

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**MODERNIZAÇÃO E ANÁLISE DINÂMICA DE UMA MAQUINA-FERRAMENTA
NC**

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

Engenheiro Luis Arturo Rapso Brenes.

FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO 1994

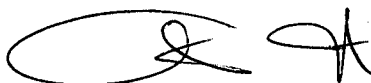
**MODERNIZAÇÃO E ANÁLISE DINÂMICA DE UMA MAQUINA-FERRAMENTA
NC**

Engenheiro Luis Arturo Rapso Brenes

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE:

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Dr.-Ing. Carlos A. Martin
ORIENTADOR




Prof. Dr.-Ing. Berend Snoeijer
COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr.-Ing. Carlos A. Martin
PRESIDENTE



Prof. Dr.-Ing. Walter Weingärtner



Prof. Dr. Eng. Czeslau L. Barczack

Este trabalho é dedicado aos meus pais e à minha irmã, pelo apoio, solidariedade e estímulo, que me tem brindado em todo momento. Obrigado!

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Professor Martin, pela confiança depositada em mim para a realização do trabalho.

Aos colegas do GRUCON-Hardware, mestrandos e estagiários, cuja contínua colaboração, sempre oportuna, foi a base do sucesso obtido.

Um especial agradecimento ao Eng° Héctor Muñoz Romero pela sua amizade e espírito de colaboração.

Agradeço aos colegas do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina por terem-me acolhido em seu corpo discente e pelo apoio ao projeto desenvolvido.

Agradeço à Universidad de Costa Rica e ao programa CONICIT-BID pela bolsa concedida, que viabilizou meu trabalho.

RESUMO

As máquinas-ferramenta e especialmente as controladas por comando numérico (NC), com o passar do tempo, começam a apresentar "sintomas" que denotam inadequação ou fim da vida útil. A solução imediata estaria na sua substituição. Contudo, freqüentemente apresentam condições de continuar operando, desde que suas deficiências sejam sanadas. A modernização ("retrofitting") surge pois como uma alternativa, que vem sendo experimentada com muito sucesso. Trata-se principalmente da substituição do sistema de controle, acionamentos e sistema de medição por equipamentos modernos. Com estas modificações a máquina passa a apresentar melhores especificações.

No presente trabalho, descreve-se a realização da modernização de uma fresadora CNC Pratt & Whitney de três eixos, constando das seguintes ações: Avaliação técnica da máquina original; seleção do comando numérico, acionamentos e sistemas de medição a serem aplicados; projeto e execução do painel de operação; análise e reprojeção do sistema de variação de velocidade do acionamento principal; projeto e execução dos componentes mecânicos para adaptação dos novos servo-motores e sistemas de medição; montagem e instalação da eletrotécnica requerida, totalmente renovada; avaliação das guias e dos fusos de esferas recirculantes; dimensionamento dos servo-motores a serem usados nos eixos X e Y; projeto de circuitos de interfaceamento eletrônico entre os diferentes componentes associados ao CNC.

Além destas atividades, que permitiram repor a máquina em operação sob comando numérico, foi realizada uma verificação de seu comportamento dinâmico através de ensaios para obter a resposta no tempo e em freqüência dos posicionadores X e Y.

A série de ensaios realizados, permitiu concluir que do ponto de vista dinâmico, a máquina apresenta um comportamento satisfatório, mostrando

uma rapidez de posicionamento e um amortecimento da ordem de grandeza recomendadas pela literatura para este tipo de sistemas.

Paralelamente foi gerada a nova documentação técnica para operação e manutenção do sistema.

Não foi possível incorporar o eixo Z ao sistema a ser controlado pelo CNC por não se dispor do acionamento correspondente. Outrossim, ensaios de usinagem e metrológicos que permitam determinar os erros de posicionamento e repetibilidade da máquina modernizada foram postergados.

ABSTRACT

The following work is developed in the Retrofitting area, a kind of technological activity oriented to modernize NC or CNC Machine tools. It is presented a procedure to realize this process, a description of the process done in a Pratt & Whitney Drilling Machine, a procedure to select a suitable servo motor is proposed and finally results of dynamical measures done in the machine are presented.

SUMARIO

O presente trabalho é desenvolvido na área do "Retrofitting", atividade tecnológica orientada à modernização de Máquinas-Ferramenta NC e CNC. É apresentado um procedimento para a realização destes processos, uma descrição do processo realizado numa furadeira Pratt & Whitney, é proposto um procedimento para dimensionamento de servomotores e finalmente são apresentados os resultados medições dinâmicas feitas na máquina modernizada.

ÍNDICE

Página

CAPÍTULO 1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.

1.1 INTRODUÇÃO.	1
1.1.1 CARACTERIZAÇÃO DO TRABALHO DESENVOLVIDO.	2
1.2 OBJETIVO DO TRABALHO.	2
1.2.1 OBJETIVO GERAL.	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.	3
1.3 JUSTIFICATIVA.	4
1.4 DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO.	4

CAPÍTULO 2 RECONDICIONAMENTO, REFORMA E MODERNIZAÇÃO DE MÁQUINAS-FERRAMENTA

2.1 INTRODUÇÃO.	6
2.2 CARACTERÍSTICAS DAS MÁQUINAS-FERRAMENTA CNC MODERNAS.	6
2.3 ABRANGÊNCIA DO "RETROFITTING".	7
2.3.1 RECONDICIONAMENTO ("REBUILDING").	7
2.3.2 REFORMA ("REMANUFACTURING").	8
2.3.3 MODERNIZAÇÃO ("RETROFITTING").	8
2.3.4 CARÁCTERÍSTICAS DAS PRINCIPAIS PARTES ENVOLVIDAS NOS PROCESSOS DE ATUALIZAÇÃO DE MÁQUINAS-FERRAMENTA	9
2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A MAQUINA A SER MODERNIZADA.	16
2.4.1 PROCEDIMENTO DE MODERNIZAÇÃO	18

CAPÍTULO 3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA COM AUXILIO DA TÉCNICA DE ANÁLISE FUNCIONAL

3.1 INTRODUÇÃO.	21
3.2 DESCRIÇÃO DA MAQUINA.	21
3.2.1 CARACTERÍSTICAS ORIGINAIS DA MÁQUINA.	21
3.2.1.1 ESPECIFICACIONES ORIGINAIS.	22

3.2.2 DENOMINAÇÃO DOS COMPONENTES DA MÁQUINA.	23
3.3 ANÁLISE DA MÁQUINA PARA O PROCESSO DE "RETROFITTING".	23
3.4 ESTRUTURA FUNCIONAL DA FRESADORA.	25
3.5 ANÁLISE DO SUBSISTEMA CNC.	27
3.6 ANÁLISE DO SUBSISTEMA ARVORE.	27
3.7 ANÁLISE DO SUBSISTEMA EIXO Z.	29
3.8 ANÁLISE DO SUBSISTEMA EIXO X E Y.	29

CAPÍTULO 4 DETALHAMENTO DO TRABALHO

4.1 INTRODUÇÃO.	30
4.2 COMANDO NUMÉRICO.	30
4.2.1 PAINEL DE OPERAÇÃO.	32
4.3 CONTROLE DO ACIONAMENTO PRINCIPAL.	33
4.4 POSICIONAMENTO DOS EIXOS X E Y.	36
4.4.1 GUIAS.	36
4.4.2 FUSOS DE ESFERAS RECIRCULANTES.	38
4.4.3 SISTEMAS DE MEDIÇÃO	39
4.4.4 ACIONAMENTO DE AVANÇO.	45
4.4.4.1 REQUISITOS PARA OS ACIONAMENTOS DE AVANÇO EM MF-CNC.	45
4.4.4.2 SERVO-ACIONAMENTOS.	48
4.4.4.3 SERVO-MOTORES.	52
4.4.4.4 COMPARAÇÃO ENTRE ACIONAMENTOS CA E CC.	52
4.4.4.5 PARÂMETROS A SEREM CONSIDERADOS NA SELEÇÃO DE ACIONAMENTOS.	54
4.4.5 RECOMENDAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO DE SERVO-MOTORES E SEUS SERVO-ACIONAMENTOS.	56
4.4.5.1 DIMENSIONAMENTO DE SERVOMOTORES.	57
4.4.5.4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO PROPOSTO PARA OTIMIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE SERVO-MOTORES.	63
4.5 DETALHAMENTO DOS CIRCUITOS ELÉTRICO E ELETRÔNICO IMPLANTADOS.	68

CAPÍTULO 5 ENSAIOS DINÂMICOS.

5.1 INTRODUÇÃO.	72
5.2 CARATERIZAÇÃO DO SISTEMA AVALIADO E DO SISTEMA DE MEDIÇÃO.	72
5.3 ENSAIOS REALIZADOS.	75
5.3.1 RESPOSTA NO TEMPO.	75
5.3.2 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA.	76
5.3.3 RESPOSTA NO TEMPO DA MALHA DE CONTROLE DE POSIÇÃO.	78
5.4 RESULTADOS.	79
5.4.1 RESPOSTA NO TEMPO.	79
5.4.2 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA.	85
5.4.3 RESPOSTA NO TEMPO DA MALHA DE CONTROLE DE POSIÇÃO.	91
5.5 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS.	95

CAPITULO 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.

6.1 CONCLUSÕES.	97
6.2 RECOMENDAÇÕES.	99

CAPITULO 7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.

100

ANEXOS

A.1 TABELA DE VALORES DA FUNÇÃO "S"	
A.2 DIAGRAMAS ELETRICOS	
A.3 AVALIAÇÃO DO SUBSISTEMA EIXO Z	
A.4 GRÁFICAS ORIGINAIS GERADAS PELO CSA	

CAPÍTULO 1

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 INTRODUÇÃO

As características do mercado mundial exigem cada vez mais que as indústrias estejam capacitadas para competir internacionalmente em termos de qualidade e produtividade. Nestas condições, os sistemas de manufatura, desde máquinas manuais até Células Flexíveis de Manufatura, são requisitados a oferecer alto desempenho.

No caso das máquinas-ferramenta, essa alta exigência recai em grande proporção nos sistemas de posicionamento, dos quais, progressivamente, espera-se mais rapidez e confiabilidade, que garantam atingir alta precisão, repetitividade e mínimo tempo dispendido com manutenção.

Esta tendência já perdura por algumas gerações de máquinas. A consequência lógica é que as máquinas-ferramenta e especialmente as controladas por comando numérico (NC), com o passar do tempo, começam a apresentar "sintomas" que denotam inadequação ou fim da vida útil. Frequentemente estes são equipamentos constituídos por uma estrutura de elevada rigidez, que lhes dá condições de continuar operando ainda por um bom tempo. As causas que tornam este tipo de máquinas inadequadas são de dois tipos:

Desgaste: Deterioração das características originais de alguns componentes tais como guias, fusos e outros elementos de transmissão.

Desatualização tecnológica: Defasagem e obsolescência presente em sistemas de posicionamento lentos e de características dinâmicas pobres ou ainda em componentes mecânicos e eletro-eletrônicos ultrapassados.

Não obstante, estes equipamentos representam investimentos que se tornam não rentáveis. A solução imediata estaria na sua substituição; no entanto, surge uma alternativa que vem sendo experimentada com muito sucesso por diversas empresas; trata-se da atualização tecnológica dessas máquinas. As máquinas consideradas candidatas a serem modernizadas podem estar desfasadas em relação às mais modernas que o mercado oferece, basicamente no que se refere a: Unidades de Comando Numérico Computarizado (CNC) e Controladores Lógicos Programáveis (CLP); servo-motores e servo-acionamentos; elementos mecânicos (fusos, guias, redutores e acoplamentos); sistemas de medição e sensores. Os progressos havidos no desenvolvimento destes tipos de componentes e outras características como tempo de entrega e custos tornam-se justificativas irrefutáveis para a modernização de uma máquina antes de substituí-la por uma nova.

1.1.1 CARACTERÍSTICAS DO TRABALHO A SER DESENVOLVIDO

O presente trabalho se enquadra dentro da abrangência do "retrofitting", atividade usualmente associada à modernização tecnológica de máquinas-ferramenta. O intuito deste trabalho é apresentar alguns critérios relacionados com a análise e o melhoramento dos diferentes componentes de uma máquina NC, sobre a qual será desenvolvido um processo de modernização. Também será feita uma avaliação da dinâmica do sistema resultante. Como o sistema original estava inoperante, foi impossível ensaiá-lo antes das modificações. Outrossim não existem informações técnicas suficientes sobre o equipamento original. Assim é impossível comparar-se os sistemas "antes e depois" do "retrofitting". Esta trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Hardware (LHW) do GRUCON da Universidade Federal de Santa Catarina, estando inserido dentro da linha de atividades de Integração Mecânica-Eletrônica e de ensaios dinâmicos do Laboratório.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

A seguir se apresenta a descrição dos objetivos a serem atingidos e a justificativa do trabalho.

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Efetuar a modernização de uma máquina-ferramenta e avaliar o seu comportamento dinâmico.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1) Realizar as reformas de tipo mecânico e eletro-eletrônico nos diferentes componentes de uma fresadora Pratt & Whitney NC e adaptá-la ao funcionamento CNC, visando atingir um adequado desempenho dinâmico, em termos de rapidez e precisão. Para tal são avaliados: Tempo de Resposta, Sobrepassagem, Resposta em frequência, etc. Para isto foram efetuadas as seguintes ações:

- Seleção do comando numérico a ser aplicado.
- Projeto e execução do Painel de operação.
- Análise e Reprojeto do sistema de variação de velocidade do acionamento principal.
- Projeto e execução dos componentes mecânicos para adaptação dos novos servo-motores e sistemas de medição.
- Montagem e instalação eletrotécnica requerida, totalmente nova.
- Análise, avaliação e eventual recondicionamento das guias e dos fusos de esferas recirculantes.
- Seleção e dimensionamento dos servo-motores a serem usados nos eixos X e Y.
- Projeto de circuitos de interfaceamento eletrônico entre os diferentes componentes associados ao CNC.

2) Otimizar o comportamento dinâmico e a estabilidade dos sistemas de controle, através de ensaios de resposta no tempo e em frequência do sistema de controle de velocidade e de posicionamento dos eixos X, Y, isolada e conjuntamente

3) Minimizar os custos no trabalho de "retrofitting".

1.3 JUSTIFICATIVA

A justificativa deste trabalho está baseada em duas prerrogativas abaixo detalhadas, a saber: Viabilidade técnico/econômica e Caráter acadêmico, de treinamento de Recursos Humanos.

Viabilidade

-Foi doada ao LHW uma máquina-ferramenta bastante antiga e desatualizada, mas que já na origem fora concebida para operação com comando numérico, apresentando, aparentemente, ainda condições mecânicas de funcionamento bastante aceitáveis.

-Existe atualmente no Laboratório a maior parte dos componentes necessários para efetuar o Retrofitting da máquina, no que tange aos objetivos apresentados.

-Existe no Laboratório uma base de conhecimento específico em sistemas de posicionamento, integração de sistemas, análise dinâmica etc., que servirá de apoio ao trabalho.

Caráter Acadêmico

-Com este trabalho se conseguirá ampliar sensivelmente a experiência na execução de atualização tecnológica e na análise do comportamento dinâmico de uma máquina-ferramenta modernizada, dentro do âmbito do LHW.

-A consecução do trabalho dotará o laboratório de uma "Bancada de Ensaio", na qual poderão vir a ser realizados ensaios sob condições de usinagem reais.

1.4 DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO

Nos capítulos seguintes serão tratados os temas relacionados com o processo de modernização de uma máquina-ferramenta. No capítulo 1 é apresentada a introdução do trabalho, onde são colocados seus objetivos e justificativa.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica realizada sobre o conceito de "retrofitting", resultados já obtidos neste tipo de trabalho e

procedimentos propostos para o processo de modernização. Em seguida, no capítulo 3, é apresentada uma descrição do problema em estudo, baseada na técnica da Análise Funcional. Este esclarecimento a nível funcional da máquina a ser modernizada serve de base para estabelecer as diferentes características a serem modificadas ou incorporadas à máquina. Entre estas se incluem: Acionamentos de avanço, acionamento principal, eletrotécnica, eletrônica de potência, proteções, elementos de interfaceamento, sistemas de medição, sistemas de controle, etc. A seguir, no capítulo 4, se descreve o detalhamento do trabalho realizado, fazendo uma análise comparativa entre as ações ideais a serem executadas e as factíveis desde uma óptica das considerações técnicas e econômicas. Além disso apresenta-se o procedimento para o dimensionamento de servo-motores baseado em critérios de otimização. Em seguida, no capítulo 5, são apresentados os resultados dos ensaios dinâmicos de resposta no tempo e em frequência realizados na máquina assim como uma análise da resposta no tempo da malha de controle de posição. Por último, no capítulo 6 são colocadas conclusões em relação aos ensaios realizados, aos objetivos, ao "retrofitting", ao procedimento proposto para dimensionamento de servomotores e da experiência adquirida.

CAPÍTULO 2

RECONDICIONAMENTO, REFORMA E MODERNIZAÇÃO DE MÁQUINAS-FERRAMENTA

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma introdução sobre os processos de renovação de máquinas-ferramenta enfocando os diferentes componentes da máquina envolvidos por dito processo trazendo ainda orientações para auxiliar na decisão da sua execução.

2.2 CARACTERÍSTICAS DE MÁQUINAS-FERRAMENTA CNC MODERNAS

As máquinas-ferramenta com comando numérico computadorizado (MF-CNC) modernas permitem a realização de peças muito complexas com alta precisão e atingindo requisitos de textura superficial pre-definidos; contam com múltiplos eixos controlados, altas velocidades de aproximação, troca automática de ferramentas e peças, sistemas de monitoração do processo, etc., o que tem permitido reduzir enormemente os tempos de fabricação.

Os sistemas com Comando Numérico Computadorizado (CNC) têm sido incorporados em múltiplos tipos de máquinas consideradas inicialmente não-convencionais, por exemplo, bordadeiras, filantadoras, entufadeiras, prensas, puncionadeiras, EDM, ECM, Máquinas de medição, retíficas, oxicorte, corte por LASER, etc.

Uma outra vantagem do advento das MFCNC é a possibilidade de produzir peças de alta complexidade em lotes pequenos economicamente, dada flexibilidade que representa a programação delas.

As tendências nas MF-CNC modernas, como as apresentadas na EMO 91 em Paris [AM Staff, 91], orientam-se em direção à usinagem de alta

velocidade, trabalhando com velocidades na faixa de 25.000 a 34.0000 rpm, com velocidades de corte de 1500m/min, incluindo capacidade de detecção de quebra da ferramenta, monitoração da vida da ferramenta e controle adaptativo (*variação, à conveniência, dos algoritmos de controle, adaptando-os às condições variáveis*) [Netushil,87]. Todas estas características exigem um alto desempenho do CNC. Na mesma Feira, foi mostrado o CNC de 64 bits, orientado à usinagem em alta velocidade, para eliminar o erro de seguimento por atraso do servo. Dada sua tecnologia RISC (reduced instruction set computer), o CNC pode calcular o erro de seguimento esperado e fazer ajustes prévios; além disto, as decisões de aceleração e desaceleração não são baseadas exclusivamente na linha de programa (comando) atual, mas sim nas linhas posteriores no programa-peça, previamente analisadas.

2.3 ABRANGÊNCIA DO "RETROFITTING"

O término "retrofitting" vem atingindo seu apogeu nos últimos tempos. Geralmente é associado aos processos de modernização de máquinas-ferramenta de comando numérico. Na verdade, ao lado do "retrofitting" aparecem outros termos e as suas definições permitem delimitar a abrangência do "retrofitting". Estes outros termos são "Remanufacturing" e "Rebuilding" [Heeb,89].

2.3.1 RECONDICIONAMENTO ("REBUILDING")

Esta termo se associa com o conceito de recondicionamento, que poderia ser usado como tradução. Consiste em recuperar uma máquina devolvendo-lhe suas especificações originais, mediante a troca ou conserto de peças. Para tal, todas as peças são analisadas para determinar o grau de desgaste, fadiga, etc., para avaliar a necessidade de trocá-las ou consertá-las conforme requerido. Através da aplicação deste processo consegue-se obter uma máquina em estado semelhante ao de uma nova, não significando entretanto que seja daí moderna [Heeb,89].

2.3.2 REFORMA ("REMANUFACTURING")

"Remanufacturing" é o tipo de atividade mais abrangente do que recondição em que são incorporados à estrutura funcional da máquina componentes de tecnologia mais moderna para substituir os já obsoletos. Isto pode-se enquadrar como uma reforma, que leva a máquina-ferramenta a atingir condições de operação semelhantes às de uma máquina tecnologicamente atual, contudo deixando a parte de comando inalterada. Este processo obriga a efetuar modificações mais profundas, sendo portanto um processo mais demorado e dispendioso do que o "simples" recondição [Heeb,89] [Simon,90].

2.3.3 MODERNIZAÇÃO ("RETROFITTING")

O retrofitting consiste na renovação e/ou acréscimo de elementos constituintes do sistema de controle de uma máquina NC ou CNC, por exemplo, a adaptação de unidades CNC recentes em máquinas desatualizadas, para que estas incorporem assim, as vantagens oferecidas pelos novos CNC, tais como:

- Maior produtividade.
- Redução do tempo de usinagem.
- Confiabilidade da máquina.
- Redução do espaço ocupado pelos componentes do sistema de controle.
- Realização de tarefas múltiplas, por exemplo, controle de operação da máquina ao mesmo tempo em que é realizada a edição de um outro programa.
- Troca automática de ferramentas e/ou peças.
- Simulação da execução do programa peça na tela.
- Aceleração e desaceleração mais rápidas e mais suaves.
- Aplicação de macros.
- Edição e manipulação de programas.
- Comunicação facilitada com computadores e periféricos.
- Operação sob controle remoto em DNC, Células flexíveis, etc.
- Compensação de erros de deslocamento nos fusos de cada eixo.
- Memória para armazenar vários programas simultaneamente.

O termo "Retrofitting" é bastante usado sendo comum achá-lo em algumas publicações técnicas de origem nacional e internacional. Este termo poderia interpretar-se como uma "Recuperação Tecnológica" [Fuoco, 91], que corresponde a uma modernização da máquina, de forma que esta adquira parte das características que são usuais nas máquinas modernas. É bastante comum que o processo de "Retrofitting" esteja associado ao de reforma, considerando que se aplica a máquinas consideradas obsoletas e com um período de uso relativamente longo; assim se faz necessária a reforma ou renovação de alguns componentes, ou ainda a incorporação de novos elementos. Tudo isto está diretamente relacionado com o caso que será analisado neste trabalho. A tomada de decisões em relação às modificações a serem realizadas no processo de modernização visam principalmente otimizar a dinâmica do conjunto, o que possibilita obter, entre outras vantagens, maior precisão da máquina.

2.3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS PRINCIPAIS PARTES ENVOLVIDAS

Além do CNC, as partes que merecem maior atenção para serem recondiçionadas, substituídas ou reformadas, são listadas a seguir e após, discutidas uma a uma:

- a) Guias.
- b) Elementos de Transmissão Mecânica:
 - i) Fusos.
 - ii) Correias.
 - iii) Acoplamentos.
- c) Acionamentos:
 - i) Acionamentos de Avanço.
 - ii) Acionamento Principal
- d) Sistemas de medição de posição:
 - i) Lineares.
 - ii) Rotativos
- e) Sistemas de Controle e Comando

a) GUIAS

Quando não é exigido um elevado desempenho dinâmico da máquina, pode considerar-se somente a necessidade de corrigir os defeitos encontrados nas guias de escorregamento originais, por processos de retificação ou rasqueteamento, recobri-las com materiais plásticos de baixo atrito e/ou dotá-las de sistemas de lubrificação centralizados, além de proteções telescópicas.

No caso de altas exigências da dinâmicas, é preciso substituí-las por outro tipo de guias de menor atrito, por exemplo, as de elementos roiantes, que apresentam um alto rendimento e permitem superar o problema de "stick-slip" (*descontinuidade no movimento devido à variação da força de atrito por causa de variação da velocidade relativa entre duas superfícies*); será dada preferência (técnica) à utilização de guias de rolos recirculantes por apresentarem a mais alta relação de capacidade de carga/tamanho e ao mesmo tempo alta rigidez, repetibilidade e precisão de posicionamento [Da Costa]. No caso de serem requeridos erros de posicionamento muito pequenos, é possível utilizar-se ainda guias aerostáticas ou hidrostáticas.

b) ELEMENTOS DE TRANSMISSÃO MECÂNICA:

1) Fusos: Estes elementos têm a função de converter o movimento rotativo (dos servo-motores) em translativo. Nas máquinas convencionais antigas estes fusos são do tipo de rosca trapezoidal, caracterizados por problemas de folgas e stick-slip. Quando se procura uma elevada precisão, repetibilidade, maior velocidade, aceleração e menor aquecimento na máquina, torna-se necessária a substituição dos fusos de rosca trapezoidal pelos de esferas recirculantes. Com estes elementos, o problema de folgas entre a castanha e o fuso é eliminado. Uma técnica consiste no uso de duas castanhas contrapostas, que produzem uma pré-carga nas esferas. Também é possível eliminar a folga mudando o passo de um fio de rosca na castanha ou modificando a forma do perfil do fio. Estes últimos dos métodos dão lugar a pré-cargas menores. A troca de fusos implica também na seleção dos correspondentes mancais. No caso de a máquina contar com fusos de esferas

recirculantes, é recomendável verificar se há desgaste; em caso afirmativo se deve considerar a troca ou o condicionamento dos mesmos.

ii) **Correias**: Na transmissão é recomendado o uso de correias sincronizadas pois, além da sincronização, não escorregam, apresentam, se bem dimensionadas, um bom desempenho dinâmico e uma completa isenção de folga pelo encaixe dos dentes da correia na polia. [Lichtblau,89]

iii) **Acoplamentos**: Outros elementos importantes são os acoplamentos, que devem ser escolhidos com o objetivo de obter a maior rigidez torsional possível, enquanto que inércias e folgas devem ser mínimas. É recomendado dedicar o maior cuidado à fixação dos acoplamentos aos eixos; não é recomendável o uso de chavetas pela tendência à vibrações por desbalanceamento, sendo melhor usar pinças ou anéis cônicos. A montagem dos motores dos acionamentos é efetuada por meio de flanges, que devem oferecer alta rigidez [Lichtblau, 89].

c) **ACIONAMENTOS**:

i) **Servo-Acionamentos de Avanço**:

a) Servo-motores: Os servo-motores são a parte principal dos acionamentos da máquina. Cumprem a função de interface entre sistema elétrico e o sistema mecânico dos posicionadores. Eles convertem a energia elétrica em mecânica e vice-versa, assim como também transformam a informação de comando em deslocamentos, velocidades e torques.

Um servo-motor distingue-se de um motor comum pelo fato de ser otimizado em função de um bom desempenho dinâmico, enquanto que o motor comum é otimizado em termos de mínimo custo e máxima eficiência. Assim, os servo-motores são aqueles que respondem com precisão e rapidez aos comandos. Os servo-motores são classificados da seguinte forma [Lichtblau, 89]:

Segundo a forma do movimento:

-Servo-motores rotativos.

-Servo-motores translativos (equivocadamente chamados lineares).

Segundo a continuidade do movimento:

- Servo-motores de movimento contínuo.
- Servo-motores de movimento descontínuo ou discreto (de passo).

Segundo o tipo da energia fornecida:

- Servo-motores de corrente contínua (CC).
- Servo-motores de corrente alternada (CA, síncronos ou assíncronos).

A seleção do tipo de servo-motor mais adequado para cada caso deve ser feita visando a dinâmica do sistema com que vai interagir. Cabe mencionar aqui que a tendência atual, para acionamentos dos eixos das máquinas-ferramenta CNC, está mais orientada ao uso de servo-motores de corrente contínua sem escovas bem como aos de corrente alternada, pelo fato de terem estas melhores características dinâmicas, fazendo com que sejam até mais compactos, além de terem vida útil mais longa e gerarem muito pouco ruído por não apresentarem escovas tendo ainda melhor capacidade de dissipação de calor dos enrolamentos, que estão no estator, podendo operar sob densidades de corrente mais altas. As principais recomendações a serem feitas sobre servomotores serão apresentadas no capítulo 4.

b) Servo-conversores: É importante efetuar uma adequada escolha da eletrônica de potência associada com o servo-motor a ser usado, pois motor e conversor formam um sistema integrado com características complementares. Se observa uma marcada tendência ao uso de inversores por modulação por largura de pulsos (PWM), associados a diferentes estratégias de controle, para energizar os servo-motores supra-mencionados.

ii) **Acionamento Principal:** Quanto ao acionamento principal, uma das possibilidades mais recentes no mercado é a de se usarem motores de indução com controle orientado pelo campo que, ademais, apresentam a possibilidade de controlar a posição angular da ferramenta [Putning, 93],

[Erickson, 89]. Outra alternativa para essas aplicações são os motores de alta frequência, os quais permitem processar materiais moles, como o alumínio, na faixa de 40.000 rotações por minuto com uma potência de 40 kW. Este tipo de aplicação permite reduzir custos em até 70%, quando comparada à usinagem com processos convencionais [Holland,89].

Já uma alternativa mais convencional é o uso de motores de corrente contínua para o acionamento da árvore, se bem que estes apresentam limitações em termos de velocidade de rotação e de potência, assim como necessidade de mais manutenção devido às escovas. Ainda existe a alternativa dos inversores de frequência para alimentação de motores de corrente alternada assíncronos (de indução), entre os quais se enquadra o popular tipo Gaiola de Esquilo. Neste tipo de motores, a velocidade é proporcional à frequência. Para tal, a alimentação trifásica da linha é convertida para corrente contínua, para depois ser convertida em CA de frequência variável, mantendo uma adequada razão V/Hz para manter constante o torque. Isto é obtido através de um Inversor PWM e um sistema de controle, cuja saída senoidal trifásica apresenta amplitude e frequência variáveis [Martin, 90].

d) SISTEMAS DE MEDIÇÃO:

i) Sistemas de medição de posição traslativos A medição de posição pode ser feita direta ou indiretamente. Quando a medição é efetuada através de outra grandeza a ela relacionada diz-se ser indireta. A medição direta é a mais adequada, pois permite corrigir também desvios introduzidos por outras grandezas intermediárias e a correspondente conversão. Os sistemas de medição mais usados são os sistemas eletro-ópticos baseados em escalas de cristal graduadas com traços espaçados de $20\mu\text{m}$, $40\mu\text{m}$ ou $100\mu\text{m}$. A medição é efetuada pela incidência de um feixe de luz condensado na escala de cristal. Um cabeçote sensor, que possui uma máscara graduada e células fotoelétricas, é deslocado sobre a escala; a luz é transformada pelos fotoelementos em pulsos de corrente elétrica, que são processados por um sistema eletrônico, permitindo interpolar e digitalizar os sinais dos fotoelementos. Um outro sistema usado para medição de posição baseia-se no

princípio indutivo (Inductosyns, resolvers...). Estes contudo estão sendo atualmente substituídos pelos sistemas eletro-ópticos.

ii) **Sistemas de medição rotativos**: A medição indireta, com sistemas de medição rotativos, só pode ser usada quando o erro decorrente gerado seja menor do que o erro máximo admitido para a máquina. Nos sistemas de posicionamento são usados codificadores ópticos rotativos, denominados "encoders", para efetuar medições indiretas cujo funcionamento é semelhante ao das escalas opto-eletrônicas. A literatura sugere o uso de escalas para comprimentos menores que 3 metros e o uso de encoders para comprimentos maiores, associado à calibração com LASER e CNC com compensação de erros [Coleman,90]. Os "encoders" podem ser empregados para a medição direta de ângulos. Sua codificação pode ser do tipo incremental ou absoluta.

e) **SISTEMAS DE CONTROLE E COMANDO**: O Comando Numérico Computadorizado (CNC) desempenha a função de controle de posição digital da máquina operatriz.

Com o passar do tempo, os sistemas de controle das máquinas de comando numérico (NC) evoluíram muito, passando pelos seguintes estágios:

- 1954 NC baseado em computador a válvulas.
- 1960 NC com técnicas de lógica por relés.
- 1964 NC transistorizado.
- 1968 NC baseado em circuitos integrados.
- 1972 NC comandado por minicomputador.
- 1976 NC com tecnologia de microprocessador (CNC).
- 1979 Controle adaptativo.
- 1981 Integração em mais larga escala (VLSI)

O CNC recebe como informação de entrada os parâmetros da máquina e os programas-peça; os primeiros dados informam as características da máquina que está ligada ao CNC e sob seu controle; os segundos contêm informações geométricas e tecnológicas das peças a serem processadas. Essas informações são introduzidas por uma das várias alternativas:

- _ Teclado (MDI "Manual Data Input").
- _ Fita perfurada.
- _ Disco magnético.
- _ Fornecidas por um outro computador que distribui o trabalho para uma ou mais máquinas (DNC).

Na execução, um programa NC é decodificado em dois tipos de informações: geométricas e tecnológicas, que são daí processadas como segue: as geométricas pelo interpolador, que fornece aos controladores de posição; de cada um dos eixos de movimento os respectivos valores de referência de posição; as informações tecnológicas são processadas no controlador lógico que fornece sinais de comando para atuadores e recebe sinais de sensores que monitoram o estado de funcionamento do processo.

A seguir são apresentadas algumas recomendações adicionais, complementando o que já foi mencionado no início item 2.3.3 na seleção do CNC [Coleman,90]:

- Ao se escolher um CNC, considere-se as vantagens de optar por um CNC que já seja conhecido na empresa, obtendo-se assim uma padronização de seus CNCs.
- Prever a familiaridade do usuário com a programação do CNC escolhido, para redução de custos de treinamento e tempo de implantação.
- Prever o casamento entre as características do CNC e as possibilidades da máquina, em termos de número de eixos, troca de ferramentas, sistemas de medição, alimentação de paletes, mesas giratórias, removedor de cavacos, lubrificação automática, etc.
- Considerar outras características como: tempo de processamento, tipo de microprocessador, tipo de compensação de posição, facilidades para simulação, interfaceamento com periféricos, nível de verificação de falhas, autodiagnóstico, etc.

2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A MÁQUINA A SER MODERNIZADA

A criteriosa avaliação da máquina a ser modernizada é uma etapa fundamental para o sucesso do trabalho de modo que se obtenha uma máquina precisa e confiável. Os CNC's de geração recente têm a possibilidade de absorver folgas e desgaste dos fusos via software, porém, não é possível esperar grandes resultados, quando se parte de uma máquina que não tem condições de efetuar uma peça com tolerâncias dentro de uma faixa aceitável. Deve-se verificar as possíveis fontes de erro: Quanto e que tipo de desgastes existem, nível de vibrações e desalinhamentos, etc, para assim poder determinar, se a máquina é ou não uma possível candidata para ser modernizada.

Na literatura encontram-se múltiplas informações relacionadas com a modernização de máquinas operatrizes. Na pesquisa bibliográfica realizada, foram encontrados alguns artigos relacionados com modernização ("retrofitting") e "rémanufacturing". Da mesma forma, se encontram relatos de trabalhos efetuados, nos quais se ressalta o ganho obtido quanto ao tempo de entrega e investimento, principalmente no fato da escolha pela modernização de uma máquina-ferramenta, frente à sua obsolescência [Coleman, 90], [Knutton,89], [Stauffer,90], [Knutton, 89,II], [Heeb,89] e [Schamisso,92].

O estudo da literatura supra-mencionada, permitiu obter algumas conclusões, a saber:

-É difícil determinar quando uma máquina é candidata à modernização ("retrofitting"). Não obstante, os europeus consideram preferencialmente máquinas européias velhas e de porte médio até grande, cujo custo de renovação é muito alto, [Knutton,89]. São aí consideradas retificadoras, mandriladoras, tornos verticais, centros de usinagem etc. , [Gregory,90]. Um sinal, que pode ser usado como referência, para determinar quando chega a hora de fazer uma renovação na máquina, é quando o tempo improdutivo supera 20% ou quando a competitividade da empresa se vê afetada por problemas de produtividade e prazos de entrega.

-Aspectos de importância ao se decidir entre realização de modernização ("retrofitting") ou compra de uma máquina nova são: Tempo de entrega, custo, possibilidade de escolher os diferentes componentes e de continuar usando o ferramental e a fundação já existentes, bem como a possibilidade de diminuir o tempo empregado para a adaptação dos operários.

-A Modernização ("retrofitting") de várias máquinas do mesmo tipo apresenta a vantagem de agilizar o processo, com a conseqüente queda dos custos.

-Ao se optar pela Modernização ("retrofitting"), deve-se selecionar criteriosamente quem vai efetuar o serviço, bem como as empresas fornecedoras dos componentes a serem usadas. Entre os critérios que podem ser considerados na escolha de fornecedores de peças e partes citam-se:

- a. Qualidade.
- b. Confiabilidade.
- c. Serviço.
- d. Relação com o usuário.
- e. Sistemas de informação e atendimento pós-venda.

No que diz respeito à escolha da empresa que irá executar o serviço de modernização, recomenda-se avaliar os seguintes itens:

- a. Inspeção das instalações físicas e do pessoal da empresa.
- b. Estudo de projetos recentemente realizados pela firma.
- c. Recomendações de clientes (relatórios).
- d. O grau de especialização em determinado tipo de máquina ou serviço .

-Uma alternativa de modernização que está sendo oferecida recentemente são os sistemas chamados "Saddle Mounted CNC", espécies de "kits" projetados para serem instalados em tornos convencionais, que ganham assim um sistema independente de dois eixos móveis, controlados por CNC, com o que automaticamente são eliminadas as partes móveis originais do carro do torno que apresentam desgaste. Porém fica requerido que o comportamento da árvore seja insento de vibrações, desalinhamentos, etc. [Knutton II,89]. Estes sistemas são oferecidos com os nomes comerciais de AUDIT, e COMPUSLIDE, No Brasil são fabricados com o nome de EKONOKIT.

2.4.1 PROCEDIMENTO DE MODERNIZAÇÃO

En relação ao que se poderia considerar como um procedimento a ser seguido para a realização do processo de modernização de uma máquina-ferramenta apresenta-se a seguinte seqüência de passos:

a) Estabelecer requisitos prévios: Trata-se de fixar algumas metas a serem atingidas como por exemplo: Definição de reformas, acréscimo ou redução no número de eixos a serem controlados, incorporação do sistema de troca de ferramentas ou de alimentação de peças, resolução, precisão e repetibilidade requeridas; etc.

b) Análise da candidata: Nesta etapa se realiza uma avaliação das condições apresentadas pelos diferentes componentes da máquina, já mencionados no ítem 2.3.3, para desta maneira determinar a necessidade ou não da substituição de cada componente avaliado.

c) Lista de necessidades: Ao se chegar nesta etapa já é possível estabelecer uma lista dos componentes a serem incorporados ou trocados na máquina. Cabe fazer uma avaliação técnico/financeira das alternativas existentes para cobrir cada uma das necessidades.

d) Reprojeto: Nesta etapa são realizadas diferentes tarefas direcionadas ao detalhamento e concretização das alternativas selecionadas, se incluem as seguintes ações:

- Levantamento de informação.
- Concepção.
- Dimensionamento.
- Análise.
- Planejamento da execução.

e) Execução: Esta etapa inclui todas as ações de montagem e ajuste requeridas para a implantação na máquina, das alternativas selecionadas no ponto c).

f) Avaliação dinâmica e metrológica: Realizado o trabalho de modernização requer uma avaliação do comportamento dinâmico e metrológico da máquina para constatar que as especificações requeridas, relativas à precisão apresentada pela máquina, foram atingidas.

g) Otimização: Esta etapa consiste na realização de ajustes para corrigir e melhorar as características da máquina depois de ser realizada a avaliação.

h) Teste de campo: Concluídos os testes da máquina cabe ainda observar o seu comportamento durante o funcionamento em produção um período de tempo "longo" para corroborar a efetividade das etapas anteriores. Uma observação de resultados insatisfatórios levaria à revisão das etapas anteriores correspondentes.

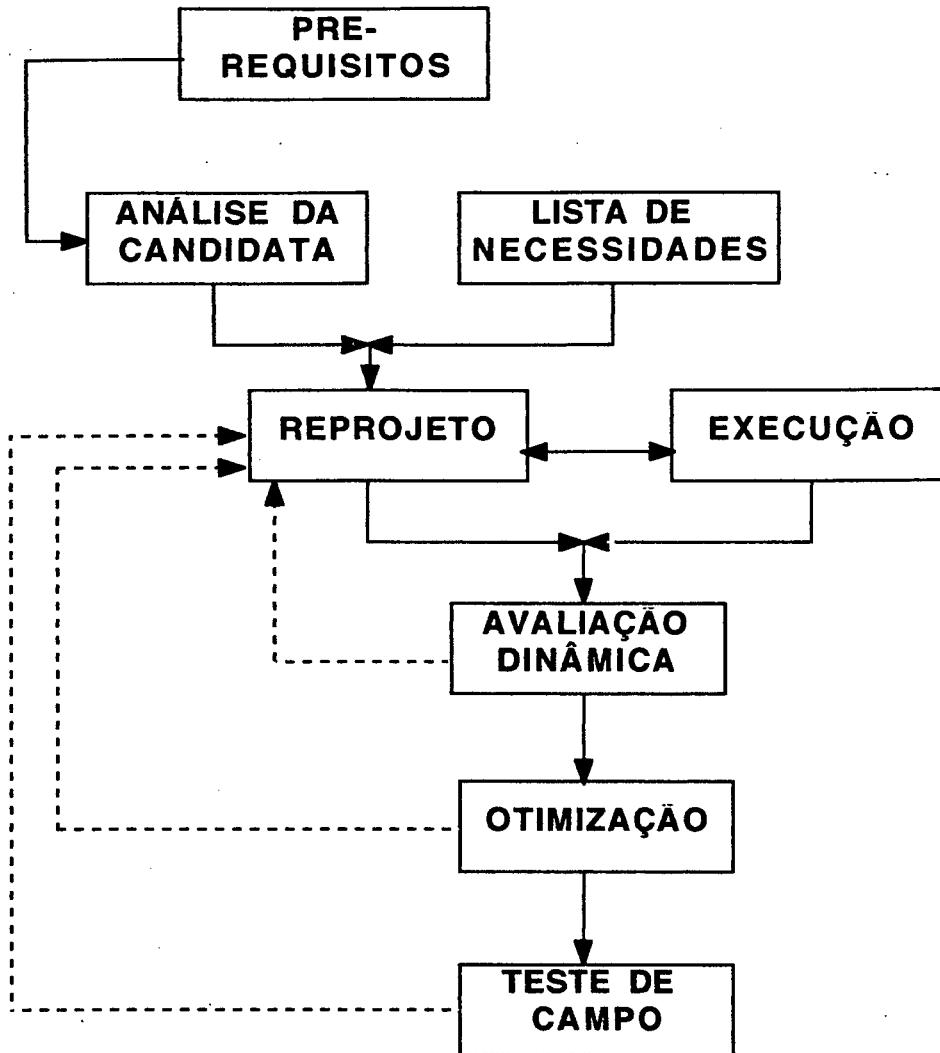


Figura 1.1 Fluxograma do procedimento de modernização

CAPÍTULO 3

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA COM AUXÍLIO DA TÉCNICA DE ANÁLISE FUNCIONAL

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo apresentar inicialmente uma descrição da máquina a ser estudada neste trabalho, passando depois a caracterizar os diferentes subsistemas da mesma que serão atingidos pelo processo de "retrofitting", assim como a análise e as necessidades de modernização previstas em cada caso, sempre atendendo um contexto funcional.

3.2 DESCRIÇÃO DA MÁQUINA

3.2.1 CARACTERÍSTICAS ORIGINAIS DA MÁQUINA

Trata-se de uma furadeira com capacidade para fresamento, tipo TAPE-O-MATIC modelo B, fabricada pela PRATT & WHITNEY. Esta máquina possuía um comando numérico de geração muito antiga, baseado em transistores, sendo que como elemento de entrada de programa, contava com uma leitora de fita perfurada. Esta máquina é do tipo chamado "bed plate milling machine" que pode traduzir-se como "fresadora de banco fixo com árvore vertical" [Weck I, 94], a qual apresenta as vantagens de fornecer uma superfície sólida para a usinagem de peças pesadas e de possuir grande rigidez estática e dinâmica.

A seguir são apresentadas as especificações iniciais da máquina segundo o catálogo [Hammerstein].

3.2.1.1 ESPECIFICAÇÕES ORIGINAIS

DIMENSÕES:

Capacidade de furação em aço (\emptyset) :	32 mm
Área da mesa:	760 x 56
Curso da mesa e carro (long. x trans.):	510 x 400 mm
Curso do cabeçote vertical:	355 mm
Curso da árvore:	205 mm
Cone do nariz da árvore:	ISO 40

VELOCIDADES E AVANÇOS

Rotação da árvore (contínua):	90-4500 rpm
Avanço do fuso:	0,02-0,90 mm/rot
Velocidades de avanço da mesa e carro transversal:	6000; 200; 12 mm/min
Velocidade de avanço rápido da mesa e carro transversal:	6000 mm/min
Avanços de fresamento (6 etapas discretas):	20-160 mm/min

MOTORES

Acionamento da árvore:	3 HP, 380 V, trifásico
Avanços rápidos da mesa e carro transversal:	1/4 HP (2x)
Motores de passo da mesa e carro transversal (para posicionamento):	18 cmkg = 1,77 Nm (2x)

PRECISÃO (ERROS DE POSICIONAMENTO)

Erro de posicionamento por eixo:	$\pm 0,03$ mm máx
Repetibilidade	$\pm 0,01$ mm

3.2.2 DENOMINAÇÃO DOS COMPONENTES DA MÁQUINA

A figura 3.1 representa as principais partes da máquina, assim como a denominação indicada para estas pela norma NBR 10050/1987 [NBR,10050].

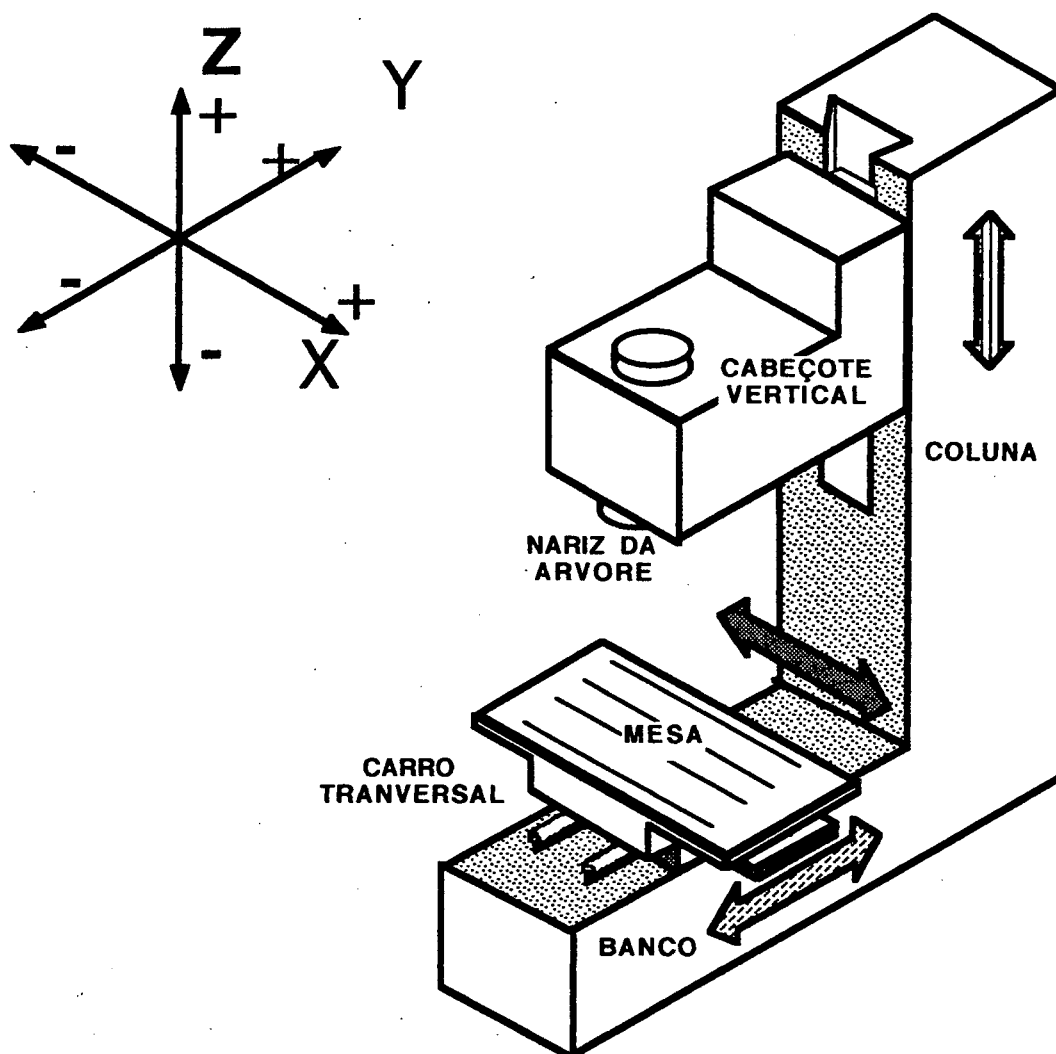


Figura 3.1 Fresadora de banco fixo com árvore vertical

3.3 ANÁLISE DA MÁQUINA PARA O PROCESSO DE "RETROFITTING"

Comparando-se as características iniciais da máquina, citadas no item 3.2.1.1, com as tendências atuais para máquinas-ferramenta de comando numérico, mencionadas no item 2.2, propõe-se um conjunto de melhorias,

tentando localizar estas metas num contexto realista em relação à máquina. A tabela comparativa 3.1 apresenta condensadamente o estudo feito:

Tabela 3.1 Modificações propostas para serem realizadas na fresadora Pratt & Whitney

CARATERÍSTICA A SER MODIFICADA	ANTES	PROPOSTO
Comando Numérico	NC baseado em transistores	CNC baseado em Microprocessador
Acionamento dos deslocamentos dos eixos X e Y	Misto: Motores de passo e Motores de indução	Servo-motores
Acionamento do deslocamento do eixo Z	Dependente rotação	Servo-motor
Velocidade de aproximação da ferramenta (máxima velocidade de avanço dos eixos X e Y)	6 m/min	8 m/min
Avanço do eixo Z	Dependente da rotação	Independente da rotação, faixa de 0.01 a 1 m/min
Controle de posição	Malha aberta	Malha fechada nos três eixos
Controle da velocidade angular da árvore	Manual	Automática, comandada pelo CNC, sistema em malha fechada

3.4 ESTRUTURA FUNCIONAL DA FRESADORA

Com o propósito de esclarecer a exposição das melhorias realizadas na máquina, descreve-se a seguir sua estrutura funcional, para assim poder localizar ditas ações no contexto da cadeia de funções.

Primeiramente se parte da descrição do sistema técnico em questão, onde se identifica como função básica a usinagem de peças, por meio do movimento relativo entre a ferramenta e a peça. Em dito sistema se observam os seguintes fluxos:

- Fluxo de energia
- Fluxo de informação
- Fluxo de material

Existe também interação entre dito sistema técnico e o homem, representado pelo operador da máquina, como também entre o ambiente e o sistema, principalmente quanto às perturbações, através de variáveis como temperatura, umidade, contaminantes, ruídos eletrônicos induzidos, etc. A figura 3.2 mostra, a nível esquemático, o sistema técnico e as interfaces citadas.

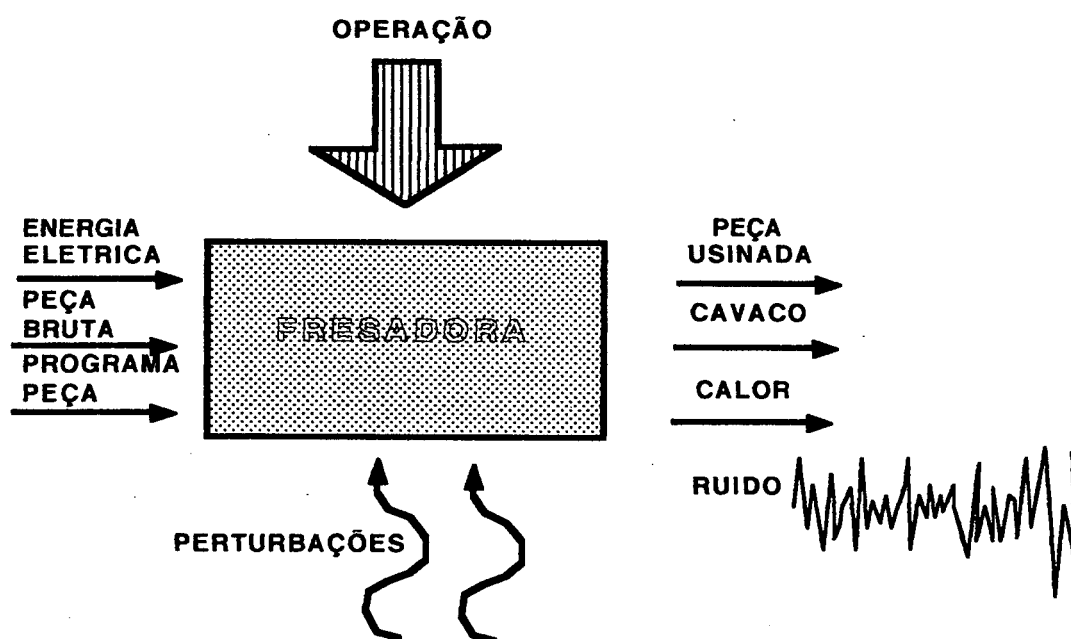


Figura 3.2 Sistema Técnico da Fresadora

A seguir é desenvolvida a cadeia de relações funcionais, a qual permite evidenciar os diferentes elementos constituintes do sistema, alguns dos quais serão atingidos no processo de modernização.

A figura 3.3 mostra a estrutura funcional idealizada da máquina.

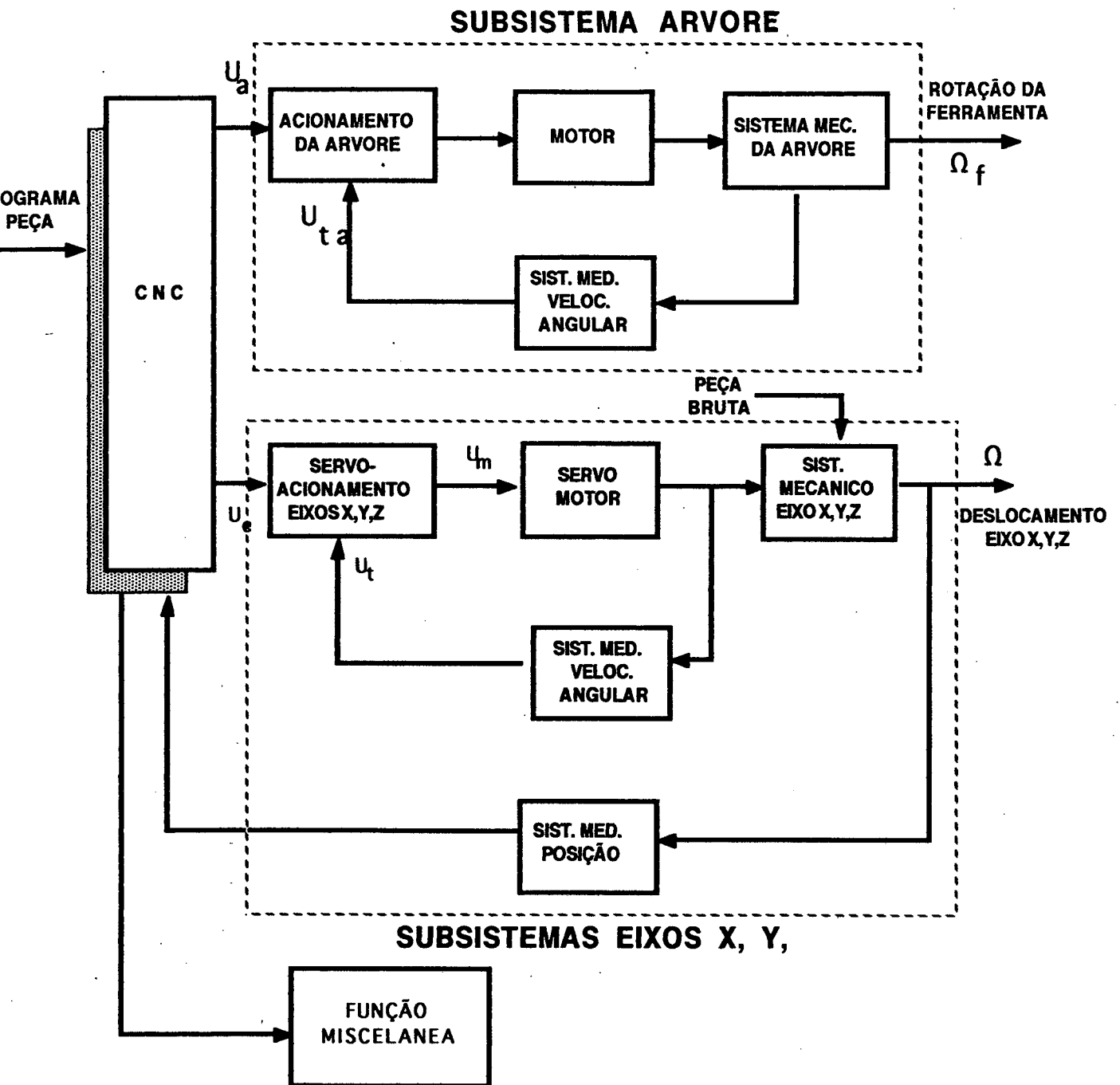


Figura 3.3 Estrutura funcional da fresadora

3.5 ANÁLISE DO SUBSISTEMA CNC

O comando numérico é um sistema no qual podem-se distinguir as seguintes funções:

- Entrada do programa-peça.
- Entrada dos parâmetros da máquina.
- Controle de posição e interpolação.
- Execução de rotinas lógicas.
- Decodificação da informação.
- Interfaceamento com o usuário
- Interfaceamento com periféricos.
- Armazenamento de informação.

A máquina não apresenta nenhuma destas funções dado o estado inoperante do comando numérico original, isto obriga a recomendar a seleção de uma unidade adequado às necessidades da máquina.

3.6 ANÁLISE DO SUBSISTEMA ÁRVORE

Inicialmente, observou-se que na mecânica original os movimentos de rotação da árvore e de deslocamento do eixo "Z", eram dependentes, o que se mostra no esquema da figura 3.4

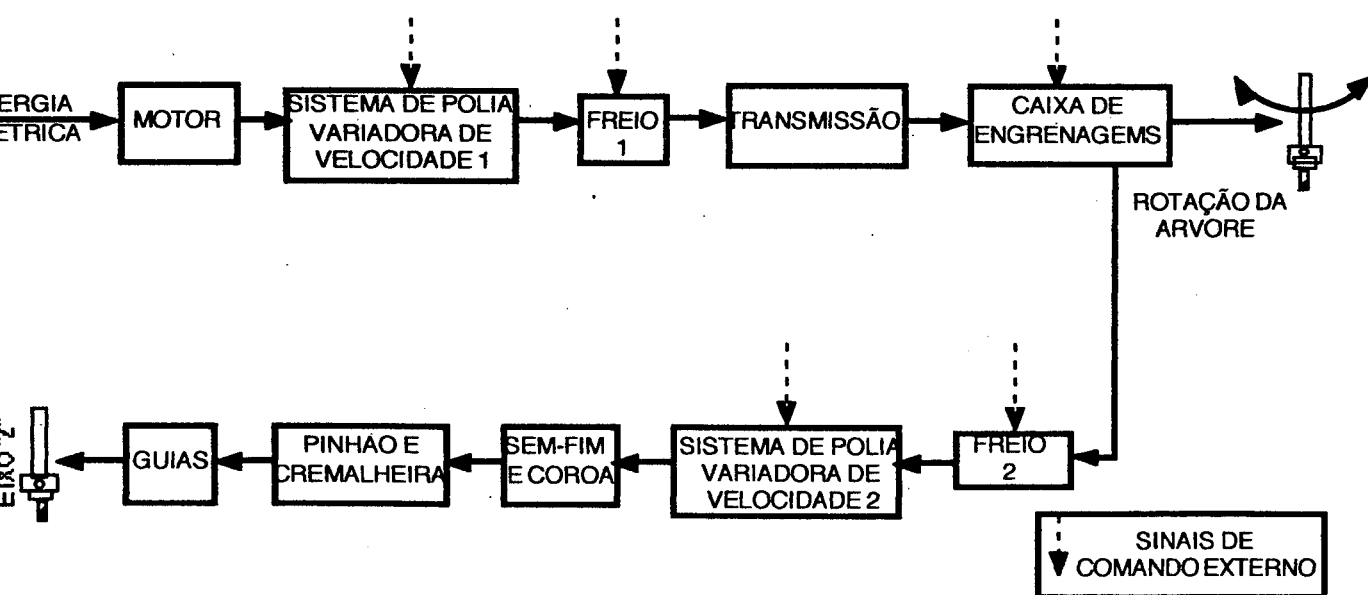


Figura 3.4 Esquema de funcionamento da rotação e translação da árvore

A primeira iniciativa a ser abordada foi considerar a necessidade de tornar independentes os movimentos de rotação e translação, conforme o proposto na tabela 3.1. Para isto deverá ser eliminado o freio 2 e o sistema de polia variadora de velocidade 2 na saída da caixa de engrenagens, além de alguns componentes internos da caixa, resultando assim o conjunto dividido em dois subsistemas como segue:

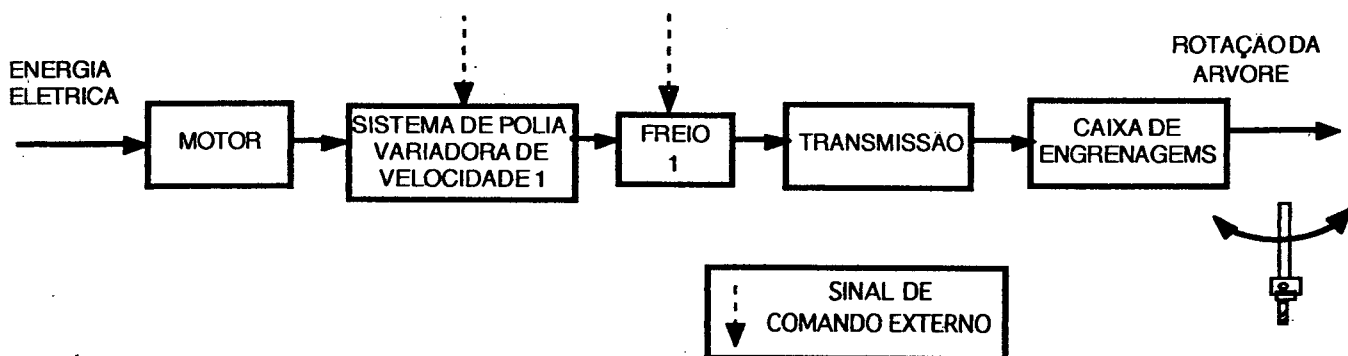


Figura 3.5 Subsistema árvore

Seguindo com o anterior, o sistema original de rotação da árvore fica segundo é apresentado na figura 3.6. Nela é mostrada a cadeia de funções que permite a variação da velocidade angular. Neste sistema é possível observar a falta de um elo que permita ao comando numérico aplicar a variação da velocidade angular, uma vez que originalmente o sistema era comandado manualmente.

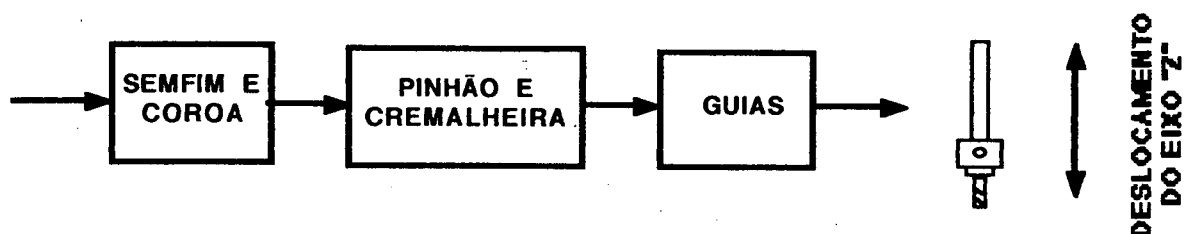


Figura 3.6 Sistema mecânico eixo "Z"

3.7 ANÁLISE DO SUBSISTEMA EIXO Z

O subsistema mecânico eixo Z é mostrado na figura 3.6. Note-se que segundo a figura 3.3, tal sistema carece da maioria dos elementos necessários para incorporar-lhe um acionamento automático, sendo necessários os seguintes elementos:

- Servo-acionamento (servo-motor e servoconversor).
- Sistema de medição da velocidade angular.
- Sistema de medição de posição.

Se observa também a necessidade de efetuar uma avaliação do subsistema mecânico do eixo Z, visando a otimização em termos de precisão e desempenho dinâmico. Esta avaliação é apresentada no apêndice 3, dado que as melhorias produto de dito análise serão desenvolvidas em trabalho posterior.

3.8 ANÁLISE DOS SUBSISTEMAS EIXOS X E Y

Em relação a estes eixos se observa que, de uma maneira similar ao caso do eixo Z, carecem da maioria dos componentes necessários para ter um acionamento automático, controlado pelo CNC, sendo necessário acrescentar os seguintes elementos:

- Servo-acionamento (servo-motor e servoconversor).
- Sistema de medição da velocidade angular.
- Sistema de medição de posição.

O subsistema mecânico para ambos os eixos apresenta fusos e castanhas de esferas recirculantes como elementos conversores de movimento rotatório para traslativo. As massas da mesa e do carro transversal estão suportadas sobre guias cilíndricas lineares, de esferas recirculantes, do tipo aberto. Recomenda-se efetuar uma avaliação das características destas guias e também dos fusos, para determinar se ainda são satisfatórias em relação às modificações previstas na máquina.

CAPÍTULO 4

DETALHAMENTO DO TRABALHO

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo se apresentam detalhes das alternativas propostas para cobrir as diferentes necessidades detectadas na etapa anterior de (análise), assim como a respectiva avaliação destas alternativas em termos de dois critérios, a saber:

Critério técnico.

Critério econômico.

Também será apresentado o detalhamento das decisões tomadas com relação às modificações e adaptações feitas durante o processo de "retrofitting" que foi realizado na fresadora Pratt & Whitney Tape-O-Matic. Será seguida a ordem de exposição do capítulo anterior, deixando de lado o posicionamento do eixo Z, tema que deixou de ser aprofundado no presente trabalho.

4.2 COMANDO NUMÉRICO

No item 3.5 já foram indicados os principais requisitos desejados para o CNC a ser escolhido. Além disto no item 2.3.4 é apresentado um conjunto de recomendações a serem consideradas na escolha do CNC. Contudo já havia um CNC para fresadora de três eixos disponível no LHW, pelo que segue a análise do mesmo.

O comando numérico em questão é um modelo TNC 131 da DIADUR, ou seja, é um comando de três eixos com entrada manual de dados e também entrada externa através da porta de comunicação padrão V-24 tipo RS 232C. Entre suas características podem-se mencionar as seguintes:

-Interpolação linear em dois de três eixos, a escolher.

- Velocidade máxima de deslocamento, 10 m/min.
- Memória de 500 passos de programa.
- Ciclos fixos de programação.
- Displays:
 - 1) Um alfanumérico para diálogo com o operador e para visualização de blocos (linhas) de programa.
 - 2) Um de 8 dígitos para valores de entrada.
 - 3) Três de 7 1/2 dígitos para mostrar as coordenadas de posição da máquina.
- Entrada de valores absolutos ou incrementais.
- Potenciometro "override" incorporado (0-150%)
- Compensação de ferramenta (raio e comprimento).
- Chamada de ferramenta função T, saída codificada (2 décadas BCD)
- Velocidade de rotação da árvore, função S, saída codificada (2 décadas BCD).
- Funções auxiliares M, existem 9 funções com saída direta de relé e 90 via saída codificada (dois dígitos BCD).
- Sinais de entrada:
 - Partida.
 - Parada.
 - Chaves de fim-de-curso.
 - Função auxiliar executada.
- Sinais de saída:
 - Tensão analógica $\pm 10V$ em $2K\Omega$, por eixo.
 - Liberação do eixo.
 - Funcionamento manual/automático.
 - Parada de emergência.
- Entradas para sistemas lineares de medição incrementais sem quadratura do sinal, período de divisão de 0,02 mm.

O CNC usado, apresenta as características básicas necessárias para comandar os três eixos da fresadora. Deixa a desejar a falta de sistema de CLP, que possibilitasse a programação de seqüências lógicas para permitir o interfaceamento a outras funções da máquina. Além disso, o CNC também carece de facilidade para operação remota e da função que executa interpo-

lação circular, o que lhe limitará as possibilidades de execução de peças que tenham contornos circulares.

O Comando incorporado à fresadora carece de algumas características que seriam desejáveis, como aquelas que já foram mencionadas, mesmo assim ele se adequa bem aos requisitos da máquina em questão.

4.2.1 PAINEL DE OPERAÇÃO

O painel de operação foi instalado junto com o CNC, numa caixa metálica unida ao corpo da máquina mediante um braço rígido. Neste se encontram a botoeira para comando manual das diferentes funções da máquina, a saber:

- Movimentação manual dos três eixos (X, Y, Z) .
- Ajuste da velocidade de movimentação manual nos três eixos (X, Y, Z).
- Acionamento manual da rotação da árvore, troca do sentido de rotação e variação da velocidade.
- Seletor de comando do fluido de corte:
 - Acionamento automático.
 - Acionamento manual.
 - Desligar o fluido de corte.
- Chaves de partida e parada da execução do programa (comando numérico em modo automático)
- Interruptor para ligação de energia para os acionamentos dos eixos.
- Interruptor de parada de emergência.
- Interruptor de segurança para impedir que o sistema seja acionado por pessoas não habilitadas.

É importante mencionar, que as três primeiras funções acima estão desativadas, quando o comando se encontra em alguma das possíveis opções de acionamento automático.

No desenvolvimento deste painel foram levadas em conta algumas considerações do tipo ergonômico e também foram respeitados os códigos industriais de cores.

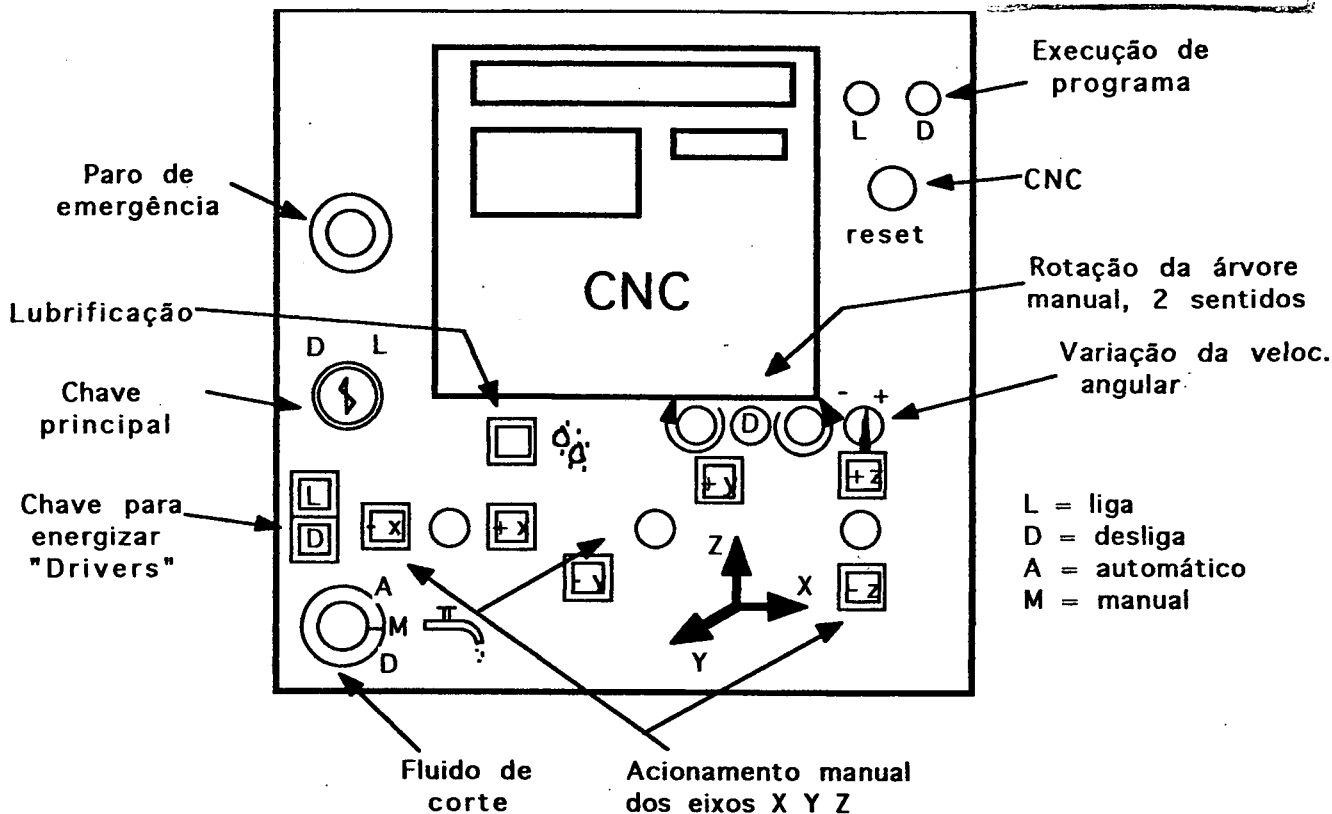


Figura 4.1 Painel de operação

4.3 CONTROLE DO ACIONAMENTO PRINCIPAL

No que diz respeito à variação da rotação da árvore, foram consideradas as seguintes alternativas:

- 1) Inversor de frequência para controlar a velocidade angular do motor de indução trifásico original da máquina.
- 2) Motor de corrente contínua e de seu correspondente acionamento.
- 3) Reutilização do sistema existente de polia variadora de velocidade com automatização especial.

A primeira alternativa é uma das mais simples do ponto de vista de instalação mecânica, pois só implica na modificação da alimentação do motor existente; já a segunda alternativa envolveria a troca de motor que

possivelmente seria um pouco mais volumoso. Ambas alternativas poderiam ser adquiridas já providas de algum tipo de interface para serem interligadas ao comando numérico. A terceira alternativa levaria a uma maior demanda de tempo de projeto dos elementos requeridos para satisfazer a função solicitada; além disto, o sistema de polia variadora apresenta pouca regularidade para manter um nível de rotação pela possibilidade de escorregamento, dada a pequena área de contato entre a correia e a polia.

Do ponto de vista econômico as primeiras duas alternativas resultam onerosas em relação aos recursos disponíveis para serem aplicados na modernização da máquina. Isto originou a opção pela terceira alternativa, sendo que do ponto de vista técnico é a menos satisfatória. No entanto, dado que não se contou com recursos para este fim, foi automatizado o sistema de polia variadora de velocidade já existente utilizando um atuador rotativo que aciona o sistema de ajuste manual. Para tal foi considerado um motorreductor de corrente contínua, e um sistema de controle dedicado para este fim. Para fechar a malha de controle foi acoplado um tacogerador ao eixo da árvore medir a velocidade angular segundo é mostrado na figura 4.2.

Foi também incorporada ao acionamento da árvore a função de inversão do sentido de rotação baseando-se no princípio de inversão da seqüência das fases de alimentação trifásica. Esta função é necessária para o rosqueamento. Igualmente foi habilitado o freio já existente na máquina. Com o intuito de produzir o tempo de espera dentro da função de inversão de sentido de rotação, foi implementado um circuito temporizador para gerar um retardo que permita a ação do freio, antes da inversão .

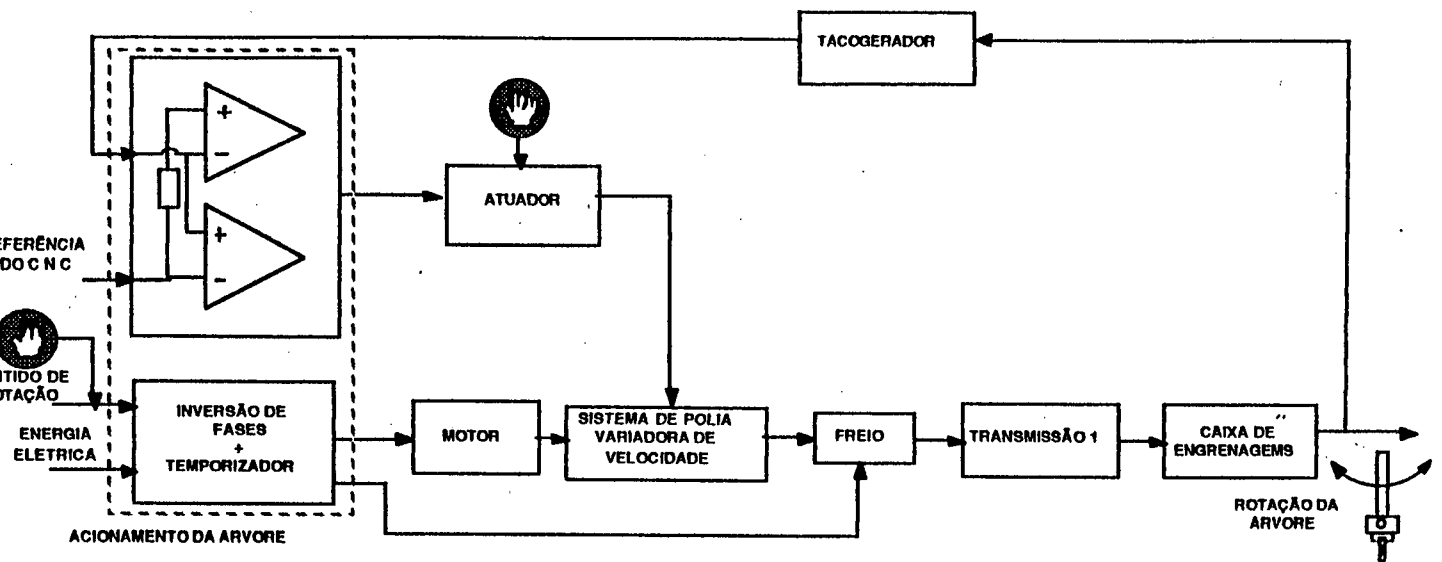


Figura 4.2 - Estrutura funcional detalhada do sistema de controle da velocidade angular da árvore.

O sinal de saída do comando numérico, é um sinal digital codificado em BCD de dois dígitos de 4 bits cada um, o que possibilita contar com 100 possíveis valores de rotação. O procedimento utilizado para converter o sinal digital de saída do CNC em um sinal analógico baseia-se num conversor digital/analógico (DAC) de oito bits com entrada binária pura, o que gera 256 níveis possíveis de tensão. Um tratamento prévio do sinal digital é realizado com o propósito de compatibilizar a resolução logarítmica de velocidades do CNC, mostradas na tabela A1.1 do apêndice A1, com a resolução linear do DAC. A figura 4.3 mostra com mais detalhes como isto é realizado, utilizando-se uma memória EPROM que associa a codificação dos dados do programa-peça com dados armazenados na memória, e com estes alimentar o DAC.

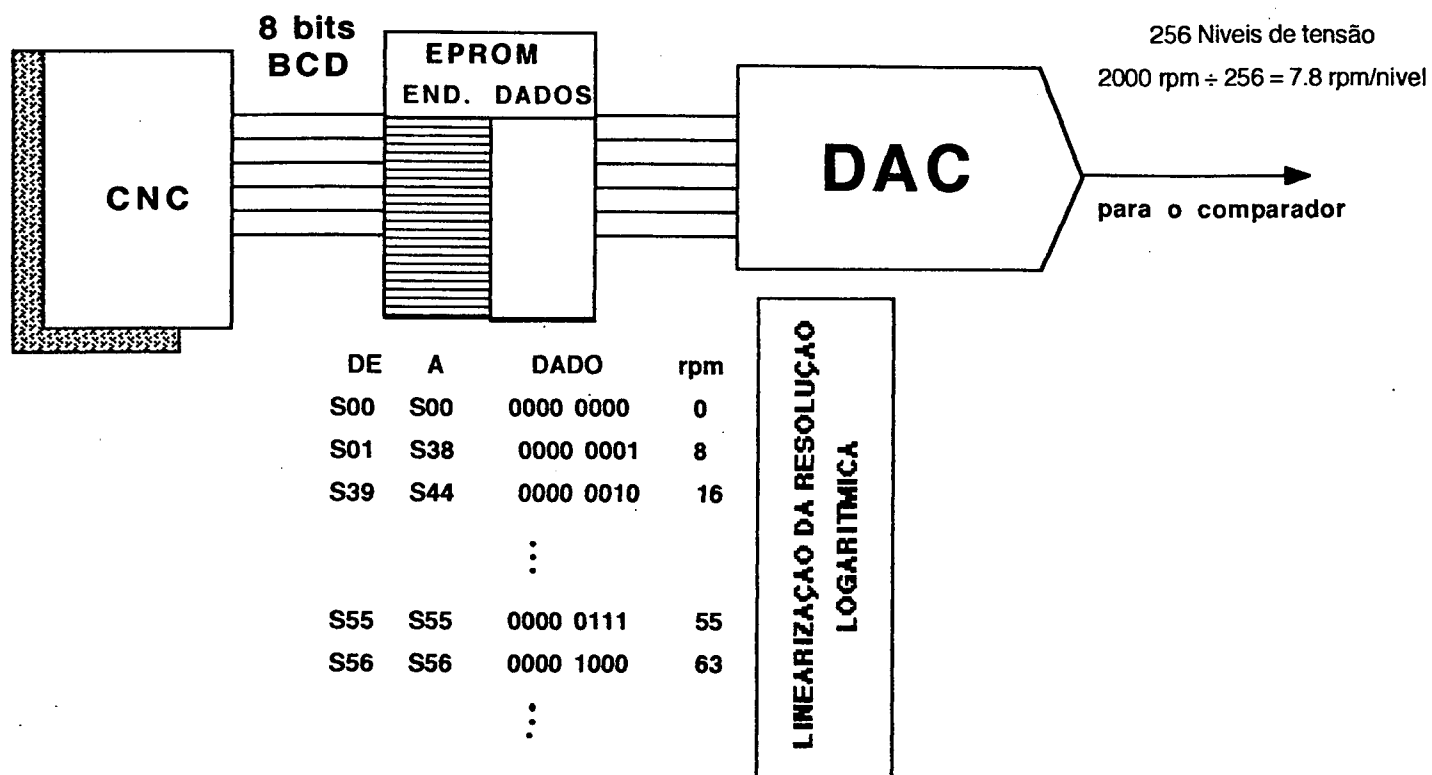


Figura 4.3 Compatibilização da informação de saída do CNC para comando da velocidade da árvore

4.4 POSICIONAMENTO DOS EIXOS X E Y

A figura 3.3 mostra os componentes dos sistemas de posicionamento dos eixos X e Y. Conforme foi colocado, a máquina já contava originalmente com fusos de esferas recirculantes e com guias lineares cilíndricas de esferas recirculantes, componentes que facilitam a obtenção de uma boa desempenho dinâmico dado o baixo atrito a ser vencido.

A seguir é realizada uma avaliação das características destes componentes.

4.4.1 GUIAS

Observou-se que a máquina possuía guias lineares do tipo cilíndrico, com buchas de esferas recirculantes; este tipo se caracteriza por permitir

um movimento e uma rotação, além disto não apresentam limitação do comprimento devido às esferas serem recirculantes. Nesta aplicação as buchas são do tipo aberto; com isto, as guias são apoiadas na estrutura da máquina ao longo de todo seu comprimento, evitando-se assim uma possível flexão. Quanto à substituição destes elementos há duas alternativas: A primeira seria a de se efetuar um condicionamento dos elementos cilíndricos, prevendo uma possível troca das buchas; como segunda opção se considera a substituição das guias cilíndricas por guias de tipo de rolos cilíndricos recirculantes, dadas as vantagens destas, como discutido no item 2.3.3. Além disto, se observa na atualidade uma forte tendência ao seu uso por parte dos fabricantes de MF-CNC. Do ponto de vista técnico, a primeira alternativa parece mais viável, sendo que a segunda alternativa seria a ideal, mas que representaria um alto investimento para a aquisição e montagem na máquina. Em síntese, decidiu-se manter as guias nas condições em que estas se encontravam, dado que não se observou nenhum comportamento irregular ao serem inspecionadas visualmente e ao se operar manualmente a máquina para realizar a usinagem de uma peça. Além disto, constatou-se o baixo atrito que se opõe ao movimento dos carros.

Tanto para a mesa, quanto para o carro, o sistema consta de duas guias cilíndricas; em cada uma delas transitam duas buchas montadas em blocos de aço, que por sua vez estão fixos à mesa e ao carro, respectivamente. Não foi possível identificar o fabricante das guias, por isso teve de ser feita uma estimativa das características destas guias, baseada nas suas dimensões e nos dados apresentados por um fabricante. Esta estimativa é apresentada a seguir [THK]:

Diâmetro inscrito internamente na bucha:	50.8 mm
Diâmetro externo da bucha:	76.2 mm
Comprimento da bucha:	101.6 mm
Capacidade de carga dinâmica:	3882 N
Capacidade de carga estática:	7938 N

A vida deste tipo de componentes é dada em km e pode ser estimada seguindo as recomendações de cada fabricante. Os principais parâmetros que determinam esta propriedade são [THK]:

- Capacidade de carga dinâmica, que corresponde à carga constante máxima, que é suportada por uma bucha e que dá uma probabilidade de 90% de alcançar um percurso igual a 50 km, quando os elementos rolantes são esferas e 100 km quando se trata de rolos.
- Carga radial a ser suportada por cada bucha.
- f_H fator relacionado com a dureza da guia. É considerado, para durezas menores de $58 R_c$.
- f_T fator relacionado com a temperatura das superfícies em contato, é igual a 1 para temperaturas \leq que 100°C .
- f_C Fator de contato, depende do número de buchas em cada eixo.
- f_W fator de carga, o qual é afetado pelas vibrações e impactos.

Foi observado que o estado da superfície das guias poderia ser melhorada. Apresentam oxidação superficial e sinais de desgaste pelo que seria recomendável retificar as guias o que é possível, pois segundo os fabricantes, a profundidade da dureza vai de 0.6 a 2 mm. Além disso, pelo fato de as buchas serem abertas, é possível implementar um sistema de ajustagem por aperto para compensar a diminuição do diâmetro da guia no processo de retificação [NSK] , [THK].

4.4.2 FUSOS DE ESFERAS RECIRCULANTES

No que diz respeito aos fusos de esferas recirculantes, a máquina conta com fusos de 25 mm de diâmetro e passo de 4 mm. Nem foram previstas alternativas para a função dos fusos dado que seu uso é uma prática comum em MF-CNC e foi observado que apresentam boas condições de funcionamento.

Foram estimadas as seguintes características, baseadas nas dimensões do fuso em catálogos correspondentes:

Tipo de apoio:	Fixo-suportado
Comprimento:	$L_x = 713 \text{ mm}$ $L_y = 537 \text{ mm}$
Diâmetro nominal (d):	25 mm
Passo (P):	4 mm
Diâmetro das esferas (Da):	2.381 mm

Diâmetro descrito pelo centro da esfera (d_p):	25.3 mm
Diâmetro da raiz do fuso (d_1):	22.8 mm

Foi verificada a capacidade de carga axial e a velocidade crítica para cada eixo da máquina, baseando-se em catálogos de outros fabricantes [THK], [NSK]. Os resultados obtidos são:

Eixo X

Capacidade de carga axial por flambagem (P):	5400 Kg
Valor máximo permissível por resistência à tensão:	5400 Kg
Velocidade crítica (de ressonância) (N_c):	6761 rpm
Velocidade permissível (segundo a relação $d_p N \leq 70000$)	$N \leq 2766$ rpm

Eixo Y

Capacidade de carga axial por flambagem (P):	9534 Kg
Valor máximo permissível por resistência à tensão:	5400 Kg
Velocidade crítica (de ressonância) (N_c):	11919 rpm
Velocidade permissível (segundo a relação $d_p N \leq 70000$)	$N \leq 2766$ rpm

Como se pode ver, o valor da carga permissível para este tipo de fuso é bastante altas, e velocidade permissível está bem perto do valor de 2000 rpm, necessária para atingir uma velocidade rápida de deslocamento de 8 m/min, segundo foi preestabelecido no item 3.4. Portanto se consideram adequados os fusos para a aplicação dada.

4.4.3 SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE POSIÇÃO

Entre as possíveis alternativas para o sistema de medição, poderiam considerar-se a utilização de:

Sistema de medição indireta (rotativos):

Codificadores ópticos rotativos "encoders".
"Resolvers".

Escalas rotativas indutivas (Inductosyn)
[Weck III,84].

Sistema de medição direta (translativos):

Escalas eletro-ópticas.

Escalas indutivas (Inductosyn)
[Weck III,84].

Do ponto de vista técnico, em princípio, resulta melhor a utilização dos sistemas de medição direta; outra restrição existente é imposta pelo CNC utilizado, cuja entrada requer sinais digitais de posição. Isto obriga a adotar sistemas de medição que forneçam informação digital, eliminando alternativas como os sistemas indutivos e "resolvers", que fornecem sinais analógicos, o que levaria à necessidade de implementar circuitos eletrônicos para conversão dos sinais analógicos em digitais. Por outro lado, sistemas como as escalas eletro-ópticas ou "encoders" fornecem sinais digitais diretamente, sendo pois as melhores alternativas a serem utilizadas no trabalho desenvolvido na máquina. A utilização de "encoders" geralmente está associada à calibração com LASER; isto requer que o CNC usado apresente a possibilidade de compensação dos erros detetados através de calibração; como o CNC aplicado neste trabalho não apresenta esta característica, não se recomenda a utilização de "encoder" na máquina, dado que afetaria negativamente a precisão e repetibilidade da máquina. Conclui-se pois que o melhor sistema de medição a ser considerado é a escala eletro-óptica.

No sentido dos custos, a solução mais econômica é o "encoder", de custo relativamente baixo comparado ao das escalas eletro-ópticas.

Por tanto, o sistema de medição incorporado à máquina foram umas escalas eletro-ópticas, dadas as características da máquina e do CNC já mencionadas.

Estas escalas eletro-ópticas são fabricadas pela DIADUR, modelo LS 403, para os eixos X e Y. Estas têm a característica de serem um transdutor

incremental de alta resolução e confiabilidade, quando instaladas conforme as indicações do fabricante.

As características das escalas DIADUR LS 403 são as seguintes.

Dados Mecânicos

Resolução básica	20 μm
Coeficiente de dilatação	$11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Nº de marcas de referência	2
Precisão do sistema	$\pm 5\mu\text{m}, \pm 3\mu\text{m}$ (Para comprimentos menores de 1240 mm)
Veloc. de deslocamento máximo	48 m/min
Aceleração máxima permitida	30 m/s^2
Força de avanço	$\leq 5\text{N}$
Temperatura de serviço	0 ... 50 °C
Umidade relativa	$\leq 80\%$

Caraterísticas Elétricas

Fonte de luz	Lâmpada miniatura 5V $\pm 10\%$ /120 mA/0,6W
Elementos sensores	Células fotoelétricas dispostas em "push pull"
Sinais de saída	2 sinais de corrente senoidais defasados de 90° com amplitude de 7 a 16 μA com carga de 1K Ω . 1 sinal de corrente de pico usado como referência com amplitude de 28 μA com carga de 1K Ω .
Eletrônica para condicionamento de sinais	amplificação de impulsos, eletrônica de interpolação, contadores e CNC
Resolução	10, 5, 2, 1, 0.5 μm conforme a eletrônica utilizada, (5 μm no caso do CNC usado).

Estas escalas já se encontravam no LHW; para sua instalação na máquina, foi necessário projetar e fabricar um sistema de ajustagem, para compensar os defeitos de fabricação apresentados pela máquina, nas partes em que se decidiu instalar as escalas. É importante mencionar que as escalas devem ser instaladas o mais perto possível do plano de usinagem e ao mesmo tempo longe das fontes de calor, visando facilitar o acesso para manutenção e também deixá-las protegidas de respingos, cavacos, fluido de corte, sujeiras, etc.

O lugar escolhido para a montagem das escalas foram blocos de aço que servem como alojamento para as buchas das guias lineares, que estão fixados tanto à mesa (eixo X) quanto ao carro (eixo Y). Estas superfícies tinham sido usinadas de uma maneira grosseira, e também não garantiam o paralelismo requerido com a guia; além disto apresentavam um comprimento menor que o necessário para instalar as escalas. Porém este era o melhor lugar, por estar perto do plano de usinagem, ter fácil acesso e proteção contra contaminantes.

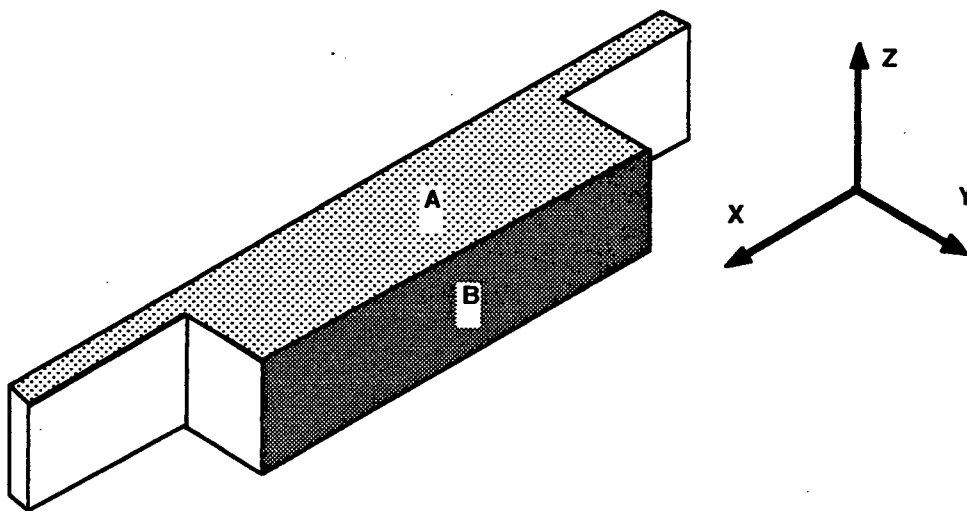


Figura 4.4 Planos de alinhamento das escalas

O primeiro passo dado no projeto de instalação das escalas foi projetar placas que servem de extensão da superfície de fixação de acordo com os

requisitos de montagem que definem um paralelismo de 0.1 mm das superfícies A e B (figura 4.4) com respeito à guia. Foi necessário projetar um dispositivo que permitisse ajustagem em três eixos de rotação, sendo que estes ajustes são independentes entre si. Foi proposta uma placa de fixação na qual seria fixada a escala através de dois parafusos, sendo que na escala existem furos alongados (rasgos), o que permite girar a guia em torno do eixo Y, segundo figura 4.5 e com isto obter o paralelismo da superfície A ao eixo de movimento. Já a rotação sobre os outros dois eixos se dá por meio da placa de fixação segundo mostra a figura 4.5. Nela podem ser identificados os pontos "a", "b", "c" e "d" dos quais, os pontos "a" e "b", junto com o "d" originam um sistema de ajustagem baseado em três pontos de apoio, que permite a rotação da superfície (placa de fixação) sobre dois eixos. Assim a variação relativa dos parafusos "a" e "b" permite a rotação da placa de fixação sobre o eixo X (figura 4.4) . Os pontos "c" e "d", são pontos de fixação da placa de fixação às placas de extensão, que por sua vez estão fixas na máquina; estes pontos estão providos de calotas esféricas, para adaptar a superfície da máquina à superfície da placa de fixação rotacionada para ajustagem. Por último, no ponto "d" se cumprem duas funções uma, como já foi dito, de fixação, e outra, que também já foi mencionada, é a de ponto de apoio ajustável, por meio de um "ajustador" que vai parafusado na placa de fixação e além disso tem um furo por onde passa o parafuso que fixa esta à placa de extensão. A rotação do ajustador é a que permite a rotação da placa de fixação sobre o eixo "Z" dando assim a possibilidade de ajustar o paralelismo da escala com a superfície B.

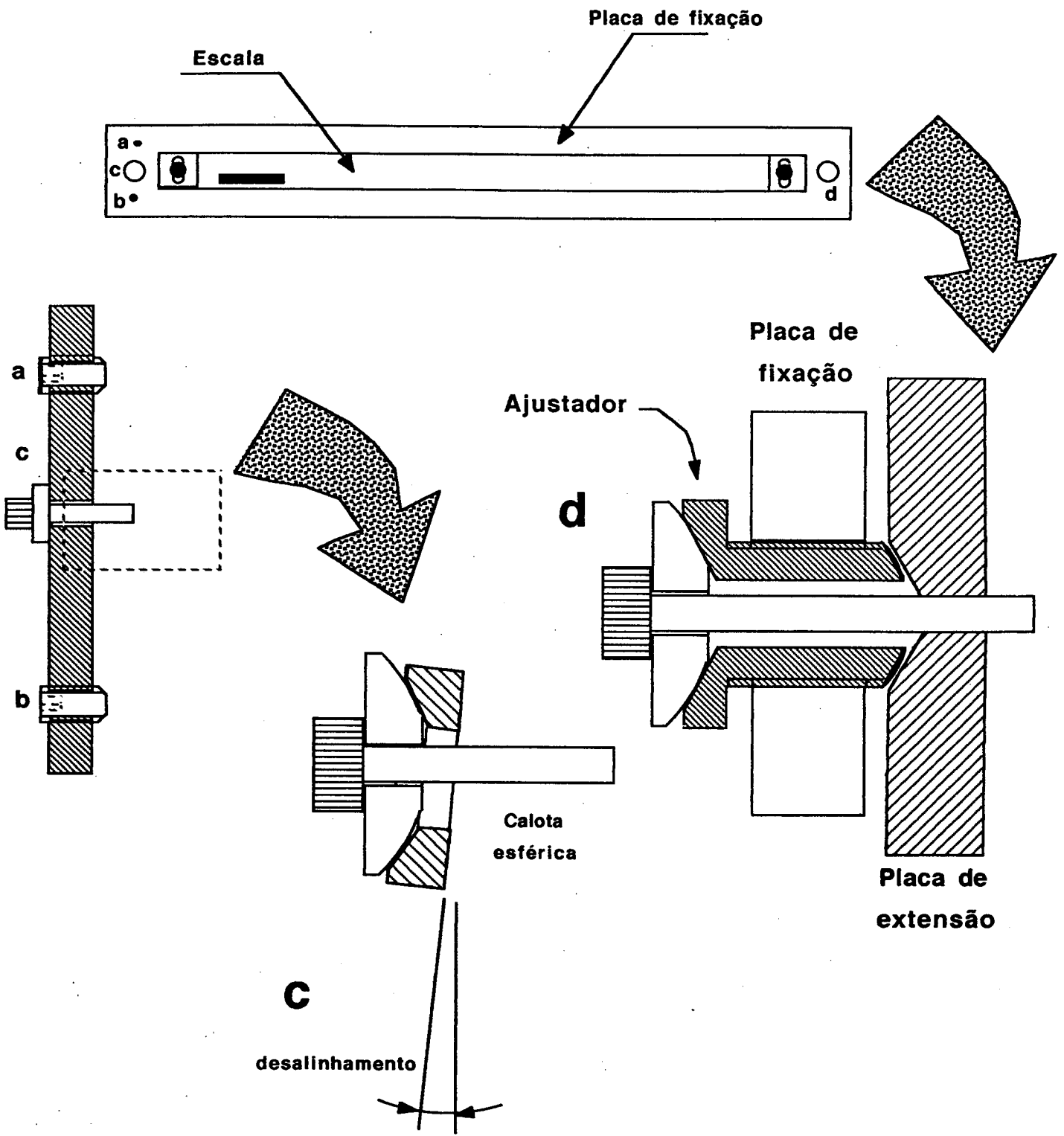


Figura 4.5 dispositivos de montagem das escalas eletro-ópticas

4.4.4 ACIONAMENTOS DE AVANÇO

Numa máquina-ferramenta, podem distinguir-se dois tipos de acionamentos [Oliveira, 89]:

Acionamento Principal.
Acionamentos de avanço.

No que segue, será tratado o tema dos acionamentos de avanço. Se dará uma descrição mais detalhada sobre o que foi apresentado no item 2.2.3, orientando a discussão no sentido de clarear os detalhes a serem considerados na seleção de componentes para ditos sistemas.

Os acionamentos de avanço de uma máquina-ferramenta de comando numérico, se dividem em três partes principais:

- 1) Eletrônica de comando.
- 2) Fonte de potência.
- 3) Servo-motor.

Estas três partes constituem um sistema integrado, de tal maneira que o comportamento de uma das partes, sempre é fortemente dependente dos outros componentes

Antes de passar a tratar sobre estas partes, será feita uma breve análise sobre o que é requisitado a um acionamento de avanço, em termos das atuais necessidades no campo das máquinas-ferramenta.

4.4.4.1 REQUISITOS PARA OS ACIONAMENTOS DE AVANÇO PARA MF-CNC

Entre os principais requisitos exigidos às MF-CNC estão a precisão e a repetibilidade, entendendo-se por precisão a maior diferença entre os valores extremos de $X + 3\sigma$ e $X - 3\sigma$, para um conjunto de diferentes movimentos de posicionamento "X", independentemente da posição destes pontos e da direção do movimento, " σ " é o desvio padrão correspondente a uma quantidade

"n" de posicionamentos em cada ponto "X". Isto se aplica tanto para movimento unidirecional, quanto bidirecional no mesmo eixo da máquina, sendo que a faixa será maior e a precisão menor quando se trata de movimento bidirecional. Já a repetibilidade e a maior banda $X + 3\sigma$ e $X - 3\sigma$, para um só dos pontos de posicionamento "X" em um eixo da máquina, seja este atingido unidirecionalmente ou bidirecionalmente [Childs, 91], segundo se mostra na figura 4.6

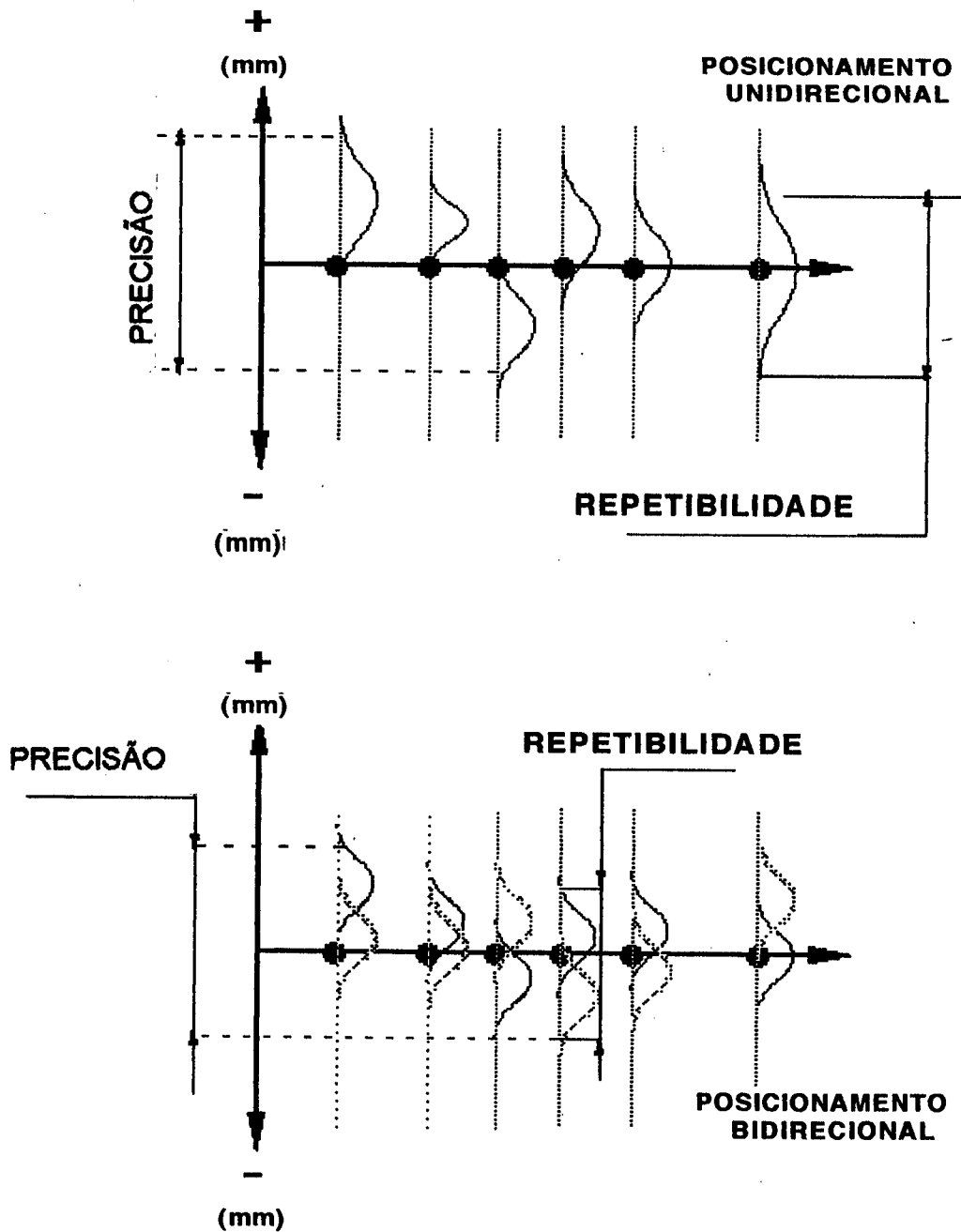


Figura 4.6 Precisão e repetibilidade segundo Norma ISO 230-2 [Childs, 91]

Dadas estas características associadas aos erros de posicionamento e considerando a necessidade de atingir os movimentos o mais rápido possível, se faz necessário estabelecer uma série de requisitos da dinâmica e do acionamento de avanço propriamente dito. Gross [Gross, 83] assinala a seguinte lista de requisitos para um sistema de posicionamento de máquina-ferramenta nos estados estacionário e não estacionário:

Estado Estacionário:

- 1-Fornecer o torque requerido para superar a força de atrito e as forças próprias da usinagem, assim como a capacidade de poder fornecer torques superiores ao valor nominal por curtos intervalos de tempo.
- 2-Uma alta rigidez de velocidade ($\Delta M/\Delta n$), que permita manter pouca variação da velocidade para variação na força de usinagem.
- 3-Faixa de regulação de velocidade de 1:10 000 ou maior
- 4-Capacidade de posicionamento em pequenos incrementos (de 1 a 2 μm).
- 5-Deve existir linearidade entre o comando de velocidade e o valor de velocidade efetiva.

Estado Não Estacionário:

- 1-Boa resposta transitória que permita mínimos desvios de contorno e suficiente qualidade superficial. Para isto é necessário manter a frequência angular nominal entre 100 e 400 Hz, e o coeficiente de amortecimento em aproximadamente 0.5.
- 2-Boa resposta a perturbações, necessária para garantir pequenos tempos de adequação após alteração na carga e para preservar pequeno o valor do desvio de posição temporário.

Outros autores por exemplo Younkin, acrescentam coloca alguns valores numéricos a serem respeitados:

- Controle de velocidade em baixíssimas velocidades de avanço (0.25 mm/min), isto é verificado na característica de "cogging" do servomotor.
- Aceleração menor a 0.15 g (1.47 m/s²).

-A rigidez da malha de controle de posição deve ser alta, da ordem de 7000 N/ μ m.

-Estabilidade do sistema, influenciada inversamente pelo valor da inércia refletida no eixo, pela largura de banda, que por sua parte também é proporcional a $\sqrt{(1/J_{\text{refletida}})}$ e pelo ganho da malha de velocidade.

-Finalmente é considerada a resolução, definida como o menor erro requerido para dar lugar a que aconteça o movimento. Esta característica é melhorada pelo aumento do ganho e da relação de transmissão. A resolução piora quando se apresenta "stick slip" e folgas [Younkin,90].

A literatura mostra alguns outros critérios a serem levados em conta para o bom desempenho do acionamento da MF-CNC, que são mencionados a seguir:

-O projeto da dinâmica do sistema deve ser orientado à obtenção de uma resposta rápida, isto é, constantes de tempo ≤ 20 ms .

- Trabalhar com base num coeficiente de amortecimento $D \approx 0.7$ [Weck III, 84].

Numa MF-CNC, os requisitos citados são atingidos pela interação dos diferentes componentes do sistema de posicionamento. Por causa disto, se justifica a importância de uma adequada seleção e dimensionamento do acionamento para uma determinada aplicação.

4.4.4.2 SERVO-ACIONAMENTOS

A eletrônica de comando, junto com a fonte de energia formam o que comumente é conhecido como servo-acionamento ou "Driver" . Este componente tem a função de converter a energia de alimentação em energia controlada e transmitida para o servo-motor acionado [Strenio, 1987].

CLASSIFICAÇÃO DOS "DRIVERS"

Uma primeira classificação se dá de acordo com o tipo de tensão que vai ser fornecida ao servo-motor, esta pode ser alternada (CA) ou contínua (CC).

Serão tratados aqui os drivers para servo-motores de corrente alternada por corresponderem estes à tecnologia mais recentemente desenvolvida; estes são classificados segundo várias características, associadas à conversão de potência [Jarc,87], sendo estas:

1-Tipo de dispositivo que efetua o chaveamento:

Podem-se mencionar os seguintes dispositivos:

-SCR's (retificadores controlados de silício) os quais requerem uma passagem por zero volts da tensão ânodo-cátodo para serem desligados, o que representa um atraso no tempo, além de apresentarem de elevado custo, mesmo para sistemas de baixa potência. Por este motivo seu uso está hoje restrito a sistemas de grande porte.

-Transistor de potência e tiristores GTO (Gate Turn Off): este tipo de semicondutores não requerem componentes adicionais para desligarem-se e interromper a corrente. Possuem preços mais baixos, porém, estão limitados no que diz respeito à potência, sendo direcionados a sistemas de pequeno porte. Apresentam também vantagens de redução no número e tamanho dos componentes, maior confiabilidade e eficiência.

-Transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Dispositivo de mais recente aparição no mercado, que combina a robustez do transistor bipolar junto com a porta controlada e a rapidez de corte do FET, permitindo uma frequência de chaveamento de 5 a 20 kHz [R & M, 90].

2-Tipo de tensão de entrada no inversor

Esta tensão, também chamada "DC Bus" é uma tensão de corrente contínua, que pode ser de amplitude constante ou variável, e obtida pela retificação e filtragem da corrente alternada da rede de alimentação.

3-Tipo de Inversor

Existem dois tipos de básicos de inversor:

- PWM (Pulse Width Modulation): Este tipo, parte de uma tensão constante, filtrada por um capacitor, que vem do "DC bus". Esta tensão é convertida em amplitude variável pela modulação da largura de pulso a uma alta frequência, para logo ser conduzida até as fases do motor com frequência e amplitude variáveis. Este sistema é um dos mais usuais nas máquinas-ferramenta de mediano porte. O blocodiagrama deste é mostrado na fig 4.7b

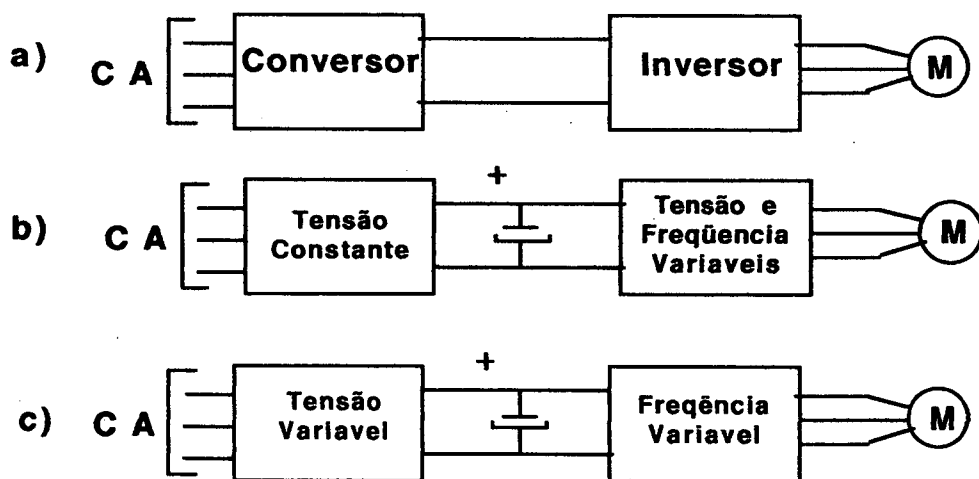


Figura 4.7 Diagrama de blocos do "Driver" CA

- VSI (Six Step Voltage Source Inverter): Neste tipo o conversor gera um sinal de tensão contínua variável e filtrada por um capacitor. O inversor simplesmente fornece esta tensão com uma frequência variável para as fases do motor. O blocodiagrama deste é mostrado na fig 4.7c

A parte de comando do servoacionamento C A se compõe de um controlador em malha fechada de velocidade, geralmente do tipo PI (Proporcional Integral) em cascata com um controlador de corrente, também em malha fechada que aciona o inversor, segundo se mostra na figura 4.8. Nesta figura pode-se observar também que a malha de controle de corrente, está dentro da malha de controle de velocidade. A primeira deve ter uma largura de banda maior que a segunda, esta por sua vez deve ter uma largura maior que a malha de controle de posição. Isto é a rapidez de resposta deve ser maior de dentro para fora para garantir a estabilidade do sistema

Existe um controlador de corrente para cada fase, onde se realiza uma comparação entre a corrente de referência e a fornecida pelo sensor, que deve ter uma resposta rápida para não introduzir atrasos. É gerado assim um sinal de erro de corrente; este é processado por um regulador dando lugar assim a um sinal de comando de tensão que, quando comparado com um sinal triangular de alta frequência gera a saída PWM para comandar os transistor de potência que alimentam a fase.

O controlador de velocidade é tipicamente do tipo proporcional integral (PI) que dá lugar a dois tipos de ganho: o tipo "P" que afeta diretamente na largura de banda da malha de velocidade. Já o ganho "I" promove uma maior "rigidez" para responder a perturbações de torque e reduzir o erro de estado estacionário de velocidade.

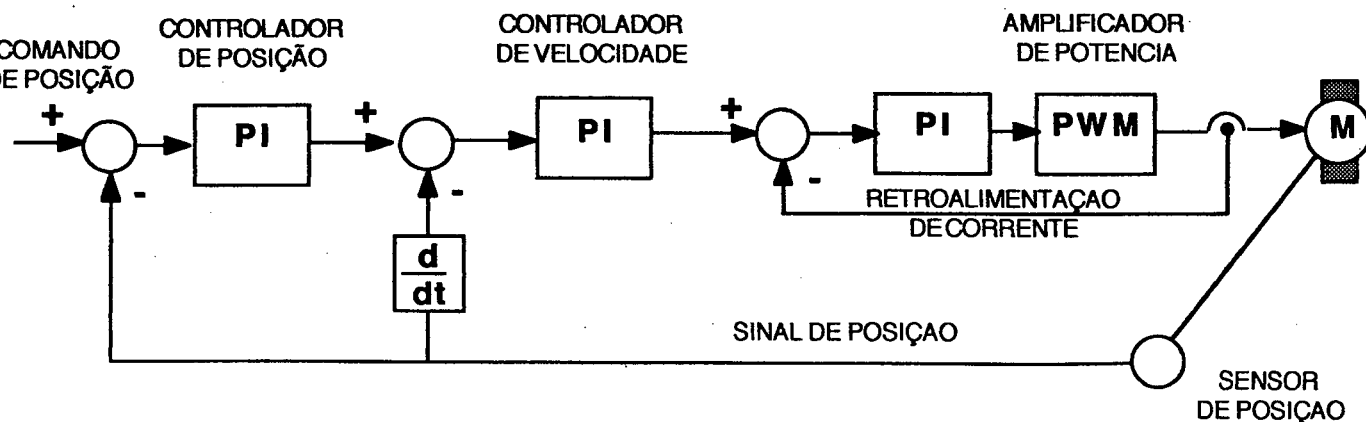


Figura 4.8 Diagrama de blocos da malha de controle de posição

4.4.4.3 SERVO-MOTORES

Os servo-motores guardam amplas diferenças construtivas com relação aos motores convencionais. Estas diferenças originam melhores características dinâmicas, sejam estes servo-motores de corrente alternada ou contínua, o que se traduz em aceleração e desaceleração suaves, redução das dimensões, maior densidade de fluxo magnético, e aparência mais esbelta. Os tipos mais utilizados em máquinas-ferramenta são:

-C.A. assíncronos (de indução)

de ímãs permanentes { -C.A. síncronos
-C.C. com escovas
-C.C. sem escovas

Uma ampla descrição destes tipos de servo-motores é apresentada por Campos [Campos, 92].

Com o intuito de apresentar as principais combinações de servos e drivers, se transcreve a tabela 4.1, tomada de Strenio [Strenio. 87].

4.4.4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS ACIONAMENTOS CA E CC

A tecnologia mais recente, coloca no mercado os servo-motores de corrente alternada, sejam estes de indução (assíncronos), ou de ímãs permanentes e sem escovas (síncronos). Deve ser esclarecido aqui, que se está entendendo como CA o caso onde as fases do motor são alimentadas por uma corrente senoidal. Estes servo-motores estão substituindo os servo-motores CC, embora estes tenham mostrado alta confiabilidade e bom desempenho, no que se refere à sua aplicação em máquinas-ferramenta. Por causa do que foi dito anteriormente, foi incorporada neste trabalho uma comparação entre ambos os tipos (ver tabela 4.2) com a intenção de esclarecer e apresentar as vantagens que possui um tipo de tecnologia sobre a outra.

Tabela 4.1 aplicações típicas de servoacionamentos.

COMPARAÇÃO DE SERVOACIONAMENTOS TÍPICOS										
COMBINAÇÃO SERVO/DRIVER	VALORES TÍPICOS						APLICAÇÕES TÍPICAS			
	Inércia Relativa do Rotor (Hz)	Largura de Banda relativa (rad/seg ²)	Aceleração Máxima (rpm)	Faixa de Velocidade Utilizável (Nm)	Capacidade Máxima de torque (kW)	Potência Máxima Contínua	Principais Vantagens	Principais Limitações	Requisitado	Exemplos
Servo AC, ímã permanente sem escovas (CC sem escovas) Inversor PWM	Baixa	200 Muito Alta	15000 Alta	0-3000 Alta	56	22	<p>Sem escovas</p> <p>Alta resposta</p> <p>Baixa inércia</p> <p>Alta aceleração</p> <p>Alto Torque a Alta Velocidade</p> <p>Baixa Manutenção</p> <p>Requerida.</p> <p>Melhor aceleração que em motores de Indução (Assíncronos) com Inversor PWM</p>	<p>Não disponíveis acima de 22kW</p> <p>Torque pico limitado a duas vezes o valor contínuo</p>	<p>Abaixo de 22 kW</p> <p>Baixa inércia refletida.</p> <p>Alta aceleração</p> <p>Apertada regulação de velocidade</p> <p>Ciclos pesados de Trabalho, Operação repetitiva o cíclica</p> <p>Alto torque a alta velocidade</p>	<p>Alimentadores de banda e indexados</p> <p>Robos</p> <p>Maneijo de materiais</p> <p>Máquinas "Pick and Place"</p> <p>Linhas de Pressas de Impressão</p> <p>Linhas de Processos Texteis</p>
Servo AC de Indução (Assíncrono) com Inversor PWM	Media	100 Alta	4000 Media	0-3000 Alta	140	22	<p>Sem escovas</p> <p>Boa resposta</p> <p>Alto torque a alta velocidade</p> <p>Baixa Manutenção</p>	<p>Não disponíveis acima de 22 kW</p> <p>Torque pico limitado a duas vezes inércia maior à dos servos A.C. sem escovas com inversor PWM</p> <p>Alto torque a alta velocidade</p>	<p>De 11 até 22 kW</p> <p>Inérciar refletida media</p> <p>Apertada regulação de velocidade</p> <p>Ciclos pesados de Trabalho, Operação repetitiva o cíclica</p>	<p>Máquinas-Ferramentas dedicadas</p> <p>Manip. de materiais</p> <p>Máquinas "Pick and Place"</p> <p>Linhas de Processos Texteis</p> <p>Alimentadores</p>
Servo CC ímã Com inversor PWM	Media	100 Alta	4000 Media	0-2000 Media	56	11	<p>Ampla variedade disponível</p> <p>Boa resposta dinâmica, melhor do que a obtida com Inversor a SCR</p>	<p>Desgaste das escovas</p> <p>Não disponíveis acima de 11 kW</p> <p>Torque pico limitado a duas vezes o valor contínuo</p> <p>Maior inércia do que servos AC sem escovas PWM</p>	<p>Abaixo de 11 kW</p> <p>Media inércia refletida</p> <p>Apertada regulação de velocidade</p>	<p>Máquinas-Ferramentas</p> <p>Linhas de Processos Texteis</p>
Servo CC de bobina móvel com Inversor PWM	Baixa	200	15000	0-2000	22	4	<p>Baixa inércia</p> <p>Alta resposta</p> <p>Perfil curto</p>	<p>Desgaste das escovas</p> <p>Não disponíveis acima de 4 kW</p> <p>Torque pico limitado a duas vezes o valor contínuo</p>	<p>Abaixo de 4 kW</p> <p>Baixa inércia refletida</p> <p>Apertada regulação de velocidade</p> <p>Perfil curto</p>	<p>Robos</p> <p>Máquinasque requerem mínimo comprimento do motor</p>

Tabela 4.2 Comparação das características dos servo-motores CC e CA
[Oliveira, 89] [Blauth,88]

CARATERÍSTICA	SERVO-MOTOR CC	SERVO-MOTOR AC
Manutenção.	Freqüente por causa do desgaste das escovas.	Muito menor por não possuir escovas.
Altas rotações e Torque.	Limitados por causa das escovas devido à produção de arcos e ruído.	Curva quase constante de torque vrs rpm, altas rotações podem ser atingidas, dado o chaveamento eletrônico.
Torque com máquina parada (T_0).	Gera aquecimento localizado na armadura.	Não apresentam este problema.
Peso		50 % <
Volume		20-50% <
Inércia (J_M)		75-65% <
Tempo de aceleração (T_H)		Menores para iguais condições de T_0 e carga externa
Perdas térmicas	É gerado tanto no rotor quanto no estator, sendo mais difícil remover calor do rotor.	Só possui enrolamentos no estator, onde o calor é removido com maior facilidade.

4.4.4.5 PARÂMETROS A SEREM CONSIDERADOS NA SELEÇÃO DOS ACIONAMENTOS

Os parâmetros referentes aos servo-motores CA, que são fornecidos pelos fabricantes, podem classificar-se em dois grupos: os elétricos e os mecânicos. Na seqüência são apresentados alguns deles, considerados de importância na seleção do servo-motor que melhor satisfaz um requerimento dado.

Parâmetros mecânicos:

- T_0 Torque com rotor bloqueado: É o torque produzido com o rotor trabaado (Nm).
- T_p Torque de pico: Torque que pode ser atingido durante um curto período de tempo, 200 ms em alguns casos, (Nm).
- J_M Momento de inércia do rotor do motor: Geralmente não inclui a inércia de tacogerador, "encoder", resolver etc. acoplados ao rotor (kg m^2)
- T_f Torque causado pelo atrito estático, (Nm).
- K_{pv} Coeficiente de atrito viscoso, (Nm/krpm).
- R_{TH} Resistência térmica, associada com a dissipação de calor da carcaça do motor, ($^{\circ}\text{C/W}$).
- τ_{TH} Constante térmica: tempo requerido para alcançar 63,2% da temperatura final, a um valor determinado de corrente fornecida (min).
- n Velocidade máxima de rotação (rpm).

Parâmetros elétricos:

- K_T Constante de torque, relaciona o torque com a corrente que passa pelo enrolamento do estator; está associada com a constante elétrica K_E , (Nm/A).
- K_E Constante elétrica do motor, relaciona a força contra-eletromotriz gerada pelo rotor com a velocidade de rotação do mesmo, no caso de alimentar as fases do servo-motor com corrente senoidal, se divide por um fator de $\sqrt{3}$, (V/krpm).

K_E [V/rad/s] = K_T [Nm/A]. Ambas duas constantes são iguais quando se representam em unidades compatíveis

- I_0 Corrente de rotor bloqueado (A).
- I_p Corrente Pico (A).
- U_a Tensão máxima de alimentação (V).
- R_a Resistência entre fases a 25 $^{\circ}\text{C}$, (Ω).
- L_a Indutância entre fases, no caso de alimentar as fases do servo-motor com corrente senoidal, se divide por um fator de $\sqrt{3}$, (mH).

Imãs Materiais dos imãs permanentes, podem ser ferrita, Samario-Cobalto Neodímio-Ferro-Boro e Al-Ni-Co

N_p Número de Pólos.

N_f Número de fases.

Alguns dos parâmetros associados com o servo-acionamento que vai controlar e acionar o servo-motor são:

Tipo de tensão de entrada (V, 1 ou 3 fases, Hz)

Corrente de entrada (A CA).

Tensão do barramento CC (V CC).

Corrente Pico de alimentação do servo-motor, (A),

Temperatura ambiente de funcionamento (°C)

Necessidade de ventilação.

Capacidade de frenagem regenerativa

4.4.5 RECOMENDAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO DE SERVO-MOTORES E SEUS SERVO-ACIONAMENTOS

A função básica a ser executada nos acionamentos de avanço de máquinas-ferramenta, é a de movimentar uma peça em relação a uma ferramenta, geralmente também em movimento. Podem ser reconhecidos dois tipos de movimentos: Um, de aproximação, que se dá à máxima velocidade, e outro é o de usinagem propriamente dito, que é quando se dá a interação entre peça e ferramenta; em alguns casos de usinagem a peça é deslocada e em outros casos a ferramenta. Este movimento de avanço se dá a um nível de velocidade bem menor do que o de aproximação. O comentário anterior permite diferenciar dois tipos de requisitos para o sistema de avanço: Durante a aproximação se tem-se exigência do tipo dinâmico, pois se precisa acelerar a carga até atingir a velocidade máxima, tendo para ser vencida basicamente a inércia da carga, já que neste caso a carga de atrito é desprezível. Já no movimento de avanço, a parte dinâmica passa a ser de menor importância por causa da velocidade menor a ser atingida; ao mesmo tempo é requerido movimentar a carga com velocidade constante vencendo um torque externo resultante da ação de corte.

4.4.5.1 DIMENSIONAMENTO DE SERVO-MOTORES

Para iniciar o processo de dimensionamento de um servo-motor para aplicações em máquinas-ferramenta, é recomendado estabelecer os requisitos que serão solicitados pela carga ao servo-motor. Basicamente, trata-se de determinar os seguintes parâmetros:

Velocidade máxima requerida pela aplicação (n_c).

Torque solicitado pela carga (T_c) decompondo este em:

Torque causado por atrito (T_f).

Torque externo resultante da ação de corte (T_{ex}).

Aceleração requerida (a_c).

A velocidade da carga n_c em rpm está associada com a velocidade de avanço V_f (em m/min) ou de aproximação V_a , através do passo (P) do fuso de esferas recirculantes, assim:

$$V_c = P * n_c \quad (4.2)$$

O cálculo do torque T_c é apresentado com ampla clareza na literatura [Gross, 83], [PacSi], pelo que este ponto não será repetido neste trabalho.

O conhecimento dos parâmetros mencionados permite realizar uma primeira seleção de um servo-motor capaz de fornecer o torque e a velocidade exigidos pela carga. A seguir se desenvolverá um processo iterativo para otimizar esta seleção.

A literatura apresenta diferentes análises realizadas com o propósito de otimizar a seleção de um servo-motor em termos da relação de transmissão N_1 do redutor [Shneydor,89], [Kim, 90], [Erickson,90].

$$N_1 = \frac{n \text{ do servo-motor}}{n_c \text{ do fuso de esferas recirculantes}} \quad (4.3)$$

Os efeitos da relação de transmissão já foram estudados por Krüger, usando diferentes valores de N_1 em redutores de correias sincronizadas os quais tinham uma relação N_1/N_{ot} em torno da unidade (0,89 a 1,7). Se concluiu também que para relações baixas de transmissão, se apresentam

maiores problemas de oscilações e ressonâncias, apontando que a causa deste problema é o maior comprimento de correia que fica livre, já com relações maiores de transmissão são envolvidas polias de maior diâmetro pelo que se diminui o comprimento livre para uma distância entre centros constante [Krüger,93].

Alguns dos critérios seguidos na procura do valor de N_{ot} são os apresentados a seguir:

- Transferência máxima de energia cinética.
- Torque de pico mínimo solicitado ao motor.
- Perdas térmicas por efeito Joule mínimas.

TRANSFERÊNCIA MÁXIMA DE ENERGIA CINÉTICA

No que diz respeito à transferência máxima de energia cinética, trata-se de igualar a energia cinética da carga, que se move a uma certa velocidade V_c (m/min), com a do servo-motor, que gira a uma rotação de n (rpm); chegando-se à seguinte expressão [Erickson,90]:

$$N_{ot} = \sqrt{J_c / J_M} \quad (4.4)$$

onde:

$N_{ot} =$	Relação ótima de transmissão do redutor.
$J_c =$	Momento de inércia da carga $\{ m_{tot} (P/2\pi)^2 \}$
$m_{tot} =$	massa total a ser movimentada, inclui peça, carros da máquina etc. (kg)
$P =$	passo do fuso de esferas recirculantes.
$J_M =$	Momento de inércia do rotor do servo-motor (kg m ²)

TORQUE DE PICO MÍNIMO

Na procura de um valor de N_1 para o qual o torque de pico solicitado pela carga ao motor seja mínimo, Shneydor desenvolveu um processo no qual chega à seguinte expressão:

$$N_{Tp} = \sqrt{\frac{T_{exp} + J_c a_{cp}}{\eta J_M a_{cp}}} \quad (4.5)$$

onde:

- Os subíndices p significam a solicitação de pico
- η = Eficiência do redutor usado.
- N_{Tp} = Relação de transmissão ótima para torque de pico mínimo.

Uma rápida inspeção da expressão anterior permite notar que, dado que em acionamentos de avanço de máquinas-ferramenta, o torque externo é nulo para processos de aceleração, a expressão (4.5) fica da seguinte maneira:

$$N_{Tp} = \sqrt{\frac{J_c}{\eta J_M}} \quad (4.5.1)$$

Esta expressão é bem semelhante à (4.4) a qual só apresenta como diferença a incorporação da eficiência do sistema de transmissão [Shneydor,89].

MÍNIMAS PERDAS TÉRMICAS POR EFEITO JOULE

Os cálculos para determinar a relação de transmissão ótima do ponto de vista das perdas de calor por efeito Joule, dão lugar a uma expressão mais complexa, sendo a seguinte:

$$N_Q = \sqrt{\frac{\sqrt{J_c^2 \cdot a^2 \cdot c_{rms} + T^2 \cdot ex_{rms} + 2J_c \cdot ac_{rms} \cdot Tex_{rms}}}{\eta \cdot J_M \cdot aL_{rms}}} \quad (4.6)$$

Usando os argumentos supra-mencionados, a expressão (4.6) pode ser resumida como segue:

$$N_Q = \sqrt{\frac{J_c}{\eta \cdot J_M}} \quad (4.6.1)$$

cujo lado direito é idêntico ao da equação (4.5.1). Pode se concluir que, para aplicações em máquinas-ferramenta o valor ótimo de relação de transmissão é tal que otimiza os três critérios pré-estabelecidos.

O segundo passo para dimensionar o servo-motor é o cálculo do valor de N_{ot} segundo já foi indicado, para aí então passar a verificar se são satisfeitos outros requisitos como os que se mencionam a seguir:

Torque de Pico:

O torque de pico, é o valor requisitado pela carga para ser fornecido no processo de aceleração da mesma. A aceleração recomendada para máquinas-ferramenta está na faixa de 0,8 até 1,5 m/s^2 . Por outro lado também é recomendado um tempo de aceleração $T_H \leq 100$ ms para atingir a velocidade de aproximação, partindo de zero [Gross,83], [Younkin,90].

O requerimento dinâmico a ser atingido é o que relaciona o torque de pico do motor com o da carga, este último, associado com a aceleração do sistema de posicionamento. O critério a ser satisfeito pode ser direcionado de duas maneiras: A primeira seria a de satisfazer a aceleração a_c pre-estabelecida; como uma segunda possibilidade, se consideraria o tempo de aceleração T_H requerido para levar a carga à velocidade préestabelecida.

$$0,8 \leq a_c = \frac{T_p P}{N_1 J_{eq} 1000} \leq 1,5 \text{ m/s}^2 \quad (4.7)$$

$$T_H = \frac{\pi J_{eq} n_c N_1}{30 T_p} \leq 100 \text{ ms} \quad (4.8)$$

donde J_{eq} = Momento de inércia equivalente da carga refletido no eixo + o momento de inércia do rotor (kg m^2)

Torque Médio:

O uso do redutor multiplica o torque transmitido pelo motor, de tal forma que se pode escolher um motor com $T_0 < T_c$. Isto permite aproveitar a

característica que têm os servo-motores CA de manter o torque quase constante numa faixa bastante ampla de velocidades esta vantagem permite o uso de servomotores menores. Ficam verificadas as seguintes desigualdades:

$$T_0 \geq T_c/N_1 \quad (4.9)$$

$$n \geq n_c N_1 \quad (4.10)$$

Por último, no seu estudo, Kim conclui que, quanto menor é a constante de tempo mecânica do motor τ_{mec} , também o calor dissipado é mínimo. então o problema de otimização da seleção de um servo-motor pode ser formulado em termos de selecionar o servo com menor τ_{mec} e que satisfaça às desigualdades supra-mencionadas [Kim, 90]:

$$\tau_{mec} = \frac{R_a J_m}{K_T^2} \quad (4.11)$$

O procedimento descrito nesta parte pode ser resumido no seguinte fluxograma.

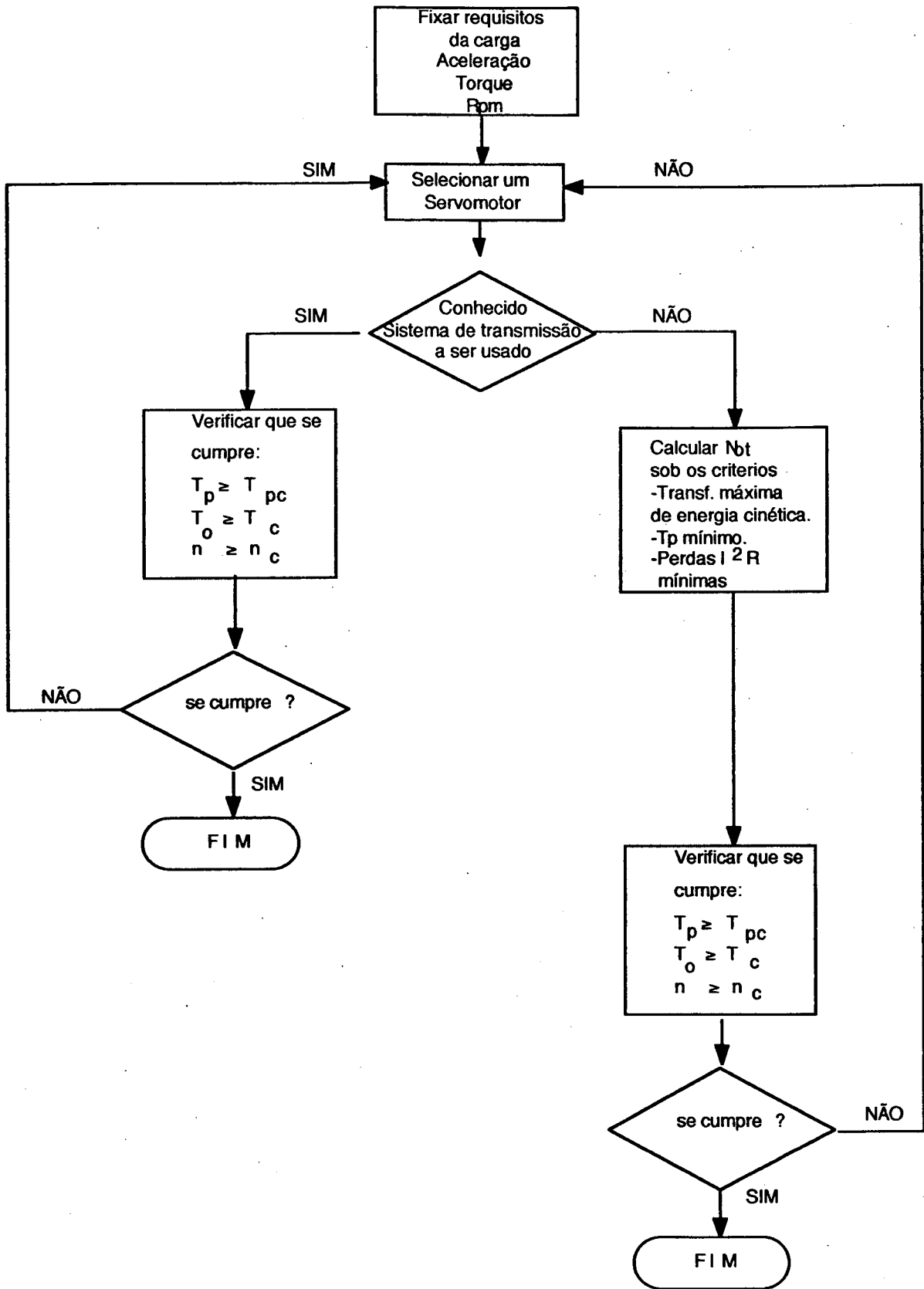


Figura 4.9 Fluxograma do procedimento proposto para otimização da seleção de servo-motores

4.4.5.2 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO PROPOSTO PARA OTIMIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE SERVO-MOTORES

Esta seção esta direcionada a realizar uma experiência de aplicação do procedimento proposto no ítem anterior. Trata-se da seleção de um servo-motor para a movimentação do eixo X da fresadora Pratt & Whitney. Neste caso foram fixados os seguintes parâmetros a serem satisfeitos pelo servo-motor com respeito à carga proposta:

- Torque médio = 2,66 Nm
- Rotação do fuso de esferas = 2000 rpm
- Aceleração requerida $\geq 0,8 \text{ m/s}^2$ e $\leq 1,5 \text{ m/s}^2$
- Inércia da carga = $0,381 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$

O cálculo da inércia da carga foi feito como segue:

$$J_{CX,Y} = J_{T+W} + J_{FER}$$

$$\text{Onde } J_{T+W} = (m_T + m_W) (P/2\pi)^2$$

$$J_{FER} = 0.77 \times 10^{-12} (d)^4 L_{X,Y}$$

Com os seguintes dados:

- m_W = 165 kg (massa estimada de uma peça)
- m_{TX} = 246 kg (massa carro eixo X)
- m_{TY} = 450 kg (massas dos carros eixos X + Y)
- d = 25mm (diâmetro dos fusos de esferas recirculantes)
- L_x = 713 mm (comprimento fuso eixo X)
- L_y = 537 mm (comprimento fuso eixo Y)

Efetuando os correspondentes cálculos:

$$J_{CX} = 0.381 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$$

$$J_{CY} = 0.410 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$$

Foi avaliada uma série de servo-motores tanto do tipo sem escovas e corrente alternada, quanto os de corrente contínua com escovas. Foram realizados cálculos de:

- N_{ot} segundo as equações (4.4), (4.5.1) e (4.6.1); considerando uma eficiência (η) unitária para o sistema de transmissão, com o propósito de simplificar os cálculos, deixando também liberdade para variar o tamanho e o material das polias, para poder aproximar o valor de N_1 , que corresponde ao valor real da dita relação de transmissão, ao de N_{ot} .

- T_H , o cálculo deste tempo de aceleração é baseado na equação (4.8).

- a_c , aceleração máxima da carga, calculada segundo a equação (4.7).

Para iniciar a análise dos resultados obtidos, foi feita uma comparação segundo as relações (4.7), (4.8), (4.9) e (4.10). Também foi calculada a constante de tempo de cada servo-motor, segundo a equação (4.12). Os resultados deste processo, são apresentados a seguir na tabela 4.3

Tabela 4.3 Cálculos e comparações para seleção de servo-motores.

SELEÇÃO DE SERVOMOTORES												
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
DADOS DA CARGA												
Torque Tc (Nm)	2,661											
Rotação nc (rpm)	2000											
Inercia Jc (kgm ²)	0,00038											
Aceleração (m/s ²)	—											
Inercia da polia (kgm ²)	0,00009	0,00145	0,00047	0,00026	0,00253	0,00253	0,00253	0,01938	0,00737	0,00423	0,00274	0,00997
Passo do fuso (mm)	4											
Dados do servomotor												
Modelo/fab.	3007/R&M	3016/R&M	4030/R&M	4050/R&M	R32/PacSci	R33/PacSci	Supertorq/2,2	Supertorq/4,5	Siem/2,2	Siem/4,5	Siem/7,0	
Torque medio T0 (Nm)	0,79	2,26	3,4	6,8	1,6	2,4	2,2	4,5	2,2	2,2	4,5	7
Torque pico Tp (Nm)	2,5	4,9	8,9	13,5	7,4	11	4	5,1	2,5	2,5	4,5	8
Inercia JM (kgm ²)	0,00003	0,00008	0,00025	0,00046	0,000051	0,000072	0,0024	0,0042	0,0012	0,0022	0,0022	0,0048
Rotação máxima n (rpm)	5000	5000	4000	4000	7000	6000	3000	3000	3000	3000	3000	2000
Inercia da polia acop. ao motor	0,00026	0,00026	0,00016	0,00026	0,00078	0,00026	0,00737	0,00253	0,00138	0,00094	0,00094	0,00332
Cte de Torque (Nm/A)	0,28	0,28	0,50	0,50	0,49	0,67	0,58	0,56	0,48	0,46	0,46	0,74
Resistência de Arm. (Ohm)	6,60	1,30	2,00	0,80	7,30	6,90	3,10	0,91	3,09	1,09	1,09	0,80
CALCULOS												
Not	1,273	2,320	1,440	0,943	1,871	2,961	1,422	1,073	1,337	0,997	1,129	
N1	1,00	2,00	1,31	1,00	1,78	2,29	1,38	1,00	1,33	1,00	1,00	
TH (ms)	63,7	68,2	27,9	21,1	88,1	38,7	1455,8	594,6	577,8	262,2	483,5	
aceleração máxima (m/s ²)	13,158	21,421	39,722	45,378	16,995	45,620	1,161	2,833	2,637	5,540	3,725	
Comparações												
Torque medio	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Rotação	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Aceleração	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Tempo de aceleração	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Cte de tempo Mec (ms)	2,5	1,3	2,0	1,5	1,6	1,1	22,1	12,2	16,4	11,4	7,1	

Se destacam os seguintes aspectos:

-A variação das inércias, da polia unida ao fuso de esferas recirculantes e da unida ao servo-motor, permitiu obter um bom ajuste entre N_{ot} e N_1 real, ficando estes valores bastante próximos. O exemplo que ficou pior foi o do caso "F" com uma diferença de 23%, isto também permitiu ajustar o torque médio em quase todos os casos.

-Observou-se que quanto maior a aceleração, menor o tempo T_H de aceleração, segundo se pode verç na comparação entre os casos "B" e "F", nos quais as inércias são semelhantes.

-No que diz respeito aos servo-motores de corrente contínua com escovas, casos de "G" até "K", as inércias foram de ordem superior e o torque de pico mais baixo, comparativamente aos "brushless" o que leva a tempos de aceleração maiores, que para todos os casos, superaram o limite de 100 ms proposto por Gross [Gross,83].

- O intervalo de valores para a aceleração, que foi obtido da literatura como recomendado para máquinas-ferramenta, foi ultrapassado em quase todos os casos, porém, considerando a massa toda a ser movimentada (estimada em 615 kg [Chikude]) e a máxima aceleração, que foi apresentada pelo servo-motor "F" ($45,6 \text{ m/s}^2$) se produz uma força de 28000 N (2860 kg) menor do que a força máxima permissível para ser suportada pelos fusos de esferas recirculantes (5400 kg).

- Se conclui que a melhor escolha seria o servo-motor "F" por ter maior aceleração e menor constante de tempo mecânica, além de uma alta redução que origina uma boa disponibilidade de torque para a realização de operações de usinagem. Como uma segunda alternativa, se apresenta o servo-motor "B" com características semelhantes as do "F" porém com aceleração menor.

- Finalmente devido a algumas dificuldades operativas, não foi possível efetuar a aquisição dos servo-motores selecionados, pelo que se optou pela instalação de servo-motores do tipo "K", já existentes no GRUCON LHW, para posicionamento dos eixos "X" e "Y" da Fresadora Pratt & Whitney. Existe a vantagem de ter usado uma relação de transmissão bastante próxima à

relação ótima. Isto permitiu um funcionamento suave e uma adequada dinâmica do sistema, o que será mostrado na seqüência, no capítulo correspondente aos ensaios.. Os servo-motores usados apresentam as seguintes características:

Fabricante:	SIEMENS
Modelo:	1UH3 074-OAC01
Torque a baixa veloc. (M_0):	7,0 Nm
Corrente de armadura a baixa veloc. (I_0):	9,7 A
Corrente de armadura máxima (I_{max}):	78 A (200 ms)
Tensão de armadura:	167 V
Velocidade de rotação:	2000 rpm
Constante de torque (K_T):	0,735 Nm/A
Constante de tensão (K_E):	77 V/Krpm
Resistência de armadura (R_a):	0,804 Ω
Inductancia de armadura (L_a):	6,1 mH
Constante de tempo termica:	90 min

Ditos servo-motores possuem freio e tacogerador, que apresentam as seguintes características:

Dados técnicos do tacogerador:

Fabricante:	SIEMENS
Modelo:	1HU1 052
Tensão gerada:	20 V DC/Krpm
Corrente:	1,5 mA DC
Tolerancia da tensão:	$\pm 8\%$
Faixa de Velocidades:	± 6000 rpm

Dados técnicos do freio:

Fabricante:	SIEMENS
Modelo:	EBD 2 M
Torque de freiado:	18 Nm(20°C)/14 Nm (120°C)
Tensão de operação:	24 V DC $\pm 10\%$
Correntede operação:	0,85 A DC

Potência consumida a 20°C:	20W
Tempo de liberação:	60 ms

No que diz respeito aos servo-conversores para ditos servo-motores, trata-se de "Drivers" tiristorizados de 6 pulsos, em ligação antiparalela, sem corrente de intercirculação, que apresentam as seguintes características:

Tensão de alimentação	190 V ,+10%,-5%, 3Ø.
Tensão máxima de saída	± 200 V CC.
Corrente media	11 A CC
Corrente máxima de curta duração	45 A CC (Máximo 200 ms)
Corrente máxima continuada	22 A CC
Fontes disponíveis para eletrônica	± 24 V CC 50 mA máx. ± 15 V CC 50 mA máx. estabilizado.
Tensão de comando de velocidade	± 10 V "ripple" < 2%.
Atraso máximo na inversão de sentido do torque	4 - 8 ms.
Faixa de controle de velocidade	1:5000 até 1:10000 +0.03 %.
Ganho máximo do controle de posição	≤ 30 Hz
Refrigeração	Natural

4.5 DETALHAMENTO DOS CIRCUITOS ELÉTRICO-ELETRÔNICOS IMPLEMENTADOS

No que diz respeito aos circuitos elétricos e eletrônicos da fresadora, estes foram projetados e montados na sua totalidade como se descreve a seguir:

Sistema de Potência:

Foram instalados os seguintes componentes com sua correspondente ligação elétrica segundo o diagrama mostrado na figura A2.1 apresentado no Apêndice 2:

-Transformadores 01 Trifásico (3-Ø)

- 01 Monofásico (1-Ø)
- Contactores**
- 01 Principal (3-Ø)
 - 01 Motor acionamento principal rot. SH (3-Ø)
 - 01 Motor acionamento principal rot. SAH (3-Ø)
 - 02 Alimentação dos "Drivers" (3-Ø)
 - 01 Moto-bomba de lubrificação (1-Ø)
 - 01 Moto-bomba de refrigeração (1-Ø)
- Indutores de saída para filtragem de corrente (02).**
- Transformadores de medição de corrente (sensores) (02)**
- Fontes**
- 03 fontes 24 V CC, duas alimentam os freios dos servo-motores dos eixos X e Y, a terceira, alimenta as entradas das funções de comando do CNC .
 - 02 fontes 110 V CC, uma alimenta o motorredutor de CC, a outra alimenta o freio do Acionamento principal.
- Fusíveis**
- 03 Alimentação do contactor principal.
 - 04 Saída dos "Drivers" 02 cada um.
 - 06 Alimentação da parte de controle dos "Drivers" 03 cada driver.
 - 06 Alimentação da parte de potência dos "Drivers" 03 cada driver.
- Driver** 02.
- Servo-motor CC** 02.
- Freio para motor** 03.
- Tacogerador** 03.
- Motor de Indução** 01 (trifásico).

-Motor Síncrono 01.

-Motorreductor CC 01.

Destes componentes, o motor de indução trifásico, o freio e o tacomotor acoplados a ele, o motor síncrono e o moto-reductor CC foram instalados na máquina. Os demais componentes mencionados foram instalados no armário principal.

Sistema eletrônico:

O sistema eletrônico consta dos seguintes componentes:

- CNC
- Placa de interfaceamento para execução das seguintes funções:
 - 1) Sistema de bloqueio do acionamento manual do movimento após que ultrapassar as chaves de final de curso, com liberação do acionamento manual para o retrocesso
 - 2) Regulação da velocidade de rotação da árvore e seu interfaceamento com o CNC.
 - 3) Circuito temporizador para inversão do sentido de rotação da árvore.
- Acionamento manual do avanço dos eixos X, Y e Z.

Com o objetivo de fornecer uma documentação adequada foi organizado um manual técnico incluindo:

- Os diagramas dos circuitos mencionados.
- A descrição dos mesmos.
- Diagramas auxiliares (Mapa de conectores, detalhamento dos conectores).
- Vistas da disposição dos componentes nas montagens.
- Listas dos componentes, seus nomes, especificação e localização.

Os circuitos, na sua maior parte, foram implementados seguindo as indicações dos fabricantes e seu projeto obedece a necessidades funcionais detectadas na máquina.

CAPÍTULO 5

ENSAIOS DINÂMICOS

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a parte correspondente aos ensaios dinâmicos dentro do processo de retrofitting realizado na fresadora Pratt & Whitney. Contém o desenvolvimento da parte experimental e os resultados obtidos nesta parte do trabalho, onde foram verificados os seguintes itens:

- Resposta no tempo da malha de velocidade ao degrau.
- Resposta em frequência da malha de velocidade.
- Resposta no tempo da malha de posição.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA EXAMINADO E DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO

a) O sistema a ser examinado consta de:

- Sistema Mecânico: Constituída pelos carros da fresadora, os quais possuem guias lineares cilíndricas e fusos de esferas recirculantes, em cada carro, providos no extremo de polias dentadas de ferro de 20 dentes e passo 3/4" (19.05 mm). A Inércia rotacional de todo o conjunto é $10.351 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ para o eixo "X" e $10.380 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ para o eixo "Y", (o cálculo destas Inércias está baseado nas recomendações de Gross [Gross,87]).

- Sistema eletromecânico: Inclui-se servomotores de corrente contínua modelo 1UH3 074-OAC01 da Siemens, providos de polias dentadas de alumínio de 20 dentes e passo 3/4" (19.05 mm); com inércia igual a $8.120 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ para o conjunto motor/polia de cada eixo.

A constante de força contra-eletromotriz dos motores é:

$$K_e = 0.735 \text{ V/rad/s}$$

As constantes de tempo elétrica e mecânica, tomadas do catálogo dos servomotores, são respectivamente:

$$\tau_e = 7.1 \text{ ms}$$

$$\tau_m = 7.6 \text{ ms}$$

- Servo-conversores tiristorizados: Cada um dos sistemas apresenta um controlador de corrente e controlador de velocidade do tipo PI; este pode ser ajustado independentemente para cada eixo, de uma maneira preliminar, através de um potenciômetro, para posteriormente realizar-se um ajuste fino usando um potenciômetro de precisão.

- Controle de posição: Este é executado pelo CNC. O ganho (K_V) da malha de controle de posição do sistema é calculado da seguinte forma:

$$K_V = \frac{\text{veloc. máxima de deslocamento (mm/min)}}{\text{comprimento da rampa de aceleração (mm)}} \quad (5.1)$$

No caso em questão, o ganho K_V escolhido foi de 1600 mm/min/mm (26.7 Hz), isto, por ser o maior ganho que ainda não produz instabilidade no sistema, segundo foi indicado no item 4.4.5.4 o valor deste ganho não deve superar 30 Hz, o seguinte comprimento de rampa a ser selecionado, daria um valor de $K_V = 53.3$, pelo que o sistema se torna instável.

b) Equipamento de medição: Nestes ensaios é utilizado um Control Systems Analyzer (CSA) da Hewlett Packard, modelo HP-3563A; trata-se de um analisador de sistemas de controle, concebido especialmente para a análise de sistemas de controle. Caracteriza-se por ter uma fonte para excitar o sistema em exame com diferentes tipos de sinais a serem escolhidos pelo usuário. Possui também um sistema de aquisição e processamento de dados que oferece uma grande versatilidade ao usuário. Sua faixa de operação atinge de 64 μ Hz até 100 KHz. Algumas das características deste equipamento aplicadas aos testes realizados, são:

Ensaio no tempo:

- Coleta de informação analógica (Sinal do tacogerador, do sinal de excitação e do comando de posição correspondentes aos sinais U_t , U_m e U_e da figura 3.3).
- Seleção de escalas de apresentação da informação.
- Recurso de ampliação de gráficos obtidos nas medições.
- Apresentação da média de "n" medições.
- Facilidades para graficação (Hard copy) da informação contida nas telas.
- Recursos para determinação de características das curvas obtidas nas medições realizadas.

Ensaio em freqüência:

Além das funções já mencionadas, foram também usadas:

- Traçado do diagrama de Bode, função coerência, e da curva de melhor ajuste sobre os pontos medidos (curve fit).
- Cálculo de pólos e zeros da função transferência a partir do diagrama de Bode.

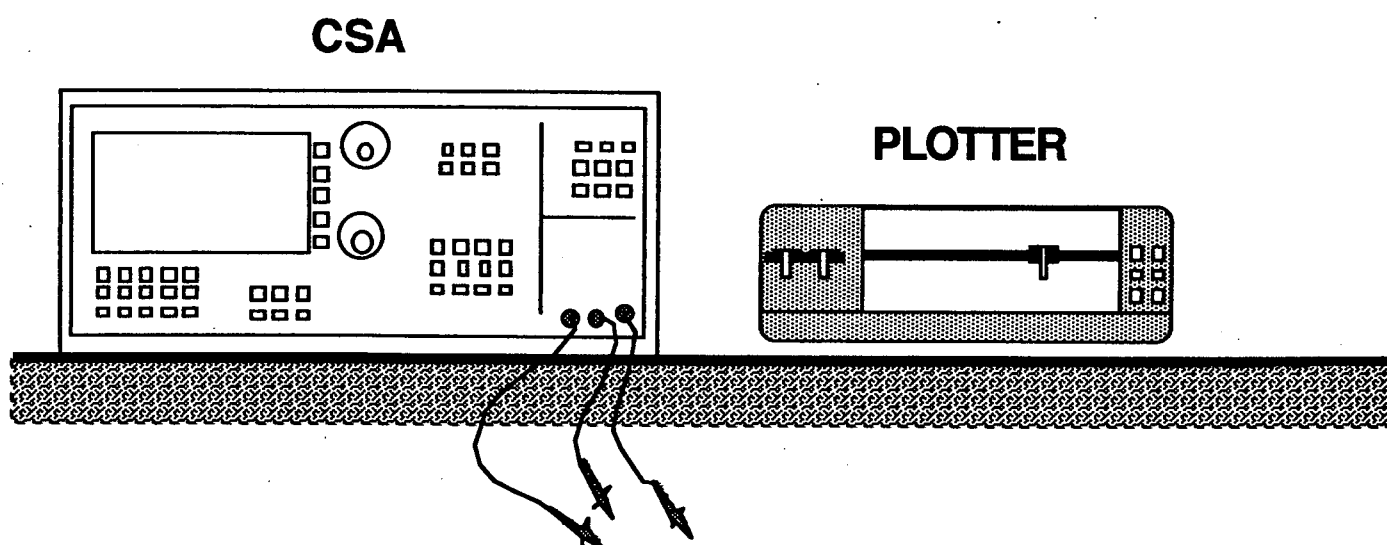


Figura 5.1 Sistema de medição e "plotter" para registrar a informação apresentada na tela do CSA .

5.3 ENSAIOS REALIZADOS.

5.3.1 RESPOSTA NO TEMPO.

A resposta ao degrau de sistemas de segunda ordem com coeficiente de amortecimento $D < 1$ tem uma forma típica, mostrada na figura 5.2. Nela podem se distinguir os principais parâmetros que caracterizam um sistema e que estão associados com as especificações a serem atingidas pelo sistema de controle dos acionamentos de avanço de uma máquina-ferramenta. Entre as vantagens da resposta no domínio tempo considera-se a possibilidade de poder-se avaliar o desempenho de um sistema linear de qualquer ordem, em termos das características mostradas na figura 5.2.

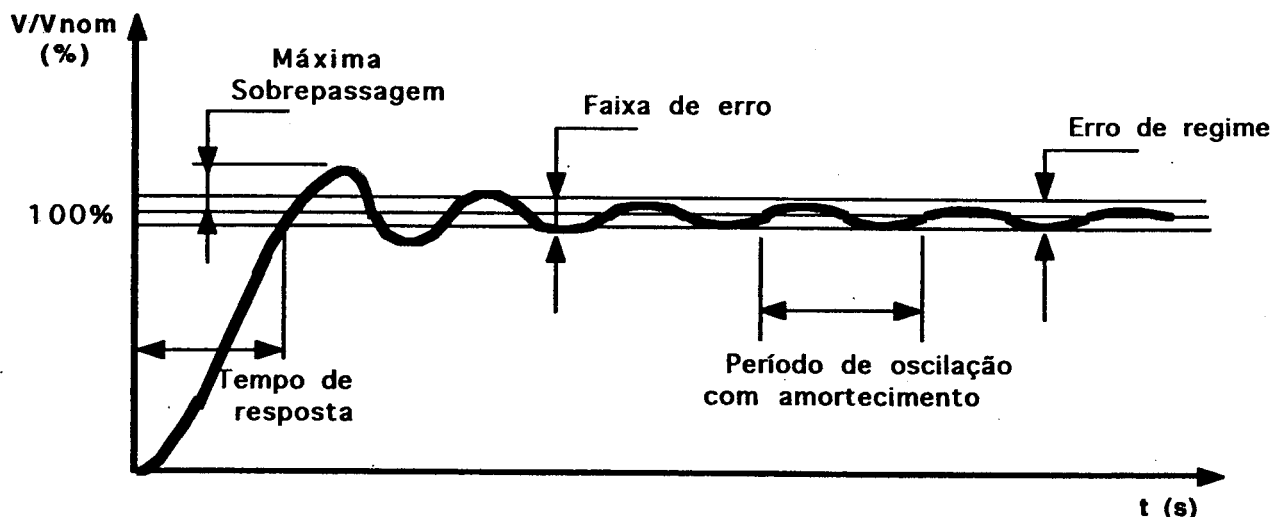


Figura 5.2 Resposta ao degrau típica de sistemas de segunda ordem com $D < 1$

Os parâmetros mais importantes que foram medidos neste trabalho são:

- Erro de regime: Diferença entre a resposta medida e a teórica ideal.
- Tempo de resposta: Tempo transcorrido desde a aplicação do degrau até a resposta atingir a faixa de erro pela primeira vez.
- Sobrepassagem: diferença entre o primeiro pico de sobrepassagem e a resposta esperada.

O ensaio foi realizado sob as seguintes condições:

- a) Para este ensaio a malha de controle de posição foi aberta, isto é, o CNC foi desligado do sistema, a malha de controle de velocidade foi mantida fechada.
- b) O nível de degrau utilizado foi de 1,5 V que corresponde a uma velocidade de 300 rpm no eixo do servomotor, com um atraso de 5 ms, isto é, que o analisador começa a medir antes de fornecer a excitação.
- c) Os resultados obtidos correspondem à média de 5 medições.
- d) O período de amostragem foi de 391 μ s
- e) Foi usada a função "ZOOM" (ou ampliação) de escala, das partes selecionadas através do deslocamento de marcadores para efetuar as leituras propostas.

5.3.2 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA.

No ensaio de resposta em frequência, esta é obtida pela excitação do sistema através de um sinal de amplitude constante cuja frequência é variada de forma crescente dentro de uma faixa de valores pré-estabelecida. Obtém-se assim um gráfico chamado Diagrama de Bode. Estes diagramas incluem dois gráficos, o primeiro é o traçado do módulo da relação resposta/excitação *versus* frequência em coordenadas semi-logarítmicas, o segundo gráfico é o correspondente ao traçado do ângulo de defasagem da relação resposta/ excitação *versus* frequência. Este ensaio pode-se realizar usando uma excitação senoidal alternada de amplitude constante e frequência variável.

Com o Diagrama de Bode também é possível observar as características filtrantes do sistema e verificar sua habilidade para reproduzir na saída o sinal de entrada. Permite também observar as frequências de ressonância do sistema. Outrossim é possível verificar a banda passante ou largura de faixa de resposta em frequência, que é definida como a gama de frequências desde um valor inicial até aquela frequência na qual a amplitude alcança um valor de -3 dB ($\text{dB} = 20 \log_{10} \text{saída/entrada}$), valor em que a relação saída/entrada é de 0.707 [D'Azzo, 88].

Uma outra utilização dos diagramas de Bode é na caracterização de sistemas bem como para o desenvolvimento e sintonização de filtros e compensadores para sistemas de controle.

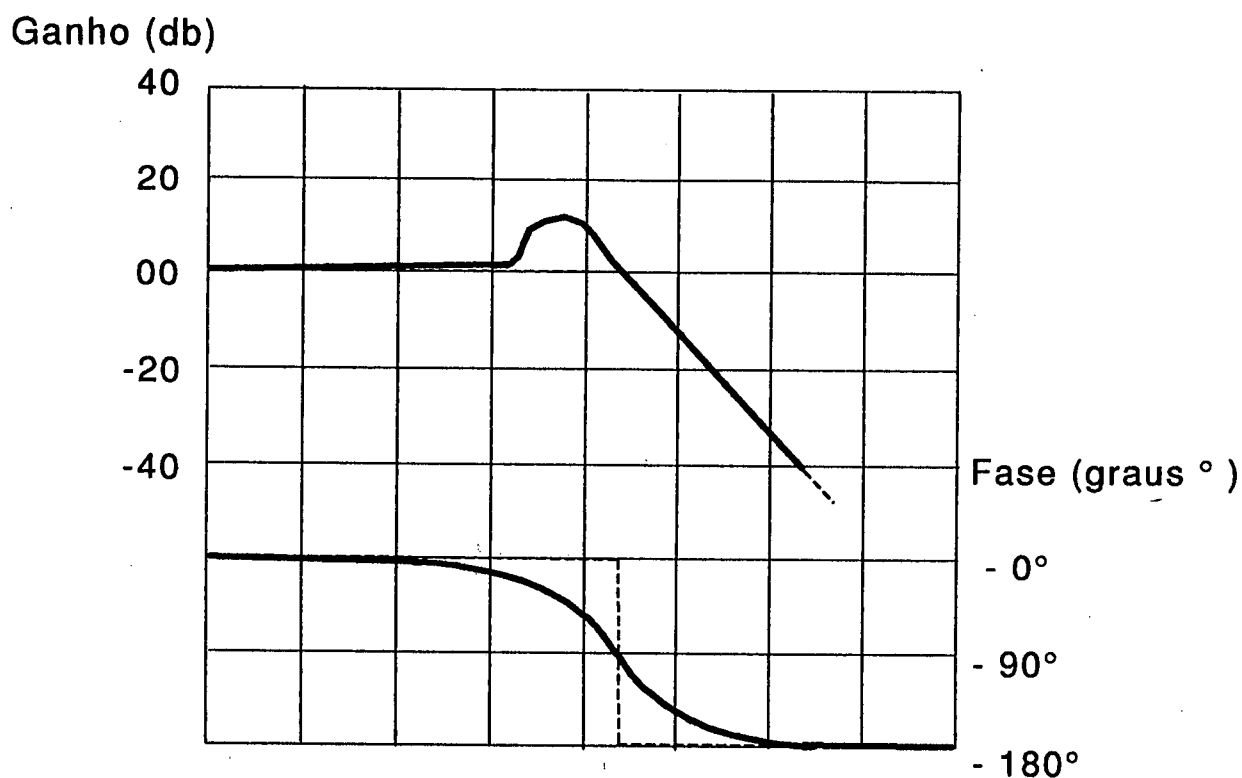


Figura 5.3 Diagrama de Bode típico para sistemas lineares de segunda ordem com $D < 1$

A obtenção dos diagrama de Bode permite analisar os seguintes parâmetros:

- Obtenção de ω_0 e D .
- Análise da amplitude e frequências de ressonância.
- Determinação experimental da função transferência.

Algumas condições consideradas neste ensaio são:

- a) Os ensaios correspondem à medição da resposta da malha de controle de velocidade do sistema.

- b) A fonte usada corresponde a um sinal senoidal, na faixa de 2 a 100 Hz, foi desconsiderado o valor de 1 a 2 Hz com o propósito de expandir a escala correspondente à segunda década, onde se espera ter maior informação do sistema.
- c) O nível de tensão é 500 mV pico/pico alternado.
- d) Os resultados correspondem à média de 5 medições.
- e) As escalas usadas na apresentação dos resultados são determinadas automaticamente pelo CSA, correspondentes aos valores obtidos nas medições
- e) Determinação da curva de melhor ajuste mediante o uso da função "curve fit" própria do equipamento de medição.
- f) Obtenção dos pólos e zeros da função transferência.
- g) A avaliação da medição foi realizada fazendo-se uso da função coerência, que é uma medida da potência do sinal de saída originada pelo sinal de entrada. Assim se a coerência é 1, significa que o sinal de entrada gerou toda a potência de saída e se for menor que 1, parte da energia de entrada foi dissipada na forma de ruído, portanto, uma queda na coerência origina uma queda na confiabilidade dos resultados [Krüger,93].

5.3.3 MALHA DE CONTROLE DE POSIÇÃO: RESPOSTA NO TEMPO

O objetivo deste ensaio é verificar o comportamento dinâmico do sistema de posicionamento. As principais características que devem ser satisfeitas são: Não existir sobrepassagem de posicionamento dentro de toda a faixa de velocidades, e que a resposta seja a mais rápida possível.

O Ganho da malha de controle de posição K_V , tem uma influência preponderante neste resultado.

A aparição de sobrepassagem é detectada através da troca de sinal da tensão de comando U_e fornecida pelo controlador de posição. O procedimento seguido foi o seguinte:

- A mesa da fresadora foi movimentada a diferentes posições com diferentes velocidades, através da programação do CNC, para simular a execução de uma peça.

- A tensão de saída do controle de posição U_e foi registrada usando a função de captura no tempo, disponível no CSA, que permite a operação deste, como se fosse um osciloscópio, armazenando a informação lida, para ser analisada depois do sinal ter sido removido.
- Foi usada a função de ampliação da imagem da tela na zona próxima à finalização de cada movimento para verificar uma eventual inversão de sinal.

5.4 RESULTADOS.

Nesta parte, serão apresentados os resultados dos ensaios realizados conforme a descrição prévia.

5.4.1 RESPOSTA NO TEMPO

A seguir, serão apresentados os resultados da medição da resposta ao degrau da malha de velocidade dos eixos X e Y, realizada na fresadora Pratt & Whitney. Todos os gráficos correspondem a um único ensaio, e são produto de uma média de 5 medições; tem sido apresentados em diferentes figuras com o propósito de ressaltar diferentes características em cada uma delas, fazendo uso de recursos tais como ampliação de parte dos gráficos em um ou dois dos eixos de variáveis, assim como outras variações da informação apresentada.

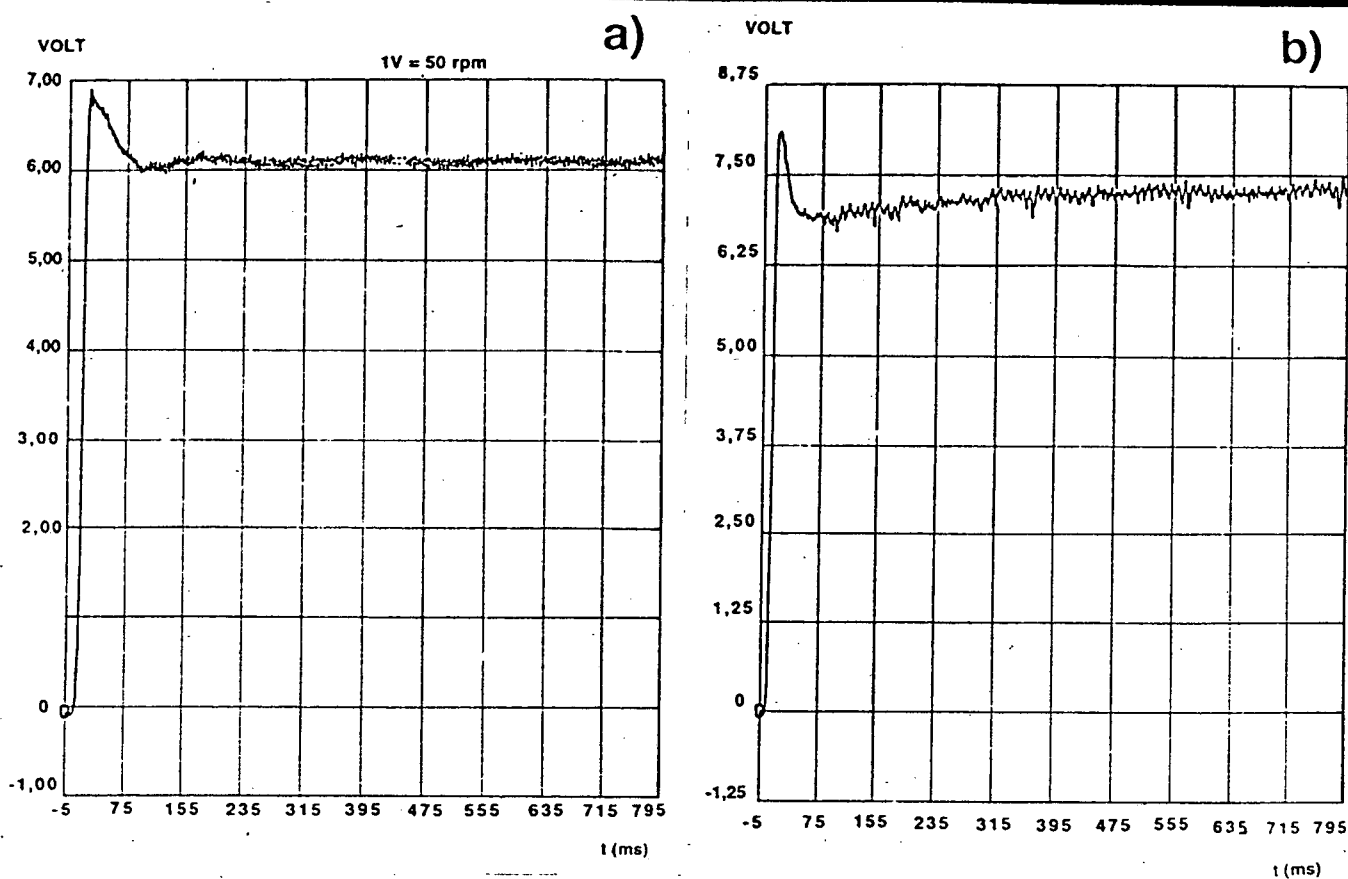


Figura 5.4 Resposta no tempo ao degrau da malha de velocidade a) eixo X, b) eixo Y

A figura 5.4 mostra os gráficos da resposta ao degrau da malha de velocidade obtidos nos dois eixos da máquina.

Nestas figuras se identifica o comportamento típico de um sistema de segunda ordem, com um pico de sobrepassagem seguido de algumas oscilações de amplitude bastante pequena. O primeiro pico de sobrepassagem tem uma forma diferente da esperada na sua etapa de subida. Esta figura registra o tempo de medição em sua totalidade.

Os comentários das seguintes figuras permitirão focalizar a atenção na verificação de alguns parâmetros, assim como a explicação de algumas características observadas nos resultados destas medições.

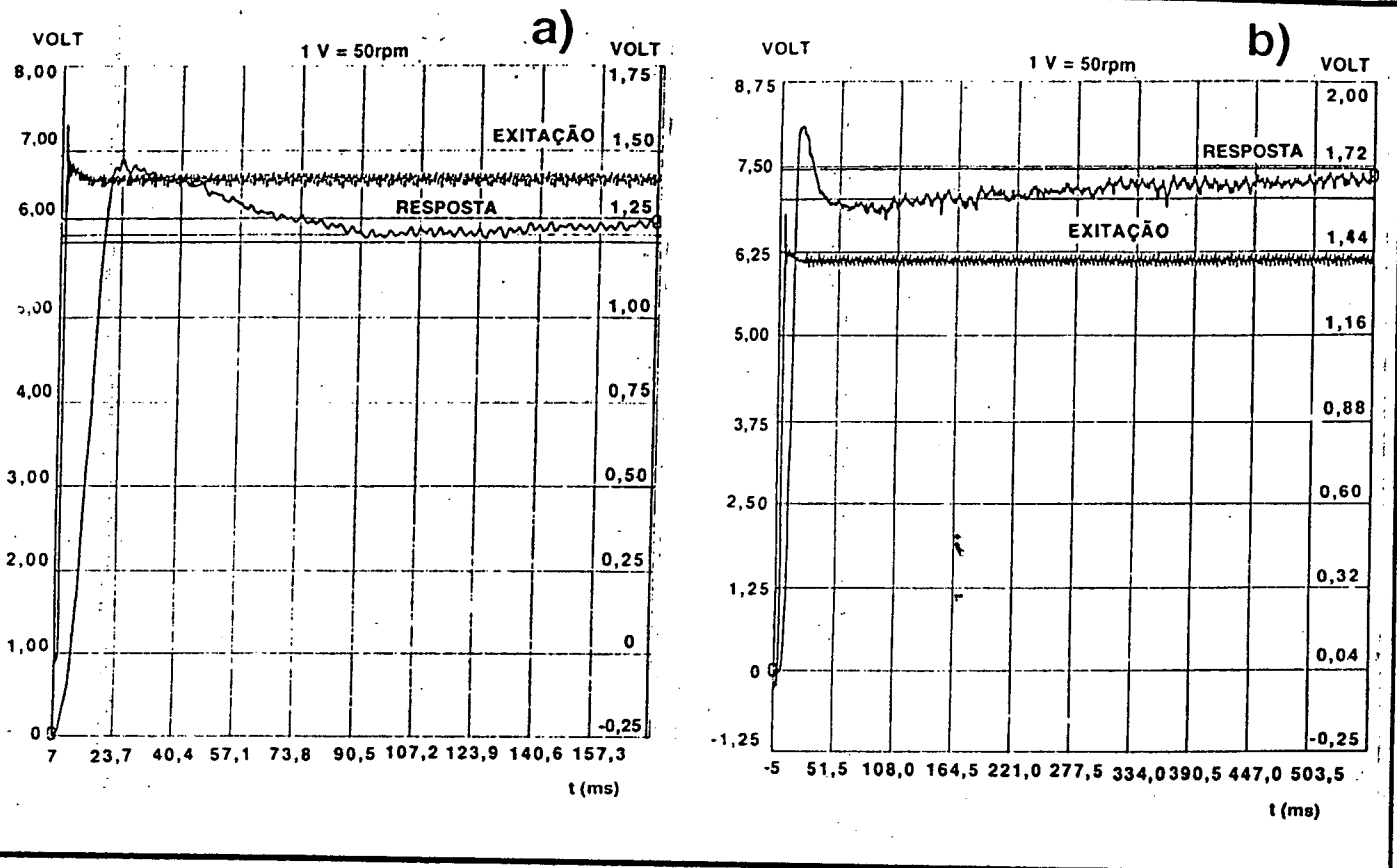


Figura 5.5 Sinais de excitação e resposta a) eixo X, b) eixo Y

Na figura 5.5 tem sido superpostos os gráficos dos sinais de excitação e resposta ao degrau.

Nesta figura pode se ver que o sinal de excitação não é um degrau perfeito, tendo um pico de sobrepassagem no início. Assim o servomotor recebe um sinal de amplitude maior que aquela estabelecida para o degrau, em $t=0$. Este reage procurando alcançar uma velocidade proporcional a este valor. Pouco tempo depois do pico, o sinal de degrau se estabiliza num valor abaixo do valor de pico e o servo-motor reage com um retardo característico da constante de tempo mecânica que em realidade é maior que 7.6 ms, por causa das inercias, dos elementos mecânicos refletidas no servo-motor.

Esta figura apresenta também o efeito do ruído de alta frequência em ambos sinais, o qual não foi possível eliminar nesta medição, sendo que ambos sinais foram filtrados pelo CSA, segundo indica a figura 5.9

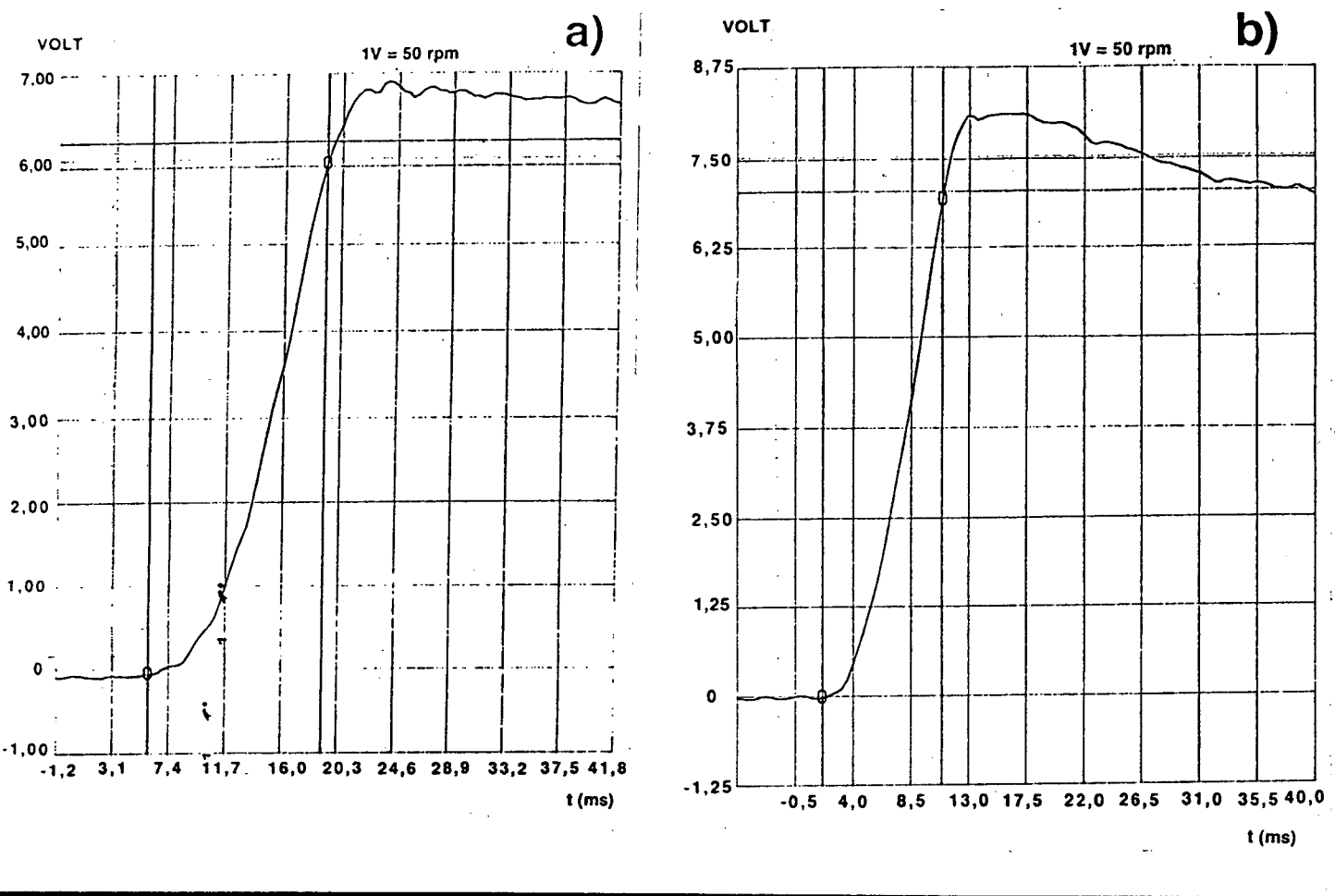


Figura 5.6 Tempo de resposta da malha de velocidade ampliado a) eixo X, b) Eixo Y

A figura 5.6 mostra o tempo de resposta, já definido no item 5.3.1, da malha de velocidade para ambos eixos, onde se obtêm os seguintes valores:

Eixo X 13.28 ms.
Eixo Y 9.38 ms.

Neste caso foi ampliado o gráfico no eixo do tempo com o propósito de facilitar a leitura dos valores; a escala de amplitude não foi alterada.

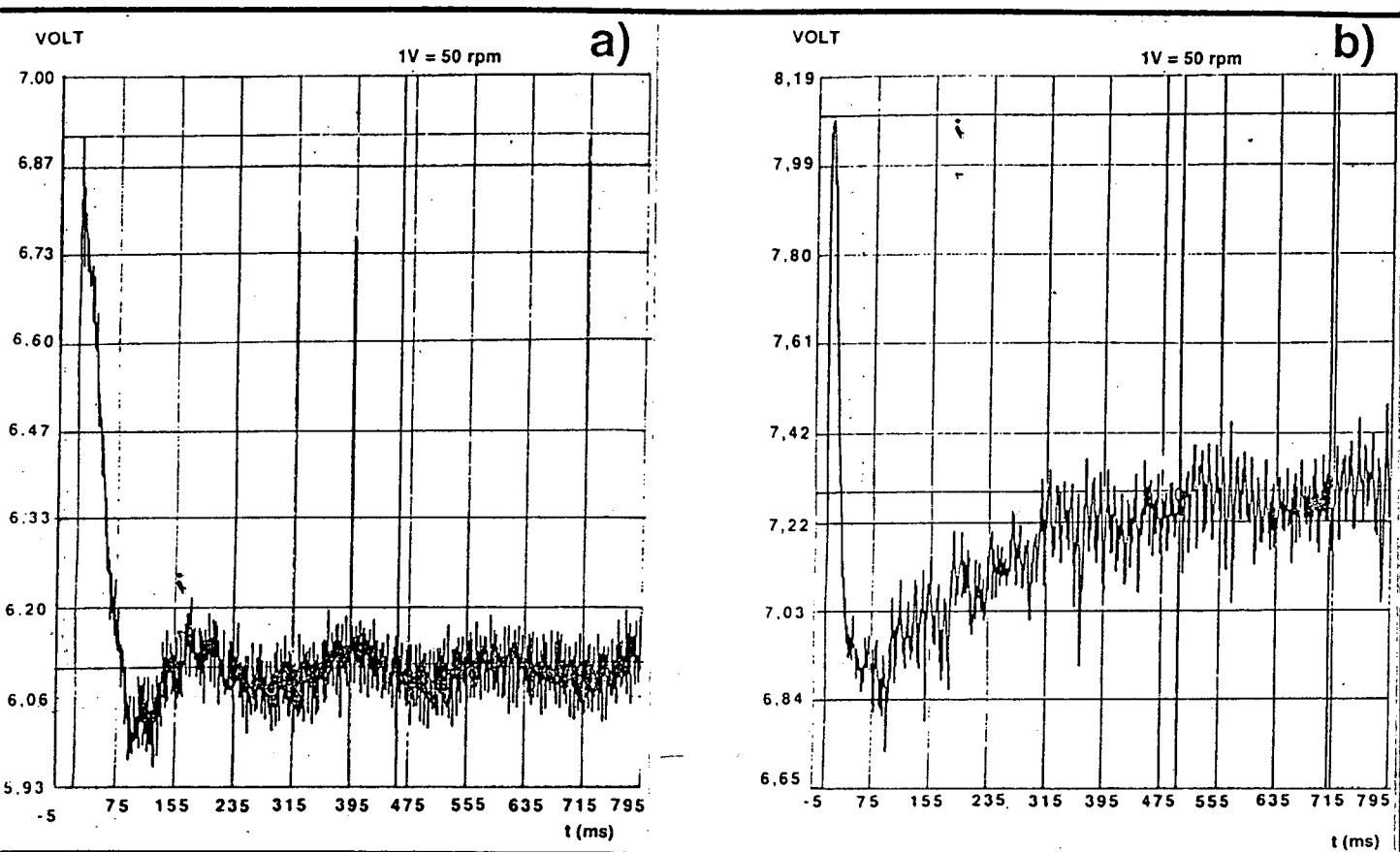


Figura 5.7 Sobrepassagem, ampliado

Na figura 5.7 é mostrada a medição de sobrepassagem, assim como também do período " τ " de oscilação com amortecimento. Desta figura também foi obtido um valor aproximado de erro de regime. Os valores obtidos da mesma são:

	Eixo X	Eixo Y
Sobrepassagem	13.1%	11.1%
τ	225.0 ms	210.5 ms
Erro	$\approx 1\%$	$\approx 1\%$

Nesta figura foi ampliada a escala de amplitude com o propósito de medir a sobrepassagem assim como poder observar a oscilação amortecida dos sistemas. Através da sobrepassagem medida foram calculados os coeficientes de amortecimento para cada eixo (este cálculo será explicado com mais detalhe no item 5.5), chegando-se aos seguintes resultados:

Eixo	D
X	0.542
Y	0.573

Foi graficada também a a curva de resposta ao degrau teórica, para um coeficiente de amortecimento (D) de 0.555 que é um valor intermediário entre os correspondentes aos eixos X e Y. Esta curva teórica, apresentada na figura 5.8, permite observar-se uma forte semelhança às respostas obtidas experimentalmente e mostradas na figura 5.7. Verifica-se também que a característica da oscilação seguinte à de sobrepassagem é um puco maior que as do resto das oscilações, as quais se mantem numa amplitude pequena que corresponde ao erro de regime.

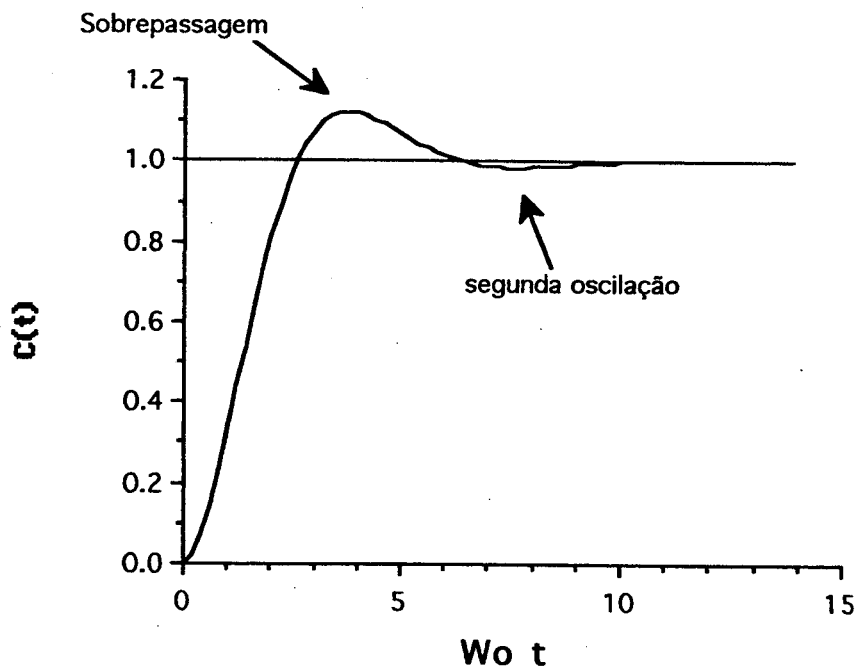


Figura 5.8 Curva teórica de resposta ao degrau para um sistema com $D=0.555$

Por último, foi colocado na figura 5.9, o conjunto das condições de ensaio da resposta ao degrau para permitir a repetição dos ensaios.

Linear Resolution				
MEASURE:	CHAN 1		CHAN 2	
	Freq Resp		Freq Resp	
WINDOW:	CHAN 1		CHAN 2	
	Uniform		Uniform	
AVERAGE:	TYPE	# AVGS	OVERLAP	TIME AVG
	Stable	5	0%	Off
FREQ:	CENTER		SPAN	BW
	500 Hz		1.0kHz	1.25 Hz
	REC LGTH	Δt		
	800ms	391 μ s		
TRIGGER:	TYPE	LEVEL	SLOPE	PREVIEW
	Source	0.0 Vpk	Pos	Off
INPUT:	RANGE	ENG UNITS	COUPLING	DELAY
CH 1	AutoRng \uparrow	1.0 V/EU	DC (Flt)	-5.08ms
CH 2	AutoRng \uparrow	1.0 V/EU	DC (Flt)	-5.08ms
SOURCE:	TYPE	SYNC	LEVEL	OFFSET
	Step	Single	1.5 Vpk	0.0 Vpk

Figura 5.9 Condições do ensaio de resposta da malha de velocidade no tempo ao degrau

5.4.2 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

A seguir são apresentados os gráficos correspondentes aos diagramas de Bode, para ensaios da malha de velocidade realizados nos dois eixos da fresadora.

A figura 5.10 apresenta a resposta em frequência de ambos os eixos da fresadora. Na mesma figura, é mostrado o valor da frequência na qual a defasagem passa a ser 45°. Isto corresponde a um dos critérios para medir a largura de banda do sistema. Desta figura se obtêm os seguintes valores:

Eixo	Largura de Banda (Hz)
X	8.97
Y	19.34

Próximo à frequência de 50 Hz se observa que o diagrama de fase da figura 5.10 tem uma descontinuidade, onde o ângulo de fase varia de -180° a 180° . Em realidade, o que acontece aqui é que a defasagem é menor de -180° , porém dado que a escala foi pré-fixada, o software interno do CSA soma 360° aos seguintes valores obtidos na medição, portanto a curva que se ve na parte superior direita do diagrama de fase, em realidade corresponde à continuação da curva da parte inferior.

Observando estas figuras e traçando as assíntotas com inclinação -40dB/década e -60dB/década se verifica que perto de 20 Hz onde a curva começa a se tornar irregular, esta acompanha a inclinação da assíntota com inclinação -2 , isto é, se manifesta um comportamento de segunda ordem. Em 40 Hz há uma ressonância; depois desta, a inclinação aumenta, mostrando uma tendência a uma assíntota com inclinação -3 . Estas observações levam à hipótese de que o sistema se comporta como um sistema de terceira ordem e que a ressonância se deve a algum componente interno do motor, por exemplo o freio, o tacogerador ou mesmo a polia acoplada ao servomotor. Uma análise deste problema se encontra em [R & M, 89]. Nesta literatura, chegase à conclusão de que se trata de um sistema de terceira ordem, de fato, a reta com inclinação -3 que foi mencionada indica um sistema de terceira ordem, outro fato que reafirma a hipótese e a defassagem menor que -180° mencionada no começo deste comentário.

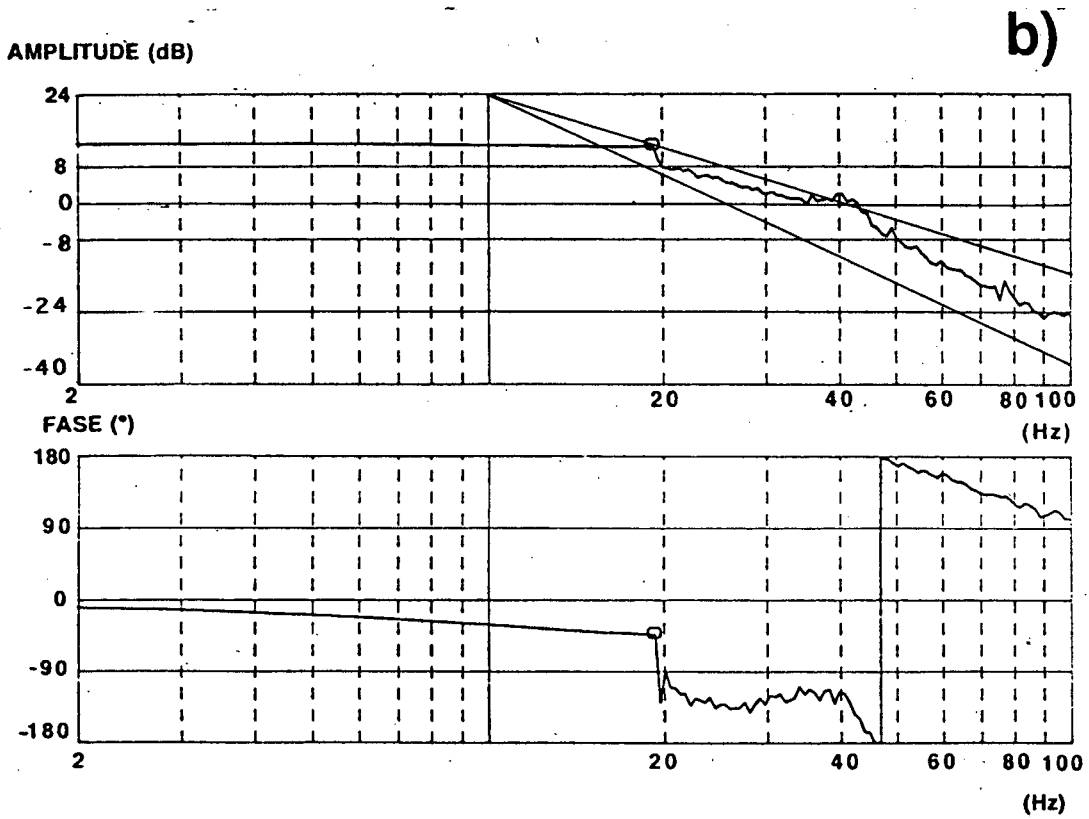
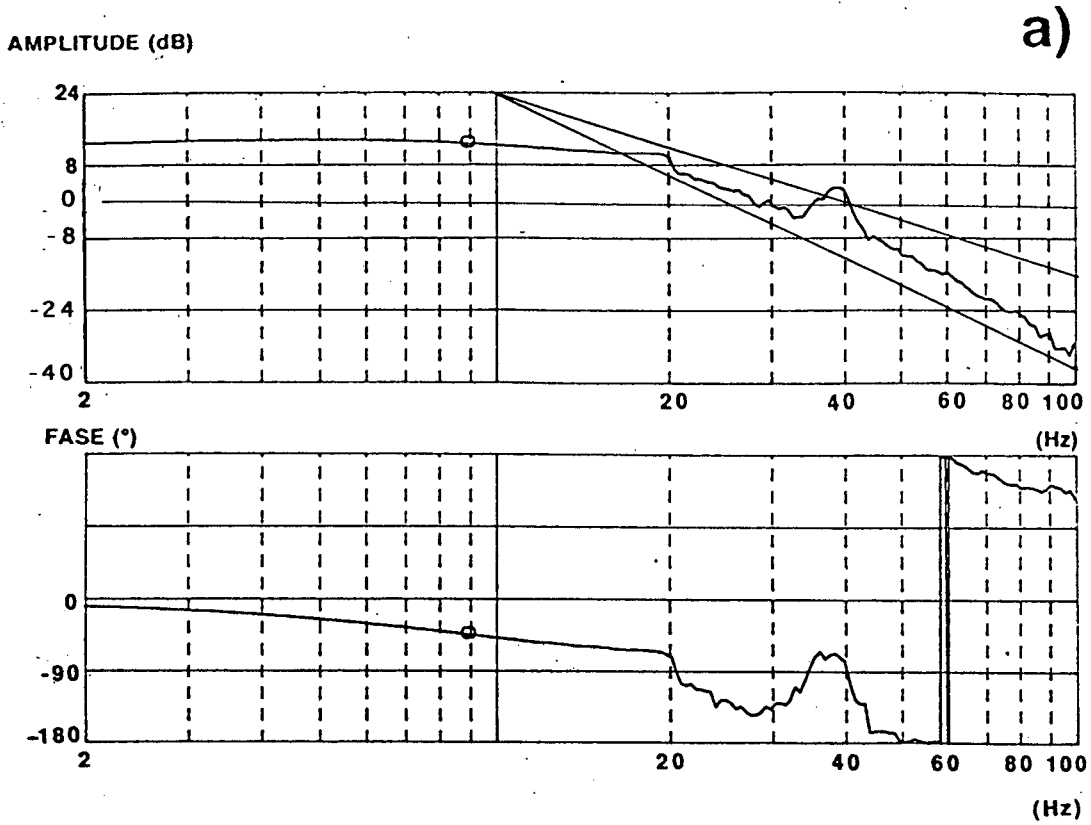


Figura 5.10 Diagramas de Bode de amplitude e fase a) eixo X. b) eixo Y.

A curva de melhor ajuste sobre os pontos medidos é mostrada na figura 5.11. Está é superposta ao traçado do diagrama de Bode. Os pólos e zeros de dita curva aparecem na figura 5.12

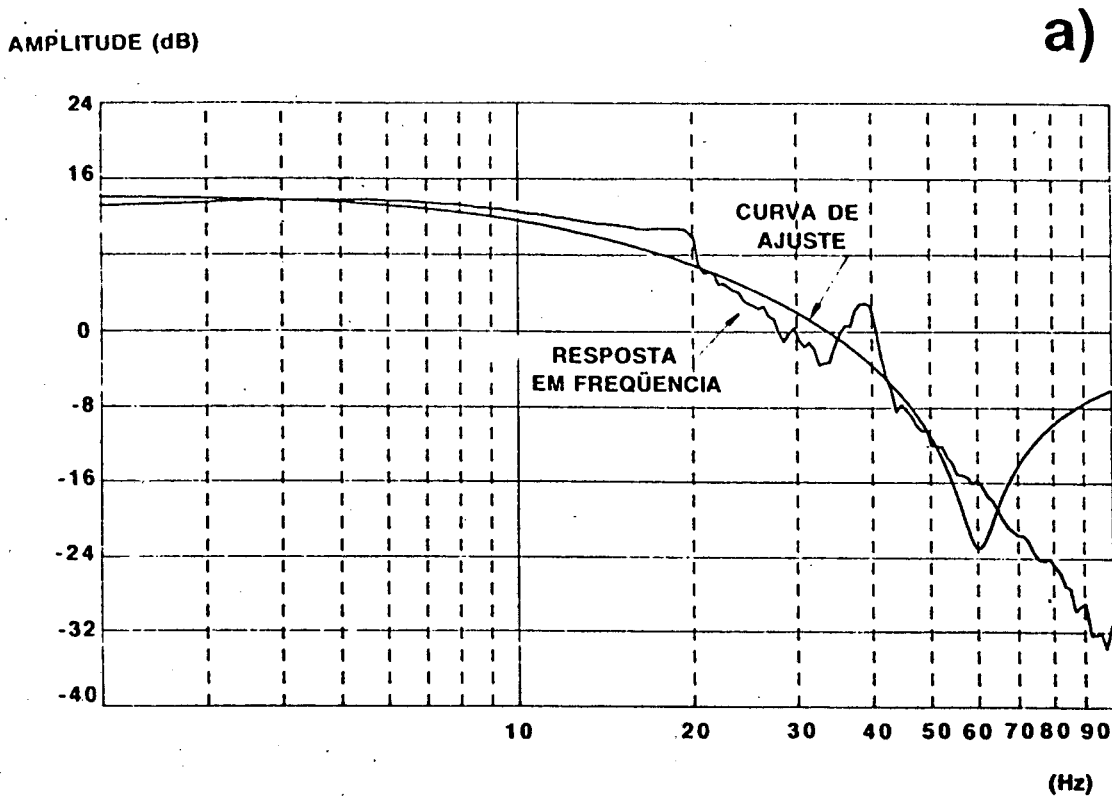


Figura 5.11a Curvas de melhor ajuste da resposta em freqüência a) eixo X

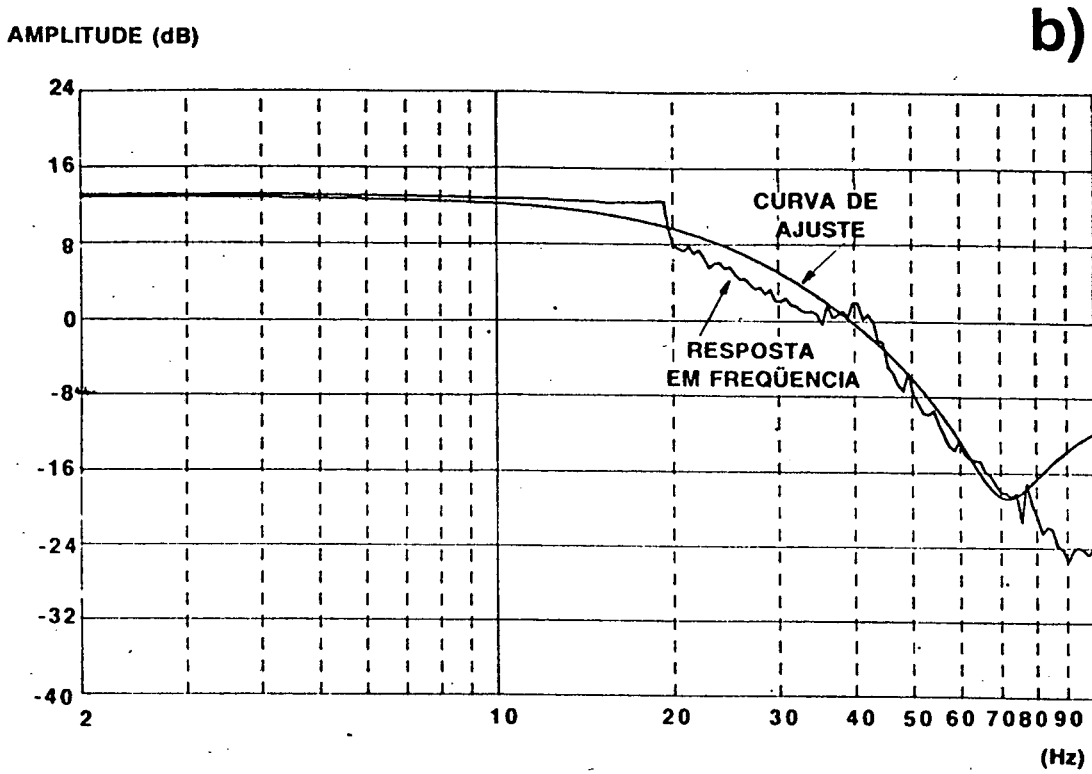


Figura 5.11b Curvas de melhor ajuste da resposta em frequência b) eixo Y.

S Curve Fit	
POLES	ZEROS
1 -50.698	3.28023 ±j 60.2921
2 -12.3247	
Time delay= 0.0 S	
Scale Frequency= 1.0	
Gain= 875.885m	

Figura 5.12a Pólos e zeros determinados pelo CSA a) eixo X

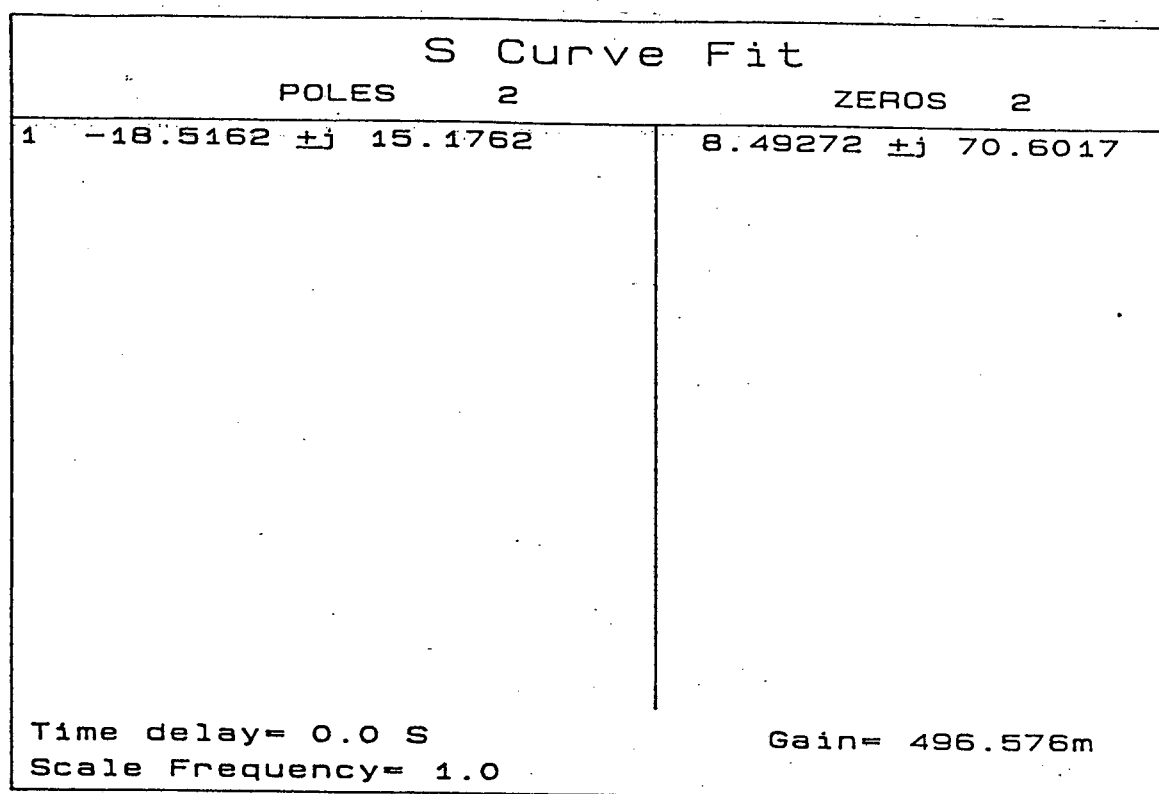


Figura 5.12b Pólos e zeros determinados pelo CSA b) eixo Y

Cabe mencionar, em relação as figuras 5.11 e 5.12 que as curvas de mejor ajuste, assim como os pólos e zeros, determinados pelo CSA, estão baseadas no análise de coerência, as medições realizadas apresentaram maior coerência nas frequências baixas, isto é menores de 40 Hz, é por isto que o CSA determinou características de um sistema de segunda ordem desconsiderando a zona de baixa coêrencia donde é encontrada a inclinação -3.

As condições em que foi realizado o ensaio, são indicadas na figura 5.13, para facilitar a reprodução do mesmo.

Swept Sine				
AVERAGE:	INTGRT TIME		# AVGS	
	<50.0ms		5	
FREQ:				
START	2 Hz		SPAN	1.7 Dec
STOP	100 Hz		RESLTN	118 Pt/Dc
SWEEP:	TYPE	DIR	EST TIME	EST RATE
	Log	Up	2.18 Min	77.1 S/Dc
AU GAIN:	Off			
INPUT:	RANGE	ENG UNITS	COUPLING	
CH 1	AutoRng↑	1.0 V/EU	DC (Flt)	
CH 2	AutoRng↑	1.0 V/EU	DC (Flt)	
SOURCE:	TYPE		LEVEL	OFFSET
	Off		500mVpk	0.0 Vpk

Figura 5.13 Condições do ensaio de resposta em frequência.

5.4.3 MALHA DE CONTROLE DE POSIÇÃO: RESPOSTA NO TEMPO

Foram programados diferentes movimentos de posicionamento comandados pelo CNC; o sinal de referência de velocidade na saída do CNC (U_e) foi registrado com o objetivo de observar a presença de sobrepassagem de posição através da inversão de sinal da tensão de comando à saída do comando numérico. A inversão de sinal é causada pela detecção da sobrepassagem pelo sistema de medição, com isto o CNC comanda o retrocesso. Deste ensaio se obtiveram os resultados mostrados na figura 5.14. Estes resultados são ampliados na figura 5.15.

Devido ao CNC utilizado não permitir diretamente a aquisição das informações de posição através de instrumentos, a verificação da sobrepassagem de posição é verificada de maneira indireta, através da análise do sinal de saída do CNC correspondente à referência de velocidade U_e .

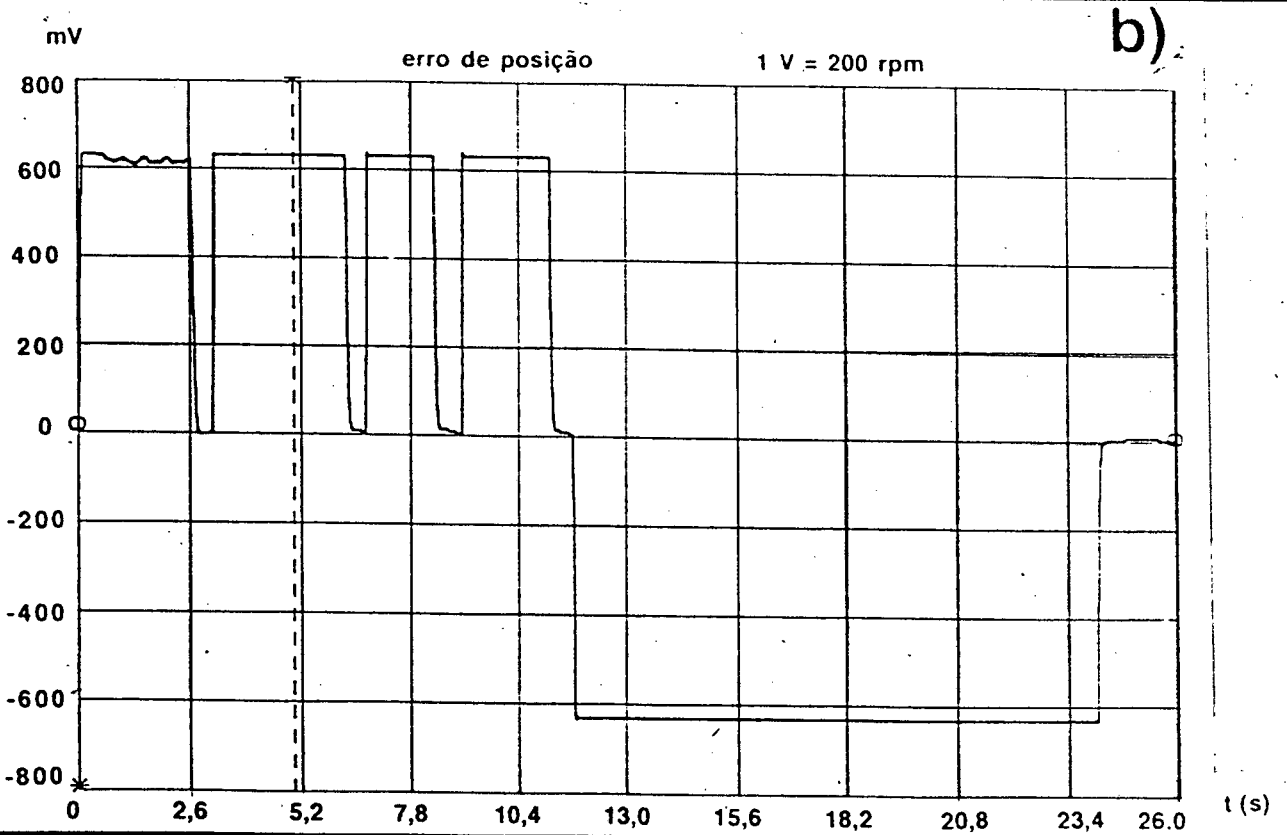
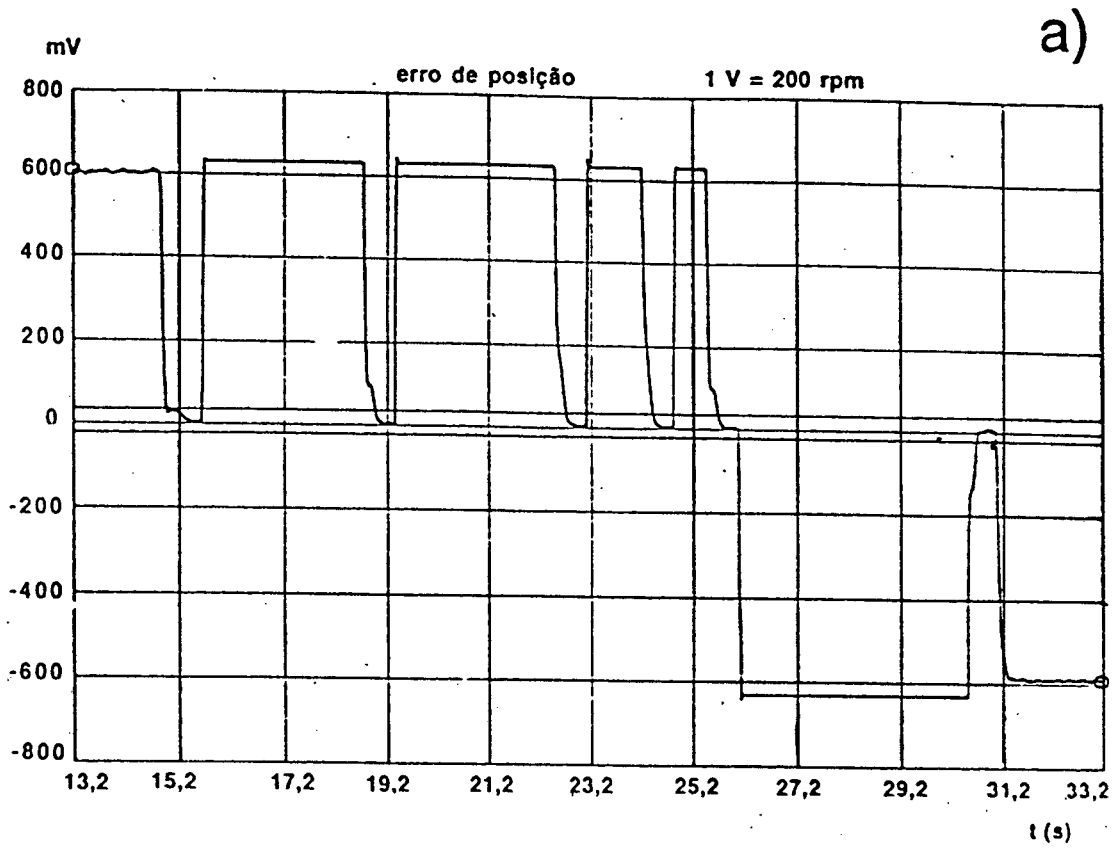


Figura 5.14 Registro do sinal de erro de posição para diferentes posições.

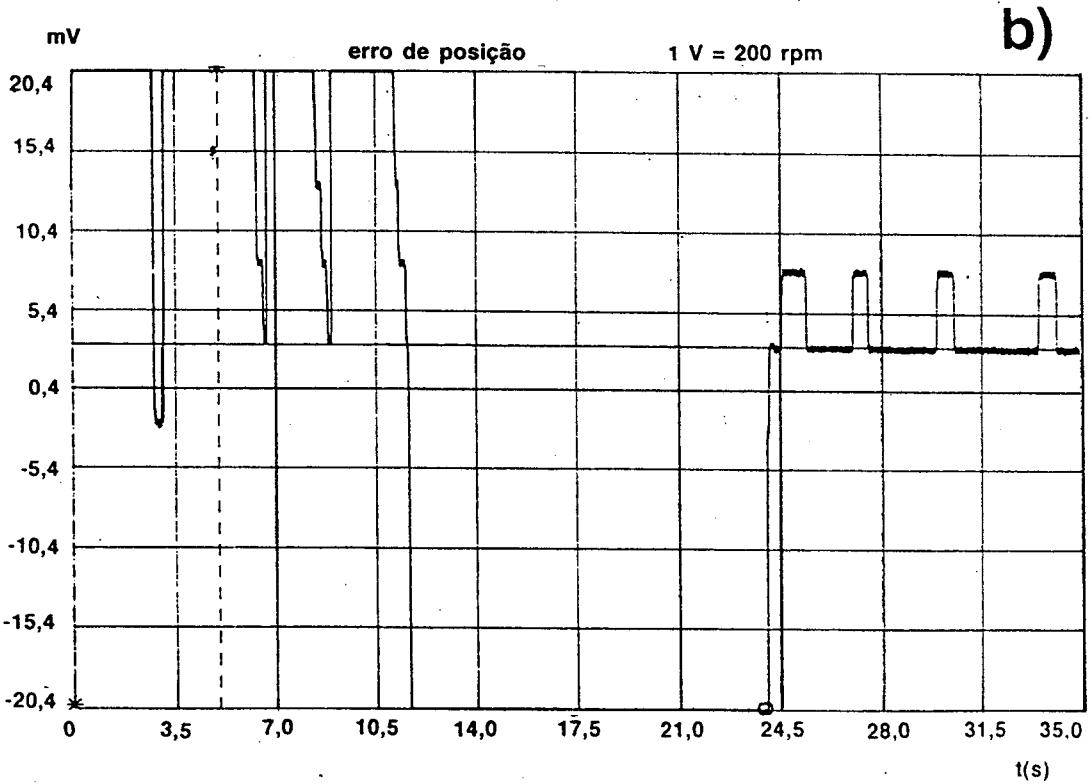
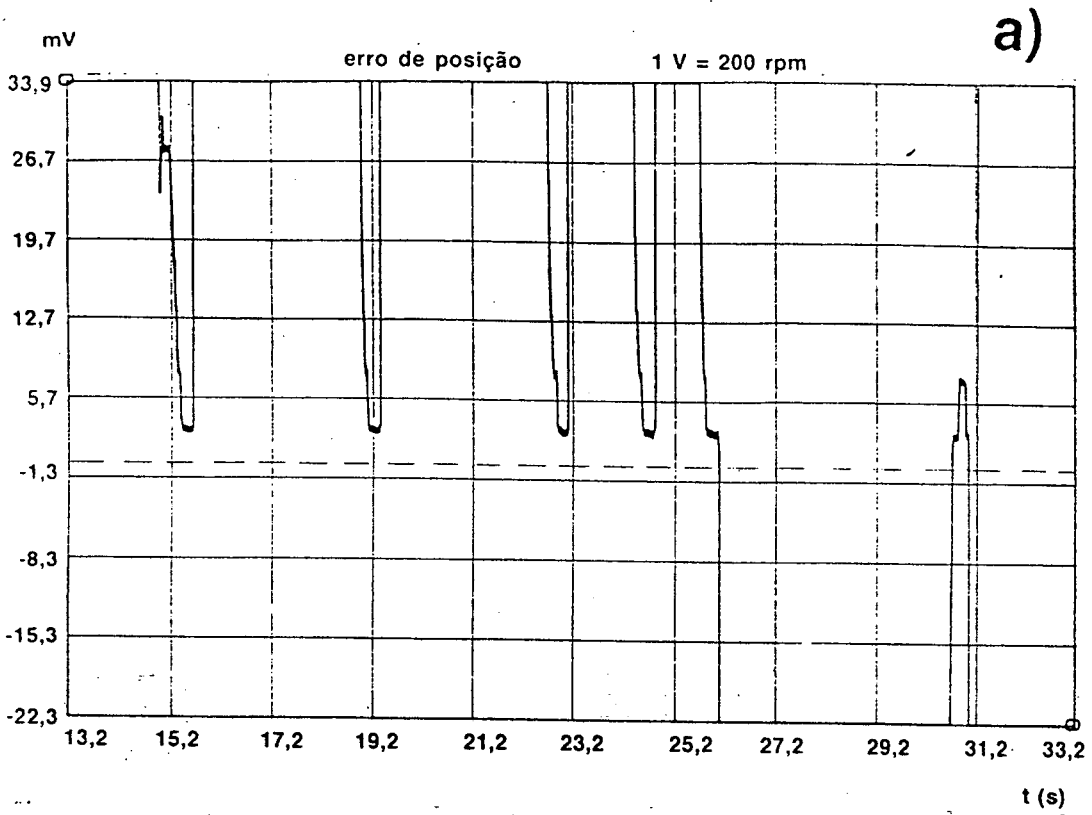


Figura 5.15 Registro do sinal de erro de posição para diferentes posições (ampliado)

5.5 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS.

Em relação aos resultados obtidos se observa o seguinte:

A sobrepassagem (M_p) obtida no eixo X, foi de 13%, maior do que a obtida no eixo Y (11 %). Isto coincide com a previsão teórica desenvolvida para sistemas lineares de segunda ordem, que demonstra que a sobrepassagem depende unicamente do coeficiente de amortecimento (D):

$$M_p = e^{-D\pi/\sqrt{1-D^2}} \quad (5.1)$$

Usando a equação (5.1) e os valores de sobrepassagem calculados dos gráficos das figuras 5.7a e b, se chegou aos seguintes resultados:

Eixo X	D=0.542
Eixo Y	D=0.573

O coeficiente de amortecimento "D" depende do atrito viscoso (b), do inverso do ganho proporcional (K) e da inércia (J). Como no caso do eixo X a inércia é menor e o ganho é maior em relação ao eixo Y, assim o amortecimento no eixo X é menor do que no eixo Y.

$$D = \frac{b}{2\sqrt{KJ}} \quad (5.2)$$

Nos resultados de tempo de resposta (t_r) se observa que o comportamento do eixo Y é menos próximo ao do sistema de segunda ordem pelo fato dos resultados diferir bastante dos valores teóricos dados segundo a equação (5.2), em relação ao eixo X, onde os resultados foram mais coincidentes.

$$t_r = \frac{1}{\omega_0 \sqrt{1-D^2}} \text{Arcotan} \left(\frac{\sqrt{1-D^2}}{D} \right) \quad (5.3)$$

Usando os valores de coeficiente de amortecimento calculados e tomando os valores de largura de banda medidos como ω_0 na equação (5.3), se chegou aos seguintes tempos de resposta:

Eixo X	$t_r=21.0$ ms	58% erro/medição
Eixo Y	$t_r=9.64$ ms	2.8% erro/medição

$$\omega_0 = \sqrt{K/J} \quad (5.4)$$

Em relação a ω_0 , frequência natural do sistema, que é diretamente proporcional ao ganho e inversamente à inércia, observa-se que os resultados confirmam esta expectativa, pois o eixo X, que possui menor inércia, precisou ser ajustado com um ganho proporcional menor que o eixo Y. Isto obedece a um comportamento lógico, pois ao se ter menor massa, implica uma diminuição da força de atrito, isto origina uma maior tendência à instabilidade.

Resumindo, pode-se dizer que o estudo teórico do comportamento do sistema de segunda ordem, mostrado na literatura [Ogata,87], dá uma orientação razoável para o estudo da dinâmica de sistemas de posicionamento reais, como o apresentado, sempre que possam ser razoavelmente modelados por um sistema de segunda ordem, como já se viu na análise de resposta no tempo. Este fato é comprovado ainda com a similaridade que guardam as curvas de ajuste, obtidas pelo CSA (Figura 5.11a e b), com os gráficos das medições realizadas, mostradas na mesma figura.

Os diagramas de Bode tem mostrado ressonâncias no entorno das frequências de 20 e 40 Hz para ambos os eixos. Isto motivou a realização de um ensaio adicional, desligando a correia no eixo X. O resultado e a curva vista na figura 5.16

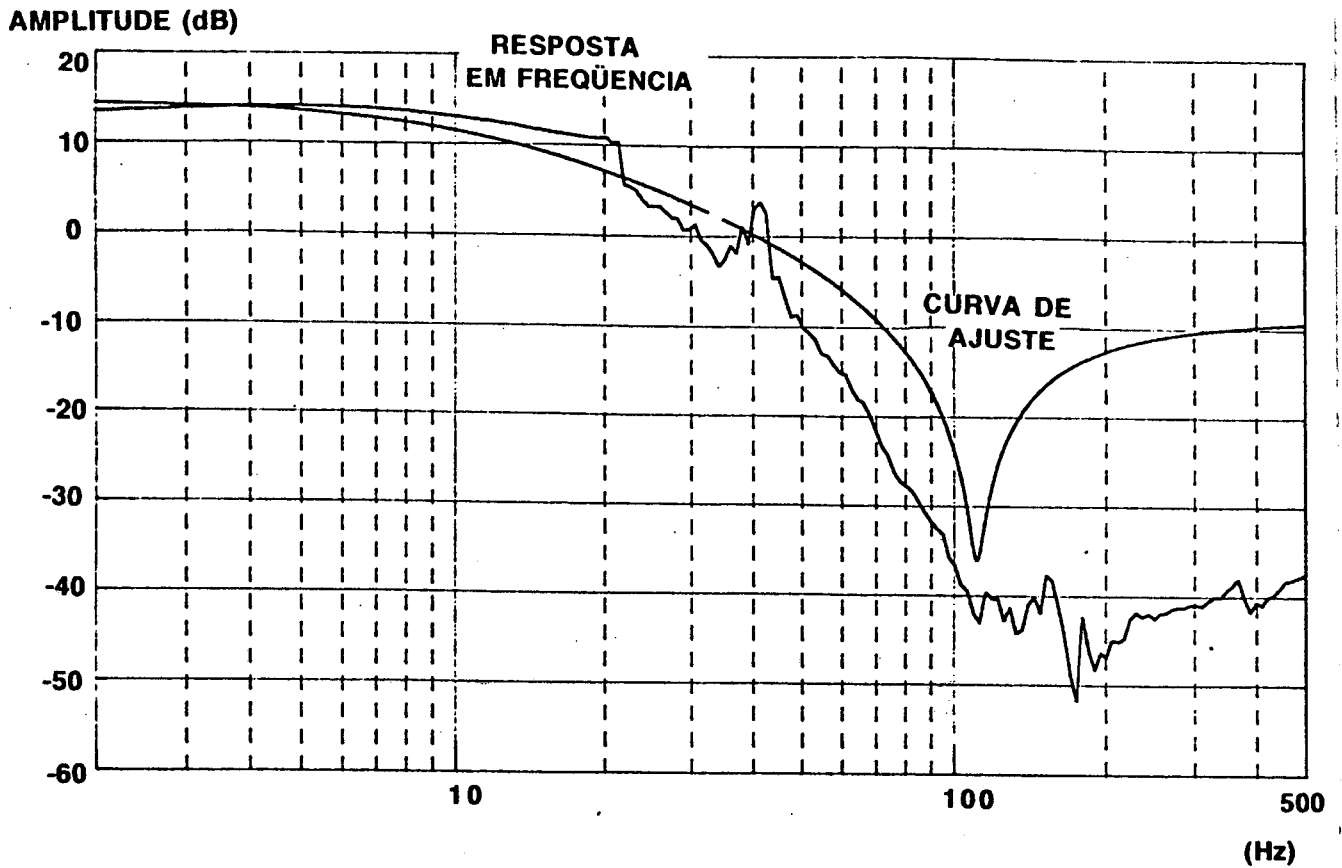


Figura 5.16 diagrama de Bode do servoacionamento do eixo X em vazio.

O objetivo de traçar as curvas mostradas nas figuras 5.14 e 5.15, foi o de observar a presença de sobrepassagem de posição através da inversão de sinal da tensão de comando à saída do comando numérico. Este fenômeno foi observado só na figura 5.15b, depois do primeiro deslocamento. Nos demais casos, o que se pôde observar foi a existência de uma tensão remanescente da ordem de +2 mV no eixo Y e de aproximadamente +4 mV no eixo Y. Possivelmente associadas com um nível de off set.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES

Em referência ao trabalho realizado e os resultados alcançados pode-se concluir:

i) Dos objetivos: No que diz respeito aos objetivos, foi realizada uma modernização numa fresadora segundo proposto, conseguiu-se habilitar dois eixos da máquina (X, Y) para responder aos comandos do CNC. Projetou-se e foi instalado, um sistema para efetuar a variação de velocidade da árvore. Este sistema ainda não foi instalado em sua totalidade e está em fase de teste. Foram testadas as características básicas da dinâmica do sistema, chegando-se a resultados satisfatórios em relação à rapidez de posicionamento e ao amortecimento, da ordem de grandeza dentro dos valores recomendados na literatura correspondente, segundo foi apresentado no item 4.4.4.1 e considerando as limitações próprias da não substituição de algumas partes da máquina que mostraram sinais de desgaste.

ii) Do "Retrofitting": O trabalho realizado na máquina, permitiú acrescentar-lhe características que o original não tinha, o que se menciona na tabela 3.1. Observou-se também a vantagem que representa o uso de escalas electro-ópticas como sistema de medição, porquanto estas, sendo um sistema de medição direta, permitem absorver imprecisões acarretadas por erros no passo do fuso, folga entre fuso e castanha, folga em acoplamentos, folga entre a correia e os dentes da polia, elasticidade da correia, etc. Sentiu-se a falta de um critério ou procedimento para avaliar as condições da máquina e assim estabelecer a validade de sua modernização. Segundo se pôde observar na literatura consultada sobre o tema, esta avaliação é realizada de uma maneira subjetiva, enquanto que a decisão é justificada em termos financeiros, só que carecendo de embasamento técnico mais objetivo. Em conclusão pode-se dizer que o "Retrofitting" Favoreceu principalmente os seguintes aspectos:

- Redução dos erros de posicionamento.
- Melhoras em termos de interface Homem-Máquina e Máquina-Periféricos.

- Aumento da faixa de velocidade.
- Extensão da vida produtiva da máquina.

iii) Do procedimento proposto para seleção de servomotores a serem usados em máquinas-ferramenta pode-se dizer que este procedimento resume critérios propostos por diferentes autores e que permite efetuar uma melhor adaptação de um determinado servomotor para uma aplicação específica, visando a otimização dos resultados. Isto é baseado principalmente na variação do diâmetro das polias do sistema de transmissão, do ajuste da relação de redução e seleção de seus materiais de construção. Foi também possível comparar o desempenho apresentado pelos servomotores CC com escovas com o dos servomotores CA.

iv) Dos objetivos obtidos em relação à experiência: Considerou-se que o mais importante foi o fato de ter vislumbrado um canal de comunicação que permite a integração disciplinas de engenharia elétrica e engenharia mecânica, estabelecendo-se uma linguagem e objetivos comuns. Nesse sentido, também constatou-se o interesse de outros centros de pesquisa no desenvolvimento de outros trabalhos na área de "Retrofitting" [Shiuh I,93], [Shiuh II,93].

v) A realização das montagens eletro-eletrônicas permite tirar as seguintes conclusões:

- Seria mais favorável ter contado com serviços de técnicos na execução das montagens, com o propósito de minimizar os erros e tempo de execução. Como no LHW até agora não há nenhum técnico disponível exceto estagiários, a montagem e realização das ligações demandou grande quantidade de trabalho e tempo que, sendo uma atividade de índole não acadêmica, pouco acrescenta à dissertação.

- A execução deste tipo de trabalho entretanto requer um adequado grau de conhecimento e planejamento, para realizar uma eficiente administração dos recursos.

6.2 RECOMENDAÇÕES

A continuidade do "Retrofitting" da fresadora Pratt & Whitney requer adicionalmente:

- Considerar a adaptação de um acionamento para o eixo Z.
- Fixar a máquina ao piso para reduzir as vibrações na realização de testes.
- Realização de ensaios para avaliação e calibração da máquina.
- Efetuar ensaios para avaliação do desempenho do sistema durante a usinagem de peças, e aplicação de cargas inerciais altas.
- Utilizar no procedimento de seleção de servomotores técnicas de simulação e modelagem para assim incluir parâmetros do comportamento dinâmico aos critérios de escolha.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIA BIBLIGRÁFICA

- [AM Staff] AM STAFF REPORT. At Emo, Europe Girds for Union, American Machinist, Vol135, No 8, Agosto, 1991.
- [Anderson,92] ANDERSON, Ashburn. Origins of NC: Was MIT Hero or Villain? American Machinist, Vol136, No 1, Janeiro, 1992.
- [Blauth,88] BLAUTH, Yeddo B.. Acionamento Elétrico em Quatro Quadrantes com Servomotor Síncrono a Imãs e Inversor a FETS de Potência. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1988.
- [Campos,92] CAMPOS R, Juan C. Controladora Flexível Multi-Eixo para Acionamentos Fracionários de Alta Dinâmica. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1992.
- [Chang,85] CHANG, Tien-Chien; WYSK, Richard. An Introduction to Automated Process Planning Systems. New Jersey, Prentice Hall, 1985.
- [Chikude] CHIKUDE, Kendi. Levantamento das dimensões e massas dos carros da fresadora Pratt & Whitney, documento interno, GRUCON-LHW,1991.
- [Childs,91] CHILDS, James J. All Accuracies are not the Same! American Machinist, Vol135 No 9, Setembro, 1991.
- [Coleman,90] COLEMAN, John, R. Take Control With CNC, Manufacturing Engineering, Vol 104, No 5, Maio, 1990.

- [D'Azzo,88] D'AZZO, John J; Houpis, C. H. Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares. Segunda Edição, Rio de Janeiro, Editora Guanabara, 1988.
- [Da Costa] LEAL, Longuinho da C. M.. Projeto de Máquinas-Ferramenta, Apostila, EMC, UFSC.
- [Erickson,90] ERICKSON, William, M. The Difference Between "Good Enough" and "Optimum" in Sizing Servomotores, REXROTH INDRAMAT, Ideas in Motion, Spring 1990.
- [Fuoco, 91] FUOCO, T. H; Furtado, M. R. Retrofitting. Esta é Uma boa Opção, Segundo Quem Já Usou. Máquinas e Metais, Vol 26, No 309, Outubro, 1991.
- [Gregory,90] GREGORY, Mike, CNC Adds Precision to Rebuilt VTL, Tooling & Production, Vol 56, No 3, Junho, 1990
- [Gross,83] GROSS, Hans. Electrical Feed Drives for Machine Tools. Munich, John Wiley & Sons, 1983.
- [Hammerstein] HAMMERSTEIN. Manual "Elektronische Bedienungsanleitung".
- [Heeb,89] HEEB, Harry B. Can Old Workhorses Still Pull their Weight?, Manufacturing Engineering, Vol 102, No 4 Abril, 1989.
- [Holland,89] HOLLAND, Ted. Now IBAG's High Speeds Get Given Higher Powers. Metalworking Production, Abril, 1989.
- [Jarc,87] JARC, Dennis A. A Graphical Approach to AC Drive Classification. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 1A-23, No 6, Novembro/Dezembro, 1987.
- [Kim, 90], KIM, S. W.; PARK, J. S, Computer Aided Optimum Motor Selection for DC Servo Drive Systems. International Journal of Machine Tools Manufacturing, Vol 30, No 2, 1990.

- [Knutton,89,II] KNUTTON, Peter. No Limit that can be Achieved..., Machinery and Production Engineering, Vol 147, No 3764, Julho, 1989.
- [Knutton,89] KNUTTON, Peter. More to it than Paint and Paraffin, Machinery and Production Engineering, Vol 147, No 3764, Julho, 1989.
- [Koren,83] KOREN, Yoram. Computer Control of Manufacturing Systems. Singapur, McGraw Hill, 1983.
- [Krüger,93]. KRÜGER, Paulo R. Avaliação da Dinâmica de Servoacionamentos CA Síncronos e Transmissões por Polias e Correia Sincronizadora Aplicados em Máquinas-Ferramenta CNC. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.
- [Lichtblau,87] LICHTBLAU, Marcos. Uma Contribuição ao Estudo da Dinâmica de Posicionadores. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1989.
- [Loskutov] LOSKUTOV, V. Mathematical Control Machines. Moscú, Peace Publishers.
- [Martin, 90] MARTIN, Merrill, How to Select a Variable-Speed Drive, Machine Design, outubro 1990
- [NBR,10050] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Fresadora de Banco Fixo Ensaio de Aceitação, NBR 10050/1987
- [NSK] NSK NIPPON SEIKO KK. Precision Machine Parts Linear Motion Products, Catálogo N° A1371, Tokyo.
- [Ogata,87] OGATA, Katsuhiko. Dinâmica de Sistemas. México, Prentice Hall, 1987

- [Oliveira,89] DE OLIVEIRA JUNIOR, Nery. Acionamentos de Avanço para Máquinas Ferramenta e Robôs. Comparação entre as Técnicas CA/CC. II Seminario de Eletrônica de Potência, SEP 89, Florianópolis, dezembro 1989, pág 147 a 149
- [PacSi] PACIFIC SCIENTIFIC. Brushless Servosystems, Catalogo N° PK91285
- [R & M, 89] ROBBINS & MYERS. DC Motors Speed Controls Servo Systems, Minnesota, Electro-Craft, 1989.
- [R & M, 90] ROBBINS & MYERS. AC Servo Drivers Handbook, Minnesota, Electro-Craft, 1990.
- [Redondo,69] REDONDO, Ibañez, J. Máquinas Herramientas de Control Numérico. Madrid, Editorial Dossat, 1969.
- [Schamisso,92] SCHAMISSO, Andrew. Largest High Speed Mills are Rebuilds, American Machinist, Vol136 No 6, Junho, 1992.
- [Schnell,90] SCHNELL, Götz. Roboterantriebe Bezüglich des Dynamischen Verhaltens Auswählen. Feinwrsetchnik & Messtechnik, Carl Hanser Verlag, Vol. 198, No 9, Setembro, 1990.
- [Shneydor,89] SHNEYDOR, N. A., A Procedure for the Design of Motor and Coupling for DC Servo Applications, Conference Record of the IEEE Industrial Application Society Annual Meeting 1989, San Diego, California, pp 171-176.
- [Shiuh I,93] SHIUH-JER Huang, Cheng-Fa Lee. Servo-Drive Systems for Milling Machine Retrofit Application. International Journal of Machine Tools Manufacturing, Vol 33, No 3, 1993
- [Shiuh II,93] SHIUH-JER Huang, Mu-Tyan Yan. Theoretical and Experimental Study of PI Control, Adaptative Control and Variable Structure for Converted Traditional Milling Machines.

International Journal of Machine Tools Manufacturing, Vol 33, No 5, 1993

- [Simon,90] SIMON, Alexandre Tadeu. Retrofitting e Reforma, duas Formas de Melhorar a Produção. Máquinas e Metais, Vol 25, No 297, Outubro, 1990.
- [Stauffer,90] STAUFFER, Robert, N. Making the Right Moves in Machine Make Over, Manufacturing Engineering, Vol 104, No 3, Maio, 1990.
- [Strenio,87] STRENIO, Donald. Selecting the Right Servo. Power Transmission Design, Vol 29, No 10, outubro, 1987.
- [THK] THK Co., LTD. Linear Motion System, Catalogo N° 75EA, Tokyo.
- [Weck I,84] WECK, Manfred. Handbook of Machine Tools, Volume 1 Types of Machines, Forms of Construction and Applications, London, John Wiley & Sons, 1984.
- [Weck III,84] WECK, Manfred. Handbook of Machine Tools, Volume 3 Automation and Controls, London, John Wiley & Sons, 1984.
- [Younkin,90] YOUNKIN, George W. Drive Sizing Requeriments for Machine Tool Feed Drivers. Conference Record of the IEEE Industrial Application Society Annual Meeting 1990, Seattle, Washington, pp 1533-1538.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

MARTIN, C. A. Dinâmica de Sistemas de Comando e Servomecanismos, Apostila EMC, UFSC.

APÊNDICE 1

TABELA DA FUNÇÃO "S"

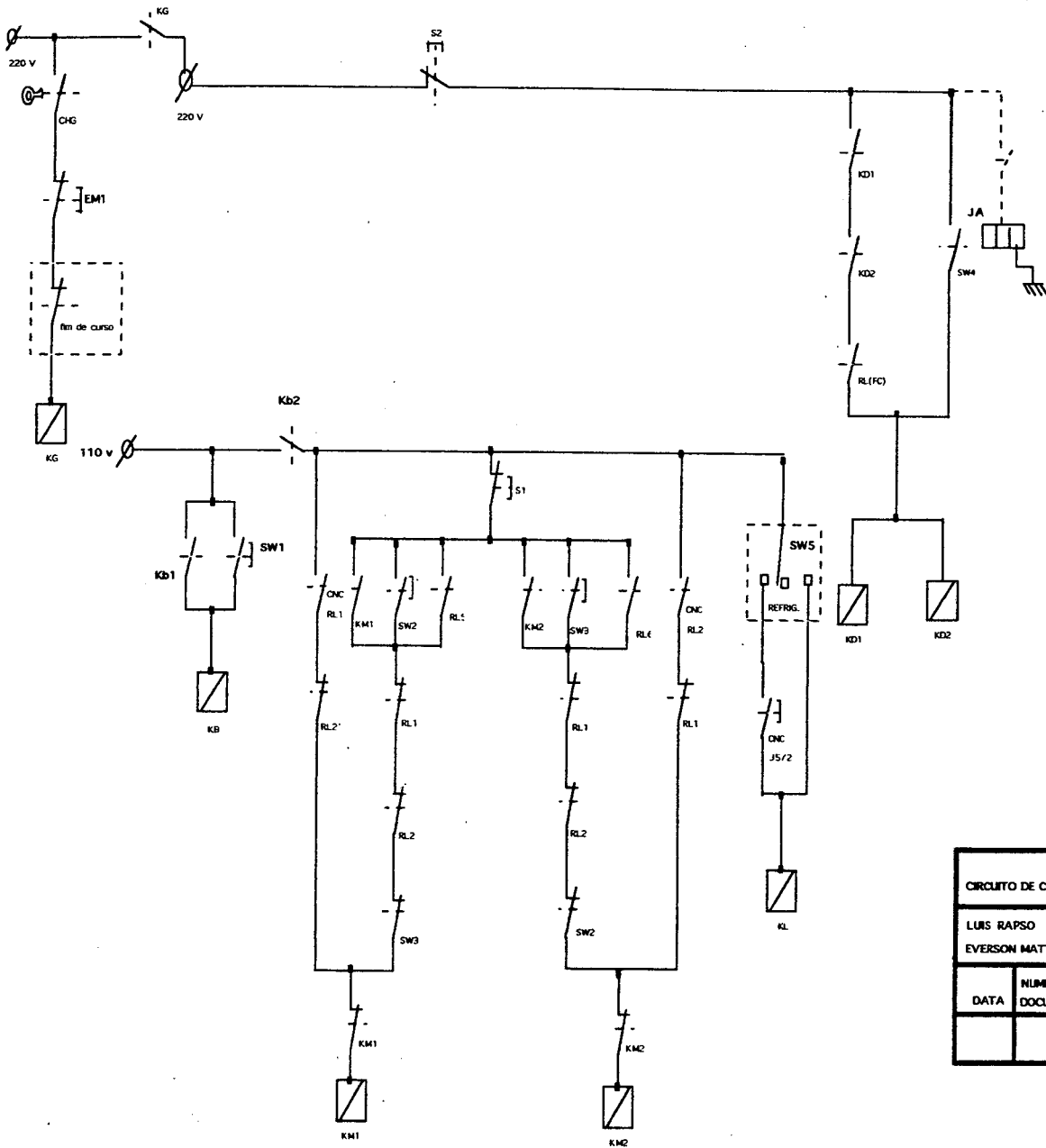
S-Funktion	U/min.	Klemmstecker J4 bit 1234 5678
S 00	0	0000 0000
S 01	0,112	1000 0000
S 02	0,125	0100 0000
S 03	0,14	1100 0000
S 04	0,16	0010 0000
S 05	0,18	1010 0000
S 06	0,2	0110 0000
S 07	0,224	1110 0000
S 08	0,25	0001 0000
S 09	0,28	1001 0000
S 10	0,315	0000 1000
S 11	0,355	1000 1000
S 12	0,4	0100 1000
S 13	0,45	1100 1000
S 14	0,5	0010 1000
S 15	0,56	1010 1000
S 16	0,63	0110 1000
S 17	0,71	1110 1000
S 18	0,8	0001 1000
S 19	0,9	1001 1000
S 20	1	0000 0100
S 21	1,12	1000 0100
S 22	1,25	0100 0100
S 23	1,4	1100 0100
S 24	1,6	0010 0100
S 25	1,8	1010 0100
S 26	2	0110 0100
S 27	2,24	1110 0100
S 28	2,5	0001 0100
S 29	2,8	1001 0100
S 30	3,15	0000 1100
S 31	3,55	1000 1100
S 32	4	0100 1100
S 33	4,5	1100 1100
S 34	5	0010 1100
S 35	5,6	1010 1100
S 36	6,3	0110 1100
S 37	7,1	1110 1100
S 38	8	0001 1100
S 39	9	1001 1100
S 40	10	0000 0010
S 41	11,2	1000 0010
S 42	12,5	0100 0010
S 43	14	1100 0010
S 44	16	0010 0010
S 45	18	1010 0010
S 46	20	0110 0010
S 47	22,4	1110 0010
S 48	25	0001 0010
S 49	28	1001 0010

S-Funktion	U/min.	Klemmstecker bit 1234 5678
S 50	31,5	0000 1010
S 51	35,5	1000 1010
S 52	40	0100 1010
S 53	45	1100 1010
S 54	50	0010 1010
S 55	56	1010 1010
S 56	63	0110 1010
S 57	71	1110 1010
S 58	80	0001 1010
S 59	90	1001 1010
S 60	100	0000 0110
S 61	112	1000 0110
S 62	125	0100 0110
S 63	140	1100 0110
S 64	160	0010 0110
S 65	180	1010 0110
S 66	200	0110 0110
S 67	224	1110 0110
S 68	250	0001 0110
S 69	280	1001 0110
S 70	315	0000 1110
S 71	355	1000 1110
S 72	400	0100 1110
S 73	450	1100 1110
S 74	500	0010 1110
S 75	560	1010 1110
S 76	630	0110 1110
S 77	710	1110 1110
S 78	800	0001 1110
S 79	900	1001 1110
S 80	1000	0000 0001
S 81	1120	1000 0001
S 82	1250	0100 0001
S 83	1400	1100 0001
S 84	1600	0010 0001
S 85	1800	1010 0001
S 86	2000	0110 0001
S 87	2240	1110 0001
S 88	2500	0001 0001
S 89	2800	1001 0001
S 90	3150	0000 1001
S 91	3550	1000 1001
S 92	4000	0100 1001
S 93	4500	1100 1001
S 94	5000	0010 1001
S 95	5600	1010 1001
S 96	6300	0110 1001
S 97	7100	1110 1001
S 98	8000	0001 1001
S 99	9000	1001 1001

APÊNDICE 2

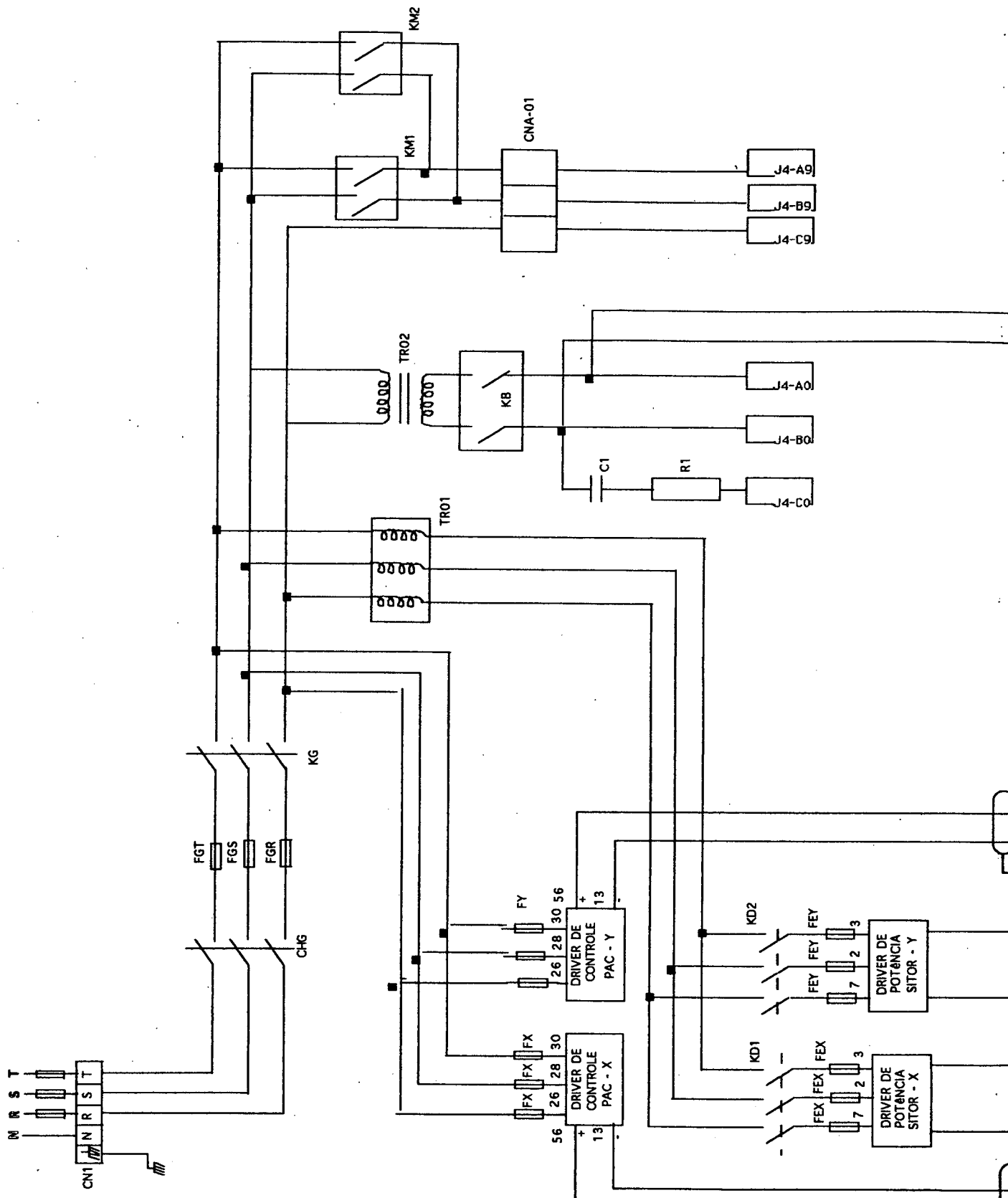
DIAGRAMAS ELÉTRICOS

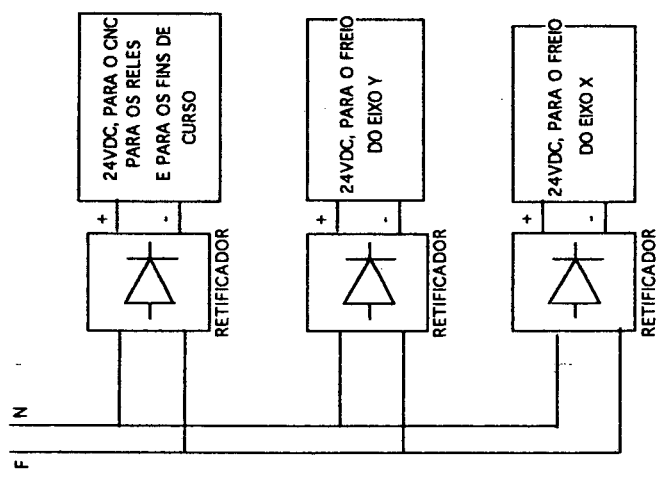
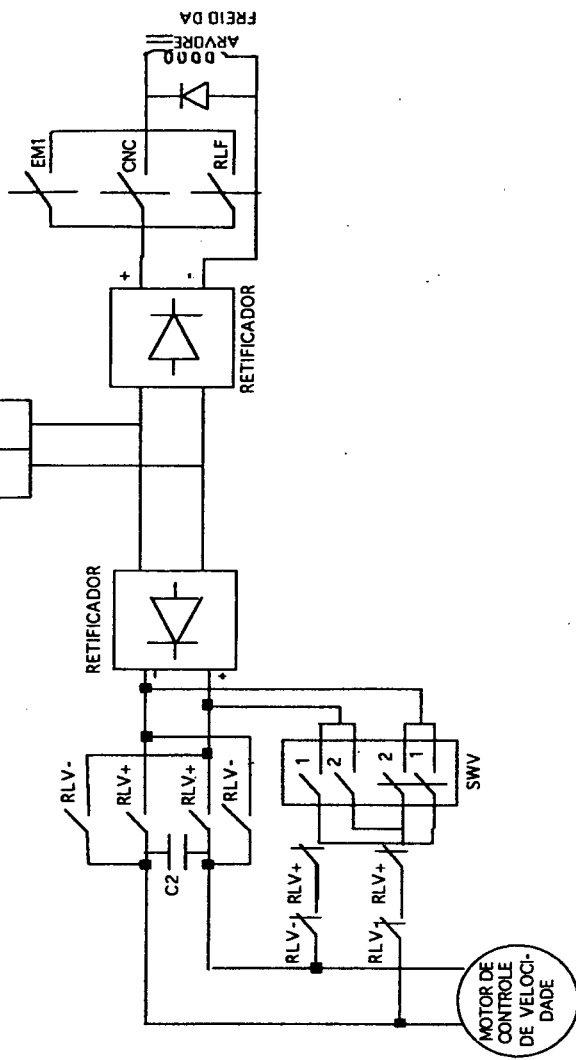
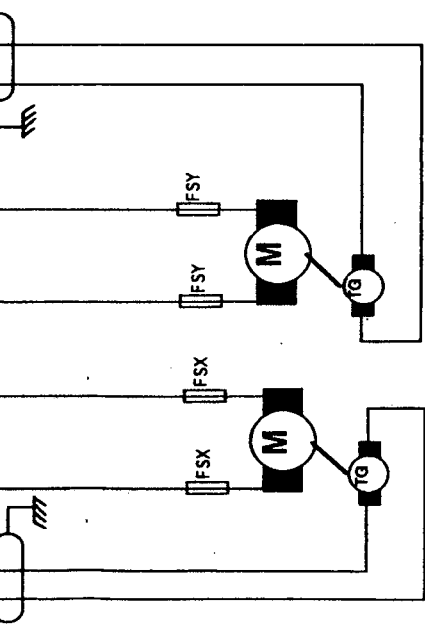
DIAGRAMAS ELÉTRICOS



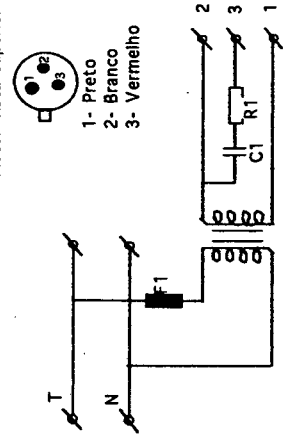
CIRCUITO DE COMANDO		
LUIS RAPSO		
EVERSON MATTOS		
DATA	NUMERO DO DOCUMENTO	GRUPO
		LHW

CIRCUITO DE POTÊNCIA





Motor vista superior



C1-Capacitor de 4uF/370VCA
R1-Resistor de 175Ω/50W

Diagrama de conexões do motor síncrono da Bomba de Lubrificação

APÊNDICE 3

AVALIAÇÃO DO SUBSISTEMA EIXO Z

AVALIAÇÃO DO SUBSISTEMA EIXO Z

Com a finalidade de modificar e adaptar o posicionamento do eixo Z ao acionamento automático foi realizada uma análise e avaliação onde foram estudadas diferentes alternativas para realizar as funções nele existentes, objetivando-se minimizar as modificações do projeto existente, o qual inclui o elementos mostrados na figura A3.1

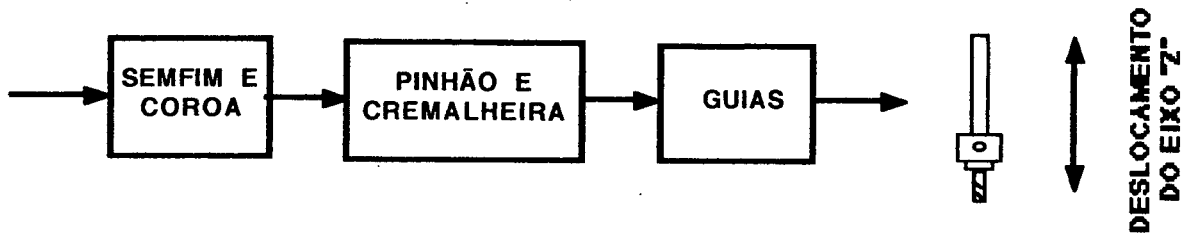


Figura A3.1 Sistema mecânico eixo "Z"

Foram encontrados os seguintes conjuntos de possibilidades:

1. Função entrada de movimento.

- Servomotor na entrada do sem-fim.
- Servomotor com redutor na entrada do subsistema pinhão e cremalheira.

2. Função conversão de movimento rotatório em traslativo.

- Fuso de esferas.
- Cremalheira helicoidal.
- Mecanismo de barras.
- Mecanismo de came.

3. Função guias:

- Guias lineares de rolamento lineares .
- Guias de deslizamento (Recondicionamento do sistema existente).

Foram estabelecidos os seguintes critérios para avaliar as diferentes alternativas.

- Consumo de energia
- Segurança da função
- Nível de modificação a ser realizado
- Condições favoráveis para controle
- Montagem
- Manutenção
- Custo
- Precisão

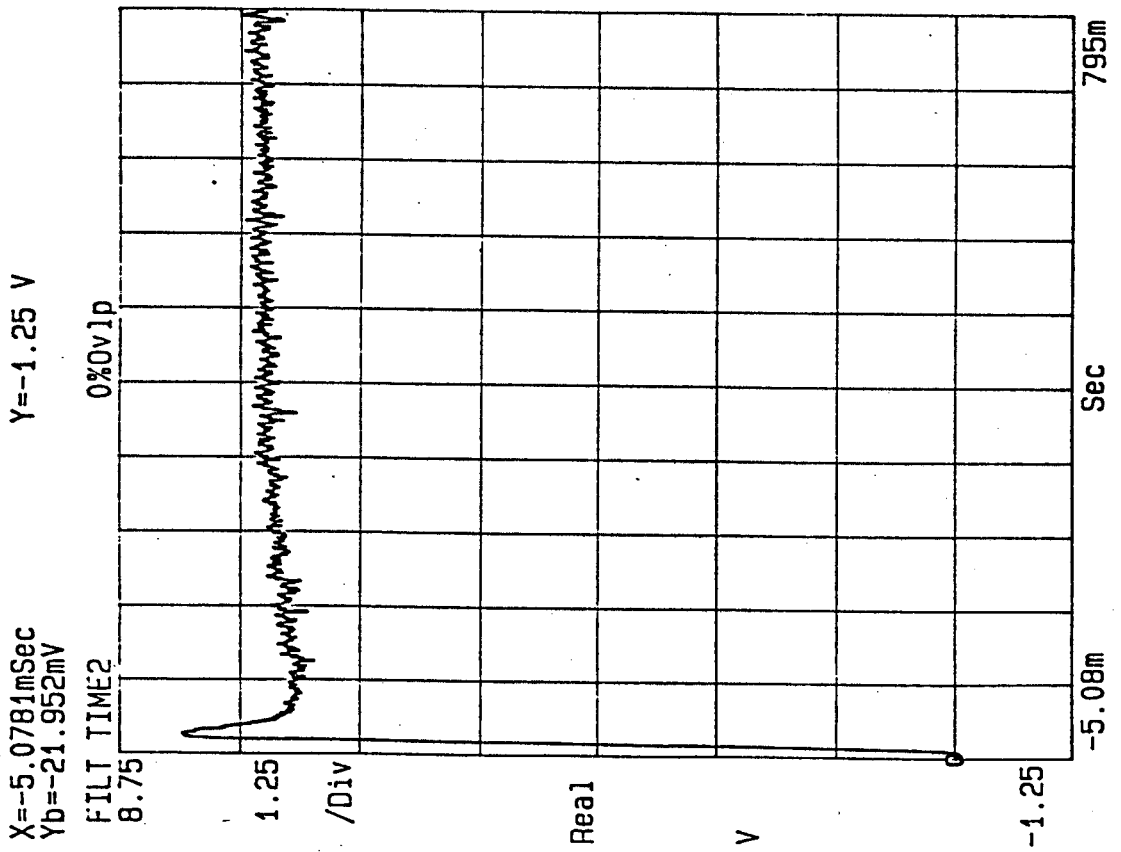
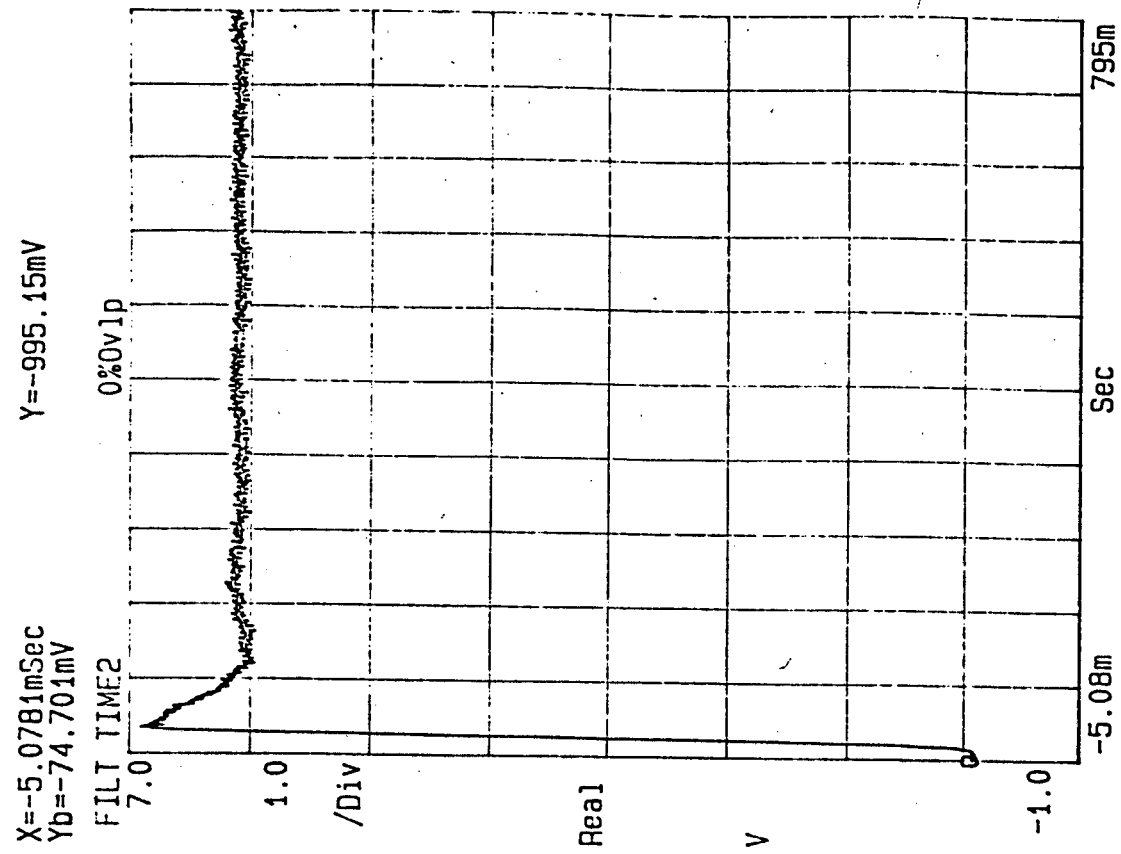
Como resultado da avaliação feita, chegou-se à seguinte combinação de variantes para o sistema mecânico do eixo Z:

Servomotor com transmissão de movimento na entrada do semfim, prevendo-se uma possível redução por correia sincronizada, cremalheira de dentes retos e guias de deslizamento; prevendo-se também o recondicionamento delas.

Segundo já foi apresentado na figura 3.3, se propõe um sistema de posicionamento onde o sistema mecânico é composto como anteriormente foi descrito. O servo-acionamento a ser instalado será definido num futuro trabalho. O sistema de medição de velocidade angular forma parte do servomotor com muita frequência e como sistema de medição da posição se preve o uso de uma escala eletro-óptica.

APÊNDICE 4

**GRÁFICAS ORIGINAIS
GERADAS PELO CSA**

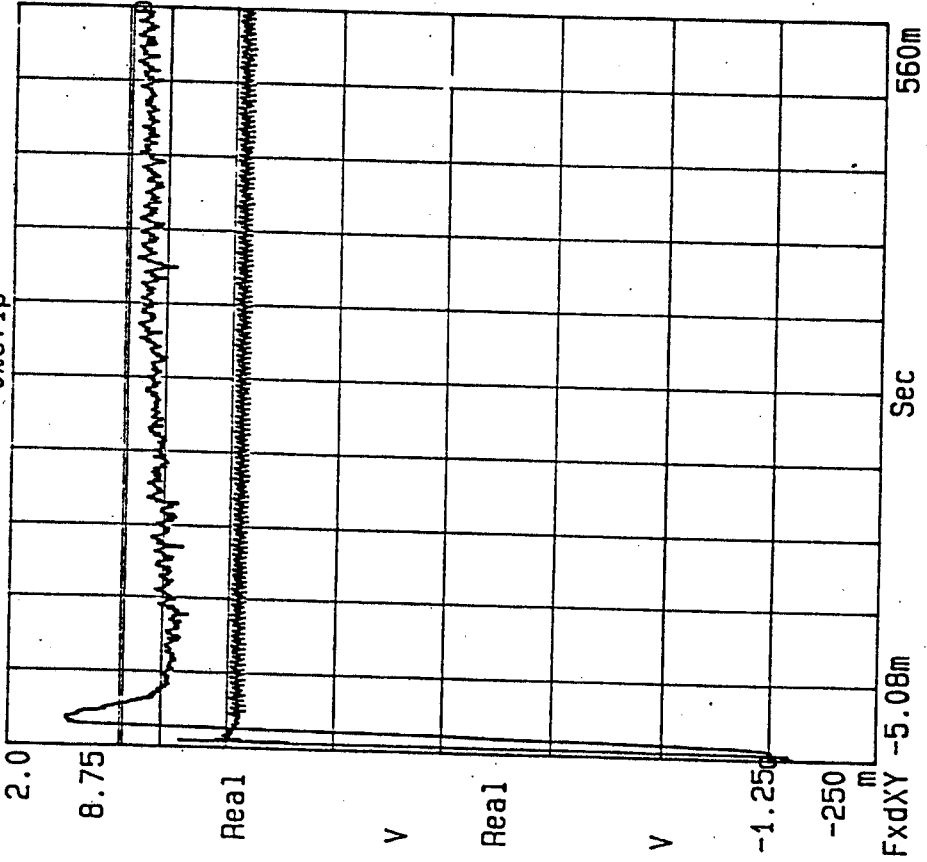


X=-5.08mS ΔX=565.2mS Y=7.46182 ΔY=438.2mV

FILT TIME1 0%0v1p

Yb=-21.952m ΔYb=7.363 V

FILT TIME2 2.0

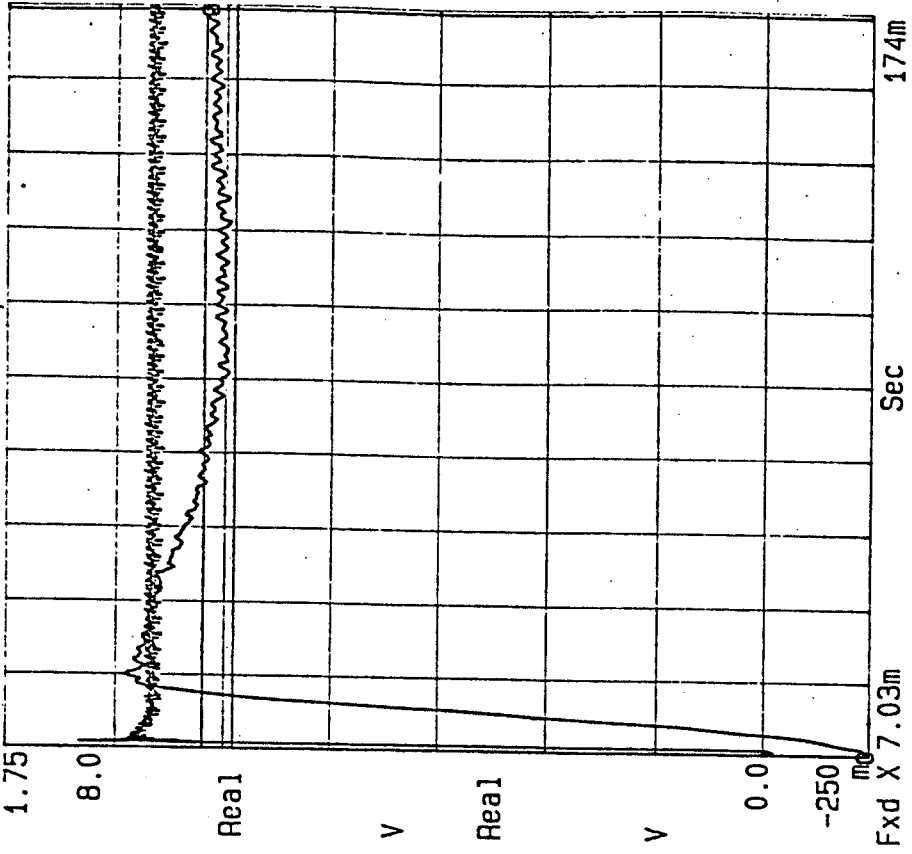


X=7.031mS ΔX=166.0mS Y=5.91235 ΔY=286.9mV

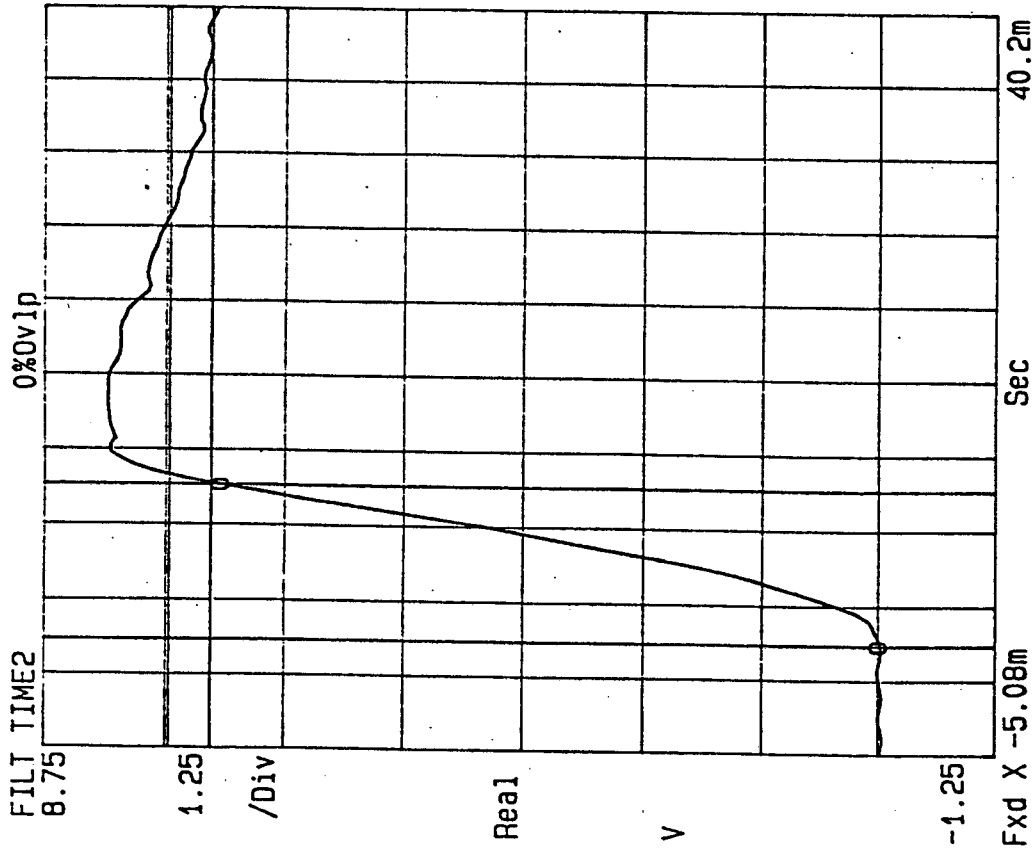
FILT TIME1 0%0v1p

Yb=6.13981m ΔYb=6.139 V

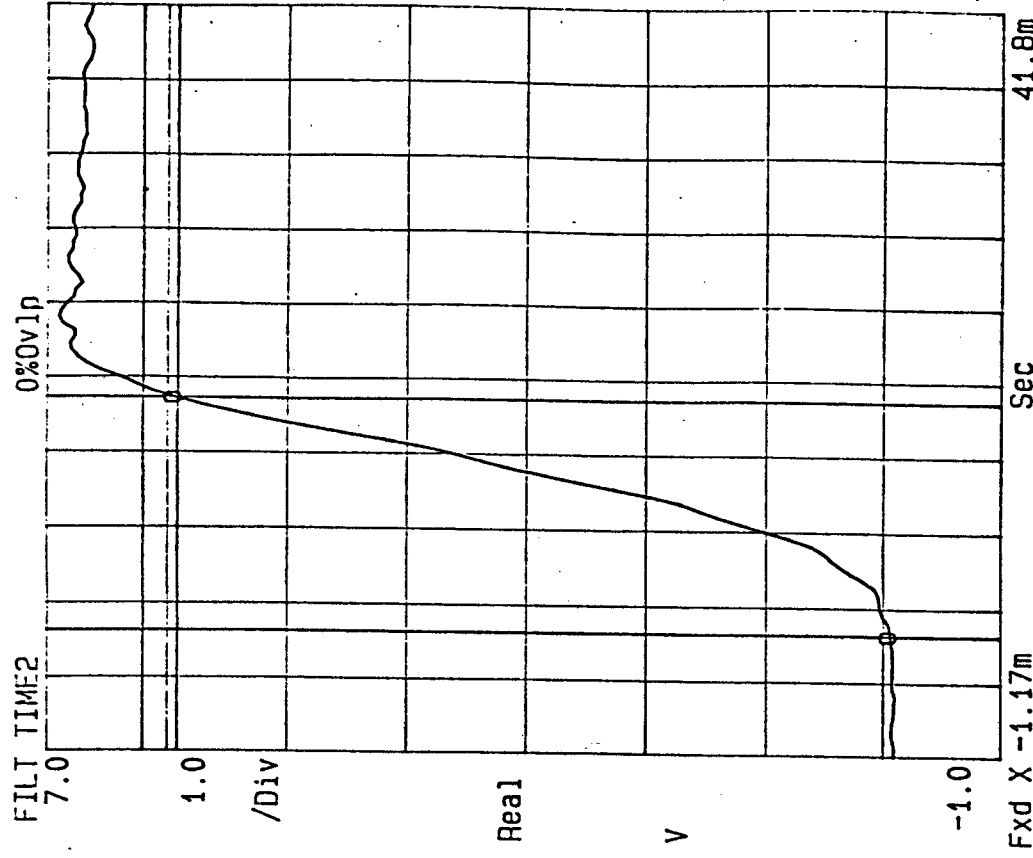
FILT TIME2 1.75

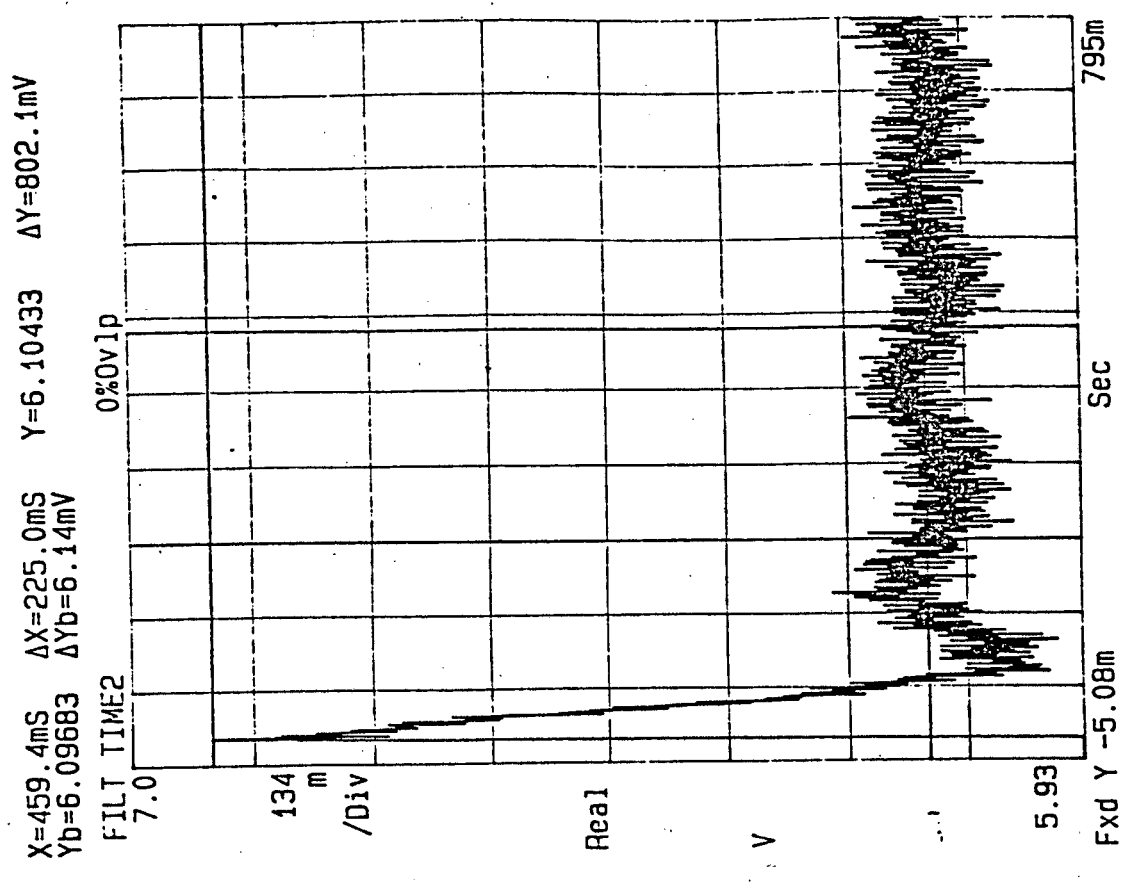
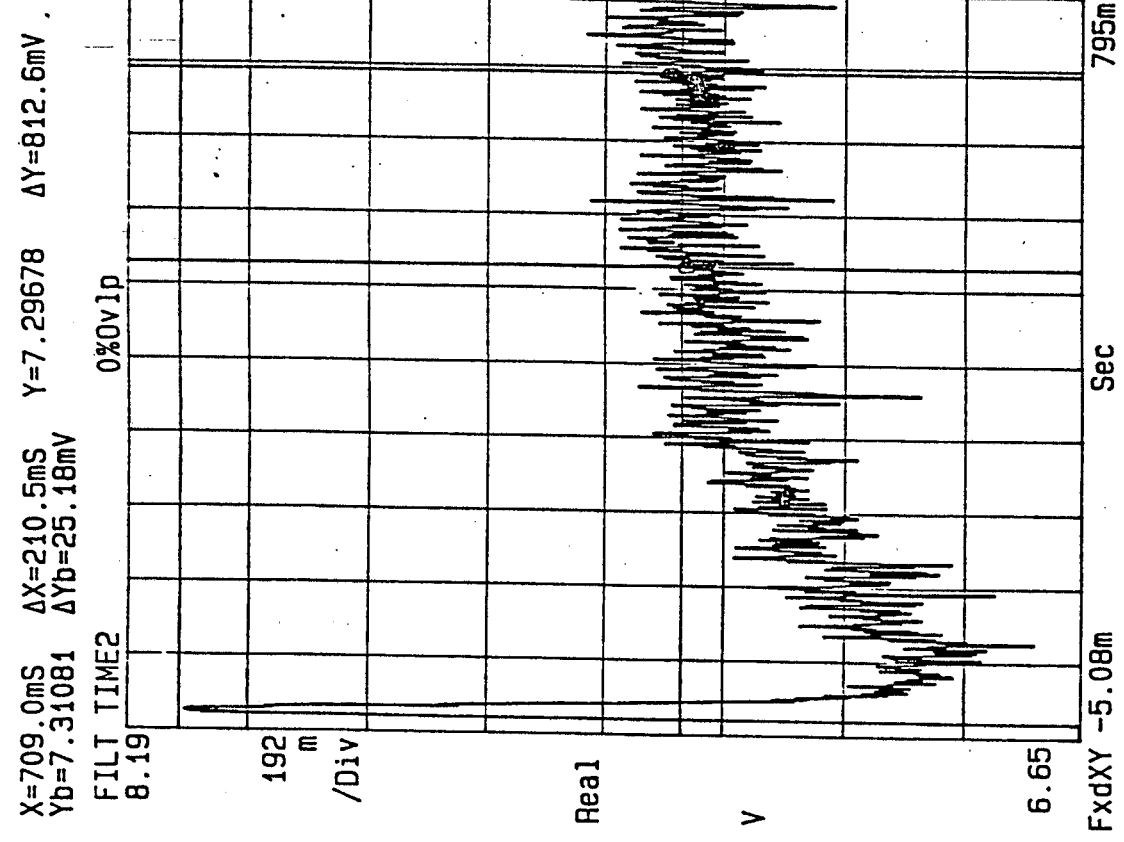


X=10.94mS ΔX=9.375mS Y=7.45909 ΔY=436.4mV
Yb=6.91244 ΔYb=6.941 V



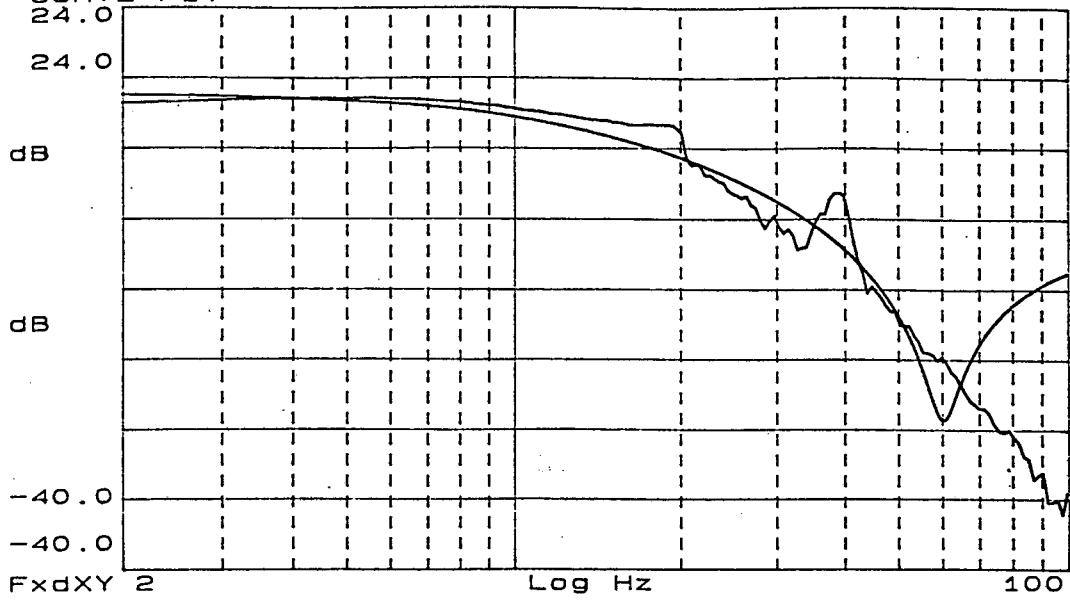
X=19.14mS ΔX=13.28mS Y=5.91394 ΔY=286.1mV
Yb=5.93618 ΔYb=6.0 V





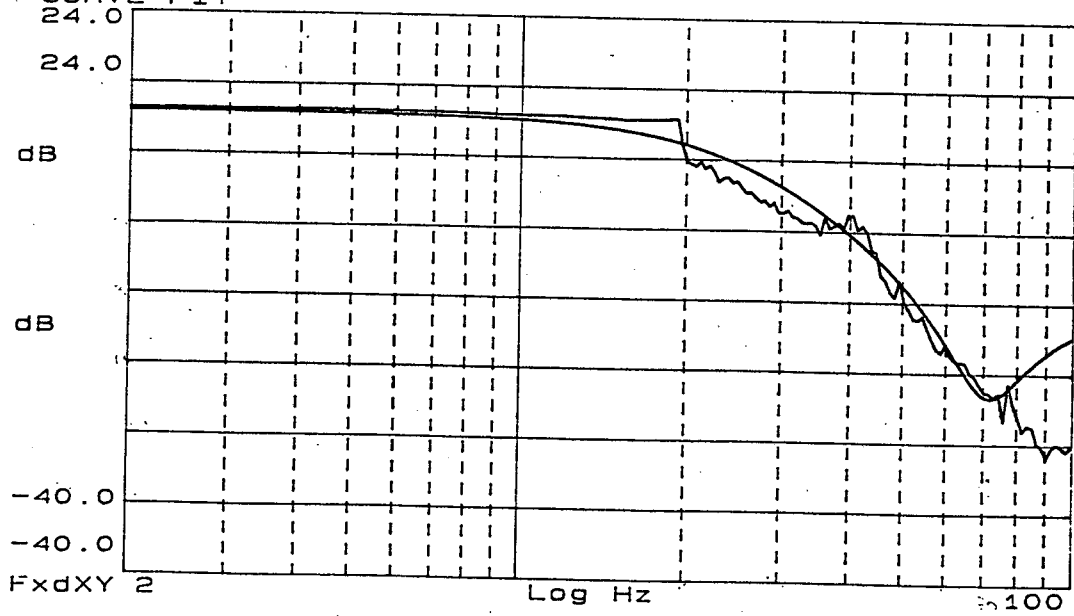
FREQ RESP

CURVE FIT

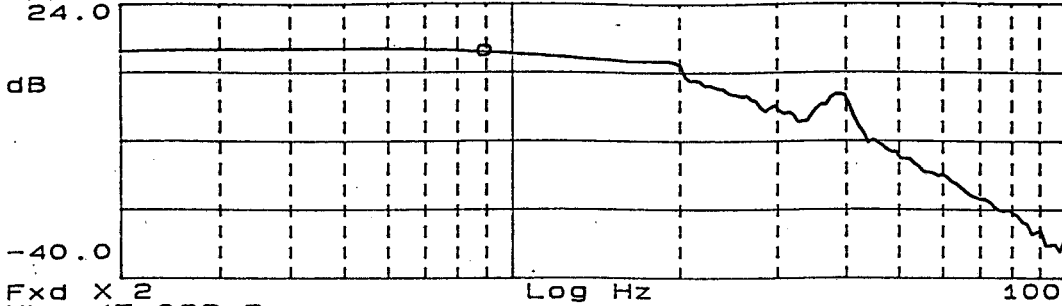


FREQ RESP

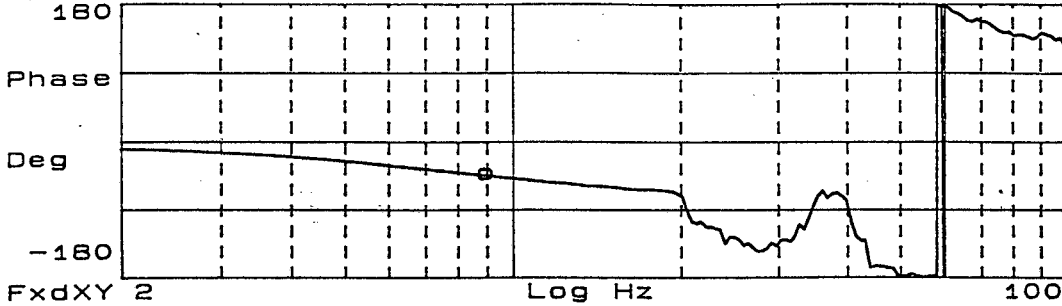
CURVE FIT



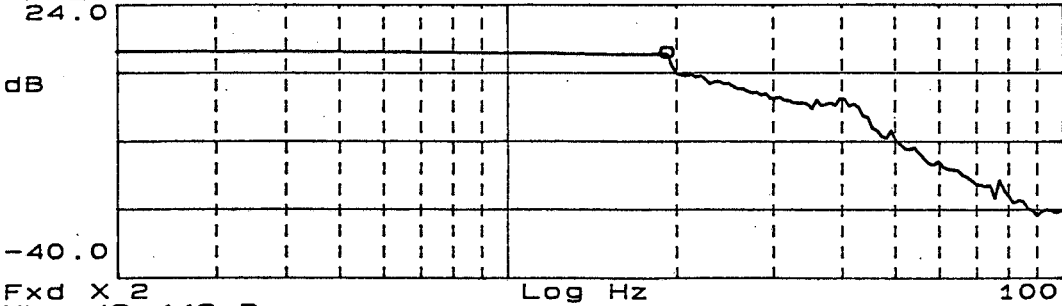
X=8.9744 Hz
Y=12.831 dB
FREQ RESP
24.0



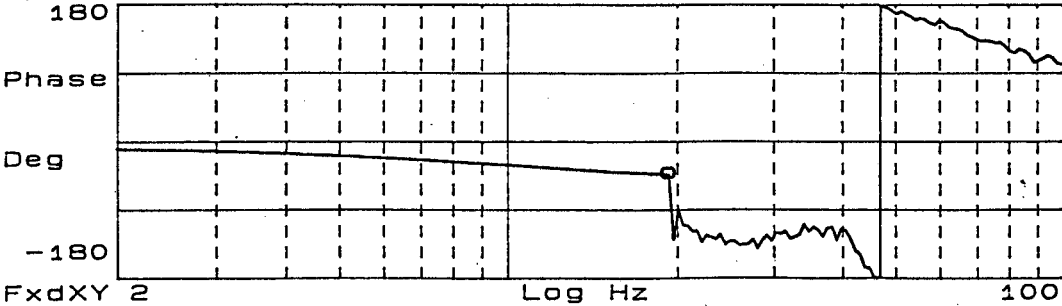
Fxd X 2
Yb=-45.086 Deg
FREQ RESP
180



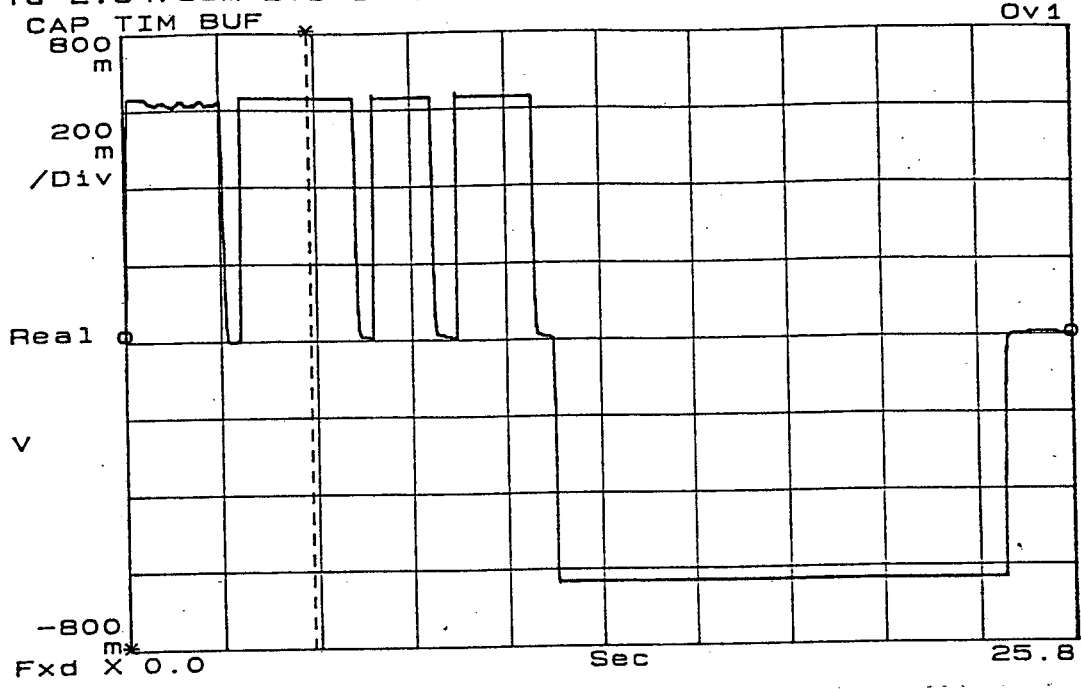
X=19.339 Hz
Y=12.5343 dB
FREQ RESP
24.0



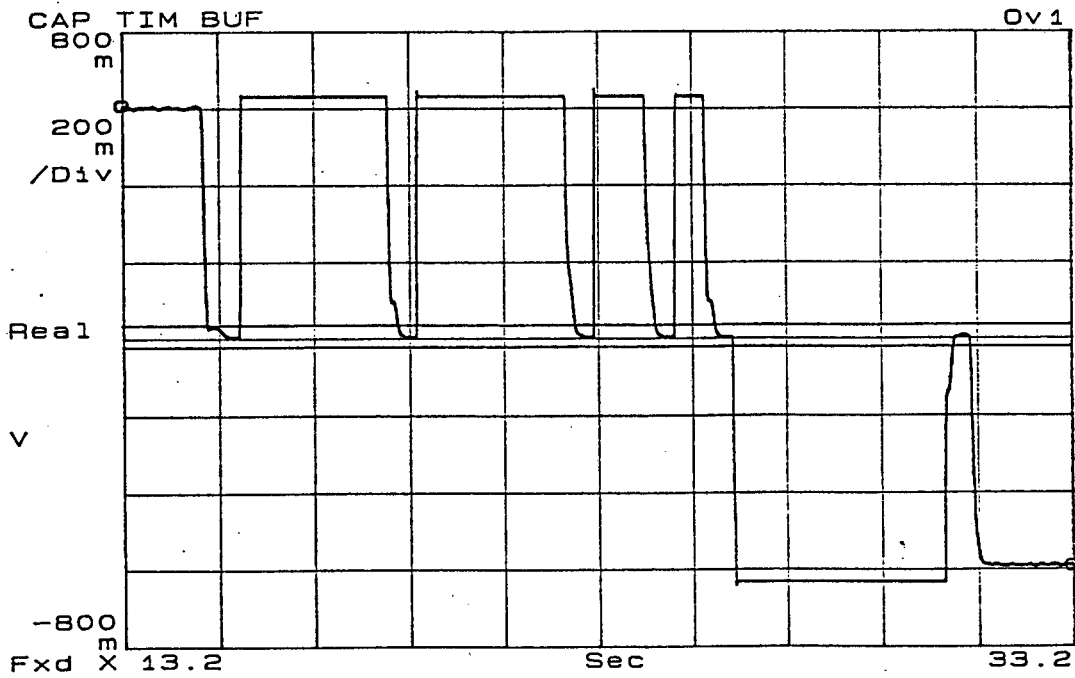
Fxd X 2
Yb=-43.442 Deg
FREQ RESP
180



X=25.83 S ΔX=25.83 S
Ya=2.64753m ΔYa=10.36mV



X=13.18 S ΔX=20.01 S Y=-22.303m ΔY=56.24mV
Ya=604.434m ΔYa=1.199 V

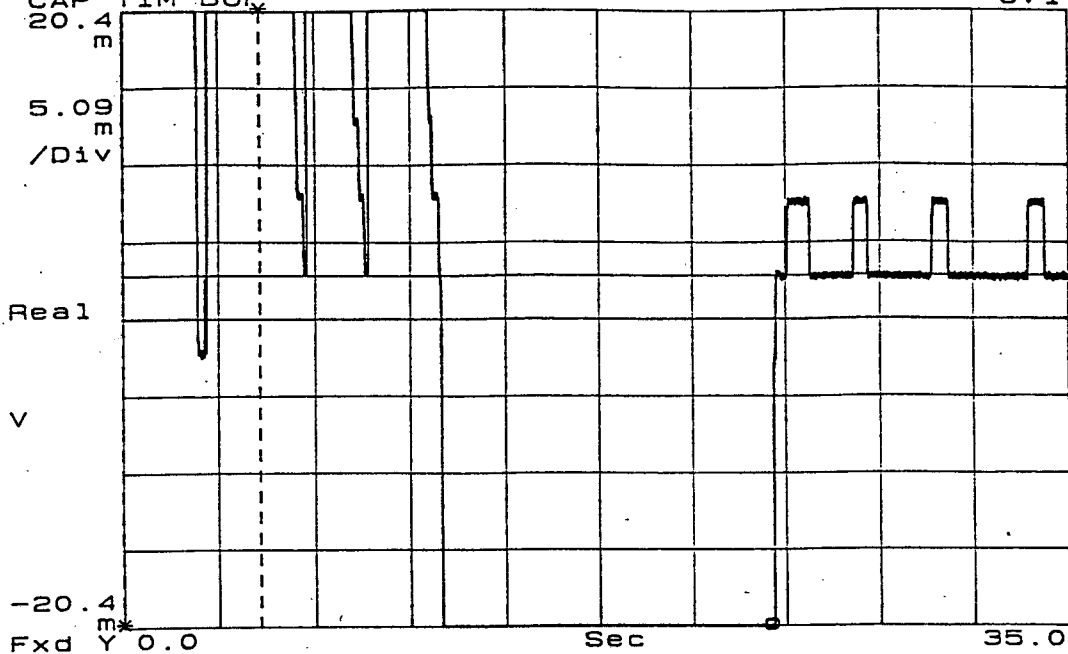


X=23.999 Sec
Ya=-133.48mV

Y=-63.33n ΔY=2.863mV

CAP TIM BUF

Ov1

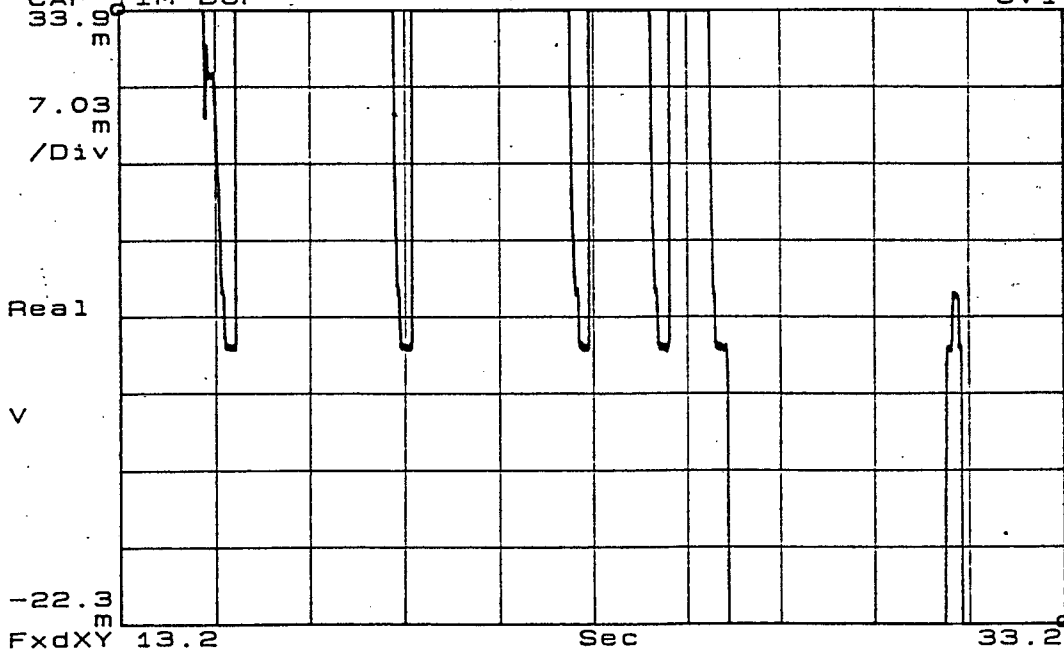


X=13.18 S ΔX=20.01 S
Ya=604.434m ΔYa=1.199 V

Y=-22.303m ΔY=56.24mV

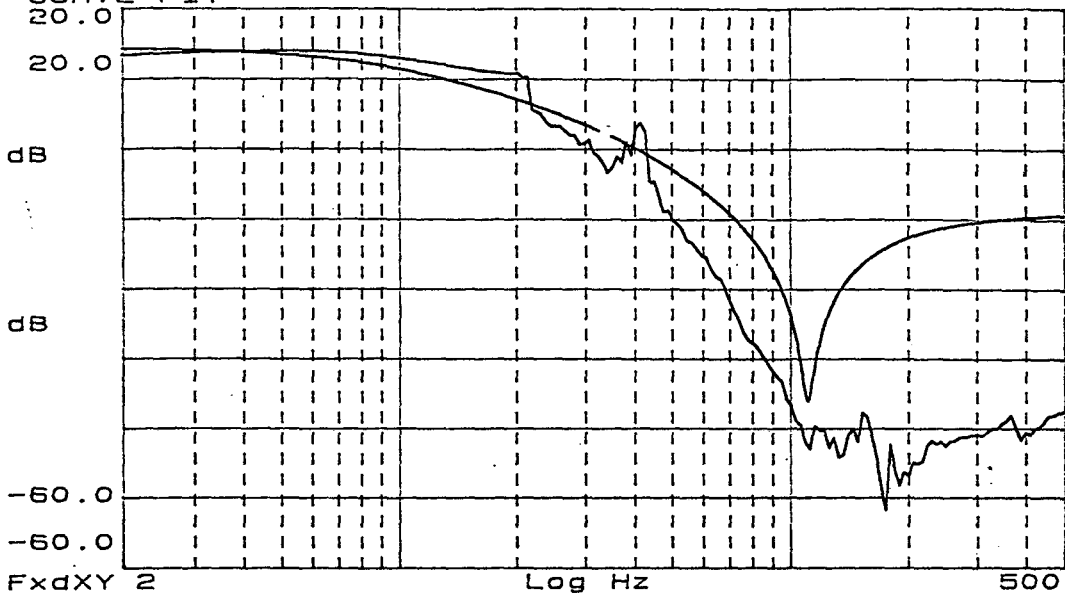
CAP TIM BUF

Ov1



FREQ RESP

CURVE FIT



FxdXY 2

Log Hz

500