

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECANICA

SISTEMA INTEGRADO DE QUALIDADE - IQS
APLICAÇÃO E ANÁLISE EM PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA A UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ENGENHARIA

GERSON TONTINI

FLORIANOPOLIS, FEVEREIRO DE 1991

SISTEMA INTEGRADO DE QUALIDADE - IQS
APLICAÇÃO E ANÁLISE EM PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO

GERSON TONTINI

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE


"MESTRE EM ENGENHARIA"

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECANICA E APROVADA EM SUA FORMA
FINAL PELO PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO

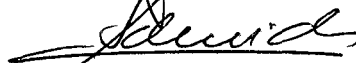
PROF. ABELARDO ALVES DE QUEIROZ, Ph. D.
Orientador

PROF. BEREND SNOEIJER, Dr. Ing.
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA



PROF. ABELARDO ALVES DE QUEIROZ, Ph. D.
Depto. de Eng. Mec. - UFSC



PROF. CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, Dr. Ing.
Depto. de Eng. Mec. - UFSC



PROF. SERGIO GARGIONI, M. Sc.
Depto. de Eng. Mec. - UFSC

A minha esposa Simone,
por seu apoio e compreensão
durante o desenvolvimento
do trabalho

AGRADECIMENTOS

Ao CNPQ, pelo financiamento de meus estudos.

Ao Prof. Abelardo Alves de Queiroz, pela orientação e apoio.

A Empresa Portobello S.A., pelo apoio recebido durante o desenvolvimento dos trabalhos práticos.

A Empresa Magnum Industrial Ltda, pela permissão para execução de experimentos em suas instalações.

Ao Prof. Sérgio Gargioni e Eng. Edgarde Alves, pela colaboração na execução dos trabalhos práticos.

Ao Prof. Samir N. Y. Gerges, pela orientação nos estudos de análise espectral.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

INDICE

	Página
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
Capítulo	
1. INTRODUÇÃO	1
A Importância da Qualidade no Brasil	
A Importância da Qualidade na Indústria	
Identificação do Problema	
Produção Contínua X Produção Discreta	
Objetivos da Dissertação	
2. REVISAO BIBLIOGRAFICA	08
Inspeção da Qualidade	
Controle Estatístico do Processo	
Controle Total da Qualidade	
Administração da Qualidade	
Sistema Integrado de Qualidade	
Aplicação das Funções de Transferência ao Controle	
de Processos Industriais	
3. SISTEMA INTEGRADO DE QUALIDADE	25
Enfoques da Qualidade	
Sistema Integrado de Qualidade - Descrição	
Funções da Qualidade	
Modelos de Estágio Simples	
Janelas de Controle de Qualidade	
Funções de Planejamento Centralizado	
4. APLICAÇÃO DA JANELA DE CONTROLE DE QUALIDADE A UM	
PROCESSO DE RETIFICA	34
Modelação	
Função de Transferência	
Janela de Controle de Qualidade	
Aplicação	
Função de Transferência	
5. FUNÇÃO DE TRANSFERENCIA	44
Regressão Linear	
Análise de Séries de Tempo	
Análise Espectral	

Sistemas de Dados Dinâmicos
Presença de Realimentação no Processo

6.	APLICAÇÃO DA JANELA DE CONTROLE DE QUALIDADE A PREENSA CERAMICA	60
	O Processo de Fabricação	
	Defeitos em Pisos Cerâmicos	
	Controle da Densidade	
	Modelo de Estágio Simples para a Prensagem	
	Janela de Controle de Qualidade	
	Determinação da Função de Transferência	
	Equação de Controle por "Feedforward"	
	Determinação da Equação de Controle	
	Variância da Variável de Saída (Controlada)	
	Aplicação da Equação de Controle por "Feedforward"	
	Equação de Controle por "Feedback"	
	Determinação da Equação de Controle	
	Variância da Variável de Saída (Controlada)	
	Aplicação da Equação de Controle por "Feedback"	
7.	CONCLUSÃO	91
	Conclusões	
	Sugestões para Trabalhos Futuros	
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	93
	APENDICE 1	96

RESUMO

A recente política de abertura do mercado interno as importações de bens e tecnologia, necessita uma rápida difusão de técnicas de gerenciamento da qualidade, levando nossa indústria à um melhor nível de qualidade e produtividade, compatível com a competição do mercado internacional.

Este trabalho apresenta um estudo e uma aplicação, para as indústrias cerâmica e metal-mecânica, do conceito de Sistema Integrado de Qualidade (IQS). A concepção de qualidade, projeto e fabricação integrados são discutidos, bem como o planejamento e controle da qualidade para curto e longo prazo.

O controle de um processo de retífica é efetuado através da aplicação dos princípios do IQS.

A análise de um sistema de fabricação de pisos cerâmicos, pelo IQS, inclui a determinação de uma função de transferência e de um algoritmo de controle. Finalmente o sistema é testado para o estágio de prensagem de pisos, através de um controle em tempo real.

ABSTRACT

The recent governmental policy toward a more open domestic market, for imports goods and technologies, needs a fast movement for difusion of quality and management techniques, to drag our industry to better profile of quality, compatible with the international market competition.

This work presents a study and application into the approach of Integrated Quality System (IQS) for ceramic and mechanical industry. The conception of integration of quality, design and manufacturing are discussed as the quality control and planning for short and long term.

A grinding process is controlled by IQS principles.

The analysis of the problem of a manufacturing system of tiles, by IQS, include the development of a control algorithm and determination of a transfer function. Finally, the system is tested for the stage of tile molding with real time control.

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - A Importância da Qualidade no Brasil

As diversas transformações Político-Econômicas que estão ocorrendo hoje, a nível mundial, estão levando a uma competição cada vez mais acirrada entre as empresas, exigindo destas produtos cada vez melhores e mais baratos.

O Brasil, até agora pouco afetado por esta competição devido à sua política protecionista, acaba de abrir suas fronteiras ao ingresso de empresas e produtos estrangeiros, o que obrigará as empresas nacionais a repensarem sua estratégia de preço, qualidade e produtividade.

A política de desenvolvimento acelerado adotada pelo Brasil a partir da década de 50 gerou também um grande endividamento, ocasionando as distorções hoje existentes, onde as importações tiveram que ser restringidas para o pagamento desta dívida. Estas restrições diminuíram a concorrência da indústria nacional com os produtos importados, fazendo com que a qualidade e a produtividade destas acabassem ficando muito abaixo dos padrões internacionais.

O Brasil desperdiça, pela baixa produtividade e qualidade, de 70 a 105 bilhões de dólares por ano, ou algo em torno de 20 a 30% do PIB [1]. Estes dados, aliados a outros (Tabela 1), confirmam a situação de atraso em que se encontra a indústria

brasileira, em termos de qualidade e produtividade. Esta situação é o resultado do modelo de desenvolvimento industrial baseado na substituição de importações e no protecionismo às indústrias instaladas no Brasil.

Tabela 1
Comparação de padrões de qualidade e produtividade [31]

Característica	Nacional	Internacional
Tempo médio para entrega de um produto	35 dias	3 dias
Média de rejeição de produtos em processo	26000/milhão	200/milhão
Rotatividade de estoques	8 vezes/ano	65 vezes/ano
Tempo médio de preparação de máquinas	85 minutos	10 minutos

Existem basicamente três maneiras de se gerenciar uma empresa, baseadas na fórmula de custo, lucro e preço, sendo assim resumidas:

$$a) \text{ CUSTO} + \text{LUCRO} = \text{PREÇO}$$

E neste estágio que encontravam-se maioria das indústrias brasileiras, que pela falta de competição simplesmente fabricavam o produto, a qualquer custo, aplicando então sua margem de lucro, determinando assim o preço final. Esta situação vem mudando rapidamente; com a abertura gradativa do Brasil ao mercado externo, as empresas estão adotando a segunda forma de gerenciamento.

b) PREÇO - CUSTO = LUCRO

Como o preço está sendo ditado pelo mercado, as empresas estão diminuindo sua margem de lucro para poderem sobreviver. Esta situação não pode continuar por muito tempo, caso contrário as empresas ficarão descapitalizadas, não tendo então condições de investir na melhoria de sua produtividade e qualidade, acabando por desaparecer.

Assim, é necessário que as empresas se lancem rapidamente na busca do terceiro modo de gerenciamento,

c) PREÇO - LUCRO = CUSTO

Neste estágio estão cerca de 10% das empresas brasileiras, que concorrem no mercado internacional. Neste caso o custo é determinado pelo preço de mercado e pelo lucro que se quer obter. Esse método de gerenciamento é conseguido através da contínua busca por maior qualidade e produtividade. Somente através da aplicação de metodologias de gerenciamento que procurem continuamente o controle e a otimização do processo de fabricação, e finalmente o controle integrado da empresa, é que as indústrias nacionais poderão sobreviver à recessão e à concorrência internacional. Com a abertura do mercado não será possível à empresa brasileira continuar no segundo modo de gerenciamento, restando então investir em tecnologia, produtividade e qualidade, de maneira a baixar os custos e preservar o lucro.

A produtividade e a qualidade estão intrinsecamente ligadas, pois somente com qualidade consegue-se produtividade, e somente com produtividade é que se consegue qualidade; qualidade no sentido amplo, que alia atendimento, desempenho e preço.

1.2 - A Importância da Qualidade na Indústria

A importância do aumento da qualidade na indústria pode ser avaliada por [17]:

1-Qualidade do produto: A qualidade do produto se reflete imediatamente no preço em que ele é cotado no mercado internacional. Assim, um aumento na qualidade ocasionaria de imediato grandes ganhos anuais pelo maior valor que atingiria.

2- Valor agregado: Um aumento na qualidade do produto é decorrência de melhor controle no processo de fabricação e/ou de melhor tecnologia de fabricação. Um melhor controle do processo de fabricação possibilitaria a produção de produtos com maior valor agregado, permitindo por exemplo, em uma mesma planta industrial que atualmente produz revestimentos cerâmicos com valor de US\$ 5,00/ m², produzir revestimentos monoporosos, com valor de mercado de pelo menos US\$ 10,00/m² [17].

3- Perdas internas: A melhoria da qualidade implica num aumento da produtividade, pela menor produção de refugos. Enquanto uma empresa cerâmica nacional consegue atingir de 70 a 75% de qualidade extra, as empresas japonesas conseguem até 95% [17]. Considerando que a diferença entre qualidade extra e a comercial é de US\$ 1,00/m², um aumento de 75% para 80% de qualidade extra significa, para uma empresa de porte médio, com 12 milhões de m²/ano, um ganho de 1,8 milhões de dólares anuais.

4- Efeito imagem: A imagem de uma empresa é grandemente afetada pela qualidade de seus produtos. Uma empresa com produtos de alta qualidade consegue melhor preço e maior mercado, devido a maior procura por seus produtos pelo mercado consumidor.

1.3 - Identificação do Problema

A qualidade, no Brasil, começa a ser encarada como elemento fundamental para aumentar a competitividade dos produtos nacionais.

Campos [11] estabelece as bases gerenciais para controle de processos através do ciclo PDCA (Plan, Do, Check, Action). Segundo ele, o controle do processo total (da empresa) é conseguido através do controle de cada processo individual. Esta metodologia (de controle de processos individuais) é a mesma utilizada no sistema integrado de qualidade [13] através das Janelas de Controle de Qualidade, utilizadas neste trabalho.

1.3.1 - Produção Contínua x Produção Discreta

O controle de processos individuais, para atingir-se o controle do processo total, já é largamente utilizado nas indústrias de produção contínua, tais como indústrias químicas, refinarias, hidroelétricas, etc. Esse controle é realizado através da medição dos característicos de qualidade importantes, em tempo real, e atuação no processo através de reguladores PID (Proporcional, Integral e Derivativo). Nos processos de fabricação discretos esse controle é dificultado por três razões principais:

a) Nas indústrias de produção discretas, (componentes discretos, tais como pisos, peças, etc), onde além de variáveis do processo, variáveis do produto também influem no resultado final, os reguladores PID não podem ser utilizados. Nesses casos, devido as próprias aleatoriedades do processo, o ajuste do mesmo através desses reguladores poderia causar um "super-ajustamento"

[12] sendo então necessário o uso de gráficos de controle estatístico de processo.

b) Muitas vezes, nos processos de fabricação discretos, e também nos contínuos, alguns característicos de qualidade, necessários ao controle do processo, não podem ser determinados em tempo real, sendo necessário então algum meio de se prever o valor futuro daquele característico. Um exemplo é o controle do diâmetro na retificação interna, onde a medição do diâmetro só é efetuada após a retificação, enquanto outra peça é usinada. Outro exemplo é a determinação da densidade aparente em seco de pisos cerâmicos, que leva aproximadamente uma hora para ser efetuado. A previsão pode então ser efetuada através de algum método estatístico, como o alisamento exponencial, análise de séries de tempo, etc.

c) Em todos os processos de fabricação industriais, além das variáveis conhecidas, que atuam de maneira determinística, existem as variáveis desconhecidas, ou desprezíveis, que em conjunto ocasionam uma variação aleatória (ruído). Além disso, muitas fontes de variação conhecidas não têm sua influência perfeitamente conhecida, sendo então difícil estabelecer uma estratégia de controle otimizada.

Essas dificuldades somente serão vencidas através do uso de uma estratégia de controle otimizada, pelo uso de ferramentas estatísticas adequadas.

O Sistema Integrado de Qualidade, através das "Janelas de Controle de Qualidade", proporciona a estratégia necessária para este fim. O elemento fundamental das Janelas de Controle de Qualidade é a Função de Transferência do processo".

A função de transferência é um modelo estatístico-mate-

mático do processo de fabricação, que correlaciona as diversas variáveis de entrada com as saídas, modelando também o ruído do processo. Através da função de transferência os 3 problemas citados acima são resolvidos, e uma estratégia de controle otimizada pode ser estabelecida para processos discretos (e também contínuos).

1.4 - Objetivos da Dissertação

O objetivo desta dissertação é estudar a aplicabilidade das "Janelas de Controle de Qualidade" no controle de processos discretos, mais especificamente nos processos de retificação de peças mecânicas e de prensagem de pisos cerâmicos.

Para atingir-se esse objetivo são estudados os princípios do IQS (Sistema Integrado de Qualidade) e métodos de aplicação das Janelas de Controle de Qualidade, como também diversos métodos para determinação de Funções de Transferência, elementos fundamentais para o uso das Janelas de Controle.

CAPITULO 2

REVISAO BIBLIOGRAFICA

No decorrer deste século várias técnicas e tendências a respeito da qualidade têm surgido e coexistido, muitas vezes de forma antagônica. Este capítulo aborda essas diversas técnicas e tendências, migrando para uma visão sistêmica e global da qualidade.

Não se pretende aqui esgotar o assunto, mas dar uma visão das principais técnicas e tendências que levaram à elaboração desta dissertação. Serão aqui abordadas a Inspeção da Qualidade, o Controle Estatístico do Processo, Controle Total da Qualidade, Gerenciamento da Qualidade, Sistema Integrado de Qualidade e Funções de Transferência.

2.1 Inspeção da Qualidade

Dodge e Romig [14] desenvolveram os planos de inspeção por amostragem visando a determinação, através de amostras representativas, da qualidade de lotes.

Os planos de inspeção por amostragem surgiram da impossibilidade de se efetuar inspeção completa (ã 100%) em itens (peças, lotes, etc) cuja inspeção é efetuada através de destruição (análise destrutiva). Apesar de terem surgido para resolver o problema da inspeção destrutiva, os planos de inspeção por amostragem logo se propagaram para todo tipo de inspeção de aceita-

ção, pela economia de tempo e custos que representam em relação a inspeção completa (à 100%). Além do mais, a inspeção à 100% não garante a ausência de itens defeituosos, devido ao desgaste do operador e instrumentos de medição. Estima-se que a inspeção completa elimine apenas de 85 a 95% dos itens defeituosos de um lote [26].

A inspeção por amostragem faz uma inferência sobre as características de uma população (lote) através de uma amostra representativa do mesmo. Desta maneira, existem riscos de se aceitar lotes ruins, ou rejeitar lotes bons, que são chamados de riscos do consumidor (β) e do produtor (α). Estes riscos variam conforme a Curva Característica de Operação do plano [26] [29], que determina seu poder de discriminação entre lotes de boa ou má qualidade.

Um fator necessário na determinação dos planos de inspeção é o NQA, ou Nível de Qualidade Aceitável, que indica o nível de peças defeituosas (fora de especificação) que é aceito em lotes de boa qualidade. O NQA é estabelecido levando-se em conta aspectos como prejuízos, causados por itens defeituosos, para o consumidor, e a capacidade do processo de produção do fornecedor. É uma decisão eminentemente política, que deve ser acertada de comum acordo entre fornecedor e consumidor. Os planos de amostragem podem ser simples, duplos ou múltiplos, dependendo do número máximo de amostras necessárias para rejeição ou aceitação de um lote, determinando o tamanho da amostra "n" e o número de aceitação "a" (número máximo de defeituosos permitido na amostra).

Atualmente existem várias normas para determinação de planos de amostragem, que levam em consideração os riscos do consumidor e produtor, o NQA e o tamanho do lote; entre eles pode-se

citar as tábuas SL e DL de Dodge e Romig, a SSS da Philips, e a norma ABC-STD-105. No Brasil, o desenvolvimento e aplicação dos planos de inspeção estão normalizados pelas normas NBR 5425 a NBR 5430.

Os planos de inspeção por amostragem, devido a facilidade de utilização, propagaram-se velozmente por todo ambiente industrial, sendo utilizado para inspeção de lotes provenientes de fornecedores ou da própria fábrica, em itens acabados ou semi-acabados. Devido à sua importância e eficiência, a inspeção é, em muitos casos, utilizada como única maneira de controle da qualidade. Muitas empresas tentam conseguir qualidade através da aplicação generalizada de planos de inspeção. A utilização da inspeção, como único meio de assegurar a qualidade, pode melhorar a qualidade das peças que chegam a uma linha de montagem, ou do produto final, mas não garantem a fabricação de itens perfeitos. Por ser um processo que apenas separa os lotes de boa qualidade daqueles de má qualidade, acaba aumentando os custos de fabricação, pelo número de inspetores necessários e pelo aumento do retrabalho.

A inspeção, como única maneira de assegurar a qualidade, é considerada um controle centrado "no produto", e deve ser abandonado, mudando-se a ênfase para um controle centrado no processo, como será visto ainda neste capítulo.

2.2 Controle Estatístico do Processo

Shewhart [32] propôs que a maneira mais econômica de se controlar a qualidade de produtos manufaturados é através do controle adequado do processo de fabricação, prevenindo a produção

de itens defeituosos.

Nenhum processo de fabricação consegue produzir sempre da mesma maneira, existe sempre uma variabilidade natural que é inerente ao mesmo. Esta variabilidade é ocasionada por influências externas (meio ambiente, matéria prima, etc) e internas (desajuste ou desgaste no equipamento, incertezas de operação e medição, etc) ao processo. São chamadas de causas naturais de variação, e somente podem ser diminuídas através de melhorias no processo.

Shewhart estabeleceu as bases para o controle do processo de fabricação através da observação de sua variabilidade natural. Se causas identificáveis de variação (esporádicas, cíclicas ou permanentes) agirem sobre o processo, a variabilidade natural terá seu comportamento alterado, podendo ser detectada e identificada através de análises estatísticas. A principal ferramenta para esse controle são as cartas de controle (fig 1), que estabelecem limites para a variabilidade natural. Pontos ou características fora destes limites são considerados anormais, significando a presença de causas identificáveis de variação (processo fora do controle).

No controle do processo através de gráficos de controle, amostras (ou sub grupos racionais) de tamanho "n" são retiradas em intervalos regulares (de peças ou de tempo), e suas estatísticas importantes plotadas no gráfico.

Os limites LSC, LIC, LM, (fig 1) são determinados pelo próprio processo quando sob controle, não sendo diretamente relacionados com os limites de tolerância estabelecidos pelo projeto. A linha média (LM) é calculada pela média das amostras passadas, e as linhas superior e inferior de controle (LSC e LIC) são esta-

belecidas a ± 3 vezes o desvio padrão da estatística utilizada no gráfico. Essa construção baseia-se na distribuição normal [10] onde a probabilidade de algum ponto cair fora dos limites de controle, devido à causas aleatórias naturais, é de apenas 0,3% (fig 2).

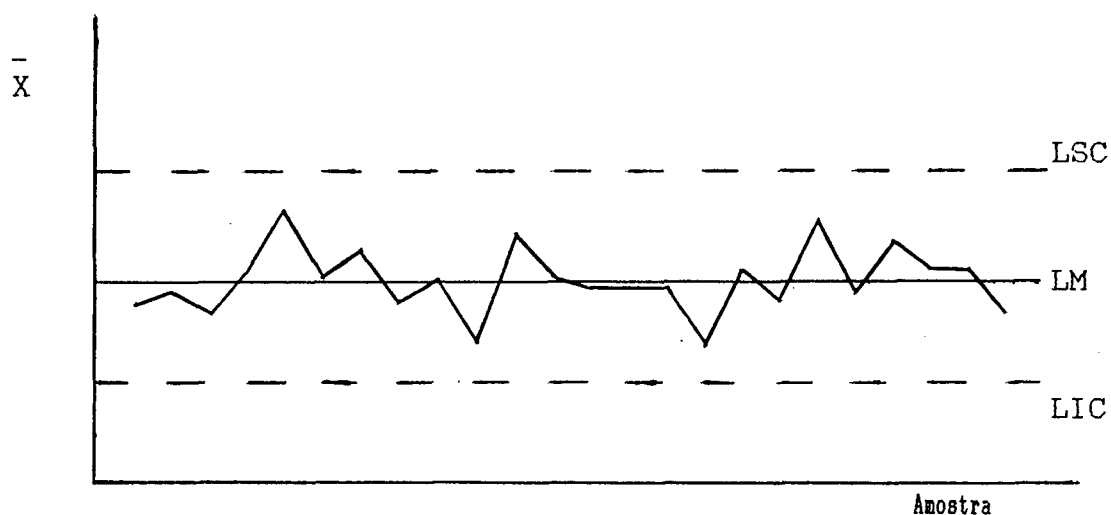


Fig. 1 - Gráfico de controle estatístico de processo

Felizmente a distribuição normal representa a grande maioria dos processos industriais sob controle estatístico, onde apenas causas aleatórias de variação estão agindo, confirmando a validade dos gráficos. Em casos onde a distribuição não é normal, transformações adequadas podem ser realizadas sobre os dados, transformando sua distribuição em distribuição normal [20].

Várias cartas, para diferentes aplicações, foram desenvolvidas, entre elas pode-se citar os gráficos \bar{X} -R (Média e Dispersão) para controle por variáveis, e ainda porcentagem de defeituosos - p, número de defeituosos - np, defeitos por unidade - u, e número de defeitos - c, para controle por atributos.

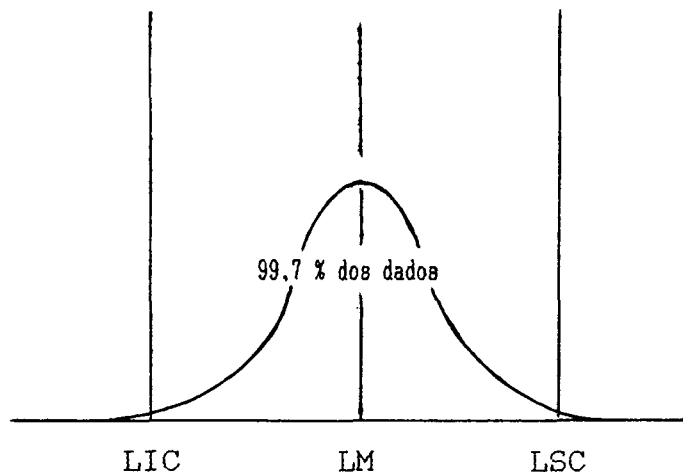


Fig. 2 - Limites de controle

Além destes, muitos outros foram desenvolvidos para aplicações específicas, tais como:

-Carta de Soma Cumulativa (CUSUM), que plota a soma dos desvios do processo em relação a um objetivo. Este gráfico de controle é particularmente bem adaptado para detectar mudanças abruptas, de $0,5\sigma_x$ a $2,0\sigma_x$, na média do processo, que permaneçam durante pelo menos cinco intervalos de amostra [20].

- Pré-Controle, baseado em amostras individuais, tem como limites de controle os próprios limites de tolerância do projeto. Controlando tanto a média como a dispersão, em um único gráfico, tem como princípio que o processo é capaz de produzir dentro das tolerâncias do projeto, é centrado e qualquer mudança na média resultaria em itens defeituosos [38].

Todos os gráficos de controle acima tem como premissas básicas a normalidade e independência dos dados (amostras). Quando a hipótese de independência é violada, como pode acontecer com

processos industriais que evoluem com o tempo, tendo alguma estrutura definida, os limites de controle não podem ser calculados como antes, invalidando os gráficos citados anteriormente. Quando isto acontece, existem técnicas que modificam os limites dos gráficos \bar{X} -R, mas são apenas para dados com baixa ordem de regressividade [6]. Outro método porém é modelar os dados da série através de um modelo ARMA(p,q) [7], utilizando os erros de previsão do modelo para avaliar a variabilidade do processo. Se o modelo ARMA estiver bem ajustado, os erros de previsão (resíduos) serão um ruído branco, isto é, serão normalmente distribuídos e não autocorrelacionados, permitindo assim o uso dos gráficos \bar{X} -R sobre eles. Outros gráficos que podem ainda ser desenvolvidos são a "verificação da autocorrelação residual" e a "soma cumulativa dos resíduos" [15].

Os gráficos de controle estatístico de processo são uma ferramenta para controle centrado "no processo", que evitam a produção de itens defeituosos através do monitoramento do processo de fabricação. Sua utilização proporciona um aprimoramento contínuo, servindo não apenas para prevenção de defeitos, mas também como um termômetro para as ações de melhoria. Uma vez que o processo tenha sido controlado, as causas de variações crônicas ou esporádicas eliminadas, e a otimização conseguida, o gráfico de controle para aquele característico deve ser abandonado, deslocando-se os esforços para outro com maior incidência de problemas.

Os gráficos de controle devem ser utilizados como uma ferramenta para controle e otimização do processo de fabricação, devendo ser apenas uma parte do esforço integrado para melhoria de qualidade, como será visto mais adiante.

2.3 Controle Total da Qualidade

Feigenbaum [16], Taguchi e WU [35], propõem a visão sistêmica do controle de qualidade, considerando todo ciclo de vida do produto. Eles advogam que as ações de engenharia devem ser realizadas visando a minimização ou eliminação de problemas durante a produção, transporte, distribuição e uso.

Taguchi diz que a qualidade de um produto deve ser medida pelas "perdas sofridas pela sociedade durante o uso do mesmo".

A perda de qualidade pode ser minimizada por um trabalho sistemático de redução de custos e melhoria da qualidade em todas as fases da vida do produto.

Para Taguchi, qualquer desvio funcional do produto, de sua especificação de projeto, impõe uma perda à sociedade, mesmo que dentro das tolerâncias. Para quantificar estas perdas ele propõe o uso da "Função Perda", mostrada na figura 3. A Função Perda pode ser calculada pela expressão:

$$L(y) = K (y-m)^2$$

onde

$L(y)$ = perda monetária sofrida pela sociedade

K = constante de proporcionalidade

m = valor nominal da característica funcional estabelecida no projeto

y = valor real da característica funcional

Assim, um sistema total de qualidade deve ser voltado para minimização dos desvios funcionais do produto, desde o projeto até o uso, minimizando as perdas impostas à sociedade.

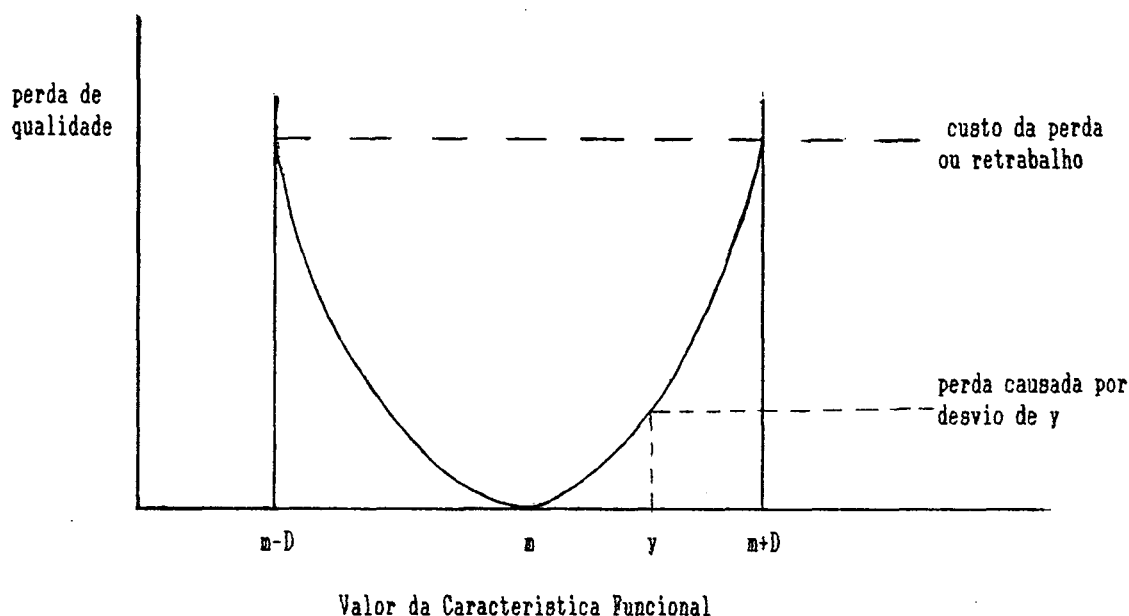


Fig. 3 - Função Perda

A função perda é utilizada no "projeto robusto" de produtos e/ou processos, através da metodologia Taguchi [22]. O "projeto robusto" baseia-se na melhoria da qualidade de um produto/processo através da diminuição da sensibilidade dos mesmos às variações normais nos materiais, componentes, processos de fabricação e ambiente. A idéia do "projeto robusto" é bastante simples, mas pode aumentar em muito a qualidade de produtos/processos. Em qualquer produto/processo de fabricação, existem muitas variáveis que devem ser controladas (chamadas fatores controlados) e outras que não podem ser controladas (chamadas fatores de ruído). Os fatores de ruído são aqueles cujo controle é impossível ou anti-econômico. Na maioria dos processos de fabricação (ou

produtos) o nível ou média da saída, e sua variabilidade, são os característicos importantes. Alguns fatores podem ser altamente correlacionados com a média, outros, com a variabilidade. O objetivo é identificar quais fatores são importantes, quais afetam a média e quais a variabilidade, encontrando o melhor conjunto de níveis para esses fatores. Determinando-se quais fatores afetam a média, mas não afetam a variabilidade, pode-se usá-los para ajustar-se a saída após a minimização da variabilidade.

Além dos desvios funcionais, causados por erros de fabricação ou influências ambientais, as perdas causadas por preço e má assistência técnica devem também ser diminuídas.

Pelo exposto acima, a qualidade deve ser encarada dentro de um contexto global, visando a minimização de perdas em todas as fases do ciclo de vida de um produto: o seu planejamento, as etapas de projeto do produto, de projeto do processo de produção, de controle do processo, desenvolvimento de mercado e embalagens, a manutenção e assistência técnica.

2.4 Administração da Qualidade

Deming [12] e Juran [21], ressaltaram a importância de uma filosofia gerencial da qualidade, advogando a ineficiência de qualquer programa para a qualidade sem a definição de diretrizes claras por parte dos altos níveis hierárquicos da empresa. De muito pouco adiantará a utilização de gráficos de controle, CCQs, engenharia da qualidade, etc, se a gerência, ou o "comandante do navio", não estiver com uma rota bem definida, com objetivos claros e estratégias estabelecidas.

Segundo Deming, "não basta que os executivos dediquem

sua vida à qualidade e à produtividade. Devem saber com que estão comprometidos, ou seja, o que devem fazer. Essas obrigações não podem ser delegadas". Com isto Deming quer dizer que ninguém consegue trabalhar eficazmente quando as orientações da alta administração mudam constantemente.

Para auxiliar a alta administração na adoção de uma política consistente para a qualidade, Deming propõe a adoção dos 14 pontos da administração, que podem ser resumidas como:

- 1- Constância de propósitos na melhoria da qualidade e produtividade;
- 2- Adotar a nova filosofia, não tolerando produção de defeituosos;
- 3- Mudar a ênfase da inspeção em massa para controle de processo;
- 4- Não comprar suprimentos apenas com base no preço;
- 5- Procurar problemas, ao invés de apenas resolvê-los;
- 6- Treinamento no trabalho;
- 7- Mudar os métodos de supervisão, dos objetivos numéricos para a qualidade;
- 8- Eliminar o medo entre os trabalhadores;
- 9- Promover uma ação integrada entre os diversos departamentos da empresa;
- 10- Eliminar a presença de metas de produtividade e qualidade sem métodos para atingí-las;
- 11- Eliminar as barreiras que impedem os funcionários de terem orgulho de seu trabalho;
- 12- Eliminar padrões de trabalho que prescrevem me-

tas numéricas;

13-Implantar um vigoroso programa de educação e re-treinamento;

14-Criar na alta administração uma estrutura que mantenha sempre em mente os 13 pontos acima.

Estes 14 pontos, uma vez seguidos, servirão de base para a aplicação de técnicas específicas de controle e melhoria da qualidade, formando um Sistema Integrado de Qualidade [13], e tratado no item seguinte.

2.5 Sistema Integrado de Qualidade

A prática e o desenvolvimento de trabalhos nas áreas de qualidade têm sido efetuados ao longo de 4 eixos ou dimensões principais, envolvendo todas as técnicas já citadas nesse capítulo. Esses 4 eixos podem ser resumidos como:

1- Controle Estatístico da Qualidade, envolvendo os planos de inspeção da qualidade (controle centrado no produto) e o controle estatístico de processo (controle centrado no processo). Enquanto o eixo do controle estatístico da qualidade se expandiu durante décadas, devido a forte ênfase dada ao controle centrado no produto (através dos planos de inspeção), funções independentes e algumas vezes contraditórias cresceram e coexistiram em um mesmo ambiente, frequentemente em detrimento do sistema como um todo.

2- Controle Total da Qualidade (TQC), surgiu da necessidade de uma visão integrativa do projeto e implementação de sistemas voltados para a qualidade. Exemplos são os trabalhos de

Feigenbaum, Taguchi e WU, citados no item 2.3.

3- Administração de Recursos Humanos, forma o terceiro eixo da qualidade. Exemplos importantes de trabalhos realizados nesta área são o Programa Zero Defeito lançado pela "Martin Company's Orlando Division", Flórida, e os Círculos de Controle da Qualidade (CCQs). Estes trabalhos tentam melhorar a qualidade através do aumento da comunicação e participação entre os empregados da empresa.

4- Filosofia Gerencial da Qualidade, através da utilização dos 14 pontos da administração, citadas no item 2.4, forma o quarto eixo da qualidade.

Os trabalhos para projeto e aumento da qualidade e da produtividade devem ser realizados levando em consideração uma visão integrada dos quatro eixos da qualidade [13]. Para que isto seja possível, algumas condições básicas essenciais devem ser satisfeitas:

- Estabelecer objetivos para qualidade, partindo dos altos níveis hierárquicos da empresa, servindo como guia para o projeto e operação do sistema como um todo.

- Ter uma visão integrativa dos quatro eixos da qualidade, citados neste capítulo, visando dar um mesmo direcionamento aos trabalhos realizados em cada eixo.

- Mudança da filosofia de contenção de defeitos baseada no produto, para a filosofia de projeto e aumento da qualidade e produtividade baseada no processo, através da identificação de problemas, diagnóstico de falhas e ações corretivas,

- Implantação de uma metodologia pela qual os itens mencionados acima se tornem uma parte integrante do sistema como um todo. A metodologia proposta por Dessouki [13], para este fim,

é o Sistema Integrado de Qualidade (IQS).

Um Sistema Integrado de Qualidade, que procure atender as necessidades citadas acima, deve adotar um conceito abrangente de qualidade, levando em conta todo o ciclo de vida do produto (projeto, produção, venda, uso e assistência técnica). Deve enfatizar o planejamento da qualidade, através do estabelecimento de objetivos e métodos, pelos altos níveis hierárquicos; e o desenvolvimento contínuo de recursos e processos através da aplicação de "Janelas de Controle de Qualidade", que focaliza a prevenção de falhas, e não a contenção de defeitos.

As Janelas de Controle de Qualidade são o elemento fundamental do IQS, sendo utilizadas para o constante controle e aperfeiçoamento do processo. O principal componente dessas Janelas é a Função de Transferência, já largamente utilizada e estudada para o controle dos processos industriais, simulações físicas, químicas e biológicas.

O Sistema Integrado de Qualidade, seus elementos e aplicações, serão estudados em detalhes no capítulo 3.

2.6 Aplicações das Funções de Transferência ao Controle de Processos Industriais

Uma Função de Transferência pode ser uma função matemática, um sistema especialista, regras de atuação, ou qualquer coisa que possa ser usada para simular o processo. As Funções de Transferência matemáticas, particularmente as empíricas, serão parte integrante deste estudo, e encontram inúmeras aplicações

práticas, entre elas a modelação de sistemas físicos, químicos, biológicos, econômicos e ambientais. Através delas um sistema pode ser simulado em várias situações diferentes, estudando-se assim seu comportamento, ou fazer previsões futuras.

A aplicação das funções de transferência na modelação e controle de processos de fabricação contínuos já é bem conhecida internacionalmente, com inúmeras aplicações práticas efetuadas no início da década de 70.

Akaike et alli [4] aplicaram métodos de regressão linear multivariados para identificar a função de transferência de um forno rotativo de fabricação de cimento. A aplicação da função de transferência no controle do processo possibilitou uma melhoria de 75% na variância do processo, quando comparado com o controle humano anterior.

Wu e Tee [36] [41], aplicaram o método de Box e Jenkins para determinar a função de transferência, e uma equação de controle otimizada, de um processo de fabricação de papel.

Wu e Phadke [40] apresentaram um procedimento para identificação de processos multivariados, aplicando-o à identificação da função de transferência de um alto forno sob operação normal. A equação determinada foi utilizada para projetar uma estratégia de controle otimizada, conseguindo redução de 36% na variância da variável controlada, quando comparada com o processo de controle normal.

A aplicação das funções de transferência ao controle "on line" de processos de fabricação discretos, mais especificamente a processos de usinagem, começou a ser largamente estudado apenas na década de 80.

Em 1983, Yang et alli [42], utilizaram modelos ARMA u-

nivariados ao controle do diâmetro interno de peças retificadas. Através da previsão dos diâmetros das peças subsequentes, o tempo de faiscamento foi sendo regulado, conseguindo-se uma diminuição de 77% na variância das peças.

Kim et alli [24], utilizaram modelos ARMA para desenvolver um sistema de controle compensatório para o erro de circularidade em retíficas externas. A principal fonte, o erro de movimento da árvore, responsável por 92% do erro de circularidade, foi modelada por um modelo ARMA (2,0). Este modelo foi utilizado para fazer a previsão do erro de circularidade, atuando sobre o rebolo através de um atuador piezoelétrico. Desta maneira, a parte determinística e aleatória do erro de movimento da árvore, e o tempo de atraso devido à inércia do sistema de controle foram compensados. Os resultados são mostrados na tabela 2.

Kim [23], utilizou a metodologia DDS na determinação de modelos auto regressivos (AR) para prever e compensar o erro de circularidade em operações de mandrilamento. A diminuição do erro foi de 55%.

Spiewak e Wu [33], Altintas [5], usaram os modelos ARMA e de função de transferência para monitorar o desgaste, e detectar quebras, de ferramentas em operações de fresamento.

Os inúmeros trabalhos publicados, e os resultados obtidos, demonstram a potencialidade de aplicações das funções de transferência empíricas, na monitoração e controle de processos industriais, onde além de variações determinísticas, ocorrem com grande intensidade variações estocásticas (aleatórias).

A aplicação dessas funções de transferência nas janelas de controle de qualidade, dentro da metodologia IQS, formam uma poderosa ferramenta para controle de qualidade e de processos in-

dustriais.

Tabela 2
Erro de circularidade das peças

Antes μm	Depois μm	Redução %
3,98	0,73	83
4,05	0,93	77
3,88	0,73	81
4,50	0,85	81
3,75	0,68	82

CAPITULO 3

SISTEMA INTEGRADO DE QUALIDADE

Neste capítulo o conceito de Sistema Integrado de Qualidade é abordado e explicado em detalhes. Os requisitos necessários a um sistema desse tipo, bem como os diversos elementos e funções que o compõem são apresentados.

3.1 - Enfoques da Qualidade

Com a competição cada vez maior pelo mercado consumidor, um novo enfoque deve ser dado à qualidade, sendo necessário a uma empresa que queira sobreviver: diferenciar seus produtos e serviços dos concorrentes; acelerar a introdução de novos produtos, diminuindo o tempo necessário para novos desenvolvimentos; controlar custos, reduzindo inventários, retrabalhos, serviços de garantia, etc; e envolver os empregados em um programa contínuo para aumento de qualidade dos produtos e serviços oferecidos pela empresa.

Esse novo enfoque deve começar com o consumidor (determinando quais as suas necessidades) e terminar com o consumidor (oferecendo um produto ou serviço que o satisfaça plenamente).

Garvin [18] lista os oito parâmetros utilizadas pelo consumidor para descrever a qualidade de um produto ou serviço (fig. 4).

- Desempenho
- Características de funcionamento
- Confiabilidade (frequência de falhas)
- Conformação (com as especificações)
- Durabilidade (vida do produto)
- Atendimento (rapidez de atendimento)
- Estética
- Percepção de qualidade (reputação da empresa)

Fig. 4 - As oito dimensões da qualidade

Para obter sucesso uma empresa não precisa satisfazer todos os oito pontos, mas precisa identificar aqueles que são mais importantes para seus consumidores.

Para conseguir um alto grau de satisfação de seus clientes, começando e terminando o processo de realização de um produto com o consumidor, a empresa deve adotar uma nova visão integrativa da qualidade, em todos os passos do processo, em todos os departamentos. Segundo Dessouki [13] a empresa deve ser um "conjunto coordenado de recursos (matéria prima, recursos humanos, etc) e processos (equipamentos e procedimentos) de forma a assegurar que o sistema (empresa) como um todo atinja os objetivos de qualidade, aliado aos requisitos de produtividade e lucratividade", formando um Sistema Integrado de Qualidade.

3.2 - Sistema Integrado de Qualidade - Descrição

Começando e terminando com o consumidor, um Sistema Integrado de Qualidade deve englobar e coordenar todas as fases do ciclo de vida do produto (fig. 5). Essas fases são normalmente efetuadas por diferentes departamentos da empresa.

Entre cada uma das fases, materiais e informações são transferidas. Manter a qualidade nestes pontos de transferência é

essencial para a qualidade de todo o sistema. Essa qualidade é garantida pelas Estruturas Analíticas, ou *Funções da Qualidade* [34].

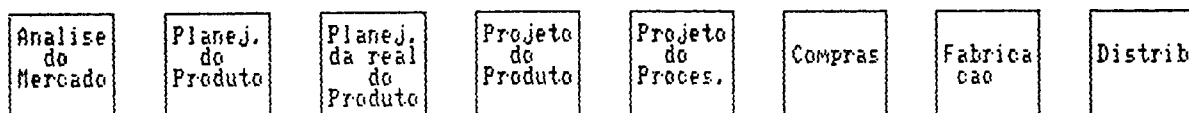


Fig. 5 - Fases da vida de um produto

3.3 - Funções da Qualidade

As Funções da Qualidade são divididas em três, que devem ser executadas para cada produto ou serviço oferecido [34] :

Planejamento para Qualidade - é uma parte integrante do planejamento de todo produto ou serviço. Planos e objetivos claros e mensuráveis para todas as fases de realização do produto devem ser desenvolvidos desde o início, dentro do processo de planejamento estratégico do produto ou serviço.

Controle e Auditoria - a execução dos planos deve ser inspecionada (auditada) e controlada, para garantir que os objetivos estão sendo alcançados em todas as fases da vida do produto. As informações e materiais que fluem entre as fases devem ser controladas.

Avaliação e Melhorias - um sistema de avaliação e melhorias é necessário para corrigir produtos e serviços que apresentem problemas; para responder a mudanças no mercado e desenvolvimentos tecnológicos; e otimizar o processo para alcançar uma

maior satisfação do consumidor e reduzir custos. Algumas atividades de "avaliação" que devem ser realizadas dentro de todo ciclo de vida incluem: visão da satisfação do consumidor; determinação dos custos com qualidade; pesquisa sobre o desempenho dos produtos quando em uso; análise dos modos de falha; sistema de informação e controle interno da qualidade, desempenhado pelas Janelas de Controle de Qualidade.

As Funções da Qualidade (Estruturas Analíticas) são mostradas na figura 6.

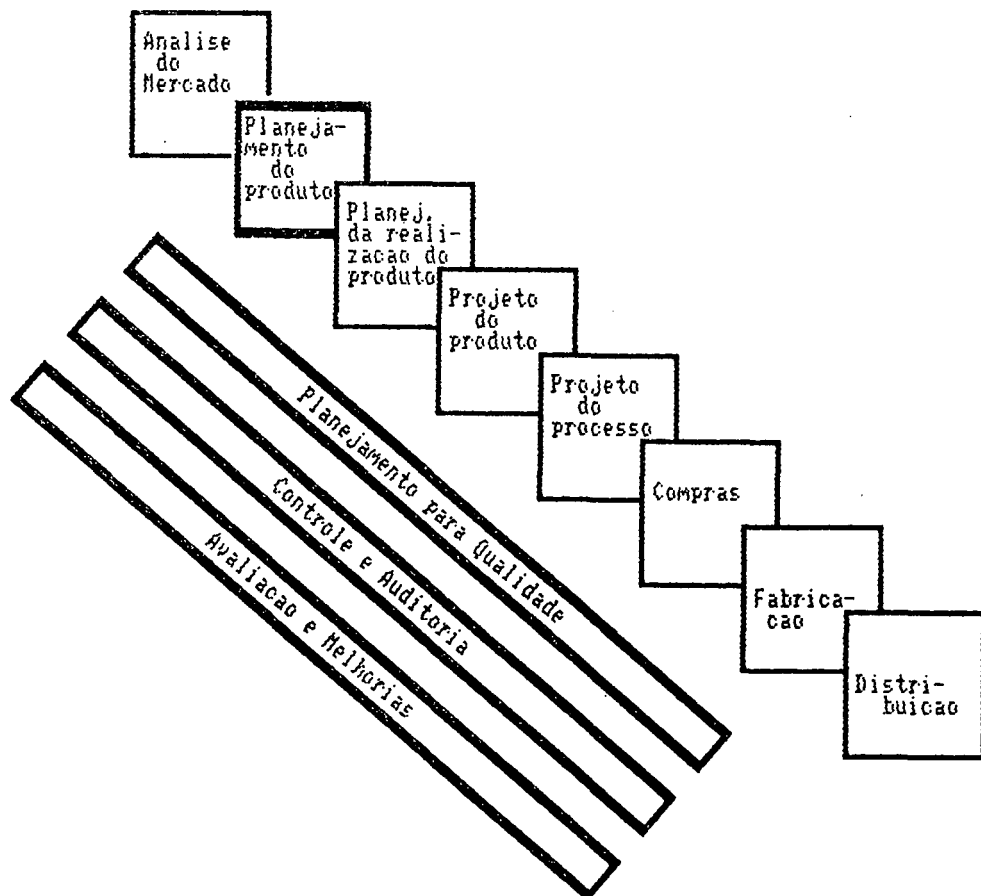


Fig. 6 - Funções de Qualidade

Assim, as Funções de Qualidade coordenam as atividades para garantia, aumento e controle da qualidade "entre" e "dentro" de cada fase do ciclo de vida do produto.

Cada fase do ciclo de vida do produto é chamado de "Bloco de Construção", podendo ser sub-dividido em blocos menores até atingir-se os chamados "Modelos de Estágio Simples" [13].

Os modelos de estágio simples são individualmente controlados pelas "Janelas de Controle de Qualidade" [13], integrantes da Função de Avaliação e Melhoria, das Funções de Qualidade [34] (fig 7).

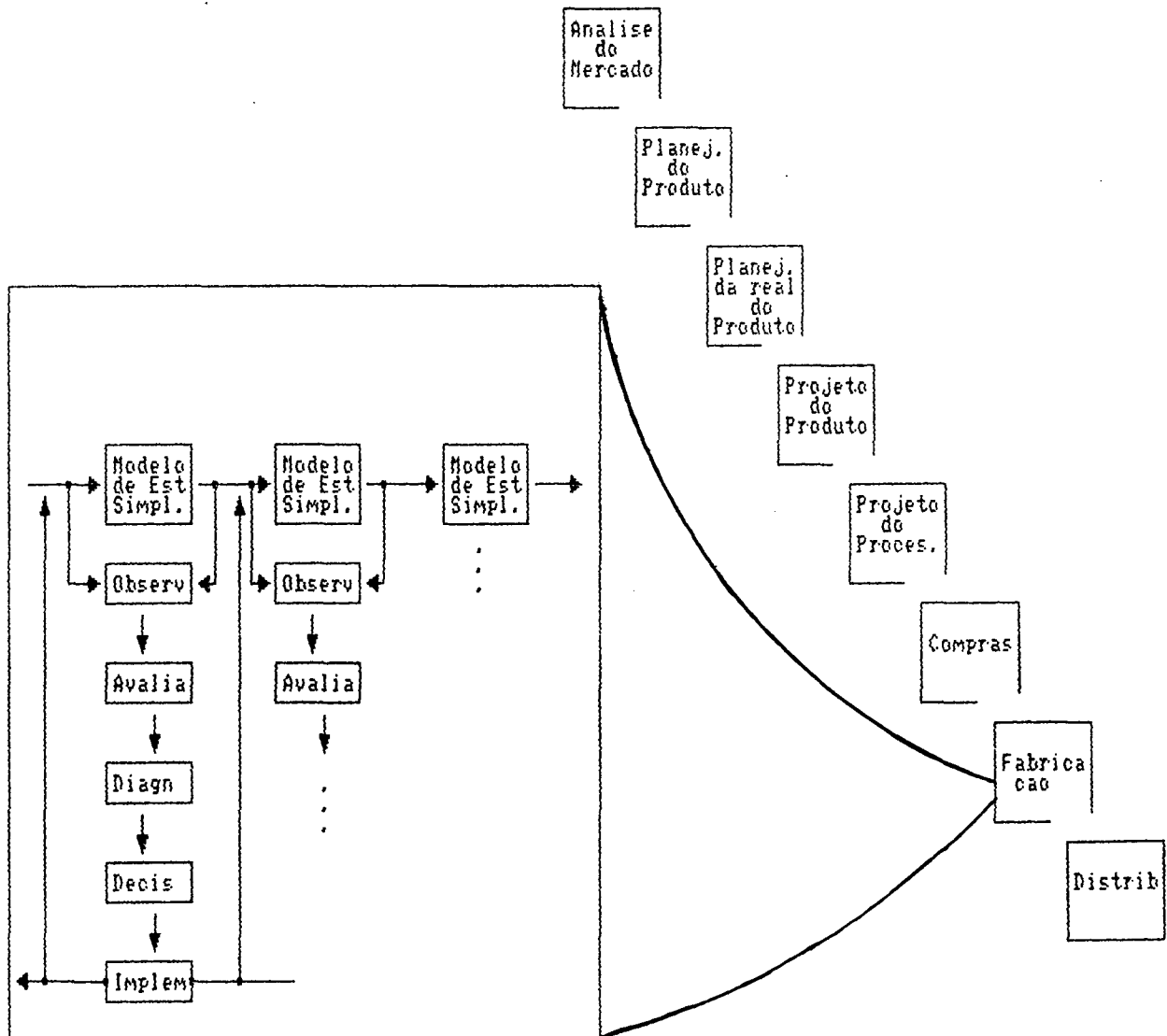


Fig. 7 - Janela de Controle de Qualidade

3.4 - Modelos de Estágio Simples

O modelo de estágio simples (Fig.8), pode ser considerado como o modelo de um processo elementar, que faz a transformação de algumas entradas (materiais, energia e informação) em saídas (produtos ou serviços), através de recursos duráveis (máquinas, recursos humanos e métodos) em um ambiente. O elemento fundamental deste modelo, quando uma análise é efetuada, é a "Função de Transferência" (F.T.), que descreve os relacionamentos e as transformações descritas anteriormente. A F.T. pode ser formada apenas por uma função matemática, por regras de transformação e sistemas especialistas, ou por uma combinação destes.

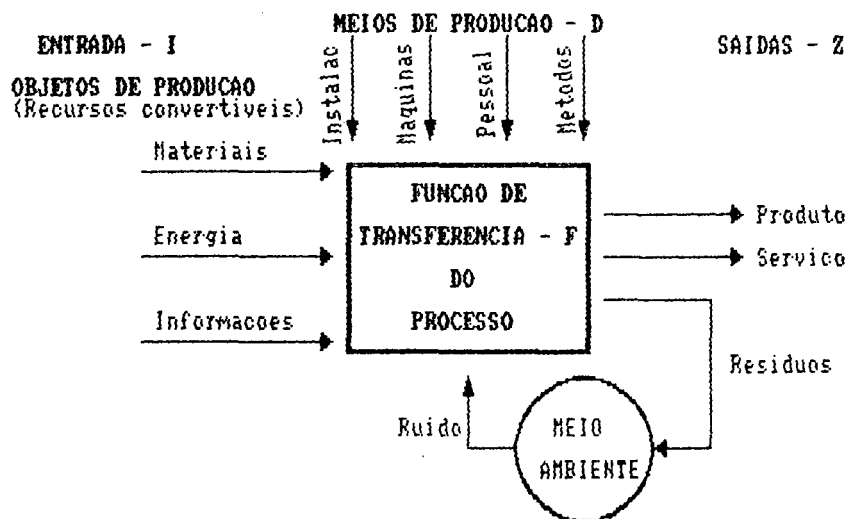


Fig. 8 - Modelo de Estágio Simples

A determinação da função de transferência é uma das mais difíceis tarefas no IQS, mas sua determinação ajuda a identificar os fatores que mais influenciam no processo, e a determinar as mudanças requeridas nesses fatores para atingir-se uma maior performance de qualidade e produtividade [13].

3.5 - Janelas de Controle de Qualidade

A Janela de Controle de Qualidade é um elemento para controle de processos formado de cinco etapas : Observação, Avaliação, Diagnóstico, Decisão e Implementação (fig. 9).

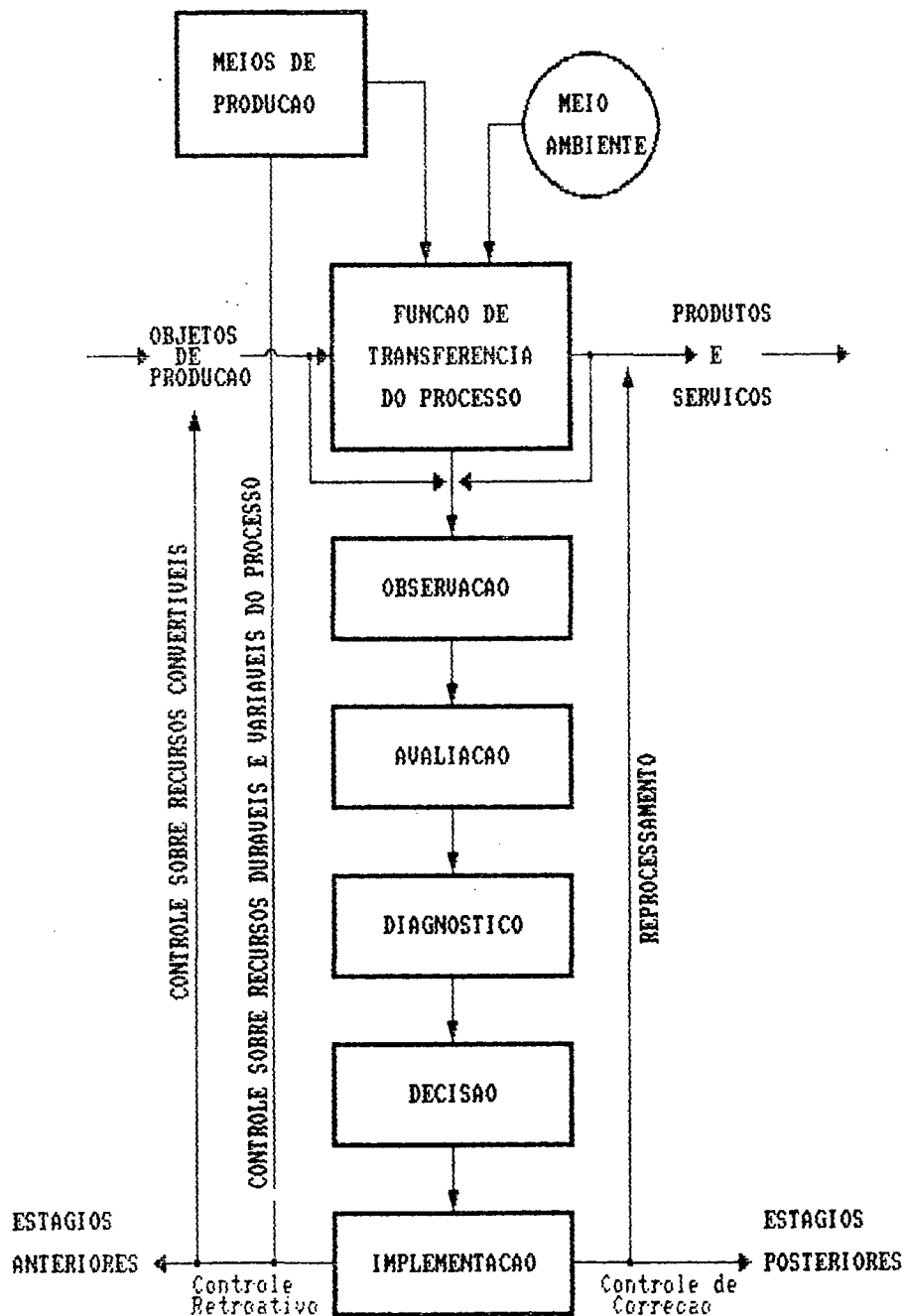


Fig. 9 - Janela de Controle de Qualidade

Através da janela de controle, o modelo de estágio simples, ou processo, é observado e ações corretivas são efetuadas neste estágio, em estágios anteriores ou posteriores. A seguir são descritas as etapas da Janela de Controle de Qualidade.

Observação: Nesta etapa as entradas e saídas do modelo de estágio simples são observadas e monitoradas continuamente, enviando dados para a etapa de avaliação.

Avaliação: Aqui os dados provenientes da etapa de observação são avaliados, procurando reconhecer se existem anomalias no processo (modelo de estágio simples). Os gráficos de controle estatístico de processo e\ou outros métodos de avaliação são aplicados.

Diagnóstico: Caso haja alguma anomalia no processo, detectada na etapa anterior, as possíveis causas de variação são identificadas. Para este diagnóstico podem ser utilizadas regras heurísticas, ferramentas estatísticas, diagramas de ISHIKAWA, registros de anomalias anteriores, etc.

Decisão: Nesta etapa as diversas maneiras de eliminação da(s) anomalia(s) são consideradas, decidindo-se sempre por aquela que diminua ao máximo a reincidência do problema.

Implementação: As maneiras para eliminação das anomalias decididas na etapa anterior, são implementadas, atuando-se no processo em questão, nos anteriores e posteriores, ou fontes de recursos duráveis.

O processo de controle reinicia novamente pela etapa de observação, fechando-se o ciclo. Assim, pelo uso contínuo das janelas de controle de qualidade, o processo vai sendo aprimorado de uma maneira sistemática e organizada, diminuindo a ocorrência de anomalias, e portanto de defeitos.

3.6 - Funções de Planejamento Centralizado

Além das Funções da Qualidade, exercidas pela gerência e pela estrutura do sistema, uma política para a qualidade deve ser definida, balizando os trabalhos da gerência e estabelecendo um planejamento estratégico de longo prazo. Além dessas funções, deve-se promover a educação e o treinamento, visando a criação de uma forte mentalidade participativa e de qualidade em todos os níveis da empresa.

Os Modelos de Estágio Simples e as Janelas de Controle de Qualidade são os elementos fundamentais do Sistema Integrado de Qualidade. Os próximos capítulos deste trabalho serão dedicados ao estudo mais aprofundado desses elementos, particularmente as Funções de Transferência.

No capítulo 4 uma Janela de Controle de Qualidade é utilizada para controlar um processo de retificação externa, exemplificando sua utilização no domínio e controle de processos de fabricação.

CAPITULO 4

APLICAÇÃO DA JANELA DE CONTROLE DE QUALIDADE A UM PROCESSO DE RETIFICA

Neste capítulo será demonstrado como uma Janela de Controle de Qualidade pode ser utilizada no entendimento e controle de um processo de retífica.

Um lote de peças para máquinas de costura (fig. 10) foi retificado externamente em uma retífica cilíndrica convencional marca/modelo Mello UNS60. A peça, por ser excêntrica, é fixada na máquina em gabarito especial, através do furo e parafusos de fixação. Esta aplicação foi possível graças a autorização da empresa Magnum Industrial Ltda, de Blumenau.

O processo de retífica foi modelado através de um Modelo de Estágio Simples e o controle efetuado pela aplicação de uma Janela de Controle de Qualidade.

4.1 - Modelação

4.1.1 - Modelo de Estágio Simples

O modelo de estágio simples é constituído pelo processo de retificação externa (fig. 11).

Como entradas tem-se: peças pré-usinadas (forma, dimensão, material, acabamento, etc), informações a respeito das peças pré-usinadas, informações a respeito da máquina e do rebolo.

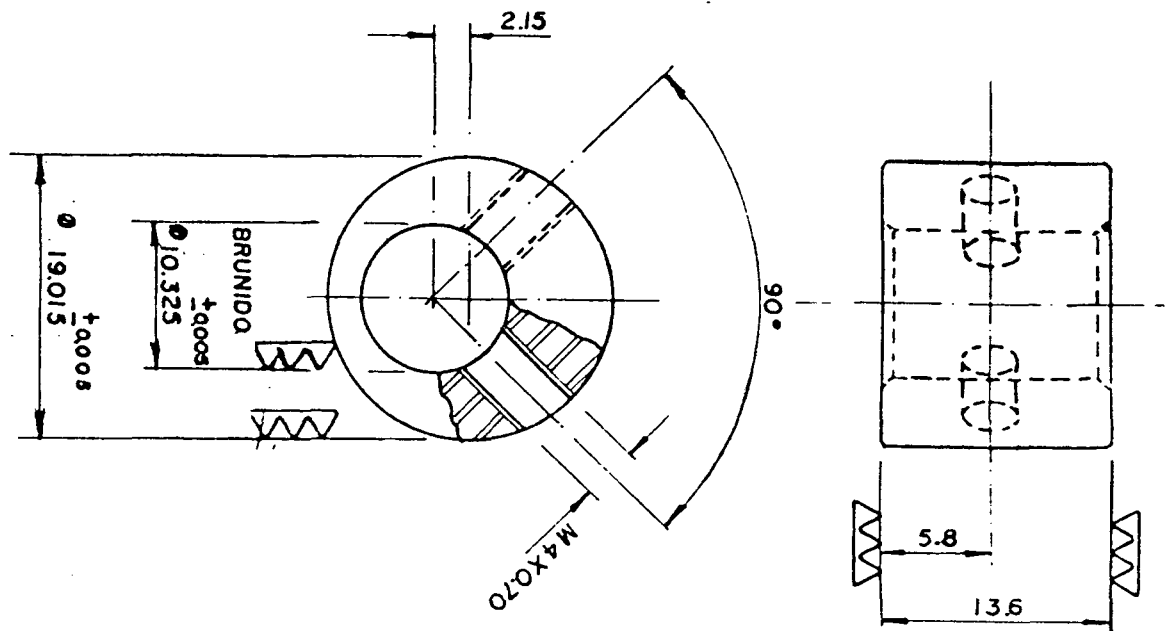


Fig. 10 - Peça exemplo

Como meios de produção tem-se : máquina de retífica, rebolo, operador, refrigerante e tecnologia de fabricação (condições de corte, tempo de corte, etc).

Como saídas tem-se: tolerância de forma e posição (dimensões finais, ovalicidade, conicidade) e tempo de fabricação total.

4.1.2 - Função de Transferência (F.T)

Neste exemplo a F.T. ainda não é disponível, mas o uso constante da janela de controle ajudará na sua identificação. A Função de Transferência será formada por regras de causa-efeito.

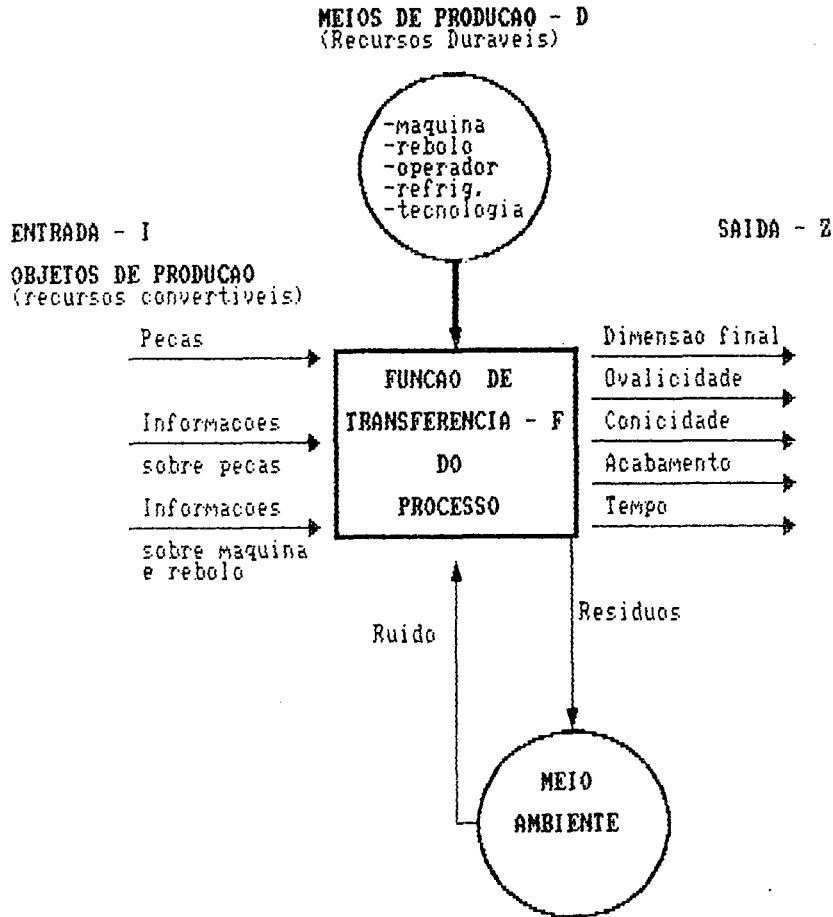


Fig. 11 - Modelo de Estágio Simples para retificação

Obs: As saídas do modelo de estágio simples são determinados pelos característicos de qualidade e produtividade importantes. As entradas são determinadas pela experiência e pela disponibilidade de dados.

Com a identificação da F.T. e do uso da janela de controle, entradas e saídas podem ser adicionadas ou subtraídas, conforme a necessidade.

4.1.3 - Janela de Controle de Qualidade

As cinco etapas da janela de controle de qualidade se-

rão adicionadas ao modelo de estágio simples formando um circuito de controle (fig. 12).

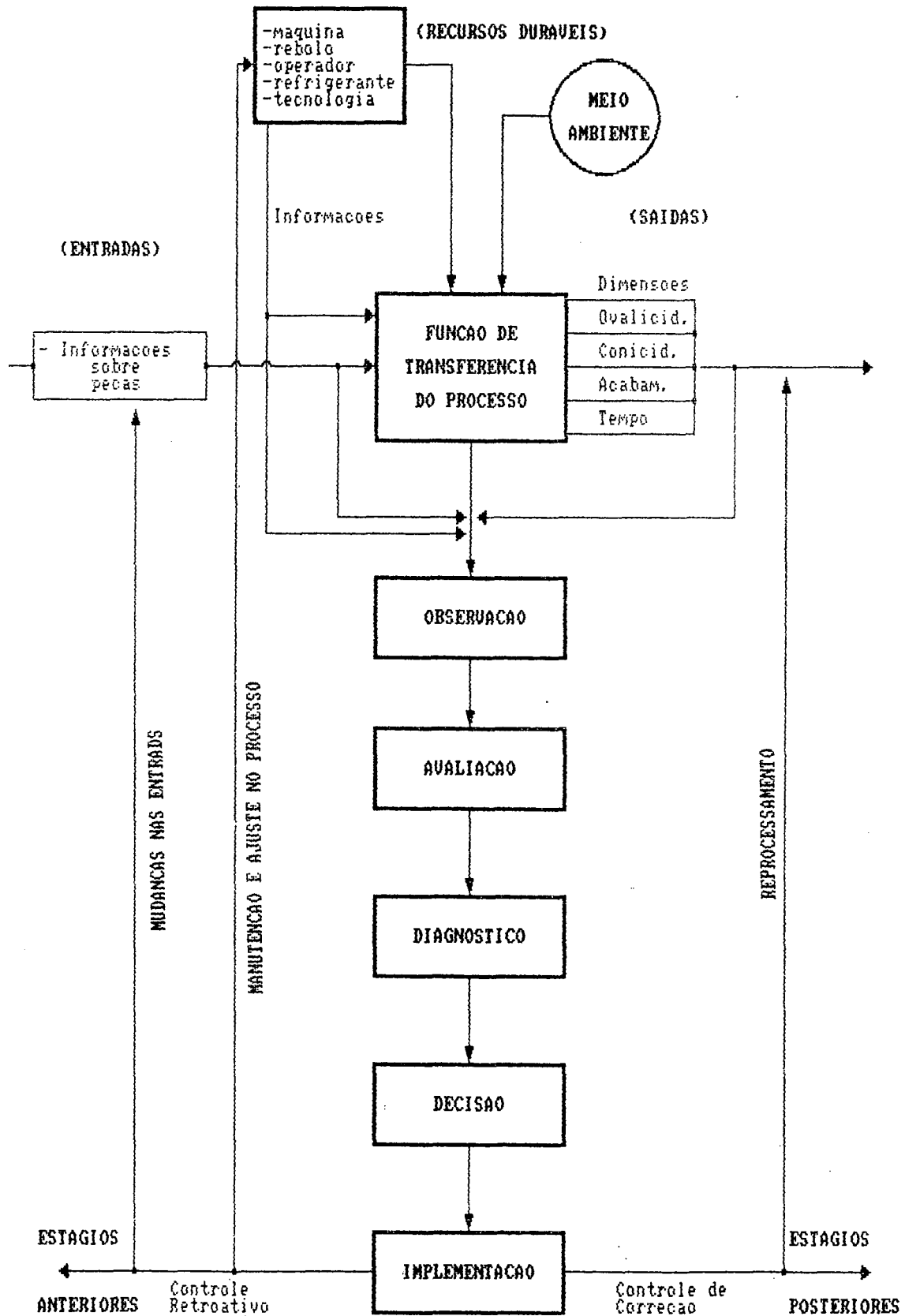


Fig. 12 - Janela de Controle de Qualidade

Na etapa de *observação* serão verificados os dados de entrada, saída e recursos duráveis, conforme figura 13.

Na etapa de *avaliação* serão utilizados gráficos de controle \bar{X} -R para cada variável de saída, como maneira de indicar se existem anomalias no processo.

Na etapa de *diagnóstico* serão utilizados inicialmente diagramas de ISHIKAWA e posteriormente as próprias relações de causa-efeito incluídas na Função de Transferência.

Na etapa de *decisão* será utilizada a mesma metodologia da etapa de diagnóstico.

As decisões serão implementadas (*implementação*), e seus resultados novamente observados.

4.2 - Aplicação

Vinte e cinco amostragens de cinco peças cada amostra foram efetuadas. O gráfico \bar{X} - R (ainda sem os limites de controle) para cada variável de saída foi estabelecido e a etapa de avaliação foi executada. Observando-se os gráficos \bar{X} -R da conicidade e rugosidade (fig. 13) verificou-se que em dado momento houve um aumento abrupto de ambos, configurando-se num aumento de nível da série (*Observação e Avaliação*). Fazendo-se uma nova análise verificou-se que este aumento da conicidade e da rugosidade coincidiram com a dressagem do rebolo. Verificadas as várias causas possíveis descobriu-se que havia folga no aparelho de dressagem. Os diferentes níveis da série eram devidas às diferentes profundidades de dressagem em cada operação (*Diagnóstico*). Definiu-se que seria necessário uma manutenção no aparelho dressador (*Decisão*). A manutenção foi executada (*Implementação*) e o ciclo

retorna ao estágio de observação.

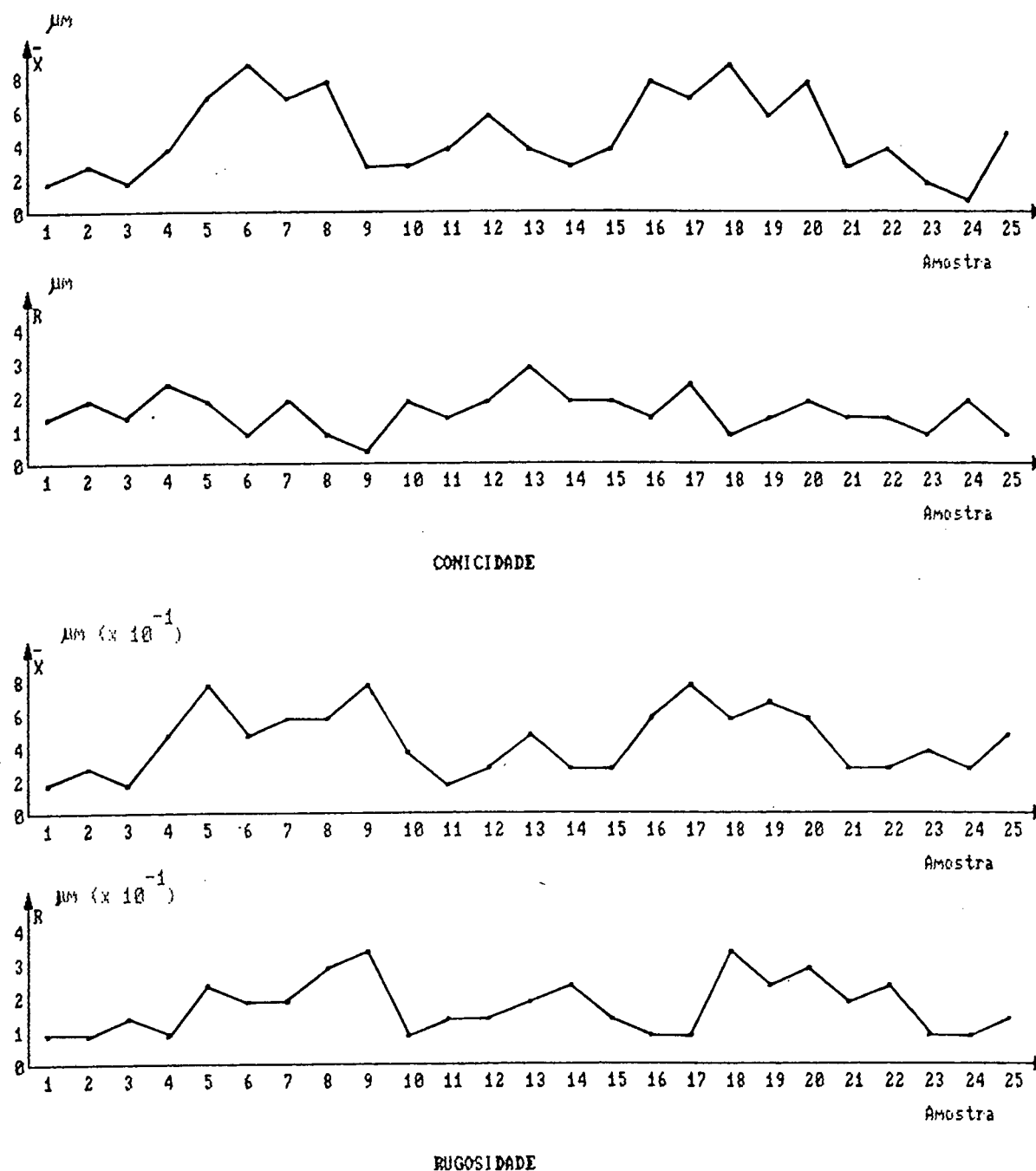


Fig. 13 - Gráficos \bar{X} -R para conicidade e rugosidade

Agora 12 amostragens de cinco peças cada amostra foram executadas (fig. 14). Observando-se os gráficos \bar{X} da rugosidade e do tempo de usinagem verificou-se a existência de picos periódicos em ambos os característicos (*Observação e Avaliação*). Estu-

dando-se as possíveis causas descobriu-se que estes picos aconteciam em média a cada 4 amostras, antes da dressagem do rebolo, sendo causadas pelo desgaste do mesmo (*Diagnóstico*). Com o fim de diminuir estes picos decidiu-se pela realização da dressagem em intervalos regulares de 3 amostragens (*Decisão*). A norma de dressagem foi então estabelecida, e a operação de dressagem efetuada a cada 3 amostras (*Implementação*).

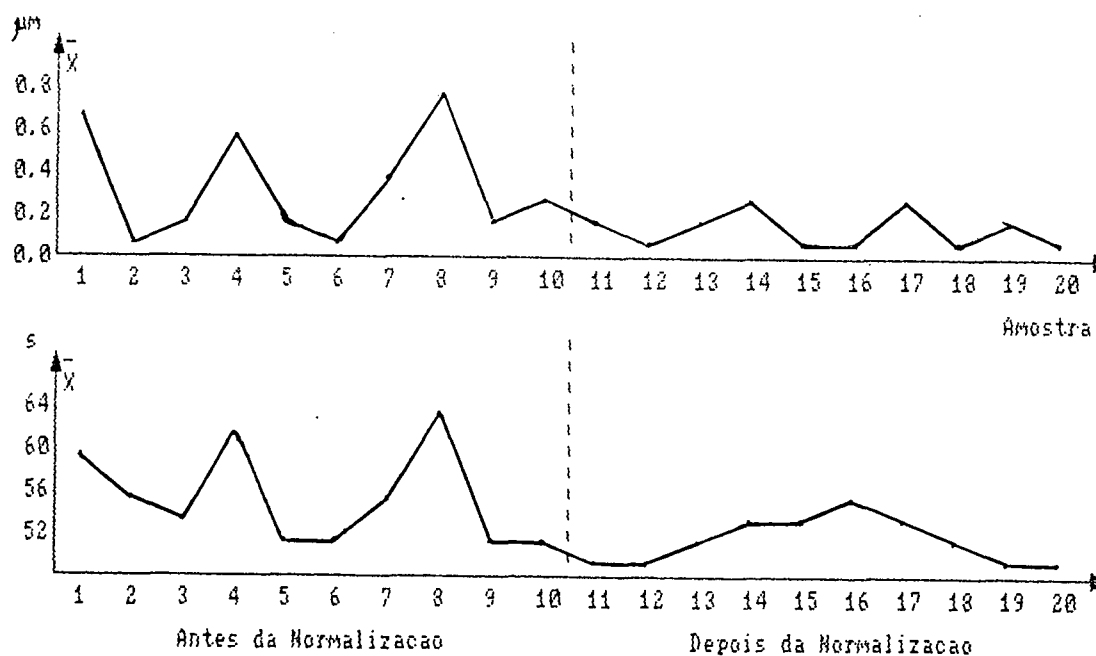


Fig. 14 - Gráficos da média para a rugosidade e tempo total de usinagem antes e depois da normalização

Continuando com o ciclo, retornou-se à etapa de observação. Através de dados provenientes do gráfico \bar{X} dos tempos de usinagem (fig. 15), verificou-se a existência de ciclos (avalia-

ção). Através de um diagrama de causa-efeito, descobriu-se que a causa desses ciclos era a variação na dureza das peças de lote para lote (*Diagnóstico*). Definiu-se então que seria necessário um melhor controle sobre o tratamento térmico, diminuindo a variação na dureza (*Decisão*). Uma rotina de controle e inspeção sobre o tratamento térmico foi então implementada (*Implementação*).

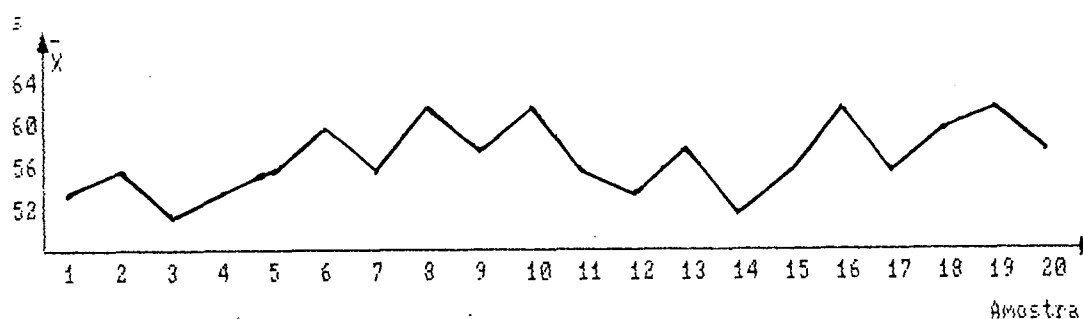


Fig. 15 - Gráfico do tempo de usinagem

4.3 - Função de Transferência

Neste exemplo a função de transferência inexistia antes da aplicação da janela de controle de qualidade. Com a aplicação continua da janela de controle, a função da transferência pôde ser determinada pelo acúmulo de conhecimentos, transformando-se em um banco de conhecimento com regras de causa e efeito.

Para se determinar a função de transferência através da janela de controle deve-se definir inicialmente a "Função Diagnóstico". Essa função é determinada pelas informações provenientes

tes das ações corretivas, e de controle, aplicadas na janela de controle. No caso do exemplo anterior, a função diagnóstico é mostrada na figura 16.

Efeito	Causa	Ação corretiva
. Conicidade elevada	. Rebolo gasto . Problema no dressador	. Manutenção no dressador
. Aumento da rugosidade	. Rebolo gasto	. Dressar rebolo
. Aumento do tempo	. Rebolo gasto . Dureza maior	. Dressar rebolo

Fig. 16 - Função Diagnóstico

Pode-se então determinar a função de transferência, definida como o inverso da função diagnóstico (fig. 17).

Entrada	Saida
. Rebolo gasto	. Conicidade aumenta . Rugosidade aumenta . Tempo aumenta
. Aparelho dressador com folga	. Conicidade pode aumentar . Rugosidade pode aumentar
. Aumento da dureza	. Maior tempo de usinagem

Fig. 17 - Função de Transferência

Assim, através do uso contínuo da janela de controle de qualidade consegue-se um constante refinamento do processo de fabricação. Ao mesmo tempo aumenta-se a capacidade de correção de

futuros problemas através da determinação das funções de diagnóstico e transferência.

Nesta aplicação a função de transferência é composta por um conjunto qualitativo de regras causa-efeito, não havendo nenhum dado que correlacione quantitativamente as entradas e saídas do processo. Para um relacionamento quantitativo, a função de transferência deve ser formada por um conjunto de funções matemáticas, que correlacionem parametricamente as diversas entradas com as saídas. Nos próximos capítulos serão abordados diversos métodos para determinação da função de transferência matemática.

CAPITULO 5

FUNÇÃO DE TRANSFERENCIA

A modelação de sistemas através da função de transferência matemática é uma ferramenta importante para seu entendimento, podendo ser usada para simulações, controle, previsões, etc. Aplicações práticas da função de transferência matemática, e sua importância no controle e simulação de processos industriais, foram apresentados no capítulo 2.

No contexto do IQS, a função de transferência é o componente fundamental dos modelos de estágio simples, podendo ser formada apenas por um conjunto de regras, sistemas especialistas, ou por uma equação matemática que correlacione os diversos fatores que influem no processo. A função de transferência matemática, dentro do IQS, é formada por uma parte determinística, que correlaciona os fatores determinísticos do processo (entradas, variáveis de processo, condições tecnológicas, etc), e uma parte estocástica/aleatória, que leva em consideração o ruído ou interferência do meio ambiente, outras causas de variação (entradas) não consideradas na parte determinística, e erros na equação (Eq. 5.1 e fig. 18).

A função de transferência matemática é representada por

$$Z = F(V, I, T) + N_t \quad (5.1)$$

onde :

- Z = Saídas do processo;
- F = Função de Transferência;
- V = Variáveis do processo;
- I = Entradas;
- T = Tempo;
- N = Ruído ou interferência devido ao ambiente.

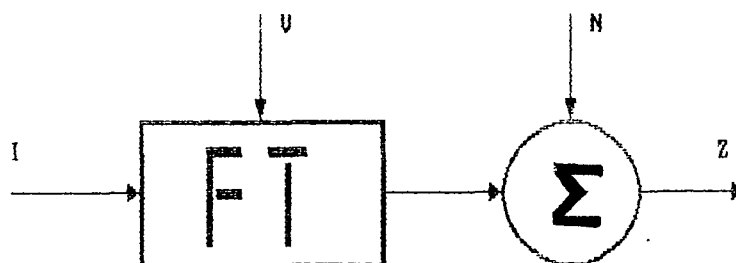


Fig. 18 - Função de Transferência Matemática

A determinação da função de transferência é fundamental para a metodologia do IQS. Uma FT matemática ajuda muito no entendimento e controle do processo, permitindo simulações e previsões de comportamento.

Existem vários métodos para se determinar a função de transferência matemática, podendo ser classificados em dois grandes grupos :

- Métodos clássicos (modelação física)
- Métodos empíricos (modelação estatística)

No primeiro caso sinais determinísticos, como rampas ou degraus, são introduzidos nas entradas do processo, e seu comportamento observado na saída. A partir daí, com uma equação diferencial modelada pelo entendimento físico do processo, os parâmetros da equação são determinados. Este método é largamente utilizado na modelação clássica de sistemas, necessitando conhecimento prévio dos mesmos.

No segundo caso, sinais aleatórios são introduzidos ou apenas monitorados. A equação é determinada através de métodos estatístico-matemáticos, dispensando conhecimento prévio profundo do sistema e suas relações. Por este método, as variáveis que mais influenciam no processo são automaticamente determinadas.

Tanto os métodos clássicos quanto os empíricos podem ser utilizados em praticamente todos os processos/sistemas existentes, pois dificilmente inexistente conhecimento prévio. Nos processos de fabricação industriais, muitas vezes, não é possível realizar-se experimentos para determinação da função de transferência. Isto acontece por motivos econômicos e/ou operacionais. Nestes casos, a aplicação de métodos estatísticos assume importância, pois não necessitam de grandes perturbações, monitorando o processo em sua operação normal.

Na tabela 3, são citadas as vantagens e desvantagens das modelações clássica e empírica.

Neste capítulo serão apresentados os seguintes métodos de modelação estatística para sistemas lineares: a Regressão Linear, Análise de Séries de Tempo, Análise Espectral e Metodologia DDS. Serão apresentadas vantagens e desvantagens de cada método, bem como uma visão de como a F.T. é determinada por cada um.

Tabela 3 - Comparação entre os métodos clássico e empírico

Método	Vantagens	Desvantagens
Clássico	a) contribui para o entendimento científico do processo/sistema b) permite extrapolação c) dá uma representação mais parsimoniosa para a função resposta que a modelação empírica	quando inexistente conhecimento, a determinação da forma da equação pode ser muito laboriosa, necessitando de grande número de experimentos
Empírico	a) determinação da equação e seus parâmetros é efetuada com pequeno número de experimentos, sem grandes perturbações no sistema b) variáveis importantes facilmente determinadas	a) não permite extrapolação b) a maioria dos modelos não relacionados fisicamente com os sistemas que descrevem

5.1 - Regressão Linear

A regressão linear pode ser utilizada tanto na modelação clássica (com entendimento físico do sistema), quando são executados experimentos com o processo; como na modelação empírica, onde não existe um conhecimento profundo do mesmo.

No caso da modelação clássica, os dados provenientes dos sinais introduzidos nas entradas dos sistemas, e de experimentos, são utilizados para estimar os parâmetros da equação diferencial pré-concebida.

No caso da modelação empírica, o modelo é considerado linear nos parâmetros e as diversas entradas são relacionadas com a saída pela equação

$$Z = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + e \quad (5.2)$$

onde

Z = saída do processo

X_1, X_2, \dots, X_k = entradas do modelo (não necessariamente do processo)

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ = parâmetros do modelo, a serem determinados

e = resíduo proveniente de erro de ajuste da equação e/ou de outras causas de variação do processo.

Os parâmetros da equação 5.2 são determinados pelo método de mínimos quadrados, que consiste em minimizar a soma do quadrado dos resíduos :

$$S = \sum_{i=1}^n (Z_i - \hat{Z}_i)^2 \quad (5.3)$$

onde

" Z_i " é a saída do processo no tempo

$$\hat{Z}_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k \text{ (valor previsto da saída)} \quad (5.4)$$

" n " é o número de dados

Para que a equação 5.2 fique bem ajustada, os resíduos " e_i " terão que ter distribuição normal $N(0, \sigma^2)$, com variância constante e não serem autocorrelacionados.

Em notação matricial, a equação 5.2 pode ser escrita como

$$Z = X\beta + e \quad (5.5)$$

onde

Z é a matriz $n \times 1$ de saída
 X é a matriz $n \times k$ das entradas
 β é a matriz $k \times 1$ dos vetores β
 e é a matriz $n \times 1$ dos resíduos

Assim, desde que nenhuma das entradas seja linearmente dependente de outras, a matriz de vetores β pode ser calculada por

$$\beta = [X'X]^{-1} X'Z \quad (5.6)$$

Se alguma das entradas do modelo for linearmente dependente de outras, a matriz X não terá inversa, sendo impossível calcular os parâmetros β desta maneira. Neste caso esta entrada deve ser eliminada.

Vantagens e Desvantagens

Vantagens:

- Rapidez de determinação;
- Facilmente expandível para múltiplas entradas.

Desvantagens:

- Captura unicamente correlações estáticas;
- Não identifica facilmente a existência de "lags" no sistema;
- Não identifica modelo para os resíduos;
- Não é recomendado para modelos onde os resíduos são séries temporais, exibindo alguma autocorrelação.

5.2 - Análise de Séries de Tempo

Um processo de fabricação real, sob controle, normalmente flutua em volta de um valor médio, com variância constante. Dados provenientes da observação deste processo, em operação normal, evoluem com o tempo de maneira estocástica/aleatória, onde os valores atuais do processo são correlacionados com os passados. Neste caso, a série de resíduos " N_t " (eq. 5.1), pode conter alguma estrutura definida, sendo autocorrelacionada.

Se a série de resíduos " N_t " for autocorrelacionada, a regressão linear não produz boas estimativas dos parâmetros da função de transferência, sendo necessário um método que leve em consideração esta correlação.

Quando existe algum atraso no sistema, isto é, quando a variação de um característico de entrada não influi imediatamente na saída, diz-se que existe um "lag" na função de transferência. A existência de "lags" na função de transferência dificulta a utilização da regressão linear, especialmente quando o tamanho destes "lags" são desconhecidos.

Box e Jenkins [7], propõem um modelo para séries temporais onde o valor atual da série pode ser estimado por uma soma ponderada de seus valores passados e de um ruído branco " a_t " (eq. 5.7).

$$y_t = \phi_0 + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + a_t + \theta_1 a_{t-1} + \dots + \theta_q a_{t-q} \quad (5.7)$$

Estes modelos são chamados de **ARMA**, para séries esta-

cionárias, e **ARIMA**, para séries não estacionárias [27]. Uma derivação destes modelos, chamados modelos **ARMAV**, pode ser utilizada para determinar uma função de transferência para modelos de uma entrada uma saída (fig. 19) da forma

$$Z_t = V_0 X_t + V_1 X_{t-1} + V_2 X_{t-2} + \dots + N_t \quad (5.8)$$

onde

Z_t = saída do sistema (processo) no tempo "t"

X_i = entrada no processo no tempo " i "

N_t = ruídos ou perturbação devido a outras causas no tempo "t"

V_1 = "Impulse response Functions"

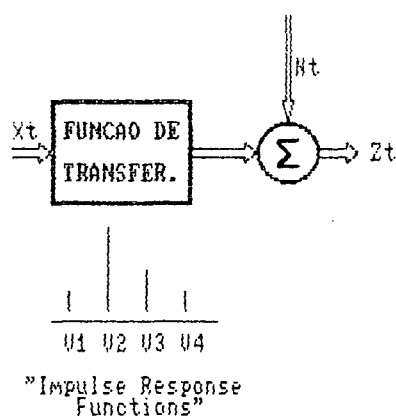


Fig. 19 - Função de Transferência

A equação 5.8 pode ser reescrita como

$$Z_t = (V_0 + V_1 B + V_2 B^2 + \dots) X_t + N_t$$

$$Z_t = V(B) X_t + N_t \quad (5.9)$$

onde "B" é o operador para o passado, definido como $B^j X_t = X_{t-j}$.

A função de transferência, na forma da equação 5.8, tem infinitos pesos, podendo ser reescrita como a divisão de dois polinômios finitos em "B", como:

$$Z_t = \frac{W_s(B) \cdot X_{t-b}}{\delta_r(B)} + N_t \quad (5.10)$$

onde $W_s(B)$ e $\delta_r(B)$ são dois polinômios em "B" de grau "s" e "r" respectivamente e, "b" é o tempo ("lag") existente entre uma variação de X e sua influência em Z.

Assim, V(B) pode ser definida como

$$V(B) = \frac{W_s(B) \cdot B^b}{\delta_r(B)} \quad (5.11)$$

A série de resíduos, "N_t", pode ser modelada por um modelo ARIMA univariado, com o modelo da equação 5.10 ficando

$$Z_t = \frac{W_s(B) \cdot X_{t-b}}{\delta_r(B)} + \frac{\theta_q(B) \cdot (1-B)^d \cdot a_t}{\phi_p(B)} \quad (5.12)$$

A determinação dos graus r,s,b,q,p, e dos pesos ou parâmetros de cada polinômio é efetuada em 3 estágios, de maneira interativa: Identificação, Estimação e Diagnóstico do modelo (fig 20).

No estágio de Identificação, a forma (graus) dos polinômios $W_s(B)$, $\delta_r(B)$, $\phi_p(B)$, $\theta_q(B)$ e b são estimadas através das

funções de autocorrelação e correlação cruzada [28].

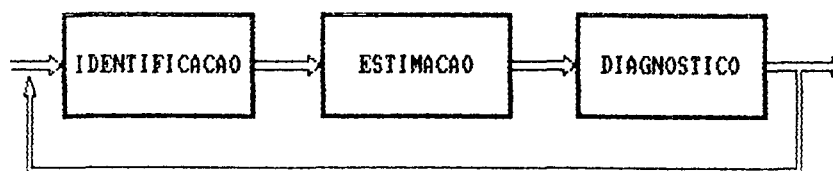


Fig. 20 - Estágios para identificação da Função de Transferência pelo método ARMA

No estágio de **Estimação**, um algoritmo de estimação não linear determina valores para os parâmetros desses polinômios [7].

No estágio de **Diagnóstico**, análises dos modelos são efetuadas através da autocorrelação residual, correlação entre resíduos e entradas, e testes estatísticos. Através destas análises, inadequações no modelo são identificadas e mudanças sugeridas, retornando ao estágio de identificação.

Estes três estágios compreendem 9 passos diferentes, que são discutidos no apêndice 1.

Um modelo para múltiplas entradas pode ser desenvolvido, identificando uma função de transferência para cada entrada, determinando-se após, o modelo para o ruído. Quanto maior o número de entradas, mais demorado e complicado o processo.

Alguns métodos para determinação de modelos de função de transferência com múltiplas entradas correlacionadas podem ser encontrados nas referências [25] e [19].

A transformada de Fourier, através da análise espectral, pode ser utilizada para determinação da função de transferência, sendo facilmente expandível para múltiplas entradas.

Este método será visto no item seguinte.

Vantagens e Desvantagens

Vantagens:

- Necessita de pequeno número de dados (aproximadamente 50);
- Determina uma função de transferência completa, inclusive com modelo para o ruído;
- Dá boas estimativas mesmo para uma baixa relação sinal/ruído;
- Identifica "lags" no sistema;

Desvantagens:

- Necessita de muita interação com o analista;
- Difícil tratamento para sistemas com múltiplas entradas correlacionadas;
- Necessita de pré-branqueamento das entradas.

5.3 - Análise Espectral

A análise espectral é largamente utilizada em análise de sinais nas áreas de vibrações e acústica. Embora esta seja amplamente utilizada nestas áreas, é pouco conhecida como ferramenta para identificar as " impulse response functions " ou função de transferência de processos de fabricação. O desenvolvimento da Transformada Rápida de Fourier (FFT) abriu um grande leque de aplicações para a análise espectral, diminuindo em muito o tempo necessário para análise, e possibilitando o uso de microcomputadores.

A utilização da análise espectral através da FFT é uma ferramenta poderosa na determinação das "Impulse Response Functions" de sistemas com múltiplas entradas correlacionadas.

O método consiste em encontrar a função de transferência espectral do sistema e, via FFT, achar a transformada inversa, encontrando as "Impulse Response Functions".

Seja um sistema com uma entrada uma saída (fig. 21):

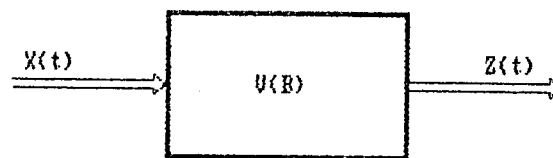


Fig. 21 - Sistema uma entrada - uma saída

onde $V(B)$ são as " Impulse Response Functions " do sistema, conforme apendice 1 e,

$$Z(t) = V(B).X(t) \quad (5.13)$$

A equação 5.13 pode ser reescrita da forma

$$Z(t) = h(t) * X(t) \quad (5.14)$$

onde "*" indica a operação de convolução, e $h(t)$ é análoga a $V(B)$, mas no domínio do contínuo.

Tomando-se a transformada de fourier de ambos os lados da equação 5.14, chega-se a

$$Z(f) = H(f).X(f) \quad (5.15)$$

onde $H(f)$ é a função de transferência espectral, $Z(f)$ e $X(f)$ são as transformadas de Fourier ou espectro de $Z(t)$ e $X(t)$.

$H(f)$ pode então ser determinada por:

$$H(f) = \frac{Z(f)}{X(f)} \quad (5.16)$$

Para evitar divisão de números complexos, a equação 5.16 pode ser reescrita como

$$H(f) = \frac{Z(f) \cdot X(f)^*}{X(f) \cdot X(f)^*} \quad (5.17)$$

onde $X(f)^*$ é o complexo conjugado de $X(f)$.

Uma vez determinada $H(f)$, $V(B)$ é achado por

$$V_n = \Delta_f \sum_{k=1}^N H(k) e^{2\pi i k n / N} \text{ para } n = 1, 2, \dots, N \quad (5.18)$$

que é a transformada inversa de $H(f)$.

Em sistemas de fabricação discretos, onde a cada elemento fabricado uma amostra é recolhida, $\Delta_f = 1$ e $N =$ número de amostras. Para detalhes sobre expansão para múltiplas entradas ver apêndice 1.

Uma vez determinada as "Impulse Response Functions", o modelo de função de transferência, da forma proposta por Box e Jenkins [7], pode ser encontrado seguindo os passos 6,7,8 e 9 do apêndice 1.

Vantagens e Desvantagens

Vantagens :

- Facilmente expandível para múltiplas entradas;
- Trata sistemas com entradas correlacionadas;

- Dispensa grande interação com o analista;
- Dispensa pré-branqueamento das entradas;
- Intervalo de amostragem facilmente detectável.

Desvantagens :

- Exige grande número de dados;
- Dá estimativas pobres para baixas relações sinal/ruído.

5.4 - Sistemas de Dados Dinâmicos (DDS)

Wu [39], apresentou uma técnica de modelação da função de transferência, que usa dados dinâmicos/operacionais provenientes de uma série temporal. A metodologia DDS desenvolve uma equação diferença/diferencial com significado físico. As constantes físicas do sistema (rigidez, massa, amortecimento, etc) podem ser determinadas mesmo para equações de alta ordem, onde a modelação clássica é de difícil aplicação, e os modelos empíricos, tais como de Box & Jenkins [7], são laboriosos e inconclusivos.

A metodologia DDS consiste no ajuste de modelos ARMA (n,n - 1) em ordem crescente, pelo uso de uma rotina de mínimos quadrados não linear. A ordem do modelo é determinada quando o ajuste de um modelo, de ordem imediatamente superior, dá uma redução estatisticamente insignificante na soma dos quadrados dos resíduos. A insignificância estatística é dada quando o valor de

$$F = \frac{(A_1 - A_0)}{S} \bigg/ \left(\frac{A_0}{N - r} \right) \quad (5.17)$$

tem nível de significância menor que 5%, quando comparado com a

distribuição $F(S, N - r)$, onde

A_0 = Soma dos quadrados dos resíduos do modelo ARMA(n,n-1)

A_1 = Soma dos quadrados dos resíduos do modelo ARMA(n+1,n)

$r = 2n + 1$

$s = 2$

N = Número de observações

Apesar do modelo ARMA(n,n-1) apresentado aqui ser parecido com o modelo ARMA(p,q), os parâmetros aqui são relacionados funcionalmente com a equação diferencial [39] :

$$\frac{dnX_t}{dt^n} + a_{n-1}\frac{dn-1X_t}{dt^{n-1}} + a_{n-2}\frac{dn-2X_t}{dt^{n-2}} + \dots + a_1\frac{dX_t}{dt} + a_0X_t =$$

$$b_m\frac{d^m a_t}{dt^m} + b_{m-1}\frac{d^{m-1} a_t}{dt^{m-1}} + \dots + b_1\frac{da_t}{dt} + a_t \quad (5.18)$$

com

$$E(a_t) = 0 \text{ e}$$

$$E[a_t a_{t-\mu}] = \delta(\mu)\sigma_a^2$$

onde a_t é ruído branco, e $\delta(\mu)$ é a função delta de Dirac.

A expansão para modelos multivariados com presença de feedback pode ser vista na referência [30].

Vantagens e Desvantagens

Vantagens :

-Permite identificação de sistemas multivariados;

-Permite identificação de modelos com feedback;

-O modelo identificado tem seus parâmetros correlacionados com sistemas físicos;

-Dispensa pré-branqueamento das entradas;

- Permite a identificação de equação/sistemas com alta ordem;
- Não necessita interação com o analista.

Desvantagens :

- Necessita de grande tempo computacional;
- Não tem recurso para determinar matematicamente o intervalo de amostragem, necessitando de um entendimento físico prévio do sistema.

5.5 - Presença de Realimentação no Processo

Na determinação da função de transferência de um processo industrial, cuidados são necessários quando existirem laços de realimentação no mesmo.

Estes laços causam erros na determinação da função da transferência, pois o ruído existente na saída será correlacionado com a entrada. Pela metodologia de Box e Jenkins, quando isto ocorrer (realimentação), o modelo identificado será o laço de realimentação, e não a função de transferência real do processo [8].

Preferivelmente estes laços devem ser desligados. Caso isto não seja possível, por razões de segurança ou economia, as referências [8], [41] e [30] ilustram maneiras de se determinar a função de transferência.

CAPITULO 6

APLICAÇÃO DA JANELA DE CONTROLE DE QUALIDADE A PRENSA CERAMICA

A modelação do processo de fabricação de pisos e azulejos cerâmicos, pelo IQS, permite a definição dos locais de instalação das janelas de controle, proporcionando assim as condições para um controle completo.

Não será aqui efetuada a modelação completa do processo de fabricação cerâmica, mas apenas sua divisão em grandes blocos, permitindo assim melhor visualização.

O processo de prensagem será modelado através de um "modelo de estágio simples", e pela determinação de sua função de transferência. O modelo determinado, e sua função de transferência, serão então utilizados em uma simulação de controle do processo de prensagem através da utilização da janela de controle de qualidade.

Os experimentos foram realizados na Empresa Portobello S.A., em Tijucas, SC.

6.1 - O Processo de Fabricação

O processo de fabricação de pisos cerâmicos por mono-queima é constituído basicamente por 4 etapas distintas, ou blocos de construção, assim definidos (fig. 22): preparação da massa; prensagem e secagem do piso; aplicação do esmalte; queima.

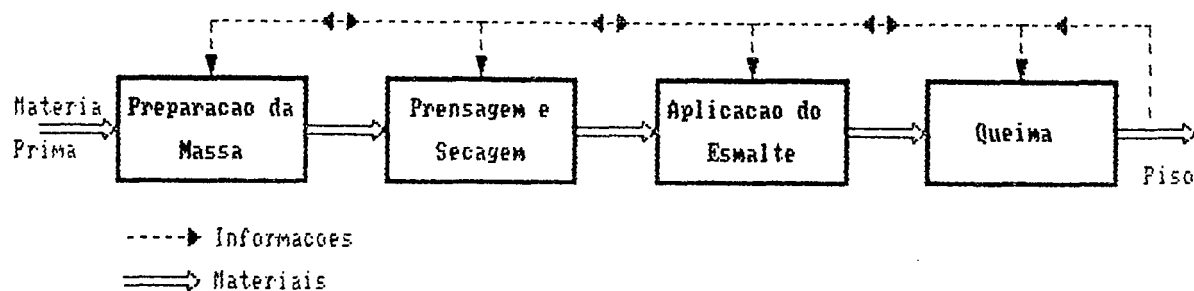


Fig. 22 - Processo de fabricação de pisos cerâmicos

a) Preparação da Massa

O bloco de "Preparação da Massa" é composto por outros quatro blocos de construção menores: mistura, preparação da barbotina (lama), atomizador e silos (fig. 23).

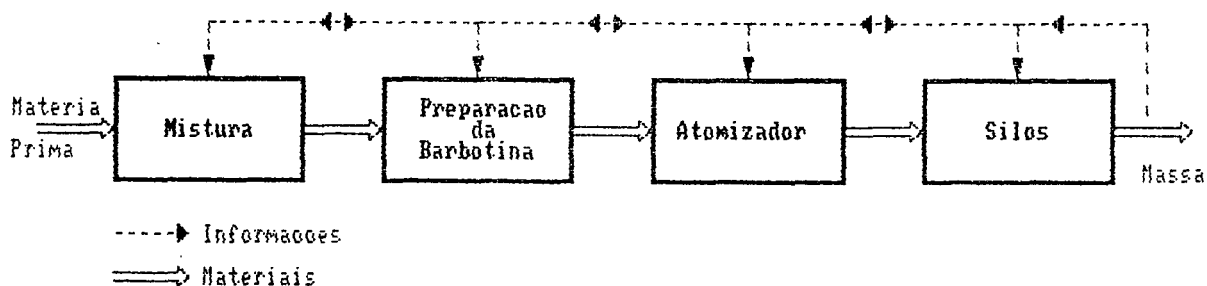


Fig. 23 - Bloco "Preparação da Massa"

O bloco "mistura", prepara a matéria prima de várias procedências, preparando a massa com a composição adequada.

O bloco "preparação da barbotina", tritura a matéria prima e prepara a lama na viscosidade adequada.

O "atomizador" prepara um pó com granulação e umidade adequadas.

Os "silos" armazenam a massa para posterior utilização, servindo como equalizador de temperatura e umidade.

b) *Secagem e Prensagem*

O bloco de "secagem e prensagem" é composta de dois outros blocos, a "prensa" e "secador" (Fig. 24).

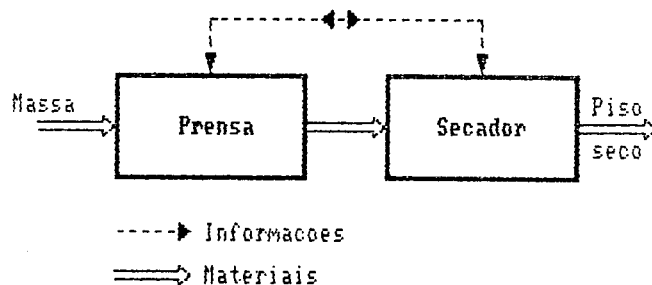


Fig. 24 - Bloco "Prensagem e Secagem"

O bloco "prensa", ou processo de prensagem, dá a forma ao piso, prensando a massa.

O bloco "secador", seca o piso, a baixa temperatura, para posterior aplicação do esmalte.

c) *Aplicação do Esmalte*

O bloco de "aplicação do esmalte", ou esmaltação, aplica o esmalte sobre o piso.

d) *Queima*

O bloco de "queima" submete o piso a altas temperaturas, dando as características finais (resistência, secagem do esmalte, etc.).

Esses blocos menores podem ainda ser sub-divididos em outros, até chegar-se aos modelos de estágio simples, que descrevem transformações básicas, utilizados para aplicação das janelas de controle de qualidade.

6.2 - Defeitos em pisos cerâmicos

Os defeitos que ocorrem nos pisos e revestimentos cerâmicos podem ser classificados em 2 grandes grupos: Funcionais e Estéticos.

No grupo de defeitos estéticos, encontram-se os defeitos provenientes da cobertura de esmalte, podendo ser ocasionados pela própria composição do esmalte ou do processo de queima.

Nos defeitos funcionais, encontram-se os defeitos mecânicos (resistência mecânica), geométricos (bitola e esquadro) e capacidade de absorção de água. Estes defeitos são influenciados por variáveis dos processos de preparação da massa, prensagem e queima.

Históricamente, os esforços tem sido direcionados ao controle dos parâmetros de queima, tentando diminuir assim os defeitos funcionais e estéticos. Acontece porém, que o processo de queima é regido por uma solução de compromisso, onde a diminuição de alguns defeitos ocasiona o aparecimento de outros.

Por sua vez os defeitos funcionais, caracterizados pela retração, absorção de água e resistência mecânica, são grandemente influenciados pela densidade do piso crú [2].

Assim, um controle otimizado da densidade do piso crú pode diminuir um dos fatores que influem no aparecimento de defeitos funcionais. Pode ainda ser utilizado para compensar eventuais modificações nos parâmetros de queima, executadas para eliminar defeitos estéticos, de forma a manter constante as características de retração, absorção e resistência mecânica.

6.3 - Controle da Densidade

A densidade do piso crú está altamente correlacionada com os parâmetros de prensagem (pressão, carregamento, etc) e da massa (umidade, granulação, composição, etc.). Assim, a densidade pode ser controlada através das variáveis de prensagem e das características da massa.

Atualmente os esforços para diminuição da variação da densidade do piso crú são direcionados para o controle da umidade e granulação da massa, através de controle do atomizador, e homogeneização, através de silos. Este controle nem sempre é eficiente [37], não possibilitando ainda, devido a grande inércia do sistema, alterar a densidade para compensar alterações na curva de queima.

Um controle eficiente da densidade aparente pode ser efetuado através dos parâmetros de prensagem, compensando assim as alterações das características da massa, e alterando a densidade (de uma maneira paramétrica) para compensar variações na curva de queima do piso.

Seguindo a metodologia IQS, um modelo de estágio simples e uma janela de controle de qualidade serão executadas no processo de prensagem.

6.4 - Modelo de Estágio Simples para o Processo de Prensagem

O modelo de estágio simples, para o processo de prensagem, deve ser construído levando em conta os principais fatores da matéria prima e do processo que influenciam na saída, neste caso, a densidade aparente média. Assim, um primeiro modelo con-

siderará como (fig. 25):

- Saída: densidade do piso, medida pela densidade aparente do piso cerâmico [3].
- Entradas : umidade e granulação da massa.
- Processo : pressão específica de prensagem, preenchimento da matriz, estado de manutenção da máquina, sujeira na estampo, etc.

A granulação da massa, para as pressões de prensagem industriais, não influi significativamente na densidade do piso [2], sendo então eliminada do modelo.

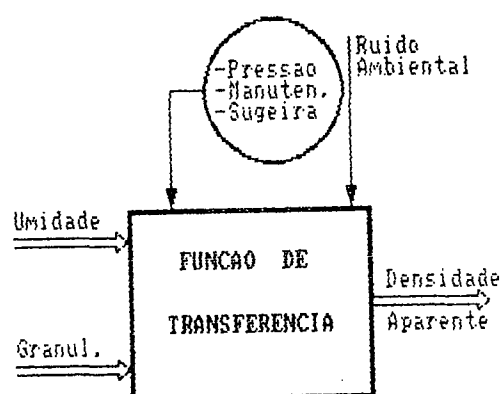


Fig. 25 - Modelo de Estágio Simples Inicial

As variáveis do processo: preenchimento da matriz, manutenção e sujeira, são de difícil ou impossível determinação numérica, sendo então incorporadas ao ruído.

Assim, o modelo de estágio simples pode ser simplifica-

do conforme a figura 26.

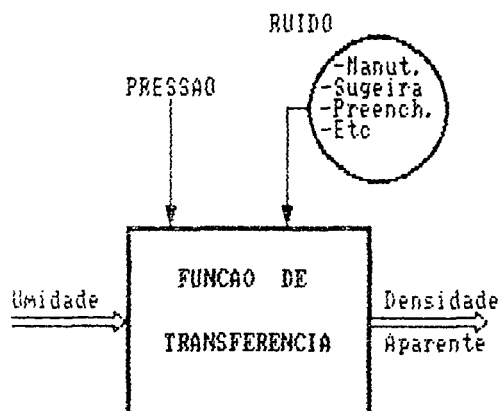


Fig. 26 - Modelo de Estágio Simples Final

6.5 - Janela de Controle de Qualidade

Determinado o modelo de estágio simples, a janela de controle de qualidade deve ser acoplada a este, para montar uma estratégia de controle completa (fig. 27).

As diversas etapas desta janela são discutidas a seguir.

Função de Transferência (F.T) - A F.T será uma equação matemática que correlacione a densidade aparente do piso seco (após secador), e as variáveis de entrada (pressão e umidade) e ruído.

A FT será linear em seus parâmetros, para utilizar-se os métodos de determinação descritos no capítulo 2.

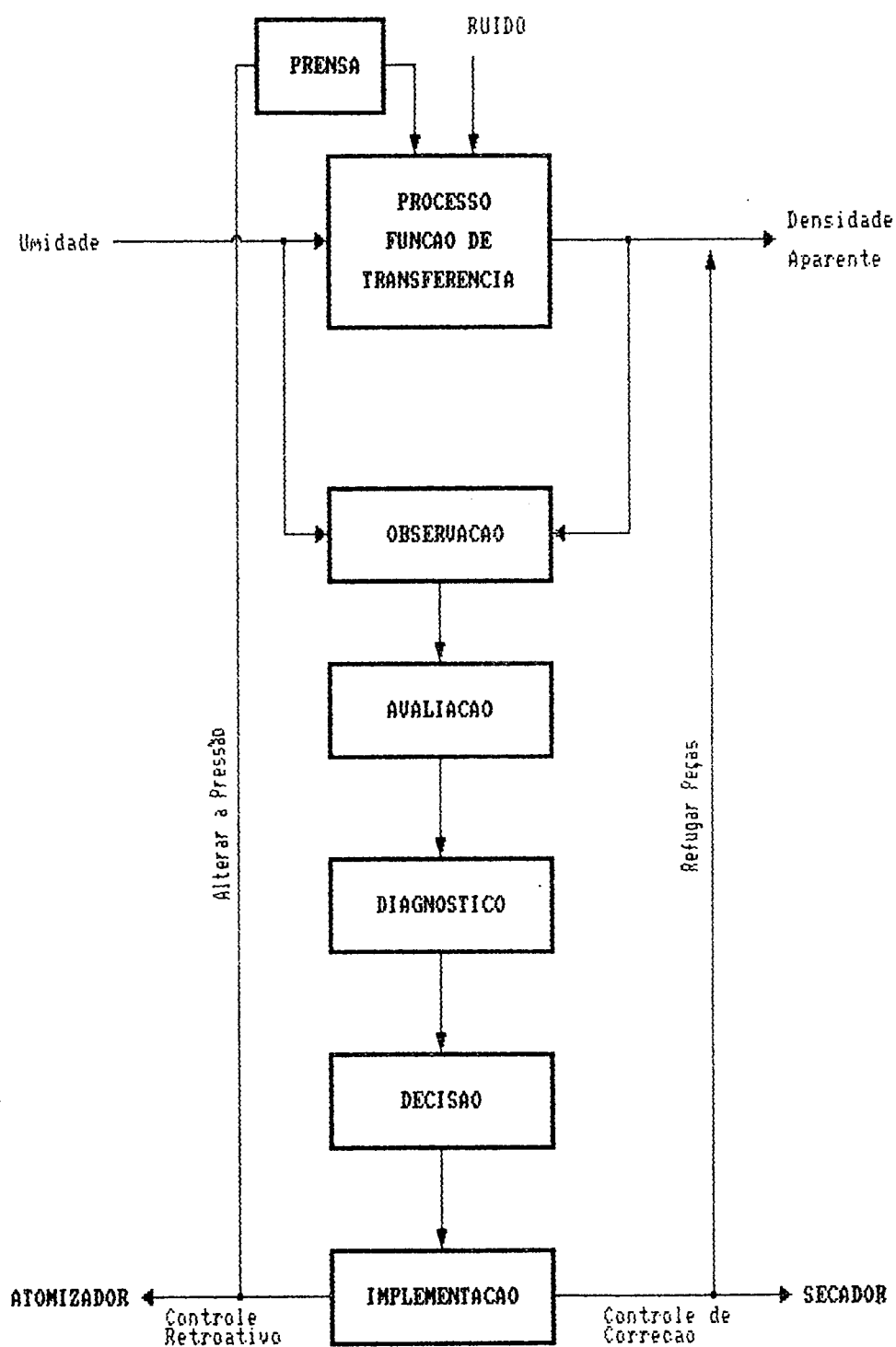


Fig. 27 - Janela de Controle de Qualidade para Prensa

Observação - Neste estágio serão observadas as variáveis de entrada (umidade da massa) e de saída (densidade aparente). Para determinação da função de transferência, e posteriormente aplicação ao controle, amostras de 100 gramas de massa serão recolhidas na entrada da prensa. No mesmo instante, serão recolhidas amostras de piso na saída. Estas amostras, seguindo procedimento já adotado na produção, serão secas em estufa a 250°C durante 1 h, determinando-se então a densidade aparente do piso seco e a umidade da massa por pesagem.

Os intervalos de observação para controle do processo serão iguais aos estabelecidos para determinação da função de transferência.

Avaliação - Admitindo-se, neste estudo, não existirem custos adicionais no controle, a toda medição da umidade (no controle por feedforward), ou densidade (no controle por "feedback"), será feito um ajuste de pressão de prensagem.

Os desvios da densidade, que ocorrerem após a aplicação do controle por "feedback" ou "feedforward", serão monitorados através de carta de controle, indicando anomalias no processo não compensados pelo ajuste da pressão.

Diagnóstico - Caso alguma anomalia seja constatada na etapa anterior, a fonte de anomalia será aqui encontrada. Havendo alguma mudança no comportamento da densidade aparente, sem a correspondente mudança na umidade, a fonte de anomalia será encontrada por diagrama causa e efeito.

Decisão - Alterações na umidade e densidade aparente serão imediatamente compensadas pela alteração da pressão, através de uma equação de controle, determinada pela função de transferência matemática do processo. Aqui, meios para eliminação das

fontes de anomalias serão encontrados (se necessário).

Implementação - Os procedimentos decididos na etapa anterior serão implementados. Avisos serão enviados aos processos posteriores e anteriores, pisos fora do padrão serão eliminados e as variáveis do processo (aqui incluídas no ruído) serão alteradas, a fim de trazer novamente o processo para o controle.

6.6 - Determinação da Função de Transferência

O processo de prensagem ocorre em bateladas, onde as características da massa são constantes. Isto acontece porque a massa para prensagem é armazenada em um pequeno silo, chamado tremonha, na entrada da prensa (fig. 28). Uma carga da tremonha dura entre 45min e 1 h, sendo o seu enchimento executado rapidamente, podendo-se assim considerar as características (umidade e granulação) constantes.

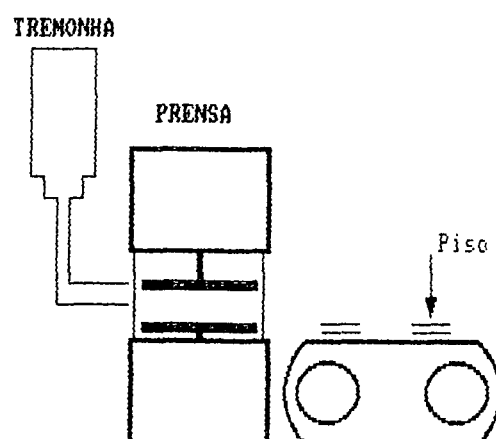


Fig. 28 - Diagrama do processo de prensagem

Os dados para determinação da função de transferência foram recolhidas durante 1 mês de operação normal de uma prensa industrial (turno diurno). Em intervalos de 1 h, amostras de pisos foram recolhidas com a pressão da prensagem variando entre 210 a 290 Kgf/cm² específica. No mesmo instante foram recolhidas, na entrada da prensa, amostras de 100 gramas de massa. As amostras de piso e massa foram secas durante 1 h, a 250 °C, para determinação da densidade aparente em seco e umidade. As condições de secagem foram estabelecidos seguindo procedimento já utilizado na produção. O método para determinação da densidade aparente pode ser visto em [3]. As séries de umidade (umid), pressão (press) e densidade aparente média (dapm), são mostradas graficamente na figura 29.

A função de transferência foi identificada e ajustada pelo método de regressão linear múltipla, com a seguinte forma:

$$Dapm = V_1 + V_2 \cdot \ln(\text{umidade}) + V_3 \ln(\text{pressão}) + a_t \quad (6.1)$$

com

$$V_1 = 0,5 \pm 0,1$$

$$V_2 = 0,13 \pm 0,01$$

$$V_3 = 0,220 \pm 0,015$$

$$\sigma_{a_t} = 0.0072$$

onde a_t é o erro de previsão da função de transferência, sendo chamada de série de resíduos, podendo ser considerado como o somatório de todas as outras causas de perturbações do sistema.

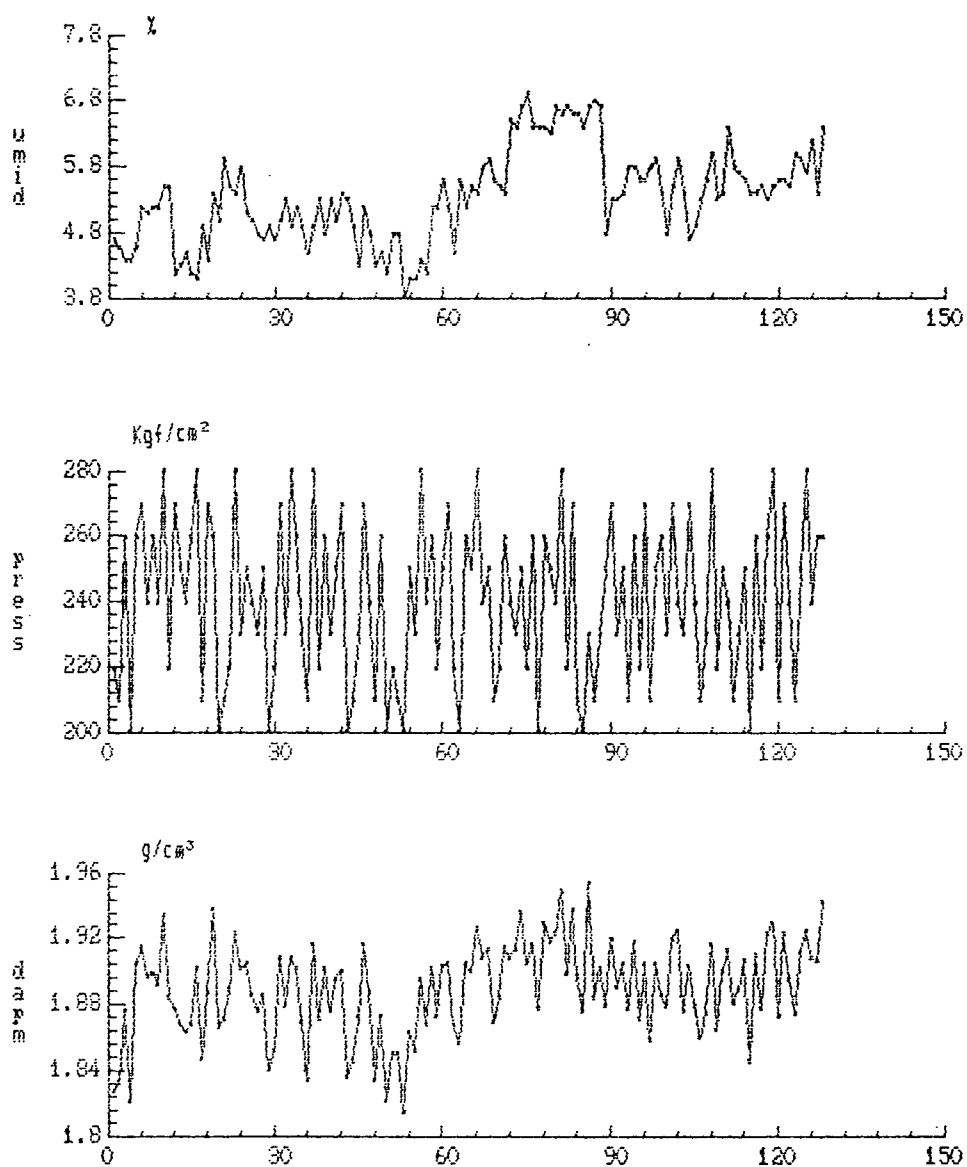


Fig. 29 - Séries da unidade, pressão e densidade aparente média

A série de resíduos tem comportamento de ruído branco, isto é, tem distribuição normal, e é não correlacionada. A figura 30 mostra a série de resíduos, sua distribuição de frequência e diagrama de autocorrelação amostral. Uma autocorrelação de ordem

K, será considerada estatisticamente insignificante ($=0$), se $r_k \leq 2/\sqrt{n}$, com "n" = número de pontos da série.

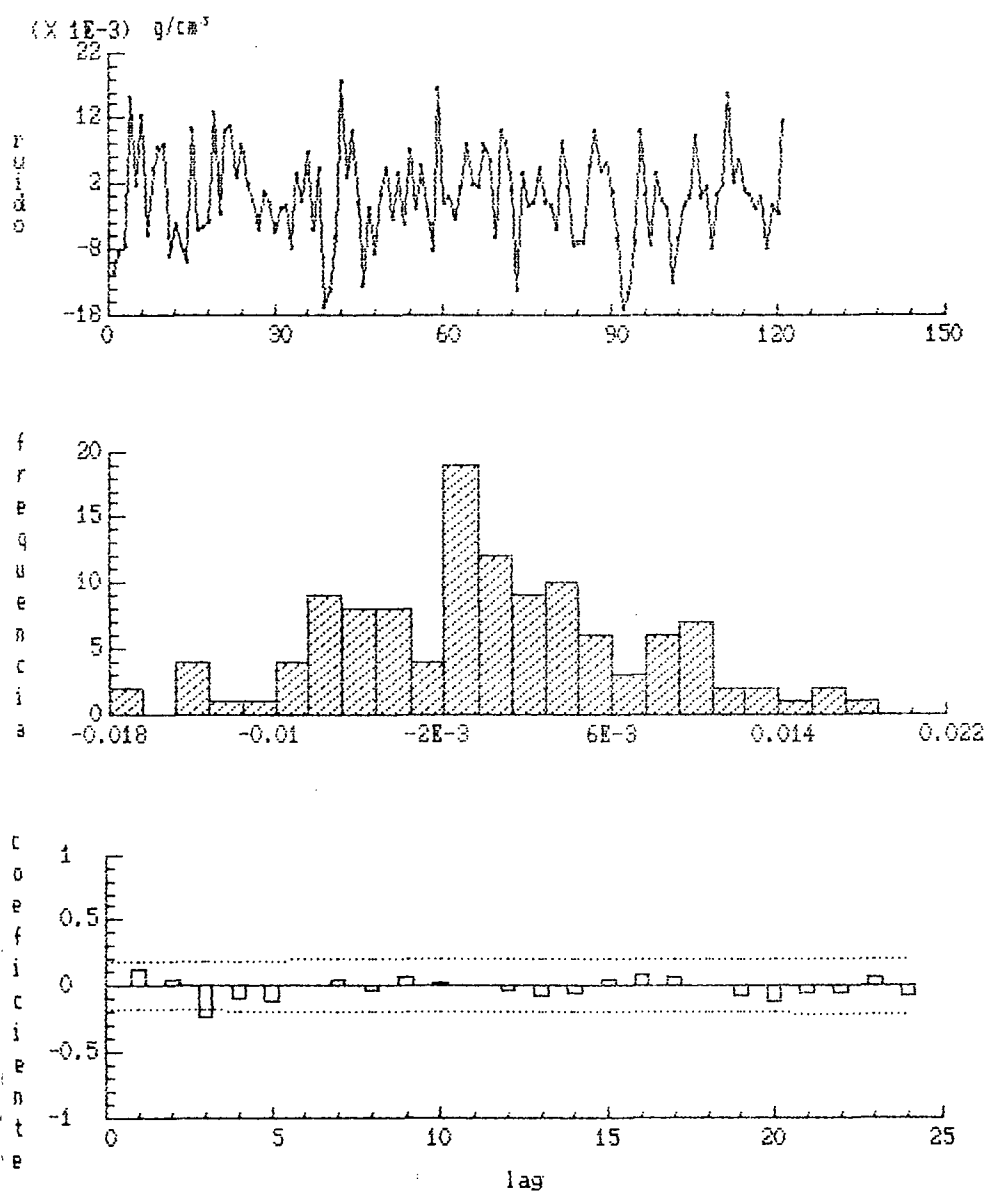


Fig. 30 - Série de resíduos, distribuição e autocorrelação amostral

No gráfico da autocorrelação amostral (fig. 30), obser-

va-se que apenas o "lag" 3 pode ser considerado estatisticamente diferente de zero [27], o que não é suficiente para indicar que os resíduos sejam correlacionados, uma vez que o cálculo foi executado sobre uma amostra.

Aplicando-se o teste de Durbin-Watson [10], verifica-se que $Q = 1,711$, confirmando o comportamento de ruído branco para os resíduos.

6.7 - Equação de Controle por "Feedforward"

6.7.1 - Determinação da Equação de Controle

No controle por "feedforward", a umidade da massa é determinada, e a pressão de prensagem é ajustada pela equação de controle, a cada nova carga da tremonha, sem monitorar-se a densidade aparente do piso na saída.

Fazendo

$$X_t = \ln(\text{pressão})_t$$

$$Z_t = \ln(\text{umidade})_t$$

Uma estratégia de controle para mínima variância [7], é conseguida quando o erro de compensação do controle é dado pelo erro de previsão " N_t ".

Como

$$N_t = D_{apm_t} - D_{âpm_t}$$

onde

(6.2)

$$D_{âpm_t} = V_1 + V_2 \cdot Z_t + V_3 \cdot X_t$$

Uma estratégia de controle ótima, visando mínima variância, fazendo-se os ajustes incrementais, é dada por:

$$D\hat{a}pmt - D\hat{a}pmt-1 = V_1 - V_1 + V_2(Z_t - Z_{t-1}) + V_3(X_t - X_{t-1})$$

$$X_t - X_{t-1} = \frac{(D\hat{a}pmt - D\hat{a}pmt-1 - V_2(Z_t - Z_{t-1}))}{V_3} \quad (6.3)$$

$D\hat{a}pmt - D\hat{a}pmt-1 = 0$, quando não são requeridas alterações na densidade do piso para compensar a curva de queima.

Assim

$$X_t - X_{t-1} = \frac{-V_2}{V_3} (Z_t - Z_{t-1}) \quad (6.4)$$

Como a umidade é feita por secagem, levando aproximadamente uma hora para sua determinação, os valores, na equação 6.4 são substituídos por suas previsões um passo a frente ($Z_{t-1}(1)$ e $Z_{t-2}(1)$), ficando

$$X_t - X_{t-1} = \frac{-V_2}{V_3} (Z_{t-1}(1) - Z_{t-2}(1)) \quad (6.5)$$

Assim a série Z_t deve ser modelada por um modelo ARMA (p,q) para obter-se as suas previsões.

A figura 31 mostra a série $W_t = Z_t - Z_{t-1}$, suas funções de autocorrelação e autocorrelação parcial, indicando um modelo MA (1) para esta série [7] :

$$W_t = (1 - \theta B)a_t \quad (6.6)$$

com

$$\theta = 0.446$$

$$\sigma^2 a_t = 6.96 \times 10^{-3}$$

A equação 6.6 pode ser reescrita como

$$Z_t - Z_{t-1} = (1 - \theta B)a_t \quad (6.7)$$

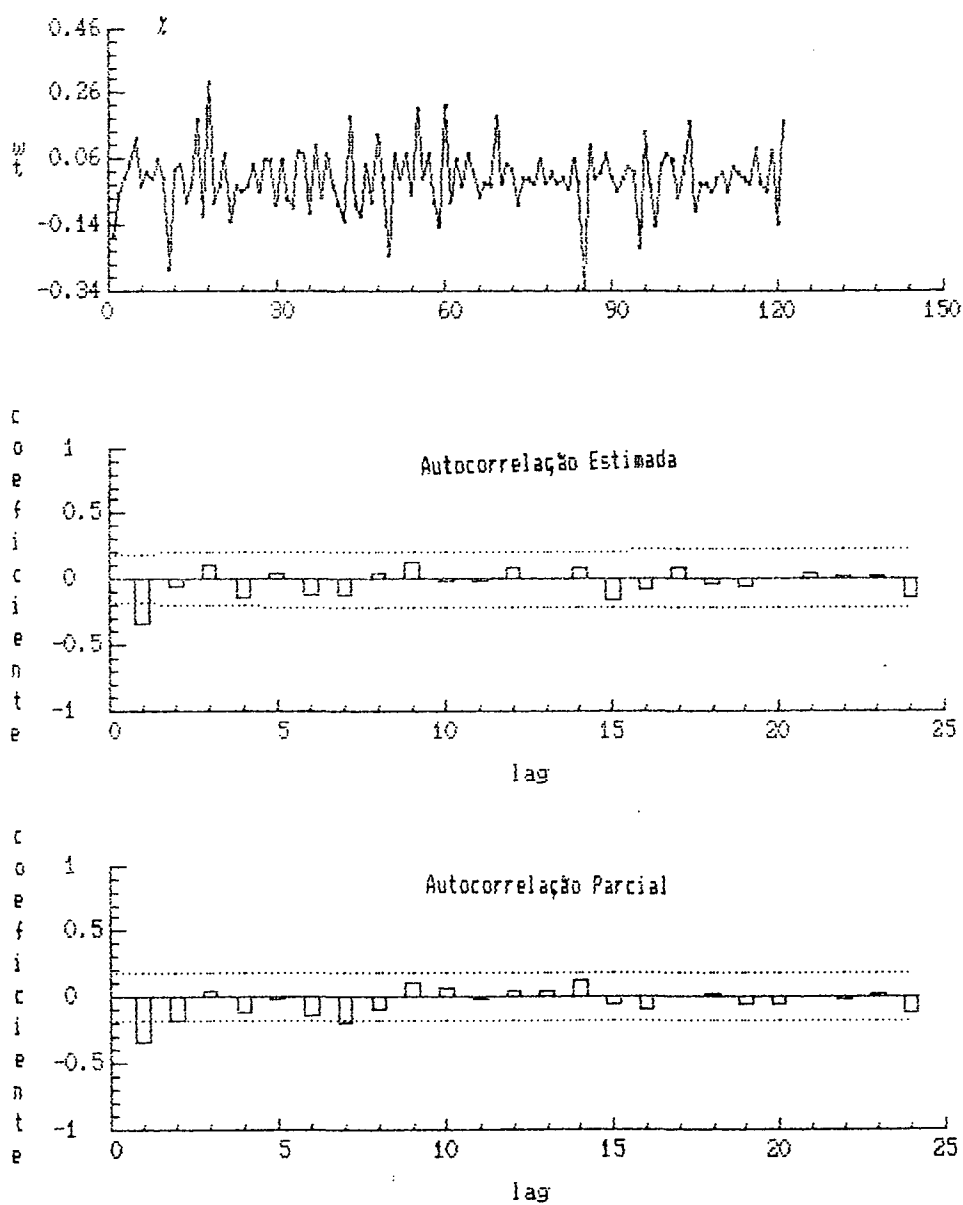


Fig. 31 - Série W_t , e suas funções de autocorrelação e autocorrelação parcial

e através de algumas operações matemáticas chega-se a:

$$(1 - \theta B)Z_t(1) = (1 - \theta)Z_t \quad (6.8)$$

substituindo-se 6.8 em 6.5 tem-se

$$X_t - X_{t-1} = \frac{-V_2(1 - \theta)}{V_3(1 - \theta B)} (Z_{t-1} - Z_{t-2}) \quad (6.9)$$

então, fazendo-se $x_t = X_t - X_{t-1}$ e $z_t = Z_t - Z_{t-1}$, chega-se a

$$x_t = \theta x_{t-1} - \frac{V_2}{V_3} (1 - \theta) z_{t-1} \quad (6.10)$$

que é a equação de controle para mínima variância da variável de saída.

O resultado numérico da equação 6.10 fica então:

$$\ln(\text{pressão})_t = 0.446 \Delta \ln(\text{pressão})_{t-1} - 0.325 \Delta \ln(\text{umidade})_{t-1} \quad (6.11)$$

com $\Delta X_t = X_t - X_{t-1}$, a pressão em Kgf/cm² (manométrica) e a umidade em %.

6.7.2 - Variância da variável de saída (controlada)

Caso a umidade da massa possa ser medida instantaneamente, a pressão será ajustada pela equação 6.4, resultando na saída apenas o ruído do sistema (outras variáveis que influenciam na densidade), que é a série "a_t" na equação 6.1. Assim, a variância da densidade após o controle seria:

$$\text{Var}(\text{DAPCTR}) = \sigma^2_a \quad (6.12)$$

onde "DAPCTR" é a densidade aparente após o controle.

Sendo a umidade medida pelo método de secagem, a pressão é ajustada pela eq. 6.10, baseada na previsão da umidade um passo a frente. Neste caso, haverá um erro, na determinação da pressão, devido ao erro de previsão da umidade.

Seja "a_{1t}" o erro de previsão da umidade no tempo "t", dado por "a_t" na equação 6.6. Sejam Z'_t, X'_t e dapctr os desvios da ln(umidade)_t, ln (pressão)_t e DAPCTR em relação aos seus valores médios, a equação 6.2 fica

$$\text{dapctr} = V_2 Z'_t + V_3 X'_t + a_t \quad (6.13)$$

mas, nesse caso, a equação de controle fica

$$X'_t = -\frac{V_2}{V_3} Z'_{t-1}(1) \quad (6.14)$$

ou

$$X'_t = -\frac{V_2}{V_3} (Z'_t - a_{1t}) \quad (6.15)$$

substituindo 6.15 em 6.13, tem-se

$$\text{dapctr} = V_2 Z'_t - V_2 Z'_t + V_2 a_{1t} + a_t$$

e

$$\text{dapctr} = V_2 a_{1t} + a_t \quad (6.16)$$

assim, a variância de "dapctr" fica

$$\text{Var}(\text{dapctr}) = V_2^2 \cdot \sigma_{a_{1t}}^2 + \sigma_{a_t}^2 \quad (6.17)$$

Sendo a série "dapctr" estatisticamente independente (não autocorrelacionada), pode-se determinar o seguinte intervalo, com 95% de confiança, para a variância [10].

$$\frac{(n-1) \text{ (Var(dapctr))}}{\chi_2^2} \leq \sigma^2 \leq \frac{(n-1) \text{ (Var(dapctr))}}{\chi_1^2} \quad (6.18)$$

onde

- "n" é o número de elementos da série de "dapctr";
- χ_2^2 é o valor para distribuição qui-quadrado com "n - 1" graus de liberdade, tal que $P(\chi_2^2 > \chi^2) = 97,5\%$;
- χ_1^2 é o valor da distribuição qui-quadrado com "n - 1" graus de liberdade, tal que $P(\chi_1^2 < \chi^2) = 2,5\%$;

No caso do controle por "feedforward" aqui desenvolvido, a esperança da densidade aparente controlada será :

$$E(\text{Var(dapctr)}) = 1,65 \times 10^{-4}$$

podendo variar, com confiança de 95%, no intervalo

$$\text{Var(dapctr)} = \{1,30 \times 10^{-4} ; 2,18 \times 10^{-4}\}$$

6.7.3 - Aplicação da Equação de Controle por "Feedforward"

Considerando que não haja nenhum custo adicional para fazer-se o controle do processo, a cada medição da umidade, será efetuado um ajuste na pressão de prensagem, visando mínima variância da densidade aparente do piso seco.

Como média do processo, objetiva-se que a densidade aparente do piso seco fique o mais próximo possível de 1,900 g/cm³. Este valor é conseguido com pressão de prensagem de 260 kgf/

cm² e umidade da massa de 5,5% (ver eq. 6.1).

Utilizando-se o método de determinação da umidade por secagem da massa, será utilizada a equação 6.10 para determinação da pressão, com

$$\ln(\text{pressão})_{t=0} = \ln(260) = 5,5606$$

$$\ln(\text{umidade})_{t=0} = \ln(5,5) = 1,7047$$

A mesma série de umidade (fig 29), utilizada para determinar a equação 6.1, é aqui utilizada pra aplicação do controle por "feedforward". Para tanto, a série de densidade aparente sem controle, (ã pressão cte = 260 kgf/ cm²) foi conseguida por

$$\text{DAPCE1} = 0,4766 + 0,1276 \ln(\text{umidade}) + 0,2175 \ln(260) + a_t$$

onde a_t é a série de ruído no sistema, mostrado na figura 30.

As séries de densidade aparente (DAPCE1) sem controle junto com a série de umidade, pressão de controle, dado pela eq. 6.11, e densidade aparente após o controle (DAPCTR), são mostrados nas figuras 32 e 33. A série de densidade aparente após o controle (DAPCTR) é conseguida aplicando-se as séries de umidade, pressão de controle (fig. 33) e ruído (fig. 30), na equação 6.1.

A tabela 4 mostra as médias (μ) e variância (σ^2) das densidades com e sem controle, mostrando uma redução de 45% na variância da densidade após a aplicação do controle por "Feedforward".

A distribuição em frequência das séries DAPCE1 e DAPCTR são mostrados na figura 34.

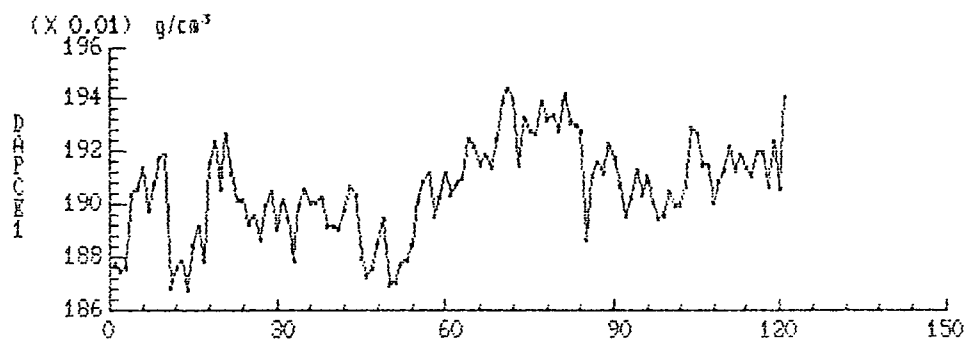
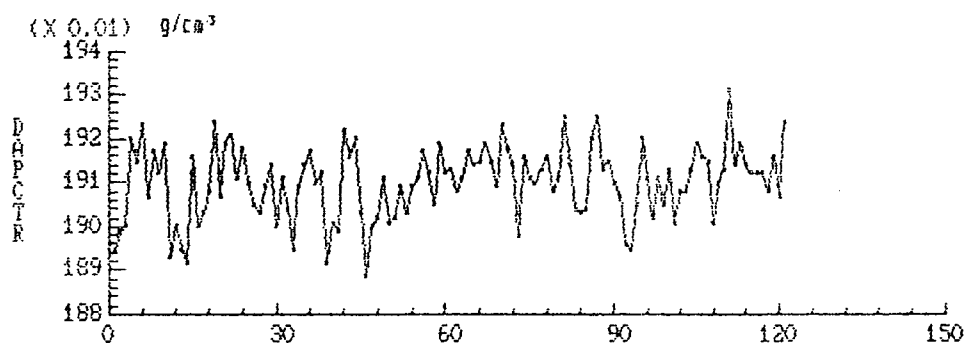


Fig. 32 - Séries de densidade aparente com e sem controle

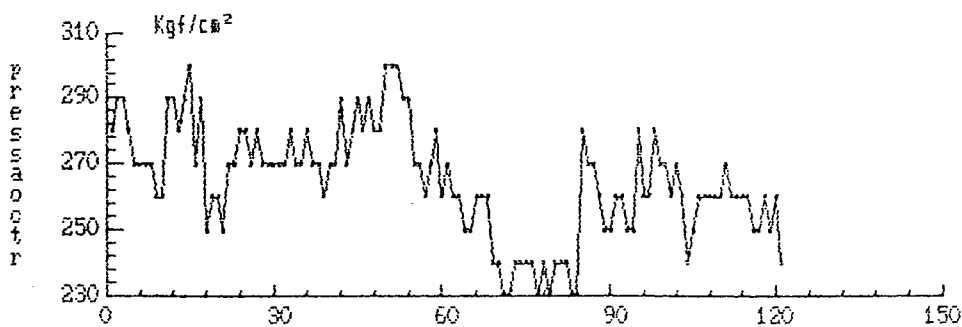
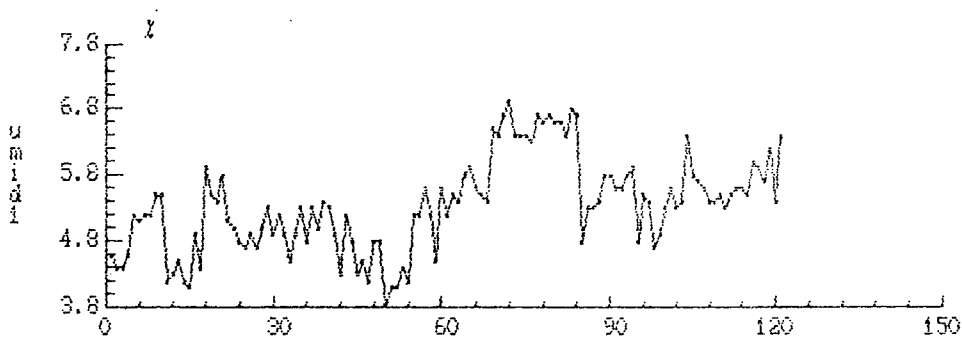


Fig. 33 - Séries da unidade e pressão de controle

Tabela 4 - Resultados da aplicação do controle por "Feedfowrd"

	SEM CONTROLE	COM CONTROLE
μ (g/cm ³)	1,906	1,903
σ^2 (g/cm ³) ²	3,18 X 10 ⁻⁴	1,76 X 10 ⁻⁴
redução na variância	45 %	

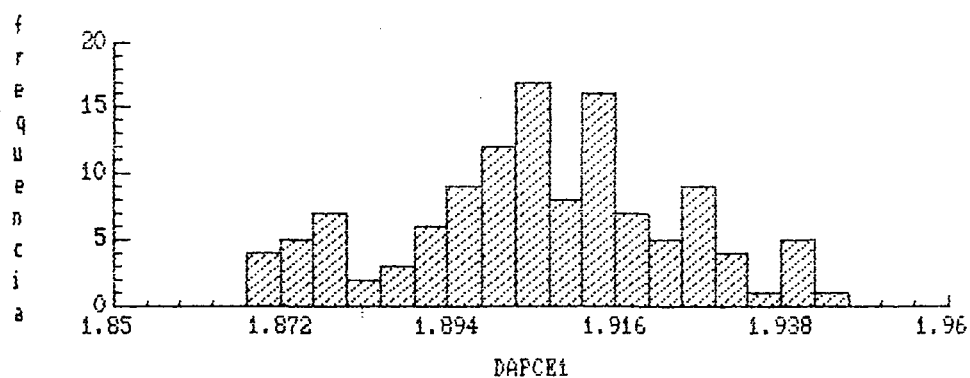
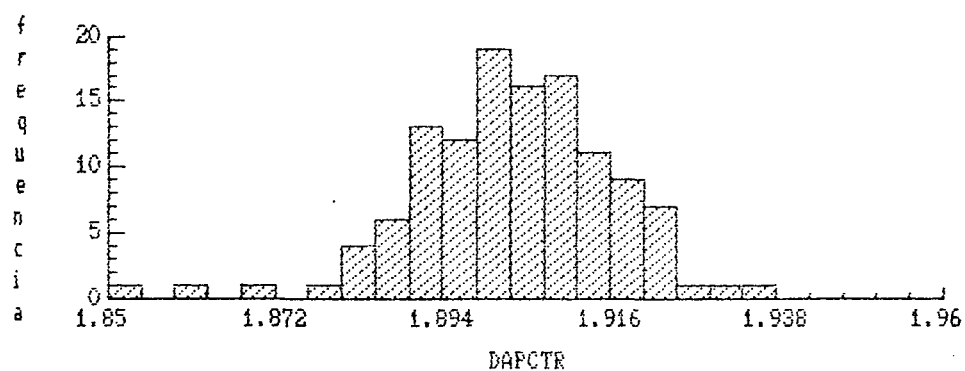


Fig. 34 - Distribuição de frequências das séries
de densidade aparente com e sem controle

6.8 - Equação de Controle por "Feedback"

6.8.1 - Determinação da Equação de Controle

O controle por "Feedback" pode ser executado através de observações da densidade aparente do piso seco, alterando-se então a pressão. Neste caso, o processo pode ser modelado conforme a figura 35 onde as variações devido a umidade estão contidas na série de resíduos " N_t ".

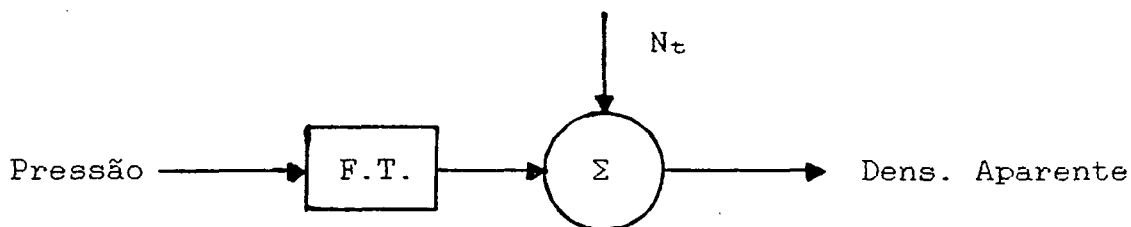


Fig. 36 - Modelo de Estágio Simples para controle por "feedback"

A função de transferência "F.T" na figura 36 é conhecida, da eq. 6.1:

$$\beta \cdot \Delta \ln(\text{pressão})_t = \Delta \text{Dapm1}_t \quad (6.19)$$

onde

$$\Delta \text{Dapm1}_t = \text{Dapm1}_t - \text{Dapm1}_{t-1}$$

$$\beta = 0.22$$

A influência do ruído (outras fontes de variação) " N_t " na densidade do piso é dado por

$$\Delta \text{Dapm2}_t = \Delta N_t \quad (6.20)$$

Assim, a variação de densidade do piso na saída do processo da figura 35 é dada por

$$\Delta D_{apm_t} = \Delta D_{apm1_t} + \Delta D_{apm2_t}$$

ou

$$\Delta D_{apm_t} = \beta \Delta \ln(\text{pressão})_t + \Delta N_t \quad (6.21)$$

No controle por "Feedback" deseja-se que a densidade do piso tenha a menor varância possível. Então, a pressão de prensagem deve ser variada de tal forma que $\Delta D_{apm_t} = 0$.

Assim, a equação de controle por "feedback" fica

$$\beta \Delta \ln(\text{pressão})_t = - \Delta N_t \quad (6.22)$$

A figura 36 mostra uma série de 121 valores de densidade aparente do piso seco sem controle, à pressão constante de 260 kgf/cm².

Neste caso a eq. 6.21 fica

$$\Delta D_{apm_t} = \Delta N_t \quad (6.23)$$

A série D_{apm_t} , sua função de autocorrelação e autocorrelação parcial são mostrados na figura 37.

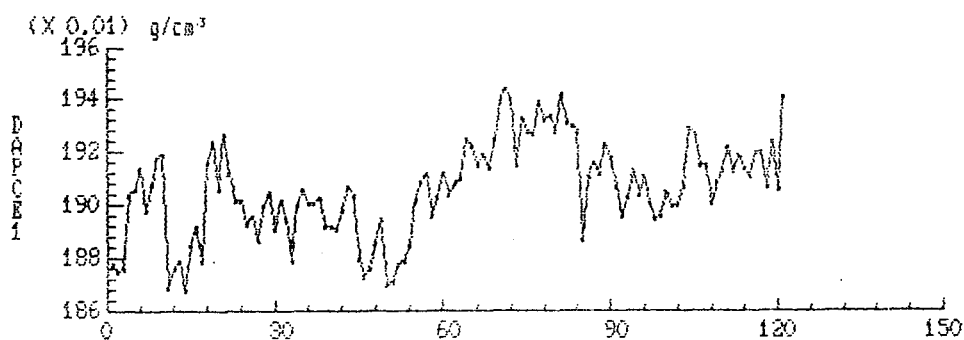


Fig. 36 - Densidade aparente sem controle

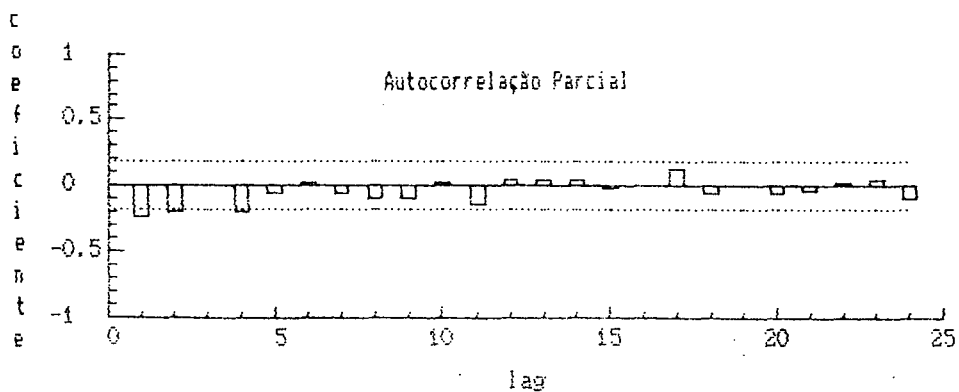
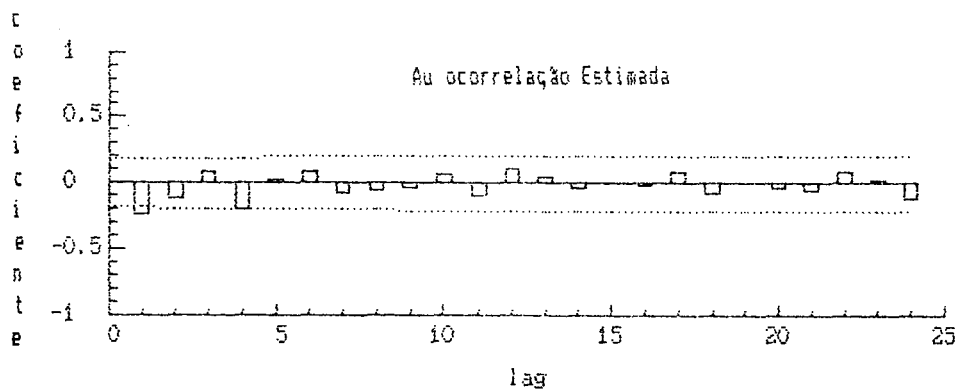
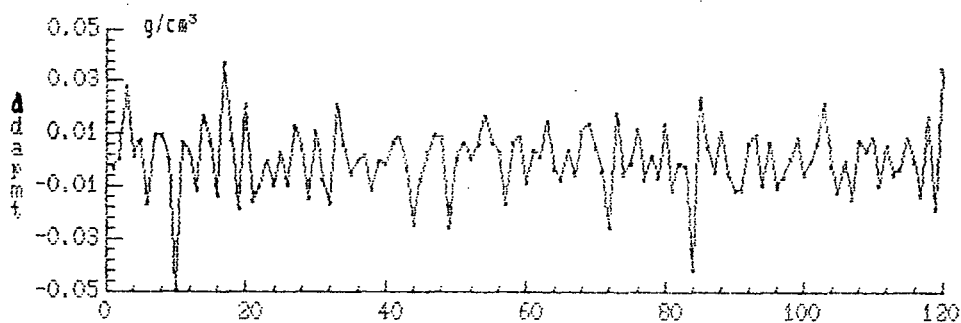


Fig. 37 - Série Dapnt. suas funções de autocorrelação e autocorrelação parcial

O melhor modelo para Δp_{mt} , ajustado pelo método de Box e Jenkins é

$$\Delta \Delta p_{mt} = \hat{\Delta} N_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2) a_t \quad (6.24)$$

onde

" a_t " = erro de previsão com comportamento de ruído branco (NID(0, σ^2))

$$\theta_1 = 0.33$$

$$\theta_2 = 0.21$$

$$\sigma^2_{a_t} = 1.51 \times 10^{-4}$$

Como a densidade aparente é determinada por secagem, a densidade no tempo " t " não é conhecida, e N_t deve ser estimado por sua previsão um passo a frente ($N_{t-1}(1)$).

A eq. 6.22 fica então

$$\beta \Delta \ln(\text{pressão})_t = - \Delta N_{t-1}(1) \quad (6.25)$$

da eq. 6.24 tem-se que

$$N_t - N_{t-1} = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2) a_t$$

e

$$N_{t+1} - N_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2) a_{t+1} \quad (6.26)$$

mas como $E(a_{t+1}) = 0$, e $E(N_t(1)) = N_{t+1}$, a eq. 6.26 fica

$$N_t(1) = N_t - \theta_1 a_t - \theta_2 a_{t-1} \quad (6.27)$$

como $a_t = N_t - N_{t-1}(1)$

$$N_t(1) = N_t - \theta_1(N_t - N_{t-1}(1)) - \theta_2 a_{t-1} \quad (6.28)$$

daí chega-se facilmente a

$$N_t(1) - N_{t-1}(1) = (1-\theta_1).(N_t - N_{t-1}(1)) - \theta_2 a_{t-1}$$

e

$$N_t(1) - N_{t-1}(1) = (1-\theta_1)a_t - \theta_2 a_{t-1}$$

ou

$$N_{t-1}(1) - N_{t-2}(1) = (1-\theta_1)a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} \quad (6.29)$$

Substituindo 6.29 na eq. 6.25 tem-se

$$\Delta \ln(\text{pressão})_t = \frac{-1}{\beta} ((1-\theta_1)a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2}) \quad (6.30)$$

mas " a_t " é o erro de previsão da eq. 6.24, e pode ser considerado como os desvios da densidade aparente do piso cerâmico em relação ao valor objetivado [7]. Assim a eq. 6.30 fica

$$\Delta \ln(\text{pressão})_t = \frac{-1}{\beta} ((1-\theta_1)\epsilon_{t-1} - \theta_2 \epsilon_{t-2}) \quad (6.31)$$

onde

" ϵ_t " = desvio da densidade, em relação ao valor objetivado, após aplicação do controle.

Numéricamente, para a série da figura 36, a equação de controle por "feedback" fica

$$\Delta \ln(\text{pressão})_t = -3,10 \epsilon_{t-1} + 0,98 \epsilon_{t-2} \quad (6.32)$$

6.8.2 - Variância da Variável de Saída (Controlada)

Como o controle por "feedback" da densidade aparente não é efetuado instantaneamente, a variância da densidade aparente controlada deverá ser a mesma do erro de previsão um passo a frente, ou seja, $\text{Var}(\text{dapctr}) = \sigma^2 a_t$. Então a $E(\text{var}(\text{dapctr})) = 1,51 \times 10^{-4}$.

Sendo o erro de previsão um passo a frente não autocorrelacionado, um intervalo de confiança para sua variância pode ser obtida da equação 6.18, ou seja $\text{Var}(\text{dapctr}) = \{1,19 \times 10^{-4} ; 1,99 \times 10^{-4}\}$, com 95% de confiança.

6.8.3 - Aplicação da Equação de Controle por "Feedback"

Como no controle por "feedforward", a cada determinação da densidade do piso seco, foi efetuado um ajuste na pressão de prensagem, determinada pela eq. 6.32, objetivando-se uma média de $1,910 \text{ g/cm}^3$ na densidade.

A mesma série de densidade aparente sem controle (DAP-CE1, fig. 32) foi utilizada nesta simulação.

A série de densidade aparente com controle, após aplicação do "feedback", foi determinada da mesma maneira que no controle por "feedforward", e é mostrada na figura 38, junto com sua distribuição de frequências.

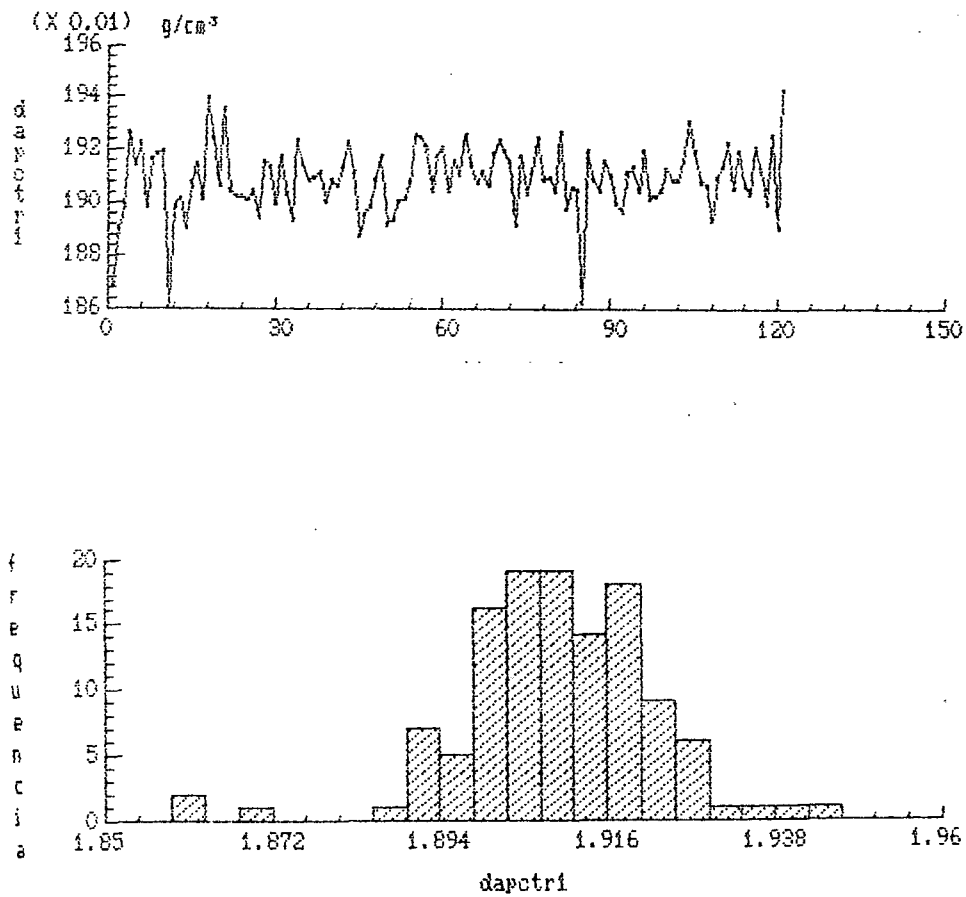


Fig. 38 - Densidade aparente controlada (Série e distr. de frequências)

A tabela 5 mostra as médias (μ) e variância (σ^2) das densidades com e sem controle, mostrando uma redução de 48% na variância da densidade após a aplicação do controle por "feedback".

Tabela 5 - Resultado da aplicação do controle por "feedback"

	COM CONTROLE	SEM CONTROLE
μ (g/cm ³)	1,906	1,909
σ^2 (g/cm ³) ²	3,18 X 10 ⁻⁴	1,66 X 10 ⁻⁴
redução na variância	48 %	

Neste caso, nota-se que a variância da densidade controlada por "Feedback" é apenas ligeiramente menor que a controlada por "Feedforward". Isto acontece porque as outras fontes de variação da densidade do piso, além da umidade, são fracamente autocorrelacionadas, não sendo possível fazer uma boa previsão do seu comportamento através de um modelo estocástico.

Na série de densidade com controle, observam-se picos de desvios em relação ao valor objetivado. Estes picos acontecem quando existe uma mudança abrupta no nível da série sem controle, impossível de prever pelo modelo da equação 6.24.

Após a aplicação do controle por "feedback", a densidade aparente resultante (com controle), pode ser monitorada através de uma carta de controle \bar{X} . Através desta carta, mudanças na estrutura do sistema dinâmico podem ser detectados e avaliados.

As aplicações do controle por "feedforward" e "feedback" (Itens 6.7.3 e 6.8.3) ao processo de prensagem foram apenas simulações. Não foi possível realizar-se uma aplicação real devido a

grande estabilidade conseguida na unidade da massa (através do atomizador) após o período de coleta de dados.

As simulações realizadas são estatisticamente corretas, e só foram possíveis porque a cadeia de ruído (fig. 30), presente na determinação da função de transferência, não é correlacionada com a pressão (fig. 39).

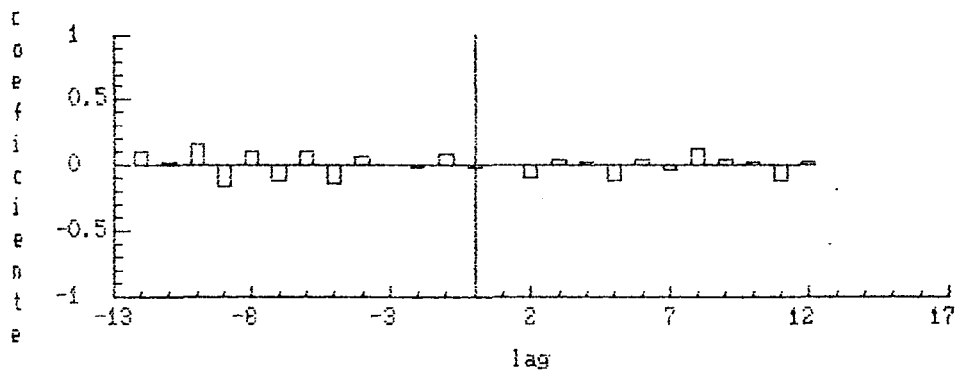


Fig. 39 - Correlação cruzada ruído X pressão

CAPITULO 7

CONCLUSAO

7.1 - Conclusões

A metodologia do IQS é uma poderosa ferramenta, sua utilização contínua, através das Janelas de Controle de Qualidade, permite não apenas o controle, mas também uma melhoria contínua da qualidade e da produtividade do processo como um todo.

A modelação de sistemas/processos, através do modelamento empírico, é uma boa alternativa para substituição da modelação clássica, principalmente naqueles casos onde o conhecimento físico do sistema/processo é pequeno, e/ou onde existam muitas variáveis aleatórias (desconhecidas) envolvidas.

Os resultados desta dissertação demonstram a potencialidade de aplicação das funções de transferência empíricas no controle de processos industriais. Sua utilização dentro das janelas de controle de qualidade, dentro do IQS, permite o estabelecimento de rotinas otimizadas de controle.

A utilização das funções de transferência empíricas no controle de processos de fabricação assume grande importância em processos discretos, onde além das variáveis de processo, variáveis do produto também são importantes. Nestes processos (e também nos contínuos), onde característicos de controle (ou o pró-

prio controle) não podem ser medidos/executado em tempo real, as funções de transferência empíricas, através de métodos de previsão estatísticos, constituem uma ótima ferramenta para o controle de qualidade/processo.

7.2 - Sugestões para Trabalhos Futuros

Visando dar continuidade aos trabalhos de pesquisa na área de controle de processos/qualidade, através de métodos estatísticos de controle e otimização, são sugeridos abaixo alguns trabalhos que trariam grande contribuição:

- Estudo aprofundado da metodologia DDS [39], e sua aplicação à modelagem e controle de processos industriais.
- Estudo sobre o método de "operação evolucionária" [9] e metodologia Taguchi [35], visando sua utilização conjunta na otimização de processos industriais.
- Estudo da metodologia Taguchi, aplicando-a ao projeto e otimização de processos de fabricação.
- Estudo sobre as diversas técnicas (estatísticas ou não) de melhoria e otimização de processos, sintetizando-as em um só trabalho.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1 - Abreu, M. S. V. - A qualidade é um mito?. Máquinas e Metais, 1990, 298, pp 63.
- 2 - Albaro, J.L.A., Fuentes, A.B., Navarro, J.E.E., Porcar, V.B. & Benllock, A.E. - Variables en la compactación de soportes cerámicos de pavimento y revestimiento. Técnica Cerámica, 1982, 105, 792 - 812.
- 3 - Albaro, J.L.A., Fuentes, A.B., Porcar, V.B., Mingarro, C.F. & Sancho-Tello, M. - Técnicas experimentales del control de la compactación de pavimentos y revestimientos cerámicos. Técnica Cerámica, 1984, 116, 1234 - 1246.
- 4 - Akaike, H., Nakagawa, T. & Otomo, T. - Statistical approach to computer control of cement rotary kilns. Automatica, 1972, 2, 481 - 496.
- 5 - Altintas, Y. - In-Process detection of tool breakages using times series monitoring of cutting forces. Int. Journal of Machine Tools Manufacturing, 1988, 2, 157-172.
- 6 - Athanásios, V. & Stamboulis, A. P. - Modification of control chart limits in the presence of data correlation. Journal of Quality Technology, 1978, 1, 20-30.
- 7 - Box, G.E.P. & Jenkins, G.M. - Times series analysis, forecasting and control. San Francisco: Holden Day, 1976.
- 8 - Box, G.E.P. & MacGregor, J.F. - The analysis of closed-loop dynamic-stochastic systems. Technometrics, 1974, 3, 391-398.
- 9 - Box, G.E.P. & Draper, N.R. - Evolutionary Operation, a statistical method for process improvement. New York : John Wiley & Sons Inc., 1969.
- 10 - Bussab, W.O. & Morettin, P.A. - Estatística básica. São Paulo: Atual Editora, 1981.
- 11 - Deming, W.E. - Quality, Productivity, and competitive position. Cambridge Mass: MIT Center For Advanced Engineering Study, 1982.
- 12- Dessouky, M.I., Kapoor, S.G. & DeVor, R.F. - A methodology for Integrated Quality Systems. Journal of Engineering for Industry, 1987, 109, 241-247.

- 13- Dodge, H.F. & Romig, H.G. - Sampling inspection Tables. New York : Wiley, 1941.
- 14 - Dooley, K.J., Dessouky, M.I., Kapoor, S.G. & DeVor, R.F. - An Integrated Quality Systems approach to quality and productivity improvement in continuous manufacturing processes. Transactions of the ASME, 1986, 108, 322-327.
- 15 - Campos, V. F. - Gerência da qualidade total: estratégia para aumentar a competitividade da empresa brasileira. Belo Horizonte, MG: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1990.
- 16 - Feigenbaum, A.V. - Total quality control : engineering and management. New York: McGraw-Hill, 3rd Ed., 1983.
- 17 - Gargioni, S. - Sistema integrado de qualidade na indústria cerâmica (proposta de Tese de doutoramento). Florianópolis: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1989.
- 18 - Garvin, D.A. - Product quality : an important strategic weapon. Trabalho apresentado no "AT&T Bell Laboratories Management Forum", 1985.
- 19 - Hannan, E.J., Kavalieris, L. & Mackisack, M. - Recursive estimation of linear systems. Biometrika, 1986, 73, 119-133.
- 20 - Juran, J.M. - Quality control handbook. New York: McGraw-Hill, 1979.
- 21 - Juran, J.M. & Gryna, F.M., Quality planing and analysis, from product development through use. New York: McGraw-Hill, 2nd Ed., 1980.
- 22 - Kacker, R.N. - Off-line quality control, parameter design and the Taguchi method. Journal of Quality Technology, 1985, 4, 176-187.
- 23 - Kim, K. - Cylindrical accuracy control based on stochastic modeling and forecasting compensation. Int. Journal of Machine Tools Manufacturing, 1988, 4, 495-501.
- 24 - Kim, K.H., Eman, K.F. & Wu, S.M. - Development of a forecasting compensatory control system for cylindrical grinding. Journal of Engineering for Industry, 1987, 109, 385-391.
- 25 - Liu, L.M. & Hanssens, D.M. - Identification of multiple input transfer function models. Communication in Statistics, Theory & Methods, 1982, 11, 297-314.
- 26 - Lourenço Filho, Rui de C. B. - Controle estatístico de qualidade. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1964.
- 27 - Morettin, P.A. & Toloi, C.M.C. - Previsão de séries tempo-

- rais. São Paulo: Atual Editora, 2ª Ed., 1987.
- 28 - Morettin, P.A. & Toloi, C.M.C. - Modelos de funções de transferência. Texto apresentado na 3ª Escola de Séries Temporais e Econometria, Rio de Janeiro, 1989.
 - 29 - Paladini, E.P. - Controle de qualidade: uma abordagem abrangente. São Paulo: Atlas, 1990.
 - 30 - Pandit, S.M. & Wu, S.M. - Modeling and analysis of closed-loop systems from operating data. Technometrics, 1977, 4, 477-485.
 - 31 - Pontes, M. - Nossas indústrias podem alcançar vantagens competitivas imensas. Máquinas e Metais, 1990, 299, pp 44.
 - 32 - Shewhart, W.A. - Economic control of quality of manufactured products. New York: Van Nostrand, 1931.
 - 33 - Spiewak, S. & Wu, S.M. - Tool wear monitoring and breakage detection based on intelligent filtering. Int. Journal of Machine Tools Manufacturing, 1988, 4, 483-494.
 - 34 - Surette, G. J. - The AT&T quality system. AT&T Technical Journal, 1986, 2, 21-29.
 - 35 - Taguchi, G. & Wu, Yu-In - Introduction to off-line quality control. Tokyo: Central Japan Quality Control Association, 1980.
 - 36 - Tee, L.E. & Wu, S.M. - An application of stochastic and dynamic models for the control of a papermaking process. Technometrics, 1972, 2, 481-496.
 - 37 - Tontini, G. & Alves, E. - Controle da densidade aparente. Trabalho apresentado em seminário na empresa Portobello S.A., Tijucas, SC, 1990.
 - 38 - Traver, R.W. - Pré-control, a good alternative to X-R charts. Quality Progress, Setembro, 1985.
 - 39 - Wu, S.M. - Dynamic Data System : a new modeling approach. Transactions of the ASME, 1977, Agosto, 708-714.
 - 40 - Wu, S.M. & Phadke, M.S. - Identification of multinput - multoutput transfer functions and noise model of a Blast Furnace from closed-loop data. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, 6, 944-951.
 - 41 - Wu, S.M. & Phadke, M.S. - Identification of papermaking process from closed-loop data by bivariate time series analysis. Journal of Dynamic Systems, measurement and Control, 1976, Setembro, 291-295.
 - 42 - Yang, H.H. & Yang, G.P. - Optimal control of the grinding process based on the filtering and prediction. Annals of the CIRP, 1983, 1, 335-338.

APENDICE 1

Determinação da Função de Transferência por
Box & Jenkins e Análise Espectral

A.1 - BOX & JENKINS

A determinação da Função de Transferência de processos industriais, onde os dados foram recolhidos sequencialmente no tempo, pode ser determinado pelo método de Box e Jenkins [7].

O método é composto basicamente por 3 estágios:

- Identificação
- Estimacão
- Verificação e diagnóstico

Estes 3 estágios (fig. A.1) são compostos de 9 passos, resumidos na figura A.2.

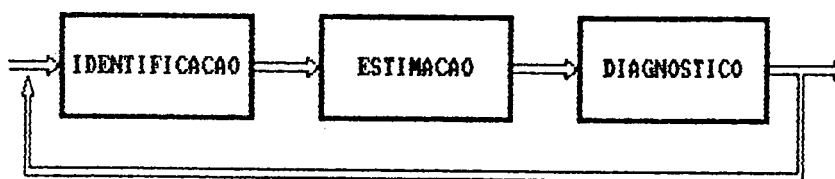


Fig. A.1 - Estágios para determinação da Função de Transferência

Passo 1 - A modelação começa por uma análise visual dos dados de entrada, para determinar se existe alguma tendência (séries não estacionárias) ou se alguma transformação (por ex. logarítmica) é necessária. Desta maneira a série de entrada é analisada individualmente plotando-se num gráfico X_t Vs Z_t . A série X_t é transformada em x_t .

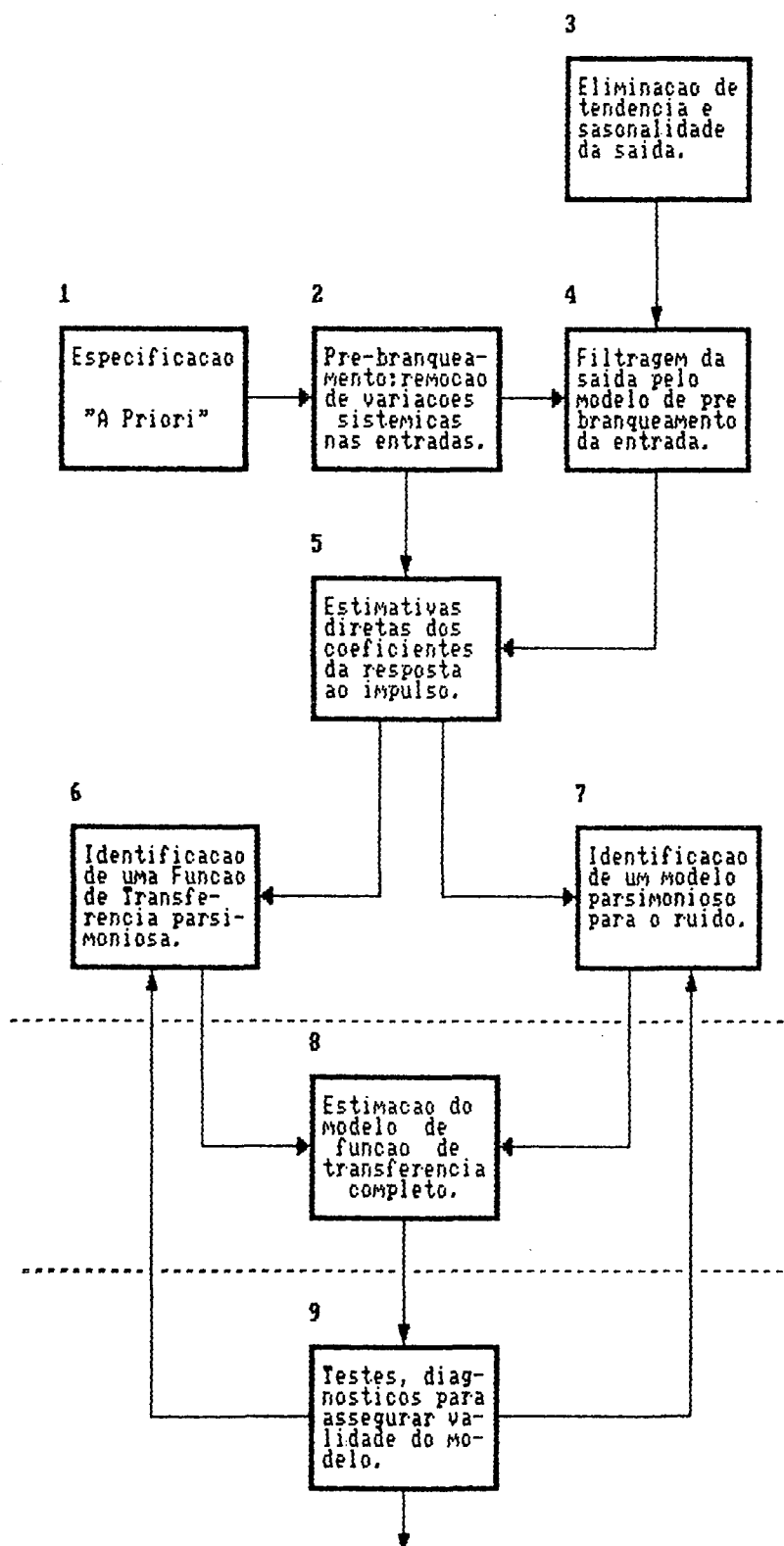


Fig. A2 - Passos para ajuste da Função de Transferência

Passo 2 - As duas séries (entrada e saída) exibirão correlação estrutural "entre" e "dentro" das séries. A correlação estrutural "dentro" das séries frequentemente mascara as interrelações "entre" elas, e aumenta as variâncias e covariâncias das estimativas de correlação cruzada.

Assim, quando a série de entrada original tem alguma estrutura estocástica interna, é efetuado um pré-branqueamento desta pelo ajuste de um modelo ARMA [7], da forma:

$$\phi_x(B).x_t = \theta_x(B).\alpha_t \quad (A1.1)$$

onde α_t é um ruído branco ($NID(0, \sigma^2)$). A série pré-branqueada fica então

$$\alpha_t = \theta_x^{-1}(B).\phi_x(B).x_t \quad (A1.2)$$

Passo 3 - A série de saída é analisada. Variações não ocasionadas pela entrada são eliminadas (sazonalidade, tendência, etc) por transformações adequadas. No caso de processo de fabricação, a sazonalidade dificilmente aparece, e a tendência é eliminada diferenciando-se a série. Aqui a série Z_t é transformada em z_t .

Passo 4 - A mesma transformação aplicada à entrada é aplicada à saída, obtendo-se a série

$$\beta_t = \theta_x^{-1}(B).\phi_x(B).z_t \quad (A1.3)$$

Esta transformação garante que o relacionamento exis-

tente "entre" a entrada e a saída não é destruída pelo pré-branqueamento.

Passo 5 - O modelo de função de transferência pode ser representado por :

$$\beta_t = V(B) \cdot \alpha_t + \epsilon_t \quad (A1.4)$$

onde

$$\epsilon_t = \theta_x^{-1}(B) \cdot \phi_x(B) \cdot N_t \quad (A1.5)$$

é a série de ruído transformada.

As estimativas de $V(B)$ ("impulse response functions") são dadas pela relação

$$V_k = \frac{r_{\alpha\beta}(k) \cdot S_\beta}{S_\alpha} \quad (A1.6)$$

onde

S_β = variância amostral da série de saída " β "

S_α = variância amostral da série de entrada " α "

$r_{\alpha\beta}(k)$ = correlação cruzada entre as séries " α " e " β ", dada por

$$r_{\alpha\beta}(k) = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} \alpha_t \cdot \beta_{t+k}}{n \cdot S_\alpha \cdot S_\beta} \quad (A1.7)$$

onde " n " é o número de dados nas séries " α " e " β ".

Passo 6 - Os graus r,s,b, da equação 4.10 são identifi-

cados pelo comportamento das estimativas das "impulse response functions", sendo que normalmente "r" e "s" são de grau 0,1 ou 2 (fig A.3).

O comportamento (forma) das "impulse response functions" nem sempre é claro. Isto acontece porque as estimativas são amostrais. Assim, vários modelos são selecionados neste passo, sendo o melhor escolhido posteriormente.

Passo 7 - A série de ruído " N_t " é estimada aplicando-se a estimativa das "impulse response functions" nas séries originais (com tendência e sazonalidade retiradas).

$$N_t = z_t - V(B).x_t \quad (A1.8)$$

e um modelo ARIMA(p,d,q) é aplicado a esta, conseguindo o modelo

$$N_t = \theta_q(B).\phi_p^{-1}(B).(1-B)^d.a_t \quad (A1.9)$$

Assim, o modelo de função de transferência está identificado, ficando da forma

$$z_t = w_s(B).\delta_r^{-1}(B).x_{t-b} + \theta_q(B).\phi_p^{-1}(B).(1-B)^d.a_t \quad (A1.10)$$

Passo 8 - As estimativas de máxima verossimilhança são derivadas para os parâmetros $w(B)$, $\delta(B)$, $\theta(B)$, e $\phi(B)$, para cada modelo de função de transferência e ruídos encontrados nos passos 6 e 7. O modelo com melhor ajuste pelo critério de mínimos quadrados é então escolhido.

MODELOS DE FUNCAO DE TRANSFERENCIA DISCRETOS		
b r s		Impulse response function tipica
2 0 0	$Y(t) = w_0 \cdot X(t-2)$	
2 0 1	$Y(t) = (w_0 - w_1 B) X(t-2)$	
2 0 2	$Y(t) = (w_0 - w_1 B - w_2 B^2) X(t-2)$	
2 1 0	$Y(t) = \frac{w_0}{(1 - 1B)} \cdot X(t-2)$	
2 1 1	$Y(t) = \frac{(w_0 - w_1 B)}{(1 - 1B)} \cdot X(t-2)$	
2 1 2	$Y(t) = \frac{(w_0 - w_1 B - w_2 B^2)}{(1 - 1B)} \cdot X(t-2)$	
2 2 0	$Y(t) = \frac{w_0}{(1 - 1B - 2B^2)} \cdot X(t-2)$	
2 2 1	$Y(t) = \frac{(w_0 - w_1 B)}{(1 - 1B - 2B^2)} \cdot X(t-2)$	
2 2 2	$Y(t) = \frac{(w_0 - w_1 B - w_2 B^2)}{(1 - 1B - 2B^2)} \cdot X(t-2)$	

Fig. A3 - Impulse Response Functions

Passo 9 - O modelo selecionado é então testado através de análise dos resíduos. Os resíduos do modelo ajustado são dados por :

$$\hat{a}_t = z_t - \hat{z}_t \quad (\text{A1.11})$$

onde \hat{z}_t é a série de saída estimada pelo modelo e z_t é o valor real da mesma.

A auto-correlação residual " $r_{aa}(k)$ " e a correlação cruzada entre resíduos e a entrada pré-branqueada " $r_{\alpha a}(k)$ " são calculados.

Se " $r_{aa}(k)$ " exibe alguma estrutura definida e " $r_{\alpha a}(k)$ " não, o modelo para a série de ruído está incorreto.

Se " $r_{aa}(k)$ " e " $r_{\alpha a}(k)$ " exibem alguma estrutura, a função de transferência está incorreta. O tipo de estrutura apresentado indicará as modificações necessárias.

Testes de Qui-quadrado podem também ser aplicados a " $r_{aa}(k)$ " e " $r_{\alpha a}(k)$ ". O teste de Qui-quadrado é usado como complemento a análise dos resíduos.

Caso existam inadequações no modelo, as alterações são efetuadas e o processo retorna ao passo 7.

A análise em séries de tempo, pelo método de Box e Jenkins [7], como mostrado acima, é um processo interativo, exigindo a presença do analista.

A.2 - ANALISE ESPECTRAL

A análise espectral permite identificar as " Impulse Response Functions " de sistemas com múltiplas entradas correla-

cionadas, de maneira direta, sem interação do analista. A seguir este método é detalhado para um sistema com 2 entradas correlacionadas (fig A.4),

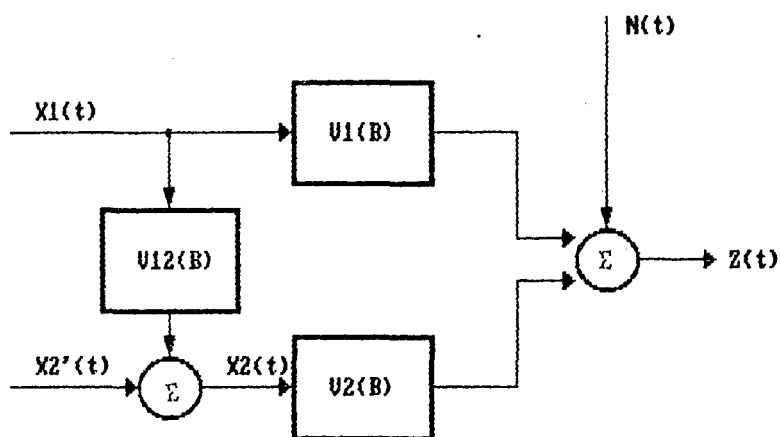


Fig. A.4 - Sistema com duas entradas correlacionadas

representado pelo conjunto de equações A1.12

$$Z_t = V_1(B).X_1(t) + V_2(B).X_2(t) + N_t \quad (A1.12)$$

$$X_2(t) = V_{12}(B).X_1(t) + X_2'(t)$$

O maior interesse aqui, uma vez que apenas as entradas X_1 e X_2 , e a saída Y são disponíveis, é identificar $V_1(B)$ e $V_2(B)$.

Tomando-se a Transformada de Fourier das entradas e da saída, pode-se rapidamente encontrar o sistema da figura A.5.

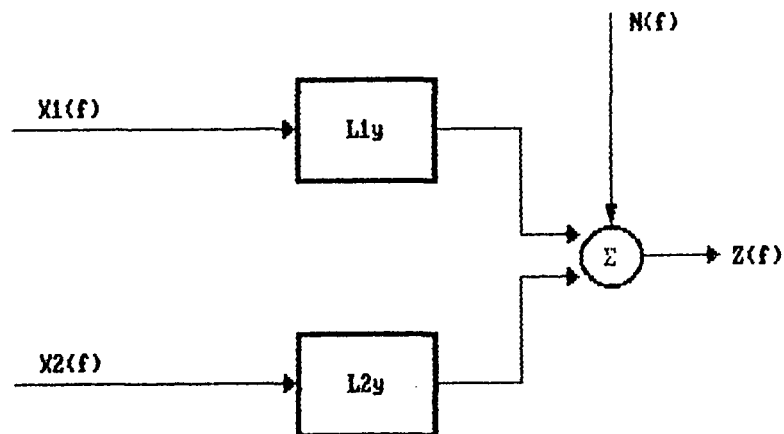


Fig. A.5 - Sistema condicional

onde

$$L1y = \frac{Z(f) \cdot X_1(f)^*}{X_1(f) \cdot X_1(f)^*} \quad (A1.13)$$

$$L2y = \frac{Z(f) \cdot X_2(f)^*}{X_2(f) \cdot X_2(f)^*} \quad (A1.14)$$

Tomando-se a Transformada de Fourier das equações A1.12, chega-se a

$$L1y = H1y + H12 \cdot H2y \quad (A1.15)$$

onde $H1y$, $H12$, e $H2$, são as funções de transferência espectrais de $V_1(B)$, $V_{12}(B)$ e $V_2(B)$.

Para encontrar-se $H1y$, é necessário calcular $H12$, que é dado pela equação

$$H12 = \frac{X_2(f) \cdot X_1(f)^*}{X_1(f) \cdot X_1(f)^*} \quad (A1.16)$$

Assim

$$H1y = L1y - H12 \cdot H2Y \quad (A1.17)$$

e, como provado em Bendat (1980),

$$H2Y = L2Y \quad (A1.18)$$

Substituindo A1.18 em A1.17 tem-se

$$H1Y = L1Y - H12 \cdot L2Y \quad (A1.19)$$

$$H2Y = L2Y$$

As " Impulse Response Functions " serão dadas pela transformada inversa de Fourier de H1y e H2y,

$$\begin{aligned} V_1(B) &= \text{IFFT}(H1y) \\ V_2(B) &= \text{IFFT}(H2y) \end{aligned} \quad (A1.20)$$

onde " IFFT " é a transformada inversa de Fourier.

A cadeia de ruído pode ser achada pela equação A1.12 e modelada independentemente por um modelo ARMA.

Quando a análise espectral é usada, deve-se cuidar com o erro de Aliasing . Este erro é evitado fazendo a frequência de amostragem dos dados ($f_a > 2 f_{max}$) maior que 2 vezes a maior frequência existente na amostra (no sinal). O intervalo de amostragem é diminuído até que não existam mudanças no espectro amostral, de uma análise para outra.