

Augusto

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico
Curso de Engenharia de Controle e
Automação Industrial

**Modernização de Máquinas Ferramenta:
Contribuição na Automação de um Torno de
Ultraprecisão**

Monografia submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação da disciplina:
EEL 5901: Projeto de Fim de Curso

Sandro Battistella

Florianópolis, Fevereiro de 1997.

Seria conveniente substituir Torno Moore
por, simplesmente, "torno" em 95% das
oportunidades em que aparece !!

**Modernização de Máquinas Ferramenta:
Contribuição na Automação de um Torno de
Ultraprecisão**

Sandro Battistella

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina
EEL 5901: Projeto de Fim de Curso
e aprovada na sua forma final pelo
Curso de Engenharia de Controle e Automação Industrial

Banca Examinadora:

Eng^o. Jose Maria Mascheroni
Orientador do Projeto

Prof. Walter Lindolfo Weingaertner
Coorientador do Projeto

Prof. Augusto Humberto Bruciaplaga
Responsável pela Disciplina e Coordenador do Curso

Prof^o Antonio Augusto Rodrigues Coelho, Avaliador

Alexandre Moraes Barp, Debatedor

Ivana Fontanive Capanema, Debatedora

AGRADECIMENTOS

À minha *família* pelo contínuo auxílio e incentivo, sem os quais, certamente, não teria conseguido executar esse importantíssimo passo em minha vida, ao qual serei eternamente grato.

À todos os colegas, professores e funcionários do Curso de Engenharia de Controle e Automação, que através do mútuo esforço e ajuda, vem sendo uma dos elementos motivadores nesse contínuo processo de aprendizado.

Ao pessoal da ISA Engenharia por possibilitar o meu desenvolvimento profissional, em um ambiente de trabalho extremamente enriquecedor, seja do ponto de vista profissional, quanto das relações entre seus membros.

A todos aqueles que de uma forma ou outra, contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho, notadamente as equipes de trabalho do Laboratório de Mecânica de Precisão e da Empresa Audaces.

A essa *equipe* que nos acompanha em todos os lugares, nem sempre perceptível, mas com a qual poderemos sempre contar.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo apresentar as várias etapas envolvidas no projeto de *retrofitting* de máquinas-ferramentas, de forma a fornecer as vantagens e características encontradas nas modernas máquinas CNC.

As tarefas a serem realizadas envolvem o aprimoramento dos conhecimentos na área de automação de máquinas para usinagem de ultraprecisão e a implementação da automação de um equipamento com estas características. O equipamento a ser modernizado consiste de um torno, de procedência americana, datado da década de 70, a ser utilizado em usinagem de ultraprecisão.

O projeto consiste de uma parceria entre o Laboratório de Mecânica de Precisão (*LMP*), do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, e a empresa ISA Engenharia Ltda.

Este trabalho é estruturado como segue:

Inicialmente são descritos detalhes relevantes do funcionamento de máquinas CNC. Em seguida são apresentados aspectos da usinagem de ultraprecisão e do *retrofitting* de máquinas-ferramenta.

Finalmente encontram-se descritos os aspectos práticos da implementação do projeto, descrevendo as atividades relacionadas com a estruturação da motorização dos eixos, da garantia de segurança do equipamento e de um sistema de interpretação de programas para máquinas CNC.

ABSTRACT

This work presents the several steps related to the retrofitting of manufacturing machines, including its design and implementation, providing the features, advantages and profits found out in the recent CNC machines.

The tasks involved in the retrofitting, comprehend the knowledge improvement in the automation of high precision machine tool and the automation of an equipment with this characteristics. The machine to be updated consists of a american lathe, from the 70's, to be used in high precision machining.

This design consists of a partnership between the Precision Mechanic Lab, of Mechanical Engineering Department of the Santa Catarina University.

The present work is organized as follows:

Initially the relevant details related with the design and implementation of CNC machines are defined. Next the aspects of high precision machining and machine tools retrofitting are presented.

Finally the practical aspects involved with the automation process of the lathe are described, where the most important objectives were the motion control of the machine axes, the assurance of the whole system and the implementation of a interpretation program like the systems available in CNC machines.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1. CAPÍTULO 1 - MÁQUINAS NC/CNC	5
1.1 INTRODUÇÃO	5
1.2 MÁQUINAS-FERRAMENTAS NC/CNC	5
1.2.1 <i>Introdução</i>	5
1.2.2 <i>Eixos NC</i>	7
1.2.2.1 Fundamentos	7
1.2.2.2 Controle da Movimentação dos Eixos.....	9
1.2.2.2.1 Motores de Passo	11
1.2.2.2.2 Servomotores de Corrente Contínua	16
1.2.2.2.3 Amplificadores e Conversores.....	17
1.2.2.3 Sistemas de Controle em Máquinas NC/CNC	19
1.2.3 <i>A função CLP</i>	20
1.2.3.1 Controladores Lógicos Programáveis - CLP's.....	20
1.2.3.1.1 Estrutura Básica	20
1.2.3.1.2 Programação de CLP's	22
1.2.3.1.3 Padronização e Tendências da Programação de CLP's	23
1.2.3.1.4 Integração CNC-CLP	24
1.2.4 <i>O Software</i>	24
1.2.4.1 Interpoladores Para Máquinas CNC.....	25
1.2.4.2 O programa NC ou Programa-Peça	26
1.3 CONCLUSÕES.....	26
2. CAPÍTULO 2 - <i>RETROFITTING</i> E USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO	28
2.1 INTRODUÇÃO	28
2.2 ATUALIZAÇÃO DE MÁQUINAS FERRAMENTAS	28
2.2.1 <i>Conceito de Retrofitting</i>	28
2.2.2 <i>O Processo de Retrofitting</i>	29
2.3 USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO	30
2.4 CONCLUSÕES.....	32
3. CAPÍTULO 3 - ESPECIFICAÇÕES DO TORNO MOORE	33
3.1 INTRODUÇÃO	33
3.2 ASPECTOS GERAIS	33
3.2.1 <i>O Torno Moore</i>	34
3.3 A PROPOSTA DE RETROFITTING.....	38
3.4 ESPECIFICAÇÕES GERAIS	39
3.5 AVALIAÇÃO DAS ATUAIS CONDIÇÕES DO TORNO	40
3.6 ESPECIFICAÇÕES PARA O TORNO MOORE	41
3.6.1 <i>Sistema de Segurança</i>	41
3.6.2 <i>Processo de Usinagem</i>	43
3.6.2.1 O Sistema CNC	43
3.6.2.2 Integração CAD/CAM e CNC	44
3.6.2.3 Interface CLP e CNC	45

3.7 CONCLUSÃO	45
4. CAPÍTULO 4 - MOTORIZAÇÃO DOS EIXOS DO TORNO MOORE	46
4.1 INTRODUÇÃO	46
4.2 CONTROLE DE MOVIMENTO DO TORNO MOORE	46
4.3 IMPLEMENTAÇÃO	48
4.3.1 Os equipamentos.....	49
4.3.2 Testes.....	52
4.4 MOTORIZAÇÃO DO EIXO ÁRVORE.....	52
4.5 CONCLUSÕES.....	53
5. CAPÍTULO 5 - INTERPRETADOR DE CÓDIGO “G”	54
5.1 INTRODUÇÃO	54
5.2 SISTEMAS CAD/CAM E A INTEGRAÇÃO COM OS SISTEMAS CNC.....	54
5.3 SISTEMA CNC E O INTERPRETADOR DE CÓDIGO “G”	56
5.3.1 Fundamentos Básicos: O Programa NC ou Código “G”	56
5.3.2 O Interpretador de Código “G”.....	60
5.3.2.1 Estruturação dos Comandos do Código “G”	60
5.3.2.2 Geração de Trajetórias.....	64
5.3.2.3 Interpolações.....	65
5.3.2.4 Compensações e Offsets	67
5.4 IMPLEMENTAÇÃO E TESTES.....	70
5.5 CONCLUSÕES.....	72
6. CAPÍTULO 6 - SISTEMA DE SEGURANÇA	74
6.1 INTRODUÇÃO	74
6.2 A SEGURANÇA DO SISTEMA.....	74
6.2.1 Especificação do Funcionamento do Sistema de Segurança.....	74
6.2.2 Descrição e Modelagem do Sistema.....	75
6.2.2.1 Funcionalidades	76
6.2.2.2 Modelagem	78
6.3 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA	79
6.3.1 Lógica Pneumática	79
6.3.2 O CLP.....	80
6.3.3 Interconexão entre o CLP e a Pneumática do Sistema.....	82
6.3.4 Programação do CLP	84
6.3.5 Intertravamento/comunicação entre CLP e CNC.....	84
6.4 CONCLUSÕES.....	85
7. CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS LUMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA	86
ANEXOS.....	89
BIBLIOGRAFIA	102

INTRODUÇÃO

Com os crescentes avanços tecnológicos, vem-se conseguindo aumentos significativos dos índices de produtividade. Dentre dos setores que, de alguma maneira, atuam com os processos de transformação de bens e matéria-prima, as atividades envolvidas mais diretamente com os meios de produção, sofreram grandes mudanças devido principalmente à esses avanços de natureza tecnológica. A Microeletrônica possibilitou cada vez mais a integração e o desenvolvimento de máquinas mais “inteligentes”, compactas e flexíveis, principalmente através da utilização de processadores para o controle de máquinas e equipamentos empregados nos meios produtivos. Ou seja, houve um aumento do nível de automatização, ou automação, nas indústrias em geral.

Dentre as tecnologias empregadas na automatização dos meios de produção, que já conquistaram seu espaço dentro dos processos de manufatura, encontram-se as máquinas com tecnologia CNC (*Computerized Numeric Control*). O emprego deste tipo de máquinas-ferramentas, apresenta uma série de vantagens perante os processos convencionais de usinagem, no que tange à produção de pequenos e médios lotes, sendo as mais significativas: flexibilidade maior na programação do sistema, as precisões e tolerâncias são mantidas durante todo o processo de usinagem, redução dos tempos envolvidos e diminuição do número de refugos e retrabalhos. Porém uma das principais desvantagens, encontra-se nos custos envolvidos para aquisição e implantação de um sistema de produção com máquinas CNC.

Muitas vezes devido a imposições principalmente de ordem econômica, a aquisição ou completa substituição de uma máquina-ferramenta obsoleta por uma máquina CNC torna-se inviável. Uma opção possível, é a modernização ou atualização tecnológica da máquina, ou seja, fazer o *retrofitting* do equipamento, de forma a fornecer ao equipamento características das modernas máquinas CNC.

A decisão entre a possibilidade de execução do *retrofitting* de uma máquina-ferramenta, ou substituição da mesma por uma máquina mais moderna, consiste da avaliação criteriosa de todos os aspectos que possam, por ventura, estarem envolvidos com esse processo. Uma análise do real estado da máquina, as disponibilidades econômicas, os fatores de tempo, as novas características e

funcionalidades desejáveis são fatores que influenciam diretamente e tem um papel preponderante sobre a decisão do *retrofitting* de uma máquina ou não.

Dessa forma, o *retrofitting* do Torno Moore, destinado à usinagem de ultraprecisão, ^{é o} compõem-se do objetivo principal do projeto estabelecido pelo Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) e pela Empresa ISA Engenharia. Dentre este desse projeto global, é que se constitui e desenvolveu o presente trabalho. A proposta é então modernizar esta máquina, tornando-a capaz de gerar superfícies espelhadas complexas, através da implementação de um sistema CNC para controle e monitoração da máquina.

Por sua vez a usinagem de ultraprecisão permite a obtenção de precisão submicrométrica e de elevada qualidade superficial. De forma a permitir essas funcionalidades, tornam-se necessárias precauções no projeto de tais máquinas-ferramentas, bem como das instalações nas quais se encontram inseridos. O objetivo deste trabalho não consiste da análise dos possíveis fatores influentes sobre o processo de usinagem [Weingaertner], porém a disponibilização do equipamento para usinagens de ultraprecisão constitui de extrema importância nessa trabalho, ainda que o processo de automatização ainda se encontre em suas etapas iniciais.

As possíveis soluções para o *retrofitting* do Torno Moore consistiam da aquisição de um pacote CNC pronto, moderno, porém de arquitetura fechada não permitindo a adição de funcionalidades extras ou específicas; ou da implementação e integração de arquiteturas abertas de forma a dar ao sistema uma flexibilidade normalmente exigida em pesquisa acadêmica. A segunda proposta, além de ser mais econômica, apresenta-se como sendo a mais indicada à aplicação da máquina: usinagem de ultraprecisão voltada à pesquisa acadêmica.

Esse trabalho tem por objetivo, dar início ao processo do *retrofitting* do Torno Moore existente no LMP. Apesar de suas excelentes características mecânicas este torno conta com uma eletrônica característica dos anos setenta, completamente obsoleta, cuja a recuperação é dispendiosa e de baixa confiabilidade.

O presente trabalho se dividiu em duas fase distintas: a primeira estando mais relacionada com o sistema CNC em si, ou mais precisamente, o processo de motorização dos eixos e da programação de um interpretador de “código ‘G’”, objetivando a integração entre o futuro sistema CNC e um

sistema CAD/CAM; e a segunda referente a segurança do mancal aerostático, que corresponde a uma parte extremamente crítica do sistema como um todo.

Para a concretização dos objetivos deste trabalho, tornou-se necessário dividi-lo em atividades de forma a garantir um embasamento adequado, e um conhecimento mais aprofundado, quando necessário, nas diversas áreas de engenharia, a saber:

- análise dos processos de usinagem de ultraprecisão e das características de máquinas CNC;
- descrição e reconhecimento do Torno Moore, bem como das especificações e características desejáveis ao novo modo de funcionamento;
- estudo de tecnologias que permitissem a motorização dos eixos do torno;
- análise de representações formais para a definição do comportamento do sistema de segurança do torno;
- estudo do funcionamento e programação de controladores lógicos programáveis (CLP), além de formas de comunicação entre CNC e os mesmos;
- atividades diversas de familiarização de conceitos e aspectos referentes à fundamentos de usinagem, pneumática, servoacionamentos, linguagens de programação, código “G” para máquinas-ferramentas e sistemas CAD/CAM.

Este trabalho está organizado como descrito a seguir:

No capítulo 1 encontram-se os fundamentos básicos necessários à compreensão do funcionamento das modernas máquinas CNC (acionamentos, sistemas de controle e monitoração da máquina, motorização dos eixos).

No capítulo 2 é descrito em linhas gerais os processos de *retrofitting* de máquinas-ferramentas, bem como é dada uma breve introdução ao processo de usinagem de ultraprecisão.

A seguir, no capítulo 3, é apresentado o equipamento existente no LMP, com a descrição de cada um dos subsistemas que o compõem. Também são expostas as especificações e características desejáveis ao futuro sistema CNC a ser implementado.

No capítulo 4 discute-se os aspectos referentes aos processos de motorização de eixos em máquinas CNC.

✕ Por sua vez, ^o capítulo 5 apresentam-se os problemas referentes à construção de um programa destinado a geração de trajetórias através da leitura de um programa NC, feito em código "G". Além disto apresentam-se as justificativas para integração do CNC de uma máquina-ferramenta com um sistema CAD/CAM.

✕ No capítulo 6 ^{se} expõem toda a problemática da segurança do mancal aerostático, ^{da} discussão e análise da solução empregada (lógica pneumática e controladores lógicos programáveis).

Finalmente, são apresentadas as conclusões e comentadas as perspectivas futuras para o prosseguimento do projeto.

CAPÍTULO 1

Máquinas NC/CNC

1.1 INTRODUÇÃO

Os aspectos relevantes no processo de projeto, construção ou modernização de máquinas-ferramentas CNC, são abrangentes^{tes} e multidisciplinares. O objetivo deste capítulo, consiste da apresentação dos fundamentos básicos, dos principais elementos (software e hardware) que compõem uma máquina CNC, procurando dar uma visão geral das características, das funcionalidades e problemas frequentemente encontrados no projeto e construção dessas máquinas.

1.2 MÁQUINAS-FERRAMENTAS NC/CNC

1.2.1 INTRODUÇÃO

As últimas décadas se caracterizaram pela marcada tendência de elevação do padrão de qualidade e produtividade; com a diminuição da intervenção do trabalho manual nos processos de manufatura, facilidade de troca e armazenamento de programas, movimentos simultâneos de diversos eixos, trocas automáticas de ferramentas e mudanças de velocidade e rotação mais rápidas. Neste sentido, desenvolveram^{se} máquinas mais flexíveis para usinagem de peças, primeiramente as máquinas com tecnologia NC, e mais tarde, as máquinas CNC.

A sigla NC é proveniente da terminologia *Numeric Control* (Comando Numérico), com origem na ideia de comandar através de números. Uma definição simples de Comando Numérico pode ser expressa como segue: “um sistema que, a partir de todas as informações geométricas e tecnológicas necessárias para a fabricação de uma peça, armazenadas num portador de informações, pode

comandar automaticamente uma máquina a partir deste portador, com o auxílio de um sistema de decodificação, capaz de transformar os dados em ações apropriadas da máquina” [ISA].

Por CNC, *Computerized Numeric Control* (Comando Numérico Computadorizado), entende-se um comando numérico que contém um ou mais microprocessadores para a realização das funções do comando. O sistema operacional do comando engloba todas as funções necessárias tais como interpolação, controle de posição e de velocidade, indicação e edição, e armazenamento e processamento de dados. Adicionalmente ele precisa de um programa de adaptação à máquina a ser comandada, gerado e integrado ao controlador programável da máquina (CLP). Neste são estabelecidos todos os enlaces e intertravamentos relativos à máquina, para realização dos decursos funcionais específicos, como por exemplo para a troca de ferramenta, troca de peça, limitação dos eixos, etc.

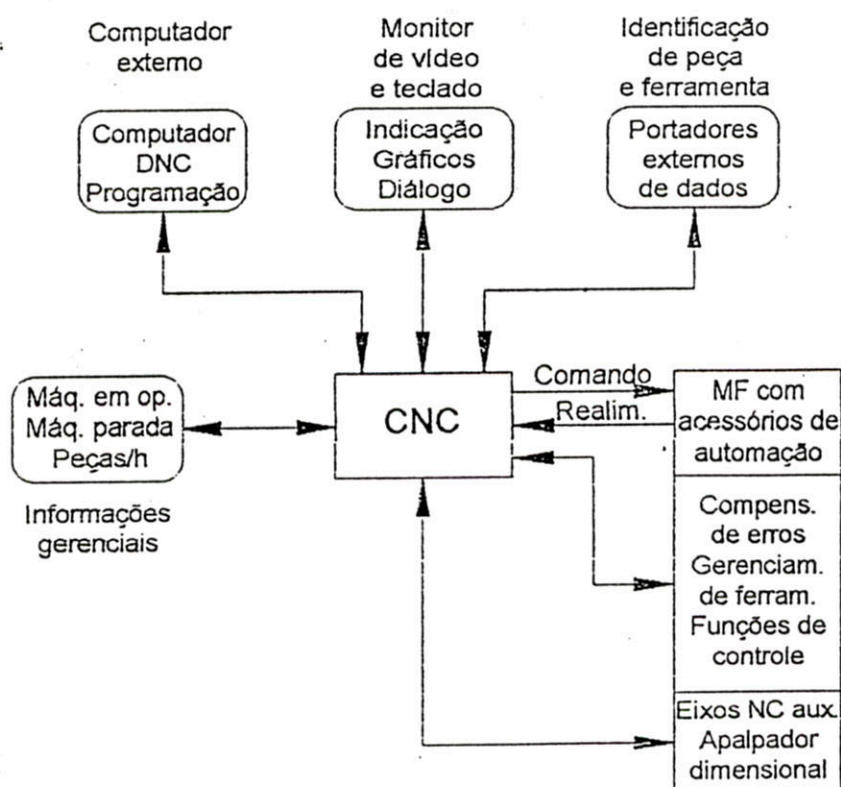


Figura 1.1. - Sistema CNC

O hardware de um sistema CNC está composto geralmente pelos seguintes componentes principais:

- a. Unidade central de processamento (CPU).
- b. Interface com sensores e acionamento dos servomotores.
- c. Dispositivo de entrada/saída (função CLP) que monitora e comanda variáveis digitais e/ou analógicas da máquina.
- d. Unidade de entrada e saída de dados e visualização.

Em relação aos processos convencionais de usinagem, os sistemas de Comando Numérico apresentam algumas peculiaridades, que lhes permitem alcançar maiores índices de produtividade:

- a. Seleção e troca automática de ferramentas.
- b. Posicionamento da ferramenta em diferentes ângulos em relação à peça, possibilitando a usinagem em um número de fixação menor.
- c. Flexibilidade na programação.
- d. Troca automática da peça acabada (Centros de Usinagem).
- e. Possibilidade de medição da peça na própria máquina, através do uso de apalpadores.
- f. Diminuição nos tempos de usinagem.
- g. Redução de refugos e diminuição do retrabalho de peças.

1.2.2 EIXOS NC

1.2.2.1 FUNDAMENTOS

Máquinas-ferramentas caracterizam-se por apresentar uma combinação de movimentos lineares (movimento retilíneo, ou de translação) e giratórios (movimento de rotação) denominados eixos. Define-se um eixo como sendo uma direção segundo a qual se pode programar os movimentos relativos ferramenta/peça [Bollman]. Os aspectos construtivos dos eixos, dependem muito do tipo de

máquina-ferramenta. Os tornos apresentam um ou dois eixos lineares (movimento X-Y) e um eixo rotativo (eixo árvore). Com relação aos centros de usinagem existe uma variedade de combinações de eixos rotativos e lineares.

A tarefa fundamental do CNC é comparar os valores de referência de posição, provenientes do sistema de geração de trajetórias (função interpolador), com os valores medidos, realimentados pelos sistemas de medição, e em caso de diferença gerar um sinal de comando que compense esta diferença. Comandos de trajetórias geram valores de referência de posição, os quais devem ser seguidos pelos eixos, e de forma a que se possa comandar numericamente estes eixos, tornam-se necessárias duas funcionalidades importantes:

- um sistema eletrônico de medição de percurso (deslocamento), e
- um acionamento de avanço controlável (servoacionamento).

Com esses objetivos de controle da movimentação dos eixos, um eixo CNC constitui-se dos seguintes elementos funcionais:

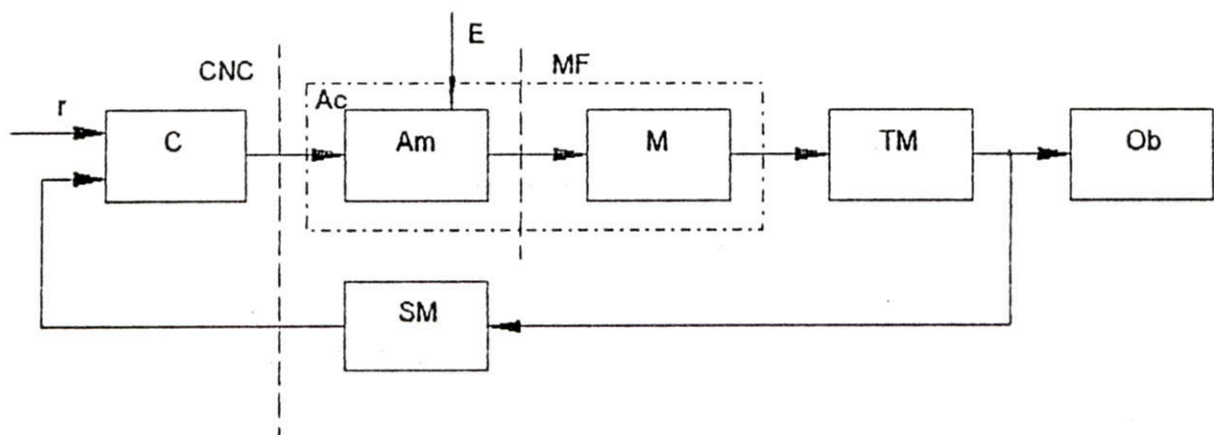


Figura 1.2. - Elementos Funcionais de um CNC

Controlador de Posição (C): o algoritmo do controlador processa as informações de referência de posição (r), provenientes da função interpolador, e posição atual, proveniente do sistema de medição (SM).

Acionamento(Ac): conjunto composto pelo amplificador (Am) e pelo motor (M).

Amplificador(Am): amplificação do sinal de comando proveniente do CNC/controlador de posição, aplicando-o ao motor, bem como a implementação das malhas de controle de velocidade e corrente do motor.

Motor(M): responsável pela conversão dos sinais de natureza elétrica, para a natureza mecânica, ou seja, em movimento e força. Comumente são empregados motores elétricos, e em casos especiais também são utilizados motores hidráulicos ou pneumáticos.

Transformador de Movimentos(TM): pode apresentar uma estrutura muito diversa dependendo do tipo de eixo (linear ou giratório) e do tipo de máquina. Neste grupo funcional enquadram-se todos os elementos mecânicos que transmitem o movimento, desde a saída do motor até o objeto (Ob) que se deseja movimentar.

Sistema de Medição(SM): sensoreamento do objeto, gerando um sinal elétrico que corresponde à posição atual do objeto. Para um eixo giratório utiliza-se de um SM rotativo (opto-eletrônico, indutivo, etc.). Para um eixo linear utiliza-se em geral um SM também linear (escala opto-eletrônica, indutiva, etc.,) ou um SM rotativo em conjunto com uma transmissão transformadora de movimento de translação em rotação (medição indireta).

Objeto(Ob): parte da máquina, da qual se deseja comandar automaticamente e flexivelmente o movimento: mesas, carros, cabeçotes, cargas, etc.

1.2.2.2 CONTROLE DA MOVIMENTAÇÃO DOS EIXOS

Os acionamentos são os diferentes tipos de motores e amplificadores que podem ser utilizados para executar os comandos provenientes das funções de geração de trajetória do CNC, através da transformação de energia elétrica em energia mecânica de movimento. Os motores utilizados nas máquinas-ferramentas CNC possuem características especiais e são chamados normalmente de servomotores.

Independente de sua aplicação específica os servomotores devem ter as seguintes características gerais:

- Alta dinâmica de torque, isto é, rápido controle da corrente.
- Alta dinâmica de velocidade, isto é, baixo momento de inércia, baixa indutância e alto torque máximo.
- Alta capacidade de sobrecarga mecânica, isto é, alto torque máximo e boa rigidez mecânica.
- Alta capacidade térmica, isto é, alto tempo de aplicação de sobrecargas mecânicas e de corrente sem sobreaquecimento.
- Alto torque contínuo.
- Característica torque x velocidade linear, mesmo em sobrecargas, para facilitar o controle.
- Larga faixa de controle de velocidade.
- Operação suave em baixas velocidades.
- Alta precisão no posicionamento (melhor que $0,36^\circ$).
- Projeto compacto, isto é, elevada relação peso/volume.
- Facilidade de instalação e de acoplamento de sensores.
- Alta confiabilidade, baixa manutenção e longa vida útil.
- ✕ • Inexistência de ressonância mecânicas e baixo ruído.
- Relação custo/performance aceitável.

Nas máquinas-ferramenta podemos distinguir dois tipos de aplicações principais dos servoacionamentos:

- Acionamento principal: encarregado de acionar a ferramenta. Normalmente são empregados motores CA assíncronos e servomotores de corrente contínua.
- Acionamento de avanço: encarregado de posicionar cada um dos eixos da máquina, estes exigem ter a sua posição e velocidade controladas. Aqui são utilizados servomotores de CORRENTE CONTÍNUA, servomotores de CA síncronos, servomotores de CA assíncronos e motores de passo.

Um servoacionamento está composto pelo motor propriamente dito e de um circuito eletrônico, chamado de amplificador ou driver, encarregados da amplificação dos sinais de baixa potência provenientes dos sistemas de controle e da lógica de acionamento do motor.

X A escolha do tipo de servoacionamento dependem^L muito das características dinâmicas exigidas pelo sistema, como relação entre torque e velocidade, etc. Para melhor compreensão dos detalhes envolvidos na escolha ^{do} sistema de acionamento, encontra-se em anexo, um fluxograma para o auxílio na escolha deste tipo de equipamento, sugerido em [Compumotor].

X Buscando a discussão dos problemas realmente a serem abordados neste projeto, somente serão discutidas as características dos motores de passo, com maior interesse dos motores de micropasso, e motores de corrente contínua. Com relação aos demais tipos de motores, indica-se a referência [ISA].

1.2.2.2.1 MOTORES DE PASSO

Os motores de passo são dispositivos eletromecânicos que convertem um sinal elétrico pulsado em movimentos dinâmicos discretos. Estes motores permitem controlar velocidade e posição sem necessidade de acoplar ao sistema de movimentação da máquina-ferramenta qualquer tipo de sensores (sem realimentação), significando assim uma sensível diminuição do custo total do projeto.

As características mais significativas deste tipo de motor são:

- Ângulo de rotação diretamente proporcional ao número de pulsos de entrada.
- Erro angular por passo é muito pequeno.
- Resposta rápida na partida, na parada e na reversão.
- Sinais digitais, como pulsos, fornecem comandos para controle em malha aberta, fazendo os sistemas simples e baratos.

O tipo de motor de passo mais empregado em aplicações industriais, são os motores híbridos. O nome é derivado do fato de combinar os princípios de funcionamento dos dois outros tipos: ímã permanente e relutância variável [Compumotor].

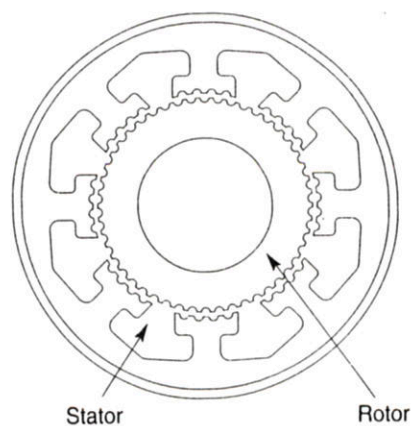


Figura 1.3. - Motor de Passo Híbrido de 200 passos

a. Princípio de Funcionamento de Motores de Passo Híbridos

Um motor de passo apresenta um estator (constituído de vários enrolamentos independentes em torno de um material ferromagnético) e um rotor que pode girar livremente, coaxial ao estator. O estator pode ser descrito com um conjunto de eletroímãs distribuídos em círculo, cada um com uma bobina independente. À medida em que estas bobinas vão sendo energizadas, estabelece-se nelas um fluxo magnético cujo comando atrai o rotor para uma posição fixa pré-determinada. Quando estas bobinas são alimentada sequencialmente, forma-se um campo magnético girante, discreto, que o rotor segue, causando deslocamentos igualmente discretos, chamados de passos.

A velocidade de chaveamento sequencial das bobinas do estator e a ordem da sequência deste chaveamento determina o sentido e a velocidade de rotação do rotor. O percurso angular realizado é proporcional ao número de chaveamentos realizados.

De acordo com o número e a forma com que as bobinas são alimentadas, consegue-se diminuir o tamanho do passo do motor (ângulo), aumentando a resolução nos posicionamentos. Por exemplo, supondo o motor das figuras 1.4. e 1.5. Com alimentação de uma só bobina por vez, consegue-se 12 posições diferentes, ou 30° por passo. Mas se excitarmos alternadamente, uma bobina e depois duas, sucessivamente (half-step), consegue-se dobrar o número de passos por revolução (15° por passo).

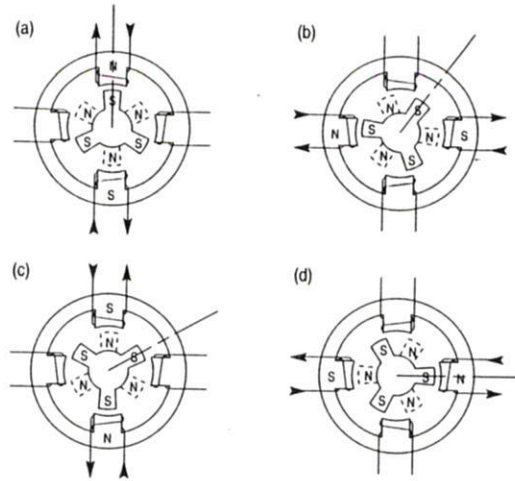


Figura 1.4. - Alimentação de uma Bobina - Full stepping

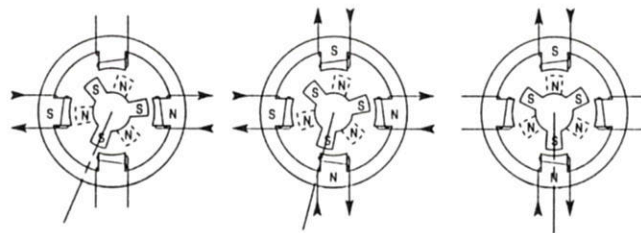


Figura 1.5. - Half Stepping

b. Princípio de Funcionamento dos Motores de Passo

Os motores de micropasso constituem-se de motores de passo, que possuem a característica de poder ter o número de passos aumentados. Basicamente, acontece uma subdivisão dos passos básicos do motor, através do controle da corrente nos bobinados do estator, produzindo-se uma série de passos intermediários.

Características importantes apresentadas pelos motores de micropasso: capacidade de produzir passos igualmente espaçados, tamanho do passo relativamente pequeno e fornecimento de torque aproximadamente constante.

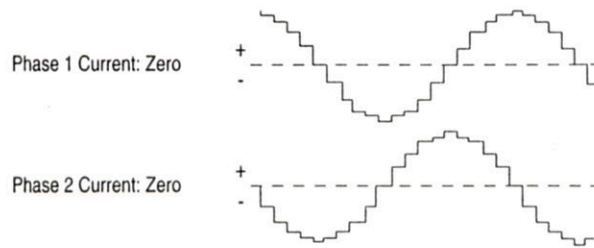


Figura 1.6. - Correntes de fase em um motor de passo no modo micropasso.

A subdivisão dos passos básicos do motor é feita pelos drivers de micropasso, que também são responsáveis pela amplificação dos sinais de potência provenientes dos sinais de comando. É possível se obter um número da ordem de 100.000 passos por revolução. O princípio consiste de alimentar o motor com duas ondas senoidais, defasadas de 90° , conforme pode ser visto na figura 1.6. Esta função de criar o perfil de onda desejado, também cabe ao driver.

c. Características Dinâmicas

Os motores de passo apresentam a inconveniência de perderem o passo, e estando em malha aberta, tal característica prejudicaria a sua utilização em sistemas de posicionamento. Desta forma, a análise dos fatores que estão diretamente relacionados a esse problema devem ser minuciosamente observados e discutidos. Dentre esses fatores, os mais significativos correspondem à relação entre os diversos torques existentes e aplicados sobre o motor. Há diversos tipos de torque a serem considerados em um motor de passo, a saber:

- a. Holding torque (torque com rotor parado): torque necessário para deslocar o rotor até uma nova posição de equilíbrio quando o motor está com as bobinas energizadas e com o rotor parado.
- b. Start-stop torque (torque de parada e partida): este torque indica qual é o valor máximo de carga com o qual o motor consegue partir e parar (ou mudar de sentido) sem perda de passo.

- c. Pull-out torque: máximo torque resistente que pode ser aplicado no eixo do motor sem perda de sincronismo.
- d. Detent torque (torque residual): máximo torque que precisa ser aplicado no eixo de um motor desenergizado para movê-lo de uma posição de equilíbrio para outra.

A relação torque/velocidade determina duas regiões (curvas) de funcionamento, uma para partida e parada do motor, e outra para trabalho em velocidades elevadas. Essas regiões de partida e parada apresentam a característica de serem sensíveis as variações na carga do sistema, dependendo, portanto, da carga acoplada ao eixo do motor. Assim, para não comprometer o funcionamento do motor (perda do passo ou dessincronização) não é desejável que o sistema tenha variações significativas na sua carga.

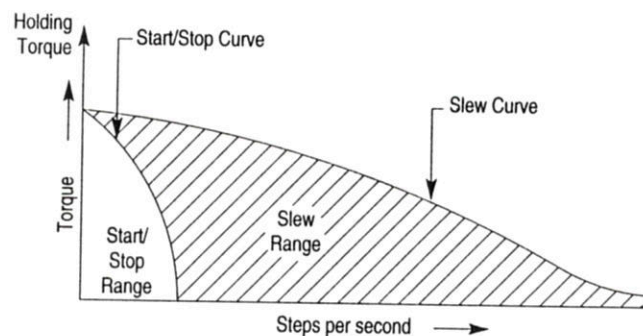


Figura 1.7. - Relação entre "Holding Torque" e Velocidade

As conexões das bobinas do estator também influenciam o comportamento dinâmico do motor. Elas podem ser de dois tipos: série ou paralelo. As conexões em série permitem maximizar o torque em baixas velocidades, porém sua performance em altas velocidades é mais baixa que na ligação em paralelo.

Os motores de passo apresentam as vantagens de ter baixo custo, são robustos, não exigem manutenção, não apresentam a necessidade de realimentação (este fator diminui os custos na implantação do sistema de controle de movimentos). Porém, os motores de passo são limitados em potência e torque disponíveis, a portanto aplicáveis somente para máquinas CNC pequenas. Além

✗ disto podem apresentar efeitos de ressonância, perda do passo, e ^{ção} ~~é~~ ^{el} incapaz de detectar e recuperar uma perda no posicionamento, pelo fato do controle ser em malha-aberta.

1.2.2.2.2 SERVOMOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

/ Os motores de corrente contínua apresentam características de elevado torque de partida e boa controlabilidade, sendo utilizado em uma variedade de aplicações onde precisão no controle de posição e velocidade requeridas justificam o seu custo mais elevado.

a. Princípio de Funcionamento

Os três componentes principais que fazem parte de um motor são: um arranjo de condutores (enrolamento) colocados sobre a superfície de um rotor, chamado normalmente de armadura, um circuito magnético que gera o campo magnético necessário para a conversão de energia, realizado com ímãs ou com um conjunto de condutores bobinados sobre um material ferromagnético e de um arranjo de contatos deslizantes para introduzir a corrente nos condutores (móveis) da armadura.

O princípio de funcionamento baseia-se em fazer circular uma corrente nas bobinas da armadura, e através da interação do campo magnético existente no estator, que busca alinhar-se com o campo resultante gerado na armadura, produz-se uma força que é então utilizada para gerar o torque desejado. Para que o torque seja constante, são utilizados comutadores de forma a que os campos magnéticos permaneçam com posição relativa e magnitude constantes.

b. Características Dinâmicas

Na prática, torques constantes são difíceis de se conseguir, existindo uma flutuação em torno do valor nominal, chamado de *ripple*. Em altas velocidades tal flutuação é mascarada pelas inércias do motor e da carga, porém, problemas podem aparecer em baixas velocidades.

Idealmente as conexões do sistema motor, carga e tacômetro são consideradas rígidas. Porém, na prática tal situação não acontece, podendo haver não-linearidades como acoplamentos não-rígidos, ou ainda, folgas (*backlash*). Em altas velocidades, podem ocorrer diferenças nos valores das velocidades instantâneas, de forma a prejudicar as performances no sistema de controle de movimento.

Motores DC provêem excelente controle de velocidade (regulação), alto torque, e alta eficiência, e portanto ^{isso} desejáveis em um grande número de aplicações, encontrando aplicação em máquinas CNC de pequeno e médio porte.

1.2.2.2.3 AMPLIFICADORES E CONVERSORES

A função do driver é de fornecer potência para o motor, em resposta aos sinais do sistema de controle. O motor é basicamente um dispositivo para produção de torque, através da ^{iteração} de campos magnéticos. A força magnética produzida no interior do motor, é proporcional a corrente e suas alternâncias. Sendo assim, o driver funciona essencialmente como uma fonte de corrente.

a. Amplificadores para Motor de Passo

Para acionar um motor de passo é necessário chavear a alimentação entre as bobinas do estator do motor. O amplificador é o encarregado de realizar esta tarefa tratando e amplificando o sinal de comando (pulsos).

Os sinais de entrada para o driver, consistem de um sinal para os pulsos e um sinal para indicar a direção do movimento (horário ou anti-horário). Um pulso é necessário para que o motor se movimente de um passo, sendo necessário, de acordo com o tipo do motor, de 400 até 101.600 pulsos para uma revolução completa.

O driver ^{é composto} ~~compõem-se~~ basicamente de duas estruturas. A seção lógica, encarregada de tratar as ondas de pulso e direção, fornecendo informações para o segundo elemento, ^o estágio de potência,

encarregado de fornecer a potência necessária para o acionamento do motor e de criar o perfil adequado de onda para a geração dos micropassos.

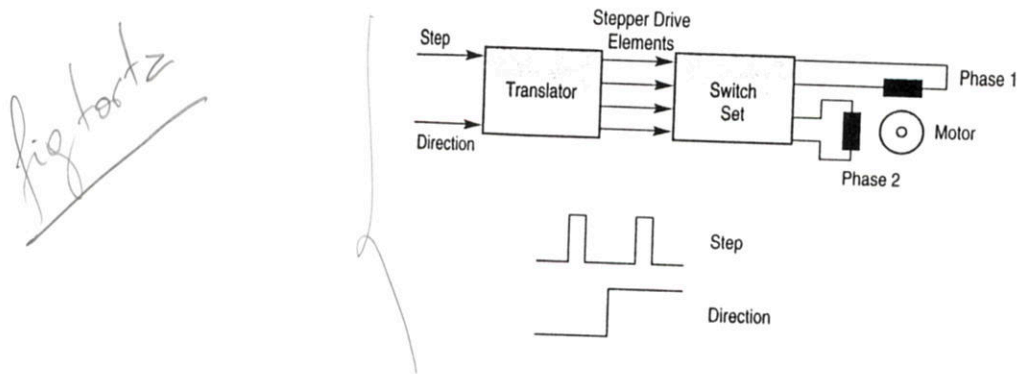
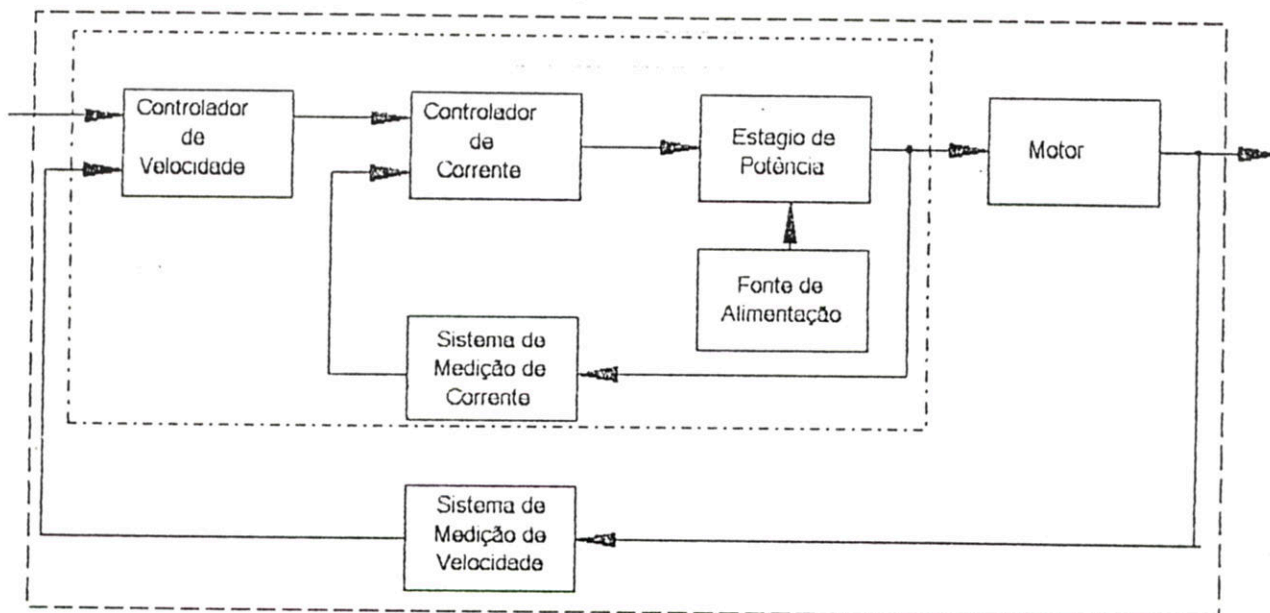


Figura 1.8. - Driver para Motores de Passo

Os tipos principais de amplificadores mais usados na prática são diferenciados pelo seu estágio de potência, sendo os mais utilizados: amplificadores unipolares e amplificadores bipolares.

b. Conversores para Motor de Corrente Contínua

O conversor integrante do servoacionamento é o encarregado de tratar e amplificar o sinal de comando. Os três tipos de conversores mais empregados diferem pela característica de seu estágio de potência (amplificador): amplificador chaveado por transistores, amplificador linear a transistores e amplificador chaveado com tiristores.



↑ a pag anterior.

Figura 1.9. - Diagrama de Blocos Conversor Motor de Corrente Contínua

1.2.2.3 SISTEMAS DE CONTROLE EM MÁQUINAS NC/CNC

Os sistemas de controle em malha-aberta não tem acesso a nenhuma informação em tempo real sobre a performance do sistema, portanto, não são capazes de atuar e corrigir perturbações durante o processo de usinagem. Eles podem ser utilizados em sistemas onde o torque de carga é muito reduzido, como é o caso da usinagem de ultraprecisão. ?

Nos sistemas CNC, cada eixo é acionado separadamente por um driver, que a princípio deveria seguir os sinais de comando produzidos pelo interpolador. A decisão da escolha do sistema de controle a ser implementado, depende de requisitos das especificações da máquina CNC e de fatores econômicos.

Os sistemas de controle em malha-aberta, utilizando-se de motores de passo para acionamento dos eixos, são alimentados diretamente pelos pulsos gerados pelo interpolador. A seleção do motor apropriado depende do máximo torque exigido, de requisitos de velocidade, e da precisão desejada (que será função do tamanho do passo do motor). Motores de passo podem ser utilizados em aplicações de pequeno porte onde o torque da carga é pequeno e constante. Por sua vez, os motores de passo, além das características normais dos motores de passo, apresentam uma elevada resolução, o que não implica em elevada precisão.

O sistema de controle em malha-fechada pode ser implementado através de motores DC ou atuadores hidráulicos, e de elementos que permitem realimentar a informação no sistema, através de encoder ou resolver, por exemplo. Em sistemas ponto-a-ponto, a trajetória da mesa em relação à ferramenta, bem como da sua velocidade durante a execução do movimento não tem significância, pois tais sistemas requerem controle apenas da posição final, em cada movimentação. Por sua vez os sistemas de contorno contínuo, que executam o corte enquanto os eixos se encontram em movimento, necessitam do contínuo monitoramento da movimentação de cada um dos seus eixos.

1.2.3 A FUNÇÃO CLP

As funções contínuas (movimento de avanço, posicionamento, interpolação) são representadas por grandezas analógicas, que para a automatização requerem controladores que possam tratar sinais contínuos de acordo com leis matemáticas. Isto é resolvido na maior parte dos casos aplicando-se CNC.

As funções discretas (ligar/desligar fluido de corte, trocar ferramenta, prender peça, etc.) são, na maior parte das vezes, representadas por grandezas digitais, que podem ser tratadas de forma lógica. A automatização desse tipo de funções é realizada através de comandos lógicos. Em uma máquina CNC esse conjunto de funções corresponde à função CLP.

Por comando lógico entende-se um sistema de comando no qual o estado dos sinais de entrada, recebidos do processo, ^e são processados de acordo com funções lógicas Booleanas, e resultam em saídas que atuam sobre o processo. Esse processamento lógico pode ser realizado em diversas tecnologias, tais como: pneumática, eletromecânica (relés), eletrônica (semicondutores).

1.2.3.1 CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS - CLP'S

1.2.3.1.1 ESTRUTURA BÁSICA

Basicamente, um CLP consiste de um equipamento eletrônico para monitoração e controle de processos, através do sensoreamento e atuação das variáveis envolvidas nesse processo.

X O hardware de um CLP compõe-se basicamente de:

- fonte de alimentação de todos os módulos
- processador

- memória de programa
- canais de entrada e saída
- funções especiais
- sistema de interconexão dos diversos módulos

Através dos módulos de entrada, o CLP recebe valores provenientes do ambiente, variáveis estas digitais ou analógicas. Conforme o programa armazenado em sua memória, o CLP processa a informação, ou seja executa um conjunto de operações lógicas tais como comparações, contagens e temporizações, atualizando as variáveis de saída, que irão atuar sobre o processo através dos módulos de saída. Os CLP's também dispõem de módulos para funções mais dedicadas como comunicação serial, controladores PID's, interfaces para LAN's, controle de motores de passo, etc.

O princípio básico de funcionamento consiste em cada ciclo em que o CLP varre o programa, chamado de ciclo de varredura, ^{vem} ler o estado de cada uma das entradas, transferir o seu conteúdo para os registros internos, executar o programa armazenado em sua memória, e calcular e atualizar o estado das variáveis de saída. Sendo assim, o programa é executado de forma cíclica e contínua.

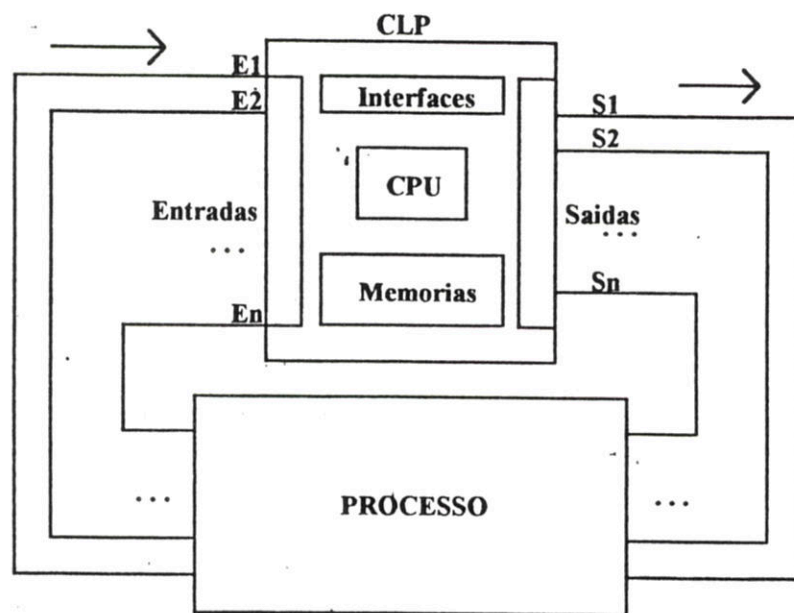


Figura 1.10. - Configuração Básica de um CLP

Em função da necessidade deste tipo de equipamento em aplicações industriais, é desejável que o CLP apresente algumas características que o tornem aplicável ao mais diversos números e tipos de

processos e máquinas existentes, tais como: hardware universal, facilidades na programação, módulos dedicados, número de entradas e saídas, etc. Essas características são preponderantes no momento de escolha do equipamento mais adequado a ser empregado em uma máquina CNC.

1.2.3.1.2 PROGRAMAÇÃO DE CLP'S

Historicamente, os CLP's vieram a substituir a lógica de relês existentes, que apresentavam a inconveniência de serem extremamente inflexíveis. Isto é, para alterações na especificação da lógica de controle do processo, era necessário toda uma substituição dos componentes e ligações existentes.

✂ Com os CLP's, qualquer modificação pode ser facilmente incorporado ~~ao programa~~ através da simples alteração do programa residente no mesmo.

A interface homem/máquina pode ser feita através da utilização das próprias entradas e saídas do CLP; através de painéis inteligentes ou terminais de programação; ou ainda através de um computador. Os painéis inteligentes são mais utilizados para a monitoração de variáveis internas e registros do CLP ou para atuação no processo controlado pelo CLP, sendo mais comum a programação deste pelo intermédio de computadores.

Basicamente, três são os tipos de linguagem de programação para CLP's:

a. Através de operadores lógicos: ao modo da linguagem assembler, nesta forma a lógica do programa é feita com a utilização de comandos mnemônicos, que implementam operações lógicas booleanas e comandos de transferência de dados.

b. Diagrama de Escada ou Diagrama *Ladder*: linguagem gráfica, que busca se assemelhar a lógica utilizada nos diagramas de relês, em que são representados as associações dos elementos de entrada e saída, definindo as operações do programa.

c. GRAFCET: é a mais formal das representações, indicada para sistemas mais complexos onde se torna necessária a verificação da lógica do programa e da conformidade deste com os requisitos desejados. Ao modo do diagrama de escada, é uma linguagem gráfica, mais precisamente, um modo de programação baseado em Redes de Petri.

1.2.3.1.3 PADRONIZAÇÃO E TENDÊNCIAS DA PROGRAMAÇÃO DE CLP'S

No processo de integração de diversos equipamentos, que necessariamente ocorre durante a fase de automação das linhas e processos de produção, um dos grandes problemas enfrentados é a falta de padronização na comunicação entre os diversos equipamentos. Cada fabricante adota uma postura bem peculiar, dificultando o trabalho de integração.

Com os controladores lógicos programáveis, não seria diferente. Além disto, pode-se ainda dizer que a situação é expandida para a parte referente à programação. O fato é que ainda não existe um padrão, já em utilização no mercado, que possa ser aplicado a todos os modelos. Mesmo dentro de uma das três formas de programação citadas, os padrões adotados entre os fabricantes são distintos, tendo cada um sua própria linguagem de programação. Surge então, visando solucionar este problema, propostas de normalização, entre elas a norma IEC 1131-3 [Lewis].

A forma de programação está intimamente relacionada com as técnicas de modelagem do sistema [Lewis]. O Diagrama Ladder, apesar de ser bastante utilizado, em função do fácil entendimento, começa a apresentar desvantagens em sistemas em que o número de variáveis se torna elevado. Nestes casos são recomendadas técnicas formais que procurem especificar o sistema, garantindo a conformidade com as especificações de projeto [Lewis].

✓ Sendo assim, a utilização da linguagem por *Grafset* constitui-se de uma poderosa ferramenta no auxílio ^{ao} projeto e implementação de sistemas para automação da manufatura ou para controle de processos. Porém a sua utilização não é trivial, necessitando de um conhecimento mais profundo na área de modelagem de sistemas. Outro fato que contribuía para que este tipo de linguagem não ser muito utilizada, era o fato de ser uma linguagem de especificação, para a verificação da lógica do sistema, tendo que ser transformada para a linguagem proprietária do CLP. Atualmente, com a criação da norma IEC 1131-3, pretende-se compatibilizar os diversos sistemas proprietários, de forma a poder facilitar a interconexão de diversos equipamentos (a exemplo do modelo *OSI* em redes de comunicação), além da padronização das linguagens de programação. Esta norma já vem mostrando seus primeiros frutos, tendo em vista a existência de variadas ferramentas computacionais de modelagem e programação existentes no mercado.

1.2.3.1.4 INTEGRAÇÃO CNC-CLP

Nas máquinas CNC, o controle de movimento relativo entre peça e ferramenta é realizado pelo CNC propriamente dito. As demais funções auxiliares da máquina, na sua maioria funções digitais, precisam ser comandadas por um CLP.

Uma primeira geração de NC's que pode ser identificada, apresenta sinais de saída auxiliares, mas que precisam ser associados, combinados e intertravados primeiramente antes de comandar os atuadores da máquina. Isso pode ser feito por um comando de relés ou também por um CLP externo. Uma segunda geração permite a conexão a nível de barramento entre o CNC e o CLP, de forma que a troca de dados entre eles é muito mais eficiente. Ressalva-se que deve haver compatibilidade entre o barramento do CNC e do CLP, e que o CLP precisa ser provido com uma placa especial de comunicação via barramento. Uma terceira geração de CNC's já traz CLP incorporado, fisicamente inclusive, compartilhando muitas vezes o processador, e organizado num sistema de software multi-tarefa.

1.2.4 O SOFTWARE

Sendo o CNC um computador, adaptado para o comando de uma máquina-ferramenta, este também necessita de um sistema operacional, também denominado de software de comando ou software de sistema. Este software, adaptado a cada tipo de máquina, determina os recursos e todas as funções de máquina, sua forma de programação, os recursos gráficos para simulação, com possibilidade de pacotes adicionais para teste e diagnóstico de falhas, aquisição de dados, etc.

O software de um sistema CNC consiste em, no mínimo, três partes integrantes:

- a. Programa NC ou programa-peça: descreve a geometria da peça (informações geométricas), bem como das condições e parâmetros para a usinagem da mesma (informações tecnológicas).
- b. Programa principal: gerência a operação da máquina de um modo geral;
- c. Programa de controle: tem por função principal produzir os sinais de comando para os acionamentos a partir dos dados fornecidos pelo programa-peça.

Às duas últimas partes denomina-se *Firmware*, que corresponde ao sistema operacional do CNC.

1.2.4.1 INTERPOLADORES PARA MÁQUINAS CNC

Um quesito comum em todos os sistemas de manufatura é a geração do movimento coordenado dos eixos, buscando a movimentação adequada da ferramenta em relação ao material. Envolve, assim, a geração de sinais que descrevam a forma da peça a ser usinada, calculando uma grande quantidade de pontos intermediários sobre uma curva matematicamente definida, e a sua transmissão como referência para o controle de movimentação da máquina.

Os comandos de trajetória são implementados por interpoladores, que nas antigas máquinas NC eram feitos por hardware, e atualmente, nas máquinas CNC, implementados por software. A implementação dos interpoladores analógicos, utilizados nas máquinas NC, ~~eram~~^{realizada} em sua grande maioria ~~implementados~~ pela, na época, recém surgida eletrônica digital. Com utilização de Analisadores Diferenciais Digitais, DDA, ou mais precisamente, de integradores DDA.

Os comandos de trajetória dispõem de diversos modos de interpolação: linear ou retilínea, circular, parabólica e “spline”. Inúmeras tem sido as discussões a respeito da geração de trajetórias, uma vez que a forma como estas são geradas tem implicação direta com a precisão nos perfis usinados. Alguns exemplos da complexidade encontrada nesta área:

- a. Cálculos de off-sets para sobrematerial: O problema se resume a, a partir de programa da peça, identificar um perfil para a trajetória da ferramenta, que permita a usinagem com sobrematerial

em uma ou todas as dimensões. Porém, tal cálculo não é simples, exigindo algoritmos complexos [Tiler and Hanson].

b. Interpolação de trajetórias: o processo de interpolação consiste em particionar a trajetória não linear em segmentos de retas. O erro devido a esta interpolação depende do algoritmo utilizado.

c. Compensação de raio da ferramenta: devido a forma da ponta da ferramenta, é necessário fazer correções nas trajetórias, de forma a se evitar erros na usinagem das peças.

1.2.4.2 O PROGRAMA NC OU PROGRAMA-PEÇA

Os dados que são passados para a máquina NC, são armazenados, ou melhor, codificados, em um programa (normalizado pela ISO), comumente conhecido por código G. Os dados se encontram estruturados em um conjunto de blocos de informação, onde cada bloco contém a informação necessária para o processo de usinagem, como tamanhos de segmentos, parâmetros de usinagem, controle de posicionamentos, controle das dimensões da peça, etc. No capítulo 5, serão apresentados mais detalhes no que se refere à parte de interpretação de programas para máquinas CNC.

1.3 CONCLUSÕES

Conforme exposto neste capítulo, observa-se que o domínio da tecnologia de construção e máquinas CNC demanda conhecimento multidisciplinar, envolvendo áreas distintas que vão desde Fundamentos de Usinagem, até a parte de Microeletrônica e Programação.

Portanto, para a construção de máquinas-ferramentas CNC, a quantidade e diversidade de problemas encontrados, demanda um conhecimento técnico bem diversificado, sendo praticamente impossível encontrar um profissional que domine totalmente todos os aspectos relacionados a este tipo de tecnologia.

Os capítulos a seguir, expõem de forma gradual e separadamente, cada um dos problemas encontrados durante o projeto, bem como as tecnologias empregadas para a solução dos mesmos.

Capítulo 2

Retrofitting e Usinagem de Ultraprecisão

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo discutem-se os pontos principais a serem considerados no projeto de modernização (*retrofitting*) de uma máquina-ferramenta, ~~necessários para o projeto e especificação do retrofitting do Torno Moore.~~ ^{do LMP.}

Sendo um dos objetivos o *retrofitting* de uma máquina-ferramenta, com fins acadêmicos, a ser empregada em usinagens de ultraprecisão, será ^{apresentada} ~~exposta~~ neste capítulo algumas referências a respeito dos aspectos envolvidos neste tipo de usinagem.

2.2 ATUALIZAÇÃO DE MÁQUINAS FERRAMENTAS

2.2.1 CONCEITO DE *RETROFITTING*

A atualização tecnológica de máquinas operatrizes, conhecida universalmente por *retrofitting*, tem por objetivo a modernização da máquina a fim de que desempenhe suas funções de maneira melhor do que a original, adicionando à mesma novos e/ou diferentes recursos, inclusive recuperando funções e características perdidas. A atualização pode ser no sentido de transformar uma máquina operatriz convencional em uma máquina CNC; ou na transformação de uma máquina NC de geração mais antiga, em uma máquina CNC de novíssima geração; ou de forma mais simples, a automatização de funções de uma máquina através da utilização de CLP's.

Porém, para aumentar a qualidade das peças usinadas é necessário que a máquina-ferramenta tenha boas características estáticas e dinâmicas, parâmetros que permitem definir os materiais, a estrutura, os elementos de acionamento, etc., com os quais se realizará o *retrofitting* da máquina. Isto

é, não basta incorporar um sistema CNC para melhorar a qualidade das peças, é necessário ter em conta as características de funcionamento da máquina.

Nesse sentido, a verificação dos componentes mecânicos (guias, mancais, acoplamentos, eixos, etc.), acionamentos, eletrônica (botões, chaves, conectores, sensores, etc.) é um fator importante na fase de avaliação das possibilidades do retrofitting, principalmente do ponto de vista econômico.

De acordo com o detalhamento do número de elementos a serem substituídos, da comparação da precisão geométrica requerida e a atualmente existente na máquina, dos custos envolvidos, etc., a atualização da máquina poderá ser feita de duas formas. A primeira corresponde a grande maioria de soluções disponíveis no mercado, implementada pela grande parte das empresas do setor, que corresponde a modernização do equipamento através da aquisição de um CNC moderno, com a instalação de arquiteturas (software/hardware) fechadas, porém de custos elevados. A segunda opção, busca a integração dos componentes propiciando uma arquitetura aberta, de forma a possibilitar alterações futuras na configuração da máquina, pelo seu usuário. Essa alternativa apresenta custos envolvidos menores, porém o sistema final pode ter funcionalidades inferiores, do ponto de vista tecnológico, se comparado à primeira opção.

2.2.2 O PROCESSO DE RETROFITTING

A atualização de máquinas-ferramenta não deve ser aplicado de maneira generalizada a qualquer máquina ou em qualquer situação, podendo porventura, ser antieconômica. É de fundamental importância uma análise cuidadosa do sistema em geral, tendo claramente definido as necessidades e objetivos desejáveis com o *retrofitting*.

Em linhas gerais o *retrofitting* é recomendável quando se dispõe de máquina de boa qualidade com uma boa concepção estrutural, quando se tem limitação de recursos financeiros para a obtenção de máquina nova, quando somente parte da máquina se encontra obsoleta, etc.

Dois temas muito importantes para o estudo da viabilidade do *retrofitting* são: o estado da máquina antes do retrofitting e as características técnicas desejáveis da máquina.

Dentre as características técnicas desejáveis encontram-se os índices de qualidades obtidos para os parâmetros de usinagem, como qualidade superficial, geométrica e dimensional da peça, minimização dos tempos improdutivos, redução na percentagem de peças defeituosas, etc. O estado da máquina é verificado a fim de se fazer um levantamento dos equipamentos/componentes a serem substituídos, incluídos e reconicionados.

Após o estudo da viabilidade de execução do *retrofitting*, são feitos os planejamentos do projeto de compra de equipamentos e do projeto de serviços, com a aquisição de material/componentes, a contratação de pessoal técnico qualificado, com a subsequente execução do projeto. A penúltima etapa corresponde a fase de avaliação, testes finais e ajustes do sistema. Nessa fase são feitas a análise do desempenho do funcionamento do sistema, tanto manual como automático; os ajustes dos sistemas de posicionamento; medição e compensação de erros no sistema; teste do sistema lógico de comando da máquina; usinagem de peças típicas; etc.

Por fim, a etapa final compreende do acompanhamento da máquina atualizada, a fim de serem feitas avaliações do estado de funcionamento em condições reais de trabalho, buscando identificar a ocorrência de falhas do sistema.

Deste modo, os objetivos deste trabalho enquadram-se nos pontos discutidos acima, consistindo do *retrofitting* do Torno Moore, porém, não estando em sua completude finalizado, mas

X tão só do início da modernização do mesmo.

no

2.3 USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO

A usinagem de ultraprecisão permite trabalhar com processos de precisão submicrométrica, ou até na faixa de alguns nanômetros, e de elevada qualidade superficial. Esta tecnologia vem encontrando aplicação crescente na produção de superfícies de alta qualidade, exigidas por exemplo, em discos magnéticos de memória, cilindros de copiadoras, e espelhos de formas não convencionais para telescópios e raios-x.

Os fatores que influenciam o processo de usinagem de ultraprecisão são os mesmos encontrados na usinagem convencional, no entanto, devido às exigências e às características que devem ser garantidas, a atenção que deve ser dada a cada um dos fatores influentes é indiscutivelmente mais crítica que na usinagem convencional. Os fatores que influenciam a usinagem de ultraprecisão e que merecem atenção envolvem características da máquina-ferramenta em si (estabilidade térmica e dinâmica), do meio ambiente (temperatura, vibrações, limpeza), do material da peça, da ferramenta de corte, do fluido de corte, de influências do operador, etc.

As exigências feitas aos componentes com características de rugosidade nanométrica e/ou características dimensionais submicrométricas só podem ser alcançadas em processos devidamente controlados. As principais exigências feitas a uma máquina-ferramenta de ultraprecisão são correlacionadas com as características estáticas e dinâmicas, a precisão do posicionamento e de movimento, estabilidade térmica e insensibilidade às variações da umidade.

Algumas tecnologias mais específicas são empregadas, procurando a redução destas perturbações. A utilização de mancais aerostáticos, ao invés dos mancais tradicionais, visa diminuir as influências de vibrações no sistema. As guias de uma máquina-ferramenta são os principais responsáveis pela precisão de deslocamento da ferramenta em relação à peça, podendo ser encontradas guias do tipo hidrostáticas e aerostáticas, ~~porventura~~ hidrodinâmicas e por escorregamento. O princípio de funcionamento, a concepção e a forma, bem como os materiais de construção empregados para as guias, também influenciam as características finais da máquina-ferramenta. Porém, devido as camadas submicrométricas de material retirado, na usinagem de ultraprecisão, os esforços provenientes do processo de usinagem são muito pequenos.

A posição da ferramenta em relação à peça durante a usinagem deve descrever a geometria da mesma, e assim descrever a sua precisão geométrica. O sistema de medição empregado e o sistema de acionamento associado ao sistema de guias irão definir a precisão com que este objetivo será atingido. Em máquinas CNC, trabalhando com uma malha de informações fechada, geralmente se atingem os objetivos de forma mais rápida.

Assim, em usinagens de ultraprecisão os fatores que influenciam o sistema devem ser analisados minuciosamente, de forma a que tais influências possam ser entendidas e minimizadas.

2.4 CONCLUSÕES

Conforme a exposição feita neste capítulo, o processo de retrofitting não se constitui de tarefa simples. A análise das partes constituintes, sejam mecânicas ou eletro-eletrônicas, certamente passarão por uma equipe técnica especializada e multidisciplinar. A previsão de utilização em usinagens não-convencionais, no caso a usinagem de ultraprecisão, ~~impõem~~ características especiais ao projeto.

No que tange ao projeto do sistema CNC da máquina, incluindo-se aí os aspectos referentes às motorizações dos eixos, às funções do CLP, à segurança do sistema, dentre outros, encontram-se discutidos e apresentados nos capítulos que se seguem, apresentando as abordagens feitas para o estudo do problema e as soluções empregadas.

Capítulo 3

Especificações do Torno Moore

3.1 INTRODUÇÃO

Para o *retrofitting* de uma máquina-ferramenta se torna necessário o conhecimento do atual estado da máquina, de forma a avaliar os custos envolvidos no processo de atualização tecnológica. Nesse sentido, são introduzidas as características, elementos e equipamentos do Torno Moore.

Em seguida são expostas os objetivos do projeto, bem como as especificações e necessidades de tarefas e equipamentos, de forma a viabilizar a utilização do Torno Moore com uma máquina CNC voltada à usinagem de ultraprecisão.

De posse dos aspectos teóricos apresentados nos capítulos anteriores, e com a visão das necessidades e da atual realidade do equipamento, a serem expostos neste capítulo, procurar-se-à nos capítulos subsequentes, apresentar as soluções tecnológicas estudadas e utilizadas em cada uma das fases do projeto.

3.2 ASPECTOS GERAIS

Conforme o capítulo anterior, foram expostas os elementos e os fatores básicos, bem como os problemas, em linhas gerais, que devem ser considerados no projeto, construção ou *retrofitting* de máquinas-ferramentas.

A definição das características desejáveis, ou especificações, para a máquina-ferramenta, requer o conhecimento prévio desse sistema, pois é somente de posse dessa informação que se pode fazer uma análise mais apurada a respeito do processo de modernização da máquina. A influência do atual estado da máquina fornece os dados necessários para a tomada das decisões, como por exemplo a aquisição de novos equipamentos, precisões e tolerâncias desejáveis e as passíveis de serem obtidas,

etc. A análise das características da máquina permitem avaliar, desta maneira, os custos e tempos possivelmente envolvidos no *retrofitting*.

3.2.1 O TORNO MOORE

O equipamento que será automatizado é um Torno Moore, de procedência americana, com mancais aerostáticos, dedicado para a usinagem de discos de “winchester”. Esse equipamento se encontra no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em fase de automatização pela empresa ISA Engenharia Ltda.

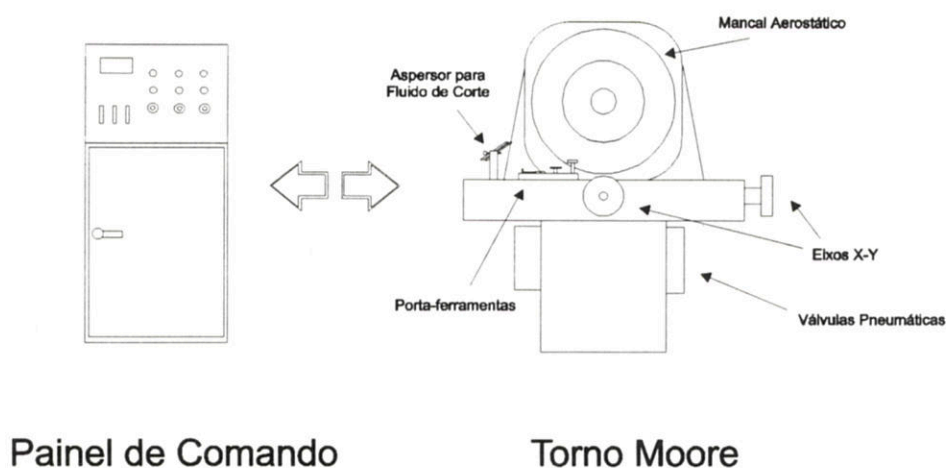


Figura 3.1. - Torno Moore e Painel de Comando

Inicialmente, o controle e comando ~~de~~ Torno Moore, era feito através de um painel de comando, que continha toda a eletrônica para o acionamento dos motores, controle de válvulas de segurança, leitura de código de barras e sistema de proteção do mancal aerostático. Devido as atuais necessidades, principalmente ^{ao} fato de se desejar ter um equipamento para pesquisa acadêmica, muitas das funções antes existentes, e seus respectivos equipamentos de controle, não são mais necessários. Por sua vez, também serão acrescentadas funcionalidades adicionais, de forma a garantir o bom funcionamento do sistema.

Os elementos constituintes são apresentadas de forma didática nas seções que se seguem.

a. Mancal Aerostático

Visando minimizar as perturbações que poderiam vir a atuar sobre a usinagem em si, a utilização de um mancal aerostático acaba por diminuir a influência de vibrações advinda da própria rotação do eixo árvore e do motor que aciona o mesmo, ou ainda das fricções existentes entre as partes mecânicas, como rolamentos.

✓ O eixo fica suspensa sobre uma camada de ar da ordem dos micrômetros. Este sistema de suspensão do mancal requer todo um cuidado com a filtragem do ar de alimentação, para impedir o ✓ aparecimento de partículas em suspensão, que ~~porventura~~ poderiam prejudicar o funcionamento do mancal.

Acoplado ao mancal, na parte posterior do torno, existe um freio pneumático a disco, que impede a livre rotação do mancal. Este dispositivo era utilizado para parar o mancal tanto em situações normais de funcionamento (redução gradativa de velocidade), quanto em condições de emergência (parada imediata da rotação do mancal).

O maior problema na utilização deste tipo de tecnologia, reside na necessidade de um sistema de segurança, de preferência dedicado, de forma a evitar prejuízos caso ocorram falhas eventuais, como por exemplo valores de pressão de ar abaixo do valor mínimo. Os problemas decorrentes de uma falha deste tipo no sistema inutilizariam o mancal, uma vez que, com uma velocidade da ordem de 1000 RPM, uma queda na pressão de ar resultaria no contato direto do mancal com a carcaça, ✓ podendo ocasionar na solda dos dois materiais, podendo, inclusive, arrancar toda a estrutura da sua fixação. Portanto a segurança dos operadores, ~~por questão humanas~~, e do próprio equipamento, por fatores econômicos, torna-se um dos pontos a serem abordados com maior prioridade e cuidado.

Além das vibrações decorrentes do contato entre peça e ferramenta, as perturbações externas podem se apresentar inconvenientes, principalmente em usinagens de ultraprecisão, como por exemplo, o tráfego local próximo ao laboratório. Nesse sentido a instalação de uma sapata de concreto contribui para o processo de minimização das influências de fatores externos. Além das

influências das vibrações mecânicas, outros fatores contribuem para a diminuição das precisões atingidas, não sendo, porém, o objetivo deste trabalho discussões neste sentido, que podem ser verificadas conforme [Weingaertner].

b. Acionamento do Mancal

O mancal era posto em rotação por um sistema composto por um motor de indução, que através de uma correia, transmitia a rotação para o mancal. Com o auxílio de um conjunto de pistões pneumáticos de duplo efeito (tensionadores), é possível controlar a tensão na correia, de forma a transmitir o movimento. Com os pistões na posição aberta, a correia se encontra relaxada, com o motor girando em vazio sem o acionamento do mancal.

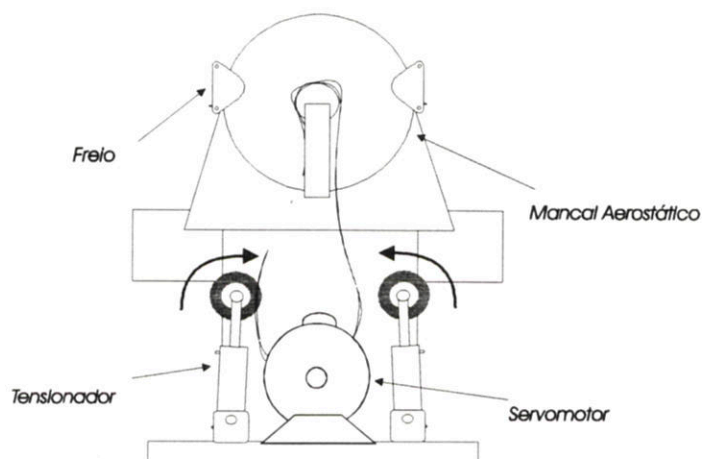


Figura 3.2. - Vista Posterior do Torno Moore

O motor de indução será substituído, por um motor de corrente contínua, de forma a permitir as frenagens dos motores. Esse processo é possível de ser feito com a utilização de um conversor que permite o acionamento do motor em vários quadrantes (característica torque versus velocidade).

c. Mesa X-Y

Um dos fatores de grande influência no processo de usinagem, encontra-se na garantia de uma estrutura que possa viabilizar movimentos precisos. Assim importantes se tornam os sistemas de controle e o sistema de guias da mesa X - Y . As guias que compõem a bancada, são do tipo hidrostáticas. Problemas decorrentes das características da bancada, como por exemplo a influência dos coeficientes de atrito em baixas velocidades [Centinkunt et al], são fatores que influenciam o projeto de motorização e controle dos eixos.

d. O Sistema de Movimentação

O processo de usinagem consistia da movimentação manual do porta ferramenta, sendo feitas basicamente operações de faceamento. Portanto, a rigor, a movimentação do sistema, durante o processo de usinagem, era feita na direção de somente um dos eixos. Além desta característica, o torno era utilizado em linha de produção, onde o perfil desejado era “controlado” por chaves de fim-de-curso, não havendo, portanto, necessidade de usinagem de perfis mais complexos.

e. Estrutura pneumática

Objetivando a segurança do mancal aerostático, existe um conjunto de válvulas pneumáticas, pilotadas eletricamente, que recebem os sinais de controle provenientes do CLP. Estas tinham por objetivo o acionamento de diversos elementos, entre eles, o líquido refrigerante, os tensionadores e o freio do mancal.

A lógica de intertravamento, consistia no monitoramento do valor da pressão de alimentação do mancal. Tal função era feita por um pressostato. Caso a pressão caísse a um valor abaixo de 6 bar, o pressostato mandava um sinal para o CLP. A este por sua vez, cabia enviar os sinais para as válvulas, acionando o freio, os tensionadores (aliviando a tensão na correia, de forma a não mais transmitir movimento para o mancal), além de outras funções, como parar a usinagem e desligar o líquido refrigerante. Fundamentalmente era, e continua sendo, necessário a segurança do mancal.

f. Eletrônica

Como comentado anteriormente, toda a eletrônica disponível se encontrava obsoleta, havendo necessidade da sua completa reformulação. Era utilizada para alimentação do motor de indução, do painel de comando, onde se encontravam as botoeiras e indicadores luminosos para o controle e monitoramento do sistema.

Também faziam parte do sistema, um conjunto de chaves fim-de-curso. Estas chaves destinavam-se ao controle dos limites de posicionamento da mesa $X-Y$, com as quais era possível detectar o fim do movimento para um determinado perfil.

Os indicadores luminosos, as botoeiras e chaves diversas existentes, bem como a estrutura metálica do painel de comando, serão mantidas de forma a serem reaproveitadas para as funções de acionamento manual do sistema.

g. Elementos Adicionais

Além dos componentes acima citados, também existiam alguns elementos auxiliares ao processo de usinagem. Entre eles citam-se:

- a. Bomba de vácuo para fixação da peça no mancal;
- b. Picador de cavaco;
- c. Sistema de leitura de código de barras;
- d. Porta ferramentas.

Embora também existissem outras funcionalidades, foram abordadas nesta seção tão só aquelas relevantes para o projeto em questão.

Quitar página

3.3 A PROPOSTA DE RETROFITTING

✎ O objetivo do projeto consiste da automatização do Torno Moore, procurando incluir neste equipamento características encontradas nas máquinas CNC, porém voltada à pesquisa acadêmica, mais precisamente, na área de usinagem de ultraprecisão.

A utilização de um sistema CNC é plenamente justificada com a necessidade de sincronização dos movimentos da mesa X-Y, possibilitando a usinagem de perfis complexos, o que não é possível com um controle manual de posicionamento, como vinha sendo empregado a máquina-ferramenta.

✎ A máquina atualizada, ^{doverá} ~~além de~~ permitir as funções básicas de uma máquina CNC, tais como: controle contínuo de trajetória, troca automática de velocidades de árvore, sensores dos sistemas de segurança da máquina. É igualmente desejável que o próprio [?] possua um controlador com todas as vantagens dos CNC's modernos, como tela gráfica para simulações, compensação automática de ferramentas, etc.

Baseado no estado atual da máquina, e considerando o nível tecnológico atual das máquinas-ferramentas CNC, detalham-se a seguir os aspectos mais significativos para a estruturação do novo sistema. Salienta-se que todos os objetivos citados abaixo, fazem parte de um projeto mais amplo, dentro do qual este trabalho se encontra inserido.

3.4 ESPECIFICAÇÕES GERAIS

A seguir encontram-se descritas os objetivos e necessidades do projeto.

a. **Sistema CNC:** Permitir o controle de todo o processo de usinagem, seja a movimentação da peça em relação à ferramenta, as compensações de geometria de ferramentas, o controle dos elementos básicos do torno. Esse sistema será implementado em um microcomputador, de forma a também disponibilizar ao sistema funções de programação de peças, ou programa NC, simulação da usinagem de peças, integração com um sistema CAD/CAM, etc.

b. **Sistema Dedicado de Segurança:** Constituinte o mancal aerostático de um componente crítico do sistema, a sua segurança constitui um dos principais objetivos de todo o processo de *retrofitting* do Torno Moore. Sendo assim o projeto para a segurança do sistema envolve a análise da lógica de intertravamento entre sensores e atuadores do torno, bem como da implementação das funções de monitoração e controle do mancal.

c. **Intertravamento:** Comunicação entre os dois processadores do sistema: o CLP e o processador do microcomputador que estará executando as funções do CNC.

d. **Código G:** Sistema computacional de geração de trajetória, interpretação de programas NC (código G), programação automática de peças, etc.

e. **Laser e Régua Ótica:** Possibilidade de utilização de laser interferométrico e régua ótica para aferição do sistema: estes equipamentos se tornam necessários para a verificação da precisão obtidas nos posicionamentos.

f. **Perfis Complexos:** Possibilidade de usinagem de perfis complexos (lentes), requerendo controle ~~de~~ automático de movimentação da mesa X-Y.

g. **Sistema com Arquitetura Aberta:** sendo um torno de pesquisa, o equipamento deve possuir arquitetura acessível, de fácil integração, de forma a viabilizar alterações e propiciar um entendimento maior das suas funcionalidades e problemas.

3.5 AVALIAÇÃO DAS ATUAIS CONDIÇÕES DO TORNO

Com relação a estrutura mecânica, observa-se que esta se encontra em bom estado, apresentando boas características, notadamente o mancal aerostático e a bancada Moore. Revisões e correções necessárias foram feitas anteriormente pela equipe de engenheiros, bolsistas e funcionários do LMP.

A estrutura pneumática teve que ser alterada, incluindo a colocação de novos filtros, da reconfiguração do sistema de alimentação do mancal e demais equipamentos pneumáticos, sendo feita em conjunto com bolsistas do LMP. Outro fator importante, que será discutido nos capítulos mais adiante, foi a implementação de uma lógica que garantisse a segurança do sistema em condições anormais de operação.

As alterações mais significativas se encontram nos aspectos que tangem a parte de controle da usinagem, do movimentação e da segurança do sistema. A parte eletrônica e o antigo CLP foram substituídos, de forma a possibilitar a implementação das funcionalidades encontradas nas máquinas CNC, uma vez que tais estruturas se encontravam obsoletas.

3.6 ESPECIFICAÇÕES PARA O TORNO MOORE

Basicamente, esse trabalho se dividiu em duas partes principais. A primeira referente ao processo de segurança do mancal aerostático, e a segunda correspondente ao processo de controle da usinagem em si, cujo centro de processamento de informações será feito em um microcomputador, com a implementação do CNC.

3.6.1 SISTEMA DE SEGURANÇA

O mancal representa uma parcela altamente crítica no sistema. A monitoração contínua é um quesito básico deste sistema, de forma a garantir a segurança do mesmo.

O mancal constitui-se de um eixo que gira acionado por uma correia, que por sua vez se encontra conectada a um motor de corrente contínua. Este mancal trabalha sobre uma camada de ar micrométrica, sendo necessária uma pressão mínima de 6 bar na câmara que contém o mancal.

Outro fator importantíssimo, corresponde ao suprimento de energia ao sistema, (eletricidade ou ar nas linhas de pressão). Caso a alimentação de ar, para o mancal e/ou para as válvulas pneumáticas, falte, faz-se necessário que o sistema atinja um estado seguro. O mesmo acontece quanto ao suprimento de energia elétrica.

Assim, durante o projeto foram definidas as especificações e necessidades do sistema de segurança como segue:

- a. Pressão na linha de alimentação do mancal maior ou igual à 6 bar.
- b. Pressão suficiente para acionamento dos atuadores (tensionadores, líquido refrigerante, freio) da ordem de 2 bar.
- c. Duas tomadas de pressão da linha: um já disponível, para a verificação da pressão do mancal, e a segunda a ser instalada, antes da alimentação das válvulas pilotadas.
- d. No caso da falta de energia elétrica e/ou alimentação de ar insuficiente: garantir posições de repouso seguras para o sistema pneumático.
- e. Possibilidade de duplo freio: pneumático mais frenagem elétrica.
- f. Possibilidade de instalação de um pulmão para garantia de alimentação do mancal e do freio pneumático.
- g. Mancal pode dar $\frac{1}{2}$ volta caso a pressão caia de 6 para 1 bar instantaneamente. Tempo de resposta das válvulas mais tempo de processamento do sistema dedicado de segurança deve ser menor que 50 ms.
- h. Possibilidade de instalação de um reservatório para manter pressão no freio pneumático.

Devido aos riscos envolvidos, notadamente a problemática apresentada no item g., observa-se que a necessidade de um dispositivo dedicado parece ser a solução mais indicada. O uso de um microcomputador, por exemplo, que já estaria envolvido com o processo de controle do sistema CNC, poderia apresentar riscos, uma vez que os tempos envolvidos são extremamente pequenos. Neste caso, optou-se pela utilização de um CLP, que dentre outras funções, garante a segurança do mancal aerostático.

3.6.2 PROCESSO DE USINAGEM

O sistema de controle do processo de usinagem, engloba as seguintes áreas:

- a. Controle de movimentos e controle da máquina (CNC).
- b. Integração de um sistema CAD/CAM com o CNC da máquina.
- c. Interface com o CLP.

3.6.2.1 O SISTEMA CNC

Responsável pela geração dos sinais de controle da máquina, da geração das trajetórias e interpretação de programas de comando numérico.

Durante o projeto foram definidas, inicialmente, algumas especificações mais relevantes para o atual estágio do projeto (procurou-se abranger o maior número de funcionalidades possíveis, de modo a prever futuras alterações no sistema):

- a. Motorização dos eixos: inicialmente motores de passo, com possibilidade de utilização de motores de corrente contínua.
- b. Verificação das características da bancada Moore.
- c. Estruturação do software de controle da máquina (CNC): software para geração de trajetórias (interpolador), controle do sistema (controle da movimentação dos eixos X-Y, da rotação do eixo árvore, etc.).
- d. Levantamento do hardware necessário para a implementação do sistema CNC.

Além destes itens gerais, incluem-se alguns requisitos mais específicos, mais não menos importantes:

- a. Viabilizar a instalação de picador de cavaco e da bomba de vácuo, a longo prazo.
- b. Velocidade nominal de trabalho: 600 rpm (mesmo sabendo que o mancal possibilita atingir velocidades até 3000 RPM).

- c. Ajuste da velocidade de rotação: via painel (potenciômetro) ou via CNC. Escala em percentual do valor nominal (130% - 0%) em RPM.
- d. Funcionamento em modo automático x modo manual: possibilidade de habilitar/desabilitar uma função que permita fazer a usinagem de forma automática, via CNC, ou de forma manual, em um painel de comando. CNC é responsável por esta função.
- e. Avanços: pode ser automático conforme o perfil especificado em um programa, ou controlado via teclado do microcomputador ou joystick.
- f. Referência absoluta (pode ser utilizada na maioria dos casos) x relativa (casos críticos). Sistema de referência feita manualmente, através de um botão, por exemplo, ou comando para armazenar valor como referência via CNC.
- g. Possibilidade de teclado remoto.
- h. Posição segura para ferramenta: totalmente recolhida.

Nem todos os itens chegaram a serem analisados, uma vez que as etapas desenvolvidas neste trabalho não se referiam à todos os itens abordados acima, como será observado nos capítulos que se seguem. Além disto, como é natural no projeto e desenvolvimento de sistemas, com o decorrer das atividades, as especificações vão sendo modificadas e expandidas, com o aumento do entendimento e detalhamento do projeto.

3.6.2.2 INTEGRAÇÃO CAD/CAM E CNC

Com a integração de um sistema CAD/CAM com o CNC da máquina, torna-se possível executar todo o processo que abrange desde o projeto da peça até a sua usinagem em um único terminal ou computador. O objetivo da integração é desenvolver um sistema que seja capaz de suportar as partes de desenvolvimento e projeto de peças, o respectivo processamento para a usinagem (geração de um programa que contenha os dados geométricos provenientes do CAD, acrescidos de dados tecnológicos como velocidades e tipos de ferramentas, o CAM) e da posterior usinagem da peça, com o controle adequado dos movimentos e da máquina-ferramenta.

3.6.2.3 INTERFACE CLP E CNC

O sistema deve ser capaz de trocar informações com o CLP, encarregado da segurança do mancal e de executar as funções lógicas necessárias ao processo de usinagem, como ligar ou desligar o líquido refrigerante, etc.

As possibilidades de comunicação podem ser através de interface serial, paralela ou através da implementação de um barramento dedicado, conectado às entradas/saídas do CLP.

3.7 CONCLUSÃO

A análise dos custos envolvidos, o planejamento das diversas atividades envolvidas, o conhecimento multidisciplinar exigido, são fatores preponderantes, que devem ser exaustivamente analisados no projeto de *retrofitting* de máquinas-ferramenta. O fato de disponibilizar o atual torno para usinagens de ultraprecisão, constitui um fator extra de extrema importância, tornando tal análise ainda mais exigente, do ponto de vista tecnológico e científico.

De acordo com as funcionalidades desejadas, e com o estado atual da máquina, e as disponibilidades econômicas, a variedade de alternativas encontradas para a solução do problema se fazem presente, constituindo cada projeto em particular, um trabalho único e específico.

Capítulo 4

Motorização dos Eixos do Torno Moore

4.1 INTRODUÇÃO

Várias são as aplicações em que são desejados controle de movimentos, como por exemplo, acionamento e controle de robôs ou sistemas de movimentação em máquinas CNC.

Em máquinas-ferramentas do tipo CNC, o controle do posicionamento da mesa X - Y é fundamental na usinagem dos perfis das peças. Por isso, a escolha do tipo de acionamento, e conseqüentemente do sistema de controle a ser aplicado, é de suma importância no que tange a precisão de posicionamentos desejados (usinagem de ultraprecisão).

O tipo de tecnologia empregada no controle de movimento da mesa X - Y , dependem das características dinâmicas desejáveis ao sistema. Nesse caso, para a automatização do Torno Moore, é fundamental a garantia das precisões obtidas nos posicionamentos, bem como das precisões/resoluções alcançadas.

De acordo com as exposições feitas no capítulo 1, onde se procurou dar uma visão das necessidades envolvidas na motorização dos eixos de máquinas-ferramentas, apresentar-se-ão os resultados observados durante os estudos e testes do sistema de controle de movimentos.

4.2 CONTROLE DE MOVIMENTO DO TORNO MOORE

Dentre as especificações do Torno Moore, encontram-se aquelas referentes ao processo de motorização dos eixos. O ponto fundamental nesta parte do projeto, consiste na verificação das características dinâmicas dos servoacionamentos, uma vez que as finalidades de utilização como

torno de pesquisa, notadamente na área de ultraprecisão, exigem um controle de posicionamento e velocidade condizentes com esse tipo de usinagem.

A opção mais recomendada, consiste da utilização de um sistema de malha-fechada, com motores de corrente contínua, devido aos desempenhos alcançados em controle de movimentos, conforme exposto no capítulo 1. A principal questão sob o ponto de vista da usinagem não-convencional, consiste nas precisões alcançáveis nos posicionamentos, pelo sistema de controle dos eixos, que encontram-se na ordem dos micrômetros.

Para implementação deste sistema, um dos componentes críticos corresponde ao sensor que realimenta o sinal de posição, o sistema de medição (capítulo 1). Para a implementação desse sistema de medição utiliza-se de um tacogerador, com baixo *ripple* (ruído) para as baixas velocidades (da ordem de 0,01 m/min à 0,1 m/min). Porém ~~o~~ custos ~~envolvidos~~ para a aquisição deste tipo de equipamento é extremamente elevado, da ordem de US\$ 7.000.

Como apresentado no capítulo 1, existe a possibilidade do emprego da tecnologia de motores de passo, que possuem a característica de apresentarem resoluções extremamente elevadas, conforme o número de micropassos. Outro aspecto importante, consiste nos poucos esforços realizados em usinagens de ultraprecisão (capítulo 2), o que corresponde à pequenas variações da carga ~~sob a qual~~ está sendo submetido o acionamento. Desta forma as características de torque de partida e parada, não se constituem de fatores críticos que impossibilitariam a aplicação deste tipo de motores, propiciando a sua utilização nas usinagens de ultraprecisão.

Porém o controle da precisão do motor de passo, não existe, pois apesar da resolução desses motores ser extremamente elevada, a sua precisão depende dos aspectos construtivos. O fato de serem utilizados em malha-aberta também ~~contribui~~ para a falta de precisão no sistema de controle de movimentação.

Assim, duas são as alternativas passíveis de implementação. A primeira, menos dispendiosa economicamente, consiste na utilização de motores de passo, acionados por drivers de micropasso, para a movimentação da mesa. A segunda, o emprego de motores de corrente contínua, com a utilização de um sistema de controle em malha fechada.

A proposta deste trabalho, consiste da implantação do controle da movimentação da mesa através do uso de motores de passo, num sentido de avaliar o desempenho deste tipo de estrutura em controle de movimento, uma vez que não se tem informação a respeito da utilização deste tipo de tecnologia em usinagens não-convencionais, mas também possibilitando a utilização de motores de corrente contínua, em um futuro próximo. Como será visto mais adiante, a tecnologia empregada permite que o sistema apresente uma flexibilidade com relação aos tipos de motores.

4.3 IMPLEMENTAÇÃO

Uma das características das máquinas CNC é o controle da movimentação dos eixos. Esse controle é feito através da geração de sinais de comando para o sistema de movimentação, provenientes do interpolador encarregado da geração de trajetórias na máquina-ferramenta.

A função do interpolador consiste na interpretação do programa NC, identificando as trajetórias relativas entre peça e ferramenta, com os respectivos valores de posição e velocidade. Esses valores são decodificados em um conjunto de sinais, por uma placa digital de controle de movimento. Por sua vez, a placa fornece os sinais de pulso, direção para os drivers de micropasso, encarregados de acionar os motores de passo.



Figura 4.1. - CNC e o Sistema de Acionamento

Objetivando a futura instalação de um sistema de controle em malha-fechada com servomotores de corrente contínua, foram previstas na atual configuração do sistema, possibilidades de alterações dos tipos de motores de forma simples e com baixos custos. Isto é possível graças a característica da

placa de controle de movimento. Através da substituição do chip responsável pela geração dos sinais de comando para os drivers, e de algumas alterações no software do interpolador (que gera os comandos de posicionamento e velocidades), torna-se possível tal tarefa.

Essa característica representa uma das grandes vantagens no emprego de arquiteturas abertas, principalmente se os objetivos são de pesquisa acadêmica, onde as possibilidades de alteração na configuração do sistema podem ser feitas sem maiores complicações, propiciando o estudo do desempenho de diferentes estruturas, como nesse caso, o emprego de motores de passo (ainda não explorado profundamente) versus as características já conhecidas dos servomotores de corrente contínua.

✕ Dessa forma, propõe-se o sistema de movimentação da mesa X-Y do Torno Moore, com o emprego de dois motores de passo e seus respectivos drivers, controlados por uma placa de controle de movimento, que faz a interface entre o software do CNC, encarregado, dentre outras funções, de gerar as trajetórias e o sistema de acionamento dos eixos.

4.3.1 OS EQUIPAMENTOS

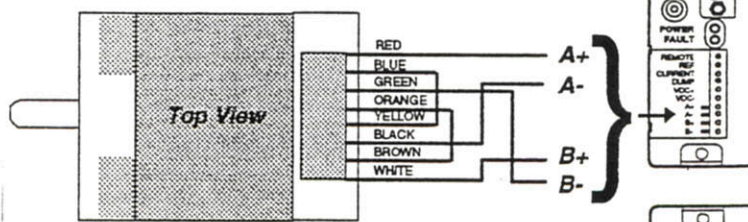
A seguir apresenta-se uma descrição sucinta dos equipamentos a serem utilizados para a motorização dos eixos do Torno Moore.

a. Motor e Driver

Devido à versatilidade dos motores empregados, é possível, através das configurações das ligações deste com o driver de acionamento, atingir um número de até 50800 micropassos por revolução. Isso significa uma resolução elevada, da ordem de $0,007^{\circ}$ por passo, ou seja, para cada pulso o motor gira de $0,007^{\circ}$. Essa elevada resolução, entretanto, não implica necessariamente em uma precisão elevada, que no caso deste tipo de motor encontra-se na faixa de 1% do passo básico do mesmo (o motor empregado apresenta 200 passos básicos, correspondendo cada passo à 1.8°).

□ Size 23 motors may be wired in series or parallel configurations (OEM57-40-MO, OEM57-51-MO, OEM57-83-MO)

Size 23 OEM650 Motors: Series Wiring



Size 23 OEM650 Motors: Parallel Wiring

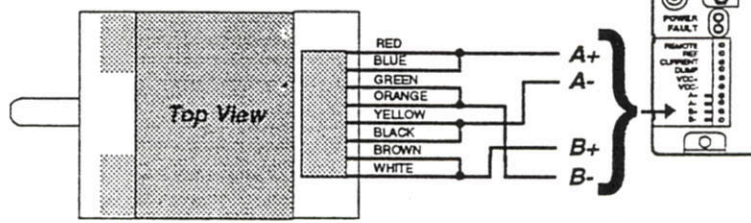


Figura 4.2. - Motor de Passo e Driver

Para posicionamentos em baixa velocidade, a utilização de motores de passo ^e são possíveis em função das pequenas variações da carga do sistema, pelo fato da usinagem de ultraprecisão ser utilizada ^{em} ciclos de acabamento, onde pequenas camadas de material são retiradas. Assim, as relações de torque e velocidade ficam constantes durante o processo de usinagem, podendo, neste sentido, ser viável o emprego dos motores de passo.

b. Placa *que placa?*

A função da placa é de fornecer os sinais de pulso e direção para os driver de controle dos motores de passo, provenientes do interpolador do CNC.

A placa utilizada permite controle de até 4 motores de passo, com opção de utilização de sinais de realimentação de encoders. A placa fornece um conjunto de operações que possibilitam o desenvolvimento de vários perfis de trajetória (trapezoidal, curva 's'), configurar valores de velocidade, posição, aceleração, bem como de funcionalidades adicionais, como limites de posição, interrupções, dentre outras. Essa versatilidade encontrada na programação da placa, como por exemplo chips dedicados ao controle de motores específicos, ampla variedade de comandos,

sincronização de eixos, etc., permite a sua utilização nas mais variadas aplicações, entre elas o controle de movimento de máquinas-ferramentas.

c. Interface Micro/Placa

O processo de controle de movimento é feito digitalmente e em malha aberta, através da interface entre um computador e a placa digital de controle de movimentos. Dessa maneira, no programa de controle da máquina-ferramenta (CNC), são definidas os valores de posição, de velocidade, limites de posicionamento, condições de interrupções, ficando a encargo da placa, a geração dos sinais para o driver.

Com a utilização dos comandos específicos de controle de movimento da placa, é possível a implementação do sistema de movimentação do CNC, a partir de uma linguagem de alto nível. Durante as fases de testes, foram empregadas as linguagens C e C++.

Com o emprego de drivers digitais, do controle de movimento feito pelo CNC (digitalmente em um microcomputador), e da versatilidade da placa utilizada, é possível alterar a estrutura do sistema, com substituição dos chipset's específicos de controle de movimentos e com poucas alterações no programa residente no CNC, tornando viável a motorização dos eixos por motores de corrente contínua, a partir da estrutura funcionando com motores de passo.

d. Régua ótica

De forma a monitorar o controle da movimentação dos motores de passo, que se encontram em malha-aberta, é possível o emprego de régua ótica. As régua ótica monitorariam os valores de posição realimentando o sistema destas informações. Deve-se salientar que a realimentação é feita de forma a monitorar o desempenho do motor, como por exemplo a detecção da perda do passo ou do acompanhamento das resoluções e precisões obtidas, mas porém não sendo empregada em um sistema de controle em malha-fechada, conforme a terminologia adota em controle de processos.

4.3.2 TESTES

✕ A parte de testes e simulações do desempenho dos motores de passo foram feitas na própria empresa, em uma máquina que possui o sistema de movimentação (mesa X-Y) com os mesmos princípios do Torno Moore, que ainda não se encontra implementado.

Como resultado desta etapa do projeto, fica a proposta para a implementação do sistema de controle de movimento do Torno Moore.

No que tange ao aspecto de garantia das tolerâncias e não-linearidades do mancal da mesa (problema de atritos [Centinkunt et al]), só poderão ser verificados os aspectos práticos com o sistema efetivamente implantado. Mas sob o ponto de vista teórico, as resoluções no posicionamento alcançados com motores de passo, conforme apresentado no início desta capítulo, a princípio apresentam razões suficientes que justificariam a sua utilização em sistemas mais precisos de posicionamento.

✕ Apesar de estarem previstas no projeto, a motorização dos eixos através da utilização de servomotores de corrente contínua, somente foram estudados os seus princípios de funcionamento, não sendo dada uma análise mais detalhada nas características apresentadas por esses motores em malha-fechada, e muito menos os aspectos referentes ao estudo dos algoritmos de controle em malha-fechada do sistema de controle de movimentos. Essa atividade, por si só, constitui ~~de~~ um projeto, que ~~porventura~~ poderá ser desenvolvido no Torno Moore.

4.4 MOTORIZAÇÃO DO EIXO ÁRVORE

O mancal aerostático constitui ~~de~~ uma parcela crítica do sistema, no que tange à sua segurança. Porém a sua motorização não apresenta maiores implicações, não estando intimamente relacionado com a precisão do sistema.

Desta forma, está previsto a utilização de um motor de corrente contínua para a motorização do eixo árvore. O acionamento do motor de corrente contínua será feito por um conversor monofásico. Este equipamento consiste de um conversor estático de corrente alternada para corrente contínua, monofásico, em ponte semi-controlada, da empresa Weg, da série CMW-02. Em anexo encontram-se o projeto das ligações para o acionamento do eixo árvore.

4.5 CONCLUSÕES

Mesmo não se encontrando implementado, o trabalho aqui desenvolvido constitui de uma referência, para a projeto de *retrofitting* do Torno Moore, mais especificamente a motorização dos eixos.

Devido a abrangência encontrada no processo de motorização de eixos de máquinas-ferramentas, o estudo de novas tecnologias, dos aspectos práticos e dos problemas envolvidos nesse processo, constitui-se de um enorme aprendizado sob o ponto de vista profissional, contribuindo para o aprimoramento do conhecimento técnico do profissional envolvido nesta área.

CAPÍTULO 5

INTERPRETADOR DE CÓDIGO “G”

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os aspectos referentes a implementação do interpretador de programas NC (código “G”) e da geração de trajetórias para o sistema de controle da movimentação dos eixos da máquina-ferramenta. Esses subsistemas correspondem a uma parcela do sistema CNC a ser implementado para o controle do Torno Moore, de acordo com as especificações dadas no capítulo 3.

A integração de um sistema CAD/CAM com o futuro CNC já se constitui de uma preocupação, e um dos objetivos ainda nas fases iniciais do processo de *retrofitting* do Torno Moore.

5.2 SISTEMAS CAD/CAM E A INTEGRAÇÃO COM OS SISTEMAS CNC

Um sistema CAD, *Computer Aided Design*, ou Projeto Auxiliado por Computador, consiste “funcionalmente de um sistema de processamento de informação com ênfase especial em processamento geométrico (para a representação gráfica de produtos) e por isso utilizam-se de técnicas de computação gráfica em ambiente de interação com o operador projetista” [Conai].

Os softwares de CAD encontram um espaço amplo de utilização em aplicações de engenharia e arquitetura: definição de dados geométricos (formas, dimensões, tolerâncias), cálculos (centros de massa, inércias), visualização de ambientes, etc.

Softwares para CAD são utilizados em larga escala nas funções de projeto na área de manufatura. Isto inclui o desenho do produto, mais o projeto de todos os sistemas requeridos para o suportar o processo de produção, tais como dispositivos de fixação, ferramentas, etc. CAD e as

funções de projeto formam uma união natural devido à geometria da peça ser usada frequentemente nos processos de produção.

Além disto, quando uma peça é criada, torna-se necessário o armazenamento de informações sobre o novo produto em desenvolvimento. As primeiras informações são criadas com a utilização do CAD, e sendo posterior a conversão da geometria da peça e atributos para um formato de arquivo requerido por outros departamentos da empresa.

Um sistema CAM, *Computer Aided Manufacture*, ou Manufatura Auxiliada por Computador, é o efetivo uso da tecnologia de computadores no planejamento, gerenciamento e controle da produção. Uma das maiores aplicações do CAM, é a utilização na manufatura de peças discretas, onde são produzidas peças acabadas com a informações extraídas diretamente dos dados e desenhos de projeto. Neste tipo de aplicação, frequentemente chamada de CAD/CAM, a geometria da peça criada com o CAD na área de engenharia de projeto é utilizada por um software CAM para criar um código de máquina capaz de descrever as funções para usinagem da peça em quase todas máquinas CNC. Dessa forma, com a geometria de peça feita pelo CAD, transfere-se então estas informações geométricas para a estação CAM.

Dessa maneira, torna-se viável a transferência dos programas NC, ou programas pós-processados, gerados no sistema CAD/CAM diretamente para um sistema CNC de uma máquina-ferramenta qualquer. Essa troca automática de informações, dispensa a utilização de programadores da máquina CNC, no que tange ao aspecto de informações tecnológicas e geométricas para a máquina, uma vez que estas informações encontram-se armazenadas no programa NC gerado. Os tempos envolvidos com o projeto e execução de novos produtos são reduzidos sensivelmente, com a redução da interferência humana sobre esse processo. Os erros decorrentes de programas errados, também podem ser evitados.

Outro ponto muito importante, consiste na linguagem NC, ou linguagem-peça, a ser interpretada pelo CNC da máquina-ferramenta, sendo diversas as linguagens encontradas, que apesar de serem parecidas, não dispõem-se ainda de uma linguagem padrão. Além disto, pode-se utilizar dessa linguagem como elo fundamental do processo de integração de um sistema CAD/CAM com o CNC de uma máquina-ferramenta, constituindo-se tal linguagem, como elemento de saída do primeiro sistema e formando um conjunto de dados de entrada para o segundo.

5.3 SISTEMA CNC E O INTERPRETADOR DE CÓDIGO “G”

Conforme visto no capítulo 3, a necessidade de utilização de um sistema CNC para o controle e monitoração do Torno Moore se torna desejável. Buscando, então, unir as vantagens decorrentes do processo de modernização da máquina, ou seja, a implementação de um sistema CNC, procura-se ainda nas fases iniciais do projeto, viabilizar a integração com um sistema CAD/CAM.

Caberá ao sistema CNC do Torno Moore, o gerenciamento do processo de usinagem, ficando encarregado da comunicação com o CLP, e do controle do sistema de movimentação dos eixos da máquina-ferramenta. Atualmente esse sistema se encontra em fase de construção, tendo sendo atingido da programação de um subsistema de interpretação de programas em código “G”, bem como das interpolações necessárias ao processo de geração de trajetórias.

A seguir são apresentados alguns conceitos básicos de programação para sistemas CNC de máquinas-ferramentas, apresentando uma maneira de se armazenar e estruturar as informações tecnológicas e geométricas da peça em um programa, o código “G”.

5.3.1 FUNDAMENTOS BÁSICOS: O PROGRAMA NC OU CÓDIGO “G”

A grande maioria dos parâmetros envolvidos com os processos de usinagem em máquinas-ferramentas são dados numéricos (informações dimensionais, avanços, número da ferramenta, compensações, etc.). Este conjunto de valores numéricos, recíproca e sistematicamente ordenados em correspondência com a sequência de operações desejada, são qualificadas como programa, e a geração e armazenamento dos dados, programação.

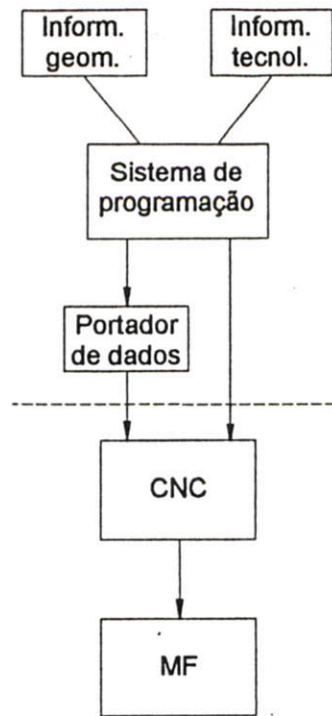


Figura 5.1. - Programação CNC

Para comandar uma máquina CNC é necessário um programa específico para a peça a ser trabalhada, o programa NC ou programa-peça. O programa CNC compõem-se por todas informações necessárias à produção da peça: cálculo da trajetória das ferramentas, informação geométrica, e controle de operações auxiliares ao processo de usinagem (velocidades de corte, avanços, ferramentas, etc.), informação tecnológica. Os dados necessários para o programa NC de uma peça podem ser classificados como segue:

- a. Informação tirada diretamente do desenho: dimensões, tais como comprimento, raio, altura, largura, etc.; perfis: lineares, circulares ou parabólicas; diâmetros de furos. A trajetória da ferramenta é calculada em função destes parâmetros.
- b. Parâmetros de usinagem, que dependem da qualidade da superfície desejada, requisitos de tolerâncias e tipos de material e ferramentas de corte: avanços, velocidades de corte, e funções auxiliares, tais como acionamento ou não, do líquido refrigerante.
- c. Dados determinados pelo programador do código G, como direção do corte e troca de ferramentas. O programador estabelece as sequências ótimas das operações que são exigidas para processar a peça. Entretanto, ele deve estar familiarizado com processos de manufatura e ter conhecimento suficiente das características do sistema CNC em particular.

d. Informação adicionais, específicas de cada máquina CNC.

A geração do programa NC pode ser feita assistida por computador ou manualmente. No que tange a programação manual, o processo de criação do programa NC consiste de um conjunto de atividades, envolvendo a parte do planejamento do processo em si, bem como da tradução dos dados técnicos para a linguagem específica da máquina CNC: seleção das peças; interpretação do desenho; planejamento do processo; especificação dos dispositivos de fixação; seleção das ferramentas e condições de usinagem; preparação dos dados para o cálculo de trajetórias; preparação do programa; inserção na máquina (manual, disquete ou fita perfurada); e teste e verificação do programa.

Por sua vez, a integração de um sistema CAD/CAM com o CNC da máquina elimina as etapas correspondentes ao processo de programação do código "G" da peça. Esta função é feita automaticamente pelo sistema, que lê o programa pós-processado do CAM, e interpreta em um conjunto de operações que irão comandar diretamente a máquina-ferramenta (CNC).

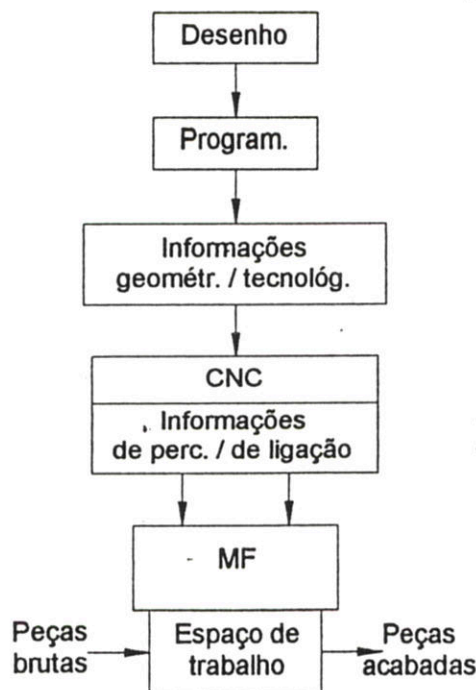


Figura 5.2. - O Programa NC

O programa que contém os dados para o desenvolvimento do processo de usinagem, é composto por um conjunto de sentenças (ou blocos) de programa, estando este por sua vez, composto por uma série de palavras. Cada palavra inicia com uma letra de endereçamento, para conduzir a informação numérica que se segue para o registrador correto, que corresponde a execução de uma função específica da máquina-ferramenta.

X Um exemplo de ~~uma~~ sentença de programa é dado a seguir:

N4, G2, X±4.3, Y±4.3, Z±4.3, I4.3, J4.3, K4.3, F7, S4, T8, M2

As letras correspondem aos tipos de palavras, e os números, ao número de dígitos que são expressos os valores numéricos (com a quantidade de algarismos antes e depois da vírgula).

∞ Sendo assim, a cada sentença está associado um número, estabelecido sequencialmente, que corresponde a palavra N4. Um dos seus propósitos é a identificação de operações de usinagem específicas, como por exemplo os ciclos fixos de desbaste ou acabamento. Após a identificação da sentença, segue um conjunto de palavras (ou funções), que contém as informações referente o processo de usinagem propriamente dito. Tais funções, podem ser divididas em funções preparatórias (ou geométricas), identificadas pela letra G, sendo daí a origem do nome “código G”; miscelâneas representadas pela letra M; para manipulação de ferramentas, letra T, além de outras mais específicas.

a. As Funções Preparatórias (G): as funções preparatórias preparam a máquina para a performance de um modo de operação específico. Aqui se encontram incluídas as informações referentes ao cálculo das trajetórias, como por exemplo, os avanços lineares, circulares, os ciclos de usinagem específicos e os sistemas de referência. Além das informações sobre a geometria da peça, também são incluídos dados adicionais de forma a que a máquina CNC possa fazer as compensações e ajustes necessários, para as correções do posicionamento de ferramentas, os cálculos dos sobremateriais para acabamento, do controle da velocidade dos eixos, etc. Os parâmetros X,Y,Z,I,J e K são empregados na programação de trajetórias, fornecendo valores de fim de percurso, centros e arcos de circunferência, etc.

X
X **b. As funções miscelâneas (M):** consiste ^{de} de um conjunto de funções auxiliares, que não estão diretamente relacionadas com a movimentação dimensional da máquina, como ^{fixar} setar velocidades e sentido de rotação do eixo árvore, interrupção de programa, fim de programa, acionamento de líquido refrigerante, etc.

X
X **c. A função de troca de ferramenta (T):** consiste de um código numérico de no máximo cinco dígitos, tendo cada ferramenta um código específico. Esta função indica a máquina CNC, as ocorrências de troca de ferramenta, podendo ser manual (com parada do programa) ou automática (cabeçote automático). A cada ferramenta, está geralmente associado um conjunto de variáveis, contendo informações a respeito da sua geometria e dimensões, que são atualizadas conforme as sucessivas trocas de ferramenta.

d. Algumas funções adicionais: programação de velocidades de rotação do eixo árvore (S); programação dos avanços (F).

5.3.2 O INTERPRETADOR DE CÓDIGO "G"

X Um dos objetivos desse trabalho, consistiu da construção de um sistema capaz de interpretar uma linguagem de programação de máquinas-ferramentas, ou programa NC. Foi adotada a linguagem de um fabricante de máquinas-ferramentas ~~em~~ específico, no caso a Romi, principalmente devido a possibilidade da integração com um sistema CAD/CAM, que também se baseia nessa linguagem para o seu pós-processamento.

Assim, foi feito um estudo preliminar dos comandos a serem implementados. Esse estudo é apresentado a seguir.

Quebra de página

5.3.2.1 ESTRUTURAÇÃO DOS COMANDOS DO CÓDIGO "G"

Essa análise consiste basicamente de uma relação das diversas possibilidades e recursos envolvidos com a programação de peças para máquinas CNC.

a. Sistema de Coordenadas

X Durante a fase de projeto, é necessário estabelecer uma referência para a cotagem da peça. A esta referência denomina-se "zero-peça". Porém X para a usinagem de uma peça, todas as movimentações executadas na máquina-ferramenta, são feitas em relação a uma referência existente X na própria máquina, denominada de "zero máquina".

De forma a permitir a correta execução dos movimentos, em função da diferença de referências, torna-se necessário fornecer ao sistema o posicionamento do zero-peça em relação ao zero-máquina. Esse procedimento é adotado, em função de todos os movimentos programados no programa NC de uma peça, também serem feitos em relação ao zero-peça, uma vez que todas as informações geométricas, como dimensões e tolerâncias ^{na ele} estão referenciadas ~~ao zero-peça~~.

Um outro conjunto de informações adicionais que devem ser incluídas no sistema, consiste de valores de comprimento dos suportes de ferramentas e da geometria das mesmas. Esses dados são passados ao sistema através da interface com o CAD/CAM, sendo repassados automaticamente para o sistema CNC, nesse caso considerando-se a integração dos dois sistemas, ou manualmente em um display ou menu do próprio sistema CNC.

Para o controle da movimentação da máquina, o sistema de coordenadas pode ser absoluto, coordenadas em relação ao zero peça, ou incremental, em relação à última coordenada atingida. Essa informação é passada através dos comandos **G90**, absoluta, ou **G91**, incremental. Essas funções são ditas modais, pois uma vez utilizadas, não torna-se mais necessário a sua inclusão nos blocos ou sentenças subsequentes no programa.

Quebra

b. Pré-sets da Máquina

Alguns comandos são utilizados para o ajuste de valores de velocidades de rotação e avanço. Com relação às velocidades de rotação envolvidas, torna-se necessário fazer o controle dessa grandeza, uma vez em que ~~para~~ velocidades de corte constante, ~~a~~ rotação do eixo árvore exigem variações ^{na} nessa velocidade. Além disto, essa variação deve estar sincronizado com a atual posição da ferramenta em relação à peça.

A placa utilizada para a motorização dos eixos, capítulo 4, também apresenta a possibilidade de sincronização do eixo árvore com os eixos da mesa X-Y, podendo dessa forma ser solucionado o problema de controle da velocidade da rotação do eixo árvore.

As funções abaixo estão relacionados à programação de velocidades, sendo todas do tipo modal.

G92 - Limite de rotação do eixo árvore em RPM.

G94 - Avanço em polegadas/minutos (G70) ou milímetros/minuto (G71).

G95 - Avanço em polegadas/rotação (G70) ou milímetros/rotação (G71).

G96 - Programação em velocidade de corte constante, onde a velocidade é programada pela função S, em RPM. A máxima velocidade é dada pela função **G92**.

G97 - Programação em RPM direta. É programada a RPM diretamente pela função S.

c. Posicionamentos

Essas funções tem por objetivo descrever a movimentação da ferramenta em relação ao zero-peça. Desse modo, é necessário fazer os ajustes necessários, como a compensação de ferramentas.

G00 - Posicionamento rápido com a maior velocidade de avanço programada. É modal.

G1 - Interpolação linear com avanço (F) pré-determinado. Modal.

G2 - Interpolação circular horária.

G3 - Interpolação circular anti-horária.

G20 - Unidades em polegadas. Modal.

G21 - Unidades em milímetros. Modal. Este comando é default.

G40 - Cancela compensação de raio. Modal e default.

G41 - Compensação de raio de ferramenta à esquerda. Modal.

G42 - Compensação de raio de ferramenta à direita. Modal.

O valor da compensação do raio da ponta da ferramenta, estando à esquerda/direita da peça a ser usinada, vista em relação ao sentido do curso de corte. Os valores de raio são definidos pelo código T, com valores previamente armazenados.

d. Ciclos de Usinagem

Existem algumas sequências de usinagens que são comuns, devido ao tipo de peça ou função que executam. De forma a compactar um conjunto de informações em um único comando, são utilizados os chamados ciclos de usinagem.

G33 - Ciclo de rosqueamento básico.

G70 - Ciclo de acabamento.

G71 - Ciclo de desbaste longitudinal.

G72 - Ciclo de desbaste transversal.

G74 - Ciclo de furação.

e. Funções Miscelâneas.

Como mencionado anteriormente, essas funções tem por objetivo auxiliar o processo de usinagem em si, não estando diretamente relacionadas com a movimentação da ferramenta em relação à peça.

O - Número e início de programa.

M00 - Parada de programa, para troca de ferramenta, por exemplo.

M02 - Fim de programa.

M03 - Liga eixo árvore, sentido anti-horário de rotação.

M04 - Liga eixo árvore, sentido horário de rotação.

M05 - Desliga eixo árvore.

M08 - Liga refrigerante.

M09 - Desliga refrigerante.

M30 - Fim de programa com rebobinamento de fita.

M98 - Chamada de sub-rotina.

M99 - Retorno de sub-rotina.

/ - Ignora blocos.

T - Seleção da ferramenta, contendo: raio da ferramenta, sentido de corte, etc.

Os comandos apresentados não representam a totalidade das funções disponíveis. Eles correspondem aos mais utilizados e necessários aos processos de usinagem.

Visando a integração com um sistema CAD/CAM desenvolvido por outra empresa, verificou-se que tal integração poderia ser feita através da interpretação do código "G" gerado pelo sistema CAD/CAM. Esse código, corresponde ao código acima apresentado. Dessa forma, viabilizou-se o processo de integração de um sistema CAD/CAM disponível comercialmente com o sistema CNC ainda em desenvolvimento.

5.3.2.2 GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS

A interpretação do programa NC, ou código "G", contendo as informações relevantes para a usinagem de uma peça, consiste da conversão dos comandos e funções definidos no programa da peça, em sinais de comando para o sistema de movimentação da máquina CNC e para a função CLP do mesmo.

As trajetórias podem ser feitas de várias formas. Pode ser um posicionamento ou um contorno. No caso de ser um contorno, exigindo uma trajetória específica, pode ser umas das trajetórias implementadas na máquina, ou não. No primeiro caso se realiza uma interpolação, onde se converte a curva definida matematicamente em um conjunto de pequenos segmentos. No segundo caso se deverá encontrar todos os pontos intermediários necessários para que a curva gerada cumpra com as precisões requeridas (tolerâncias). Estes pontos intermediários devem gerar curvas que a máquina possa gerar.

Para o Torno Moore o tipo de interpolação adotado está intimamente ligado à precisão do sistema. Erros devidos à interpolação de curvas, podem ~~consistir de~~ ^{se tornarem} uma fonte de problemas em usinagem de ultraprecisão. De forma a analisar os aspectos referentes ao processo de interpolação, introduz-se uma breve análise desse processo.

5.3.2.3 INTERPOLAÇÕES

Um dos problemas encontrados na geração de trajetórias em máquinas CNC, consiste da execução de trajetórias não lineares, como por exemplo as circulares e as parabólicas.

De forma a permitir a execução desse tipo de movimento, são utilizados algoritmos de interpolação, pois qualquer curva pode ser aproximada por segmentos infinitamente pequenos. O tipo de interpolação e a quantidade de segmentos utilizados para aproximar a curva, determinam a precisão envolvida nesse processo de interpolação. Diversas são as maneiras empregadas para aproximação de curvas [Alique]: aproximação por cordas, tangentes e secantes.

Para o Torno Moore, serão implementadas somente as interpolações circulares, uma vez que não existe a necessidade de trajetórias parabólicas.

a. Interpolação Circular

Seja o arco da figura 5.3. O cálculo dos pontos intermediários é feito através da seguinte fórmula:

$$\begin{aligned} X_{i+1} &= X_i \cos(\alpha) - Y_i \text{sen}(\alpha) \\ Y_{i+1} &= X_i \text{sen}(\alpha) + Y_i \cos(\alpha) \end{aligned} \quad (5.1)$$

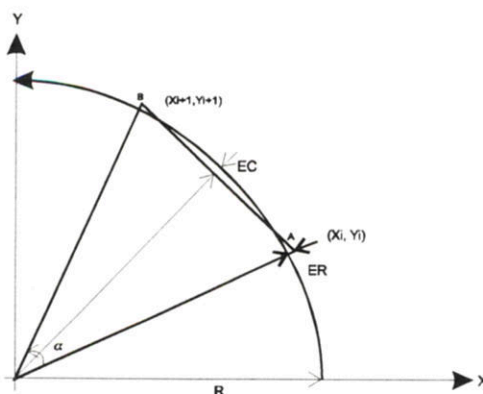


Figura 5.3. - Interpolação Circular

De acordo com o tipo de algoritmo utilizado nas aproximações das funções senoidais, através da utilização de séries matemáticas, são obtidos precisões diferentes. A escolha do algoritmo depende da capacidade de processamento do sistema CNC e das precisões desejáveis. Uma alternativa à implementação dos algoritmos de interpolação, consiste da utilização das funções senoidais disponíveis nas bibliotecas da linguagem de programação empregada para a construção do sistema. Obviamente neste caso, os erros envolvidos estão diretamente ligados com o método de aproximação utilizado (o que não deixa de ser uma forma de interpolação).

b. Erros de Interpolação

Os erros gerados devido à aproximação das curvas por segmentos de reta podem ser verificados através de duas formas:

i. *Erro Radial (ER)*: dado pela seguinte fórmula

$$ER = R(i) - R = [X^2(i) + Y^2(i)]^{1/2} \quad (5.2)$$

ii. *Erro de Corda (EC)*: dadas pelas expressões

$$EC = R - R(i)\cos(\alpha/2) \quad (5.3)$$

ou

$$EC = (AB)^2 / (8R) \quad (5.4)$$

onde o segmento AB define o tamanho máximo de segmento permitido para a aproximação circular.

Para o controle da precisão do processo de usinagem, é interessante minimizar tais erros. No caso do erro radial, a única maneira de atuar sobre o mesmo, é através da análise e implementação de diferentes algoritmos de interpolação. Porém uma vez tendo-se estruturado e compilado o código do programa, o usuário não tem mais acesso ao controle do erro radial sobre o processo.

O acesso ao controle dos erros de interpolação se dá, então, através do controle do erro de corda. Com a definição do máximo erro permitido, calcula-se então o tamanho máximo dos segmentos. Valores menores de segmentos de interpolação, obviamente levam a precisões melhores, porém a quantidade de pontos intermediários tem que ser compatível com esforço computacional disponível, principalmente memória e velocidade de processamento. Esse aspecto de disponibilidade de memória se torna crítico, quando tem-se perfis mais complexos, onde são necessários muitos pontos para a completa descrição da trajetória.

✕ O cálculo dos pontos intermediários (interpolação), é feita pela implementação da fórmula (5.1) com o emprego de bibliotecas da linguagem utilizada para a programação do interpretador, no caso C++. O controle da precisão se dá através do controle de erro de corda. Com a definição do máximo erro permitido, calcula-se através da fórmula (5.4) o tamanho máximo de cada um dos segmentos, e por consequência a quantidade de segmentos necessários para a interpolação da curva.

5.3.2.4 COMPENSAÇÕES E OFFSETS

Para a geração de trajetórias de ferramentas, muitos fatores devem ser considerados. As compensações decorrentes de características da geometria de ferramentas, ou ciclos de desbastes com necessidade de se deixar material para operações posteriores, consistem de tarefas complicadas, que exigem cálculos complexos. Com o desenvolvimento de dispositivos de processamento mais poderosos, as linguagens de programação de máquinas NC, e atualmente CNC, aprimoraram-se, transferindo todo esse processo de cálculo para o sistema de controle da máquina. Dessa forma, o

programador passa ao computador a tarefa de fazer as correções e compensações necessárias, tarefa esta antes executada manualmente.

A proposta do sistema CNC consiste do tratamento dos problemas de geração de offset, para usinagem em ciclos de desbaste, e compensação de ferramentas. Como mencionado, tais tarefas são extremamente complicadas, exigindo poderosas ferramentas e algoritmos para implementação dessas funções. Esses problemas foram estudados durante o desenvolvimento do atual projeto, mas ainda não foram implementados. Isto, entretanto, não constitui problema ou obstáculo para o processo de integração do sistema CAD/CAM com o interpretador de código "G" desenvolvido.

X A seguir encontram-se algumas observações a respeito dos problemas que ~~porventura~~ terão que ser solucionados.

a. Compensação

X Devido a geometria da ferramenta, o processo de compensação de raio de ponta de ferramenta tem uma grande importância, principalmente na usinagem de peças que exigem contorno. Esta compensação de ferramenta permite a programação do contorno da peça independente do tipo de ferramenta empregada. O processo de compensação fica a cargo do sistema de controle da máquina CNC. Alguns tipos de compensações empregados [Alique]: compensação paraxial, por transição circulares, por transição não-circulares. O tipo de compensação depende do tipo de contorno da peça.

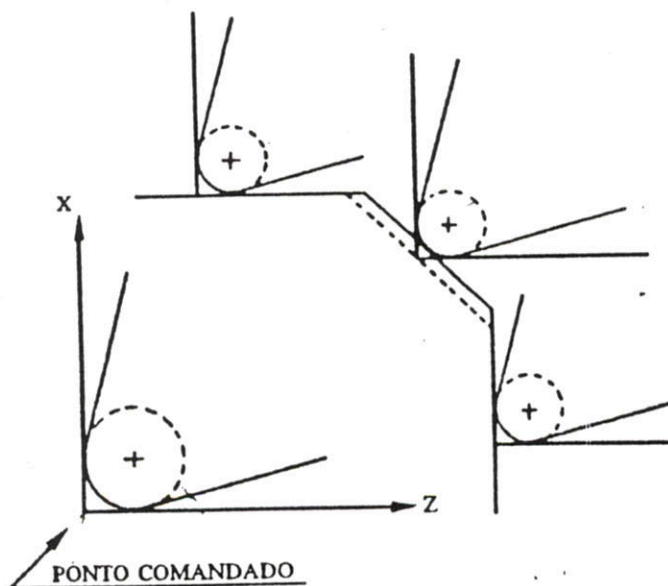


Figura 5.4. - Compensação de Geometria de Ferramentas

Em tornos são utilizados dois tipos de ferramentas: de corte pontual e corte arredondado. Quando se utilizam ferramentas de corte pontual se programa o contorno real da peça e os valores de correção correspondem à ponta da ferramenta. Quando a ponta da ferramenta de corte é arredondada, programa-se a trajetória do centro do raio de corte da ferramenta, sendo necessário a devida compensação.

b. Offset

Em algumas operações de desbaste, torna-se necessário deixar uma quantidade de material, denominado de sobrematerial. Esse sobrematerial é necessário para as operações de acabamento, que de acordo com as especificações de qualidade superficial desejadas exigem diferentes quantidades de sobrematerial, dependendo, inclusive da natureza da operação, como por exemplo um rosqueamento ou um faceamento.

Melhores

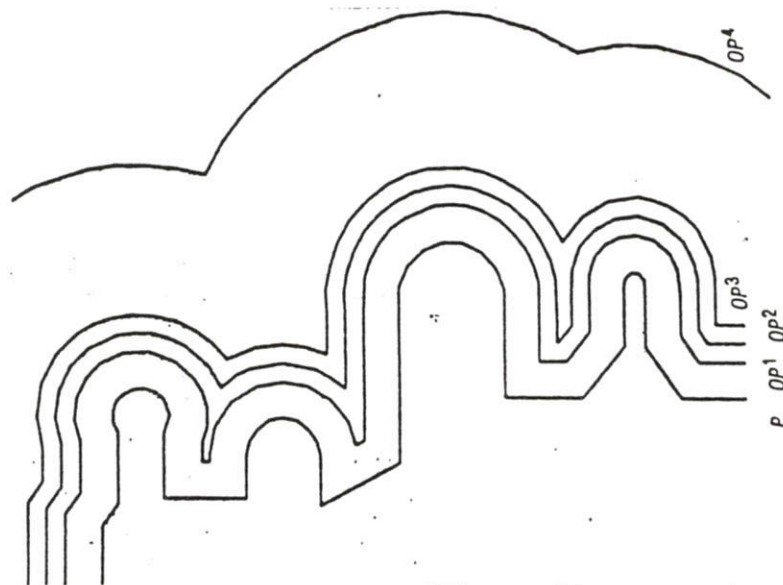


Figura 5.5. - Conjuntos de offset's sucessivos. O perfil original corresponde à P.

De forma a tornar transparente essa característica aos programadores, os comandos existentes na programação do programa NC (código "G"), permite que seja passado o perfil final da peça, com a quantidade de sobrematerial desejado. Cabe, então, ao interpolador do CNC a geração de um offset que corresponda à real trajetória da ferramenta, tendo em conta essa diferença de material.

Porém tal cálculo é extremamente complicado, encontrando-se diversas discussões a respeito, principalmente na área de modelagem e projeto em sistemas CAD [Tiler and Hanson].

5.4 IMPLEMENTAÇÃO E TESTES

A implementação do interpretador de código "G", é feita simultaneamente com o desenvolvimento do interpolador para geração de trajetórias. Na prática, essas funções são feitas por um único subsistema, que a medida em que vai sendo ~~feita a interpretação do~~ ^{interpretado o} programa NC, ~~são~~ ^{realiza} ~~feitos~~ os cálculos, e interpolações necessários ao processo de geração de trajetórias das ferramentas.

A programação do programa ^{wo} interpretador/interpolador consistiu do desenvolvimento de uma série de atividades. Essas atividades compreendem-se de:

- a. **Escolha de uma linguagem para interpretação:** a linguagem de código "G" implementada, consiste da linguagem que um sistema CAD/CAM gera após o pós-processamento. Dessa forma, a integração dos sistemas CAD/CAM é feita através dessa linguagem, no caso a linguagem proprietária da empresa Romi.
- b. **Estudo de uma linguagem de programação:** de forma a construir o sistema, foi necessário o aprendizado de uma linguagem de programação específica, no caso C++.
- c. **Conhecimento básico de Usinagem:** de forma a implementar as movimentações, compensações e correções na geração da trajetória da ferramenta, foram necessários estudos direcionados ao processo de usinagem.
- d. **Sistema de Movimentação:** devido ao fato do sistema de movimentação da mesa do Torno Moore ainda não se encontrar implementada, foram feitos testes em um sistema de movimentação acionado por motores de passo, disponível na empresa. Esse equipamento possibilitou fazer os testes da integração dos sistemas CAD/CAM e CNC. A correta interpretação do código "G" gerado pelo sistema CAM, possibilita essa integração. O

Computador

*
X

estudo dos equipamentos utilizados para a motorização dos eixos apresentados no capítulo 4, também apresentará ligação com esta parte do projeto, uma vez que com o reconhecimento dos comandos, é necessário transformá-los em movimentos, sinais de comando etc. A movimentação é feita através da integração com a placa de controle dos motores de passo.

e. Análise específica e aprofundada de cada um dos comandos: o objetivo principal dessa fase consistia em disponibilizar a correta interpretação dos comandos de código “G”, implementados pelo sistema CAD/CAM. Dessa forma nem todas as funções foram implementadas. Porém para a entrada de programas via sistema CNC, torna-se necessário a implementação de todos os códigos. Os conhecimentos adquiridos no item *b*. encontram a sua justificativa de estudo, nessa etapa do projeto.

Conforme mencionado no capítulo 4, a análise dos erros de posicionamento não foram feitos em função de não se encontrar, ainda, implementada a motorização dos eixos do Torno Moore. *foi realizada*

De forma a viabilizar a integração do sistema CAD/CAM com o futuro sistema CNC do torno, foram feitos os testes de integração, através do reconhecimento e interpretação de arquivos gerados no sistema CAM. A integração foi completada, estando disponível, ainda que em uma versão protótipo sem o efetivo teste em uma máquina-ferramenta, a possibilidade de programação de toda a movimentação da mesa X-Y do Torno Moore, através da programação ou interpretação de programas NC. Os testes comprovaram o sucesso da integração, uma vez que foi utilizado uma mesa de coordenadas X-Y acionadas por motores de micropasso, similar ao previsto para a movimentação da mesa X-Y do Torno Moore.

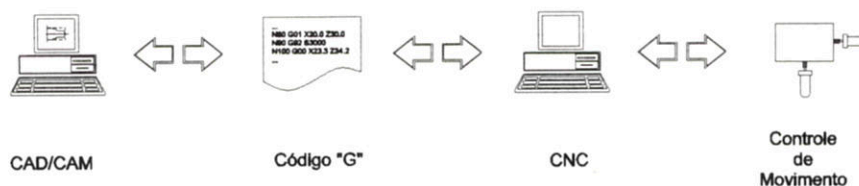


Figura 5.6. - Integração CAD/CAM e CNC

Da forma como foi implementado o programa, o processo de interpretação dos programa NC, de geração das trajetórias e comandos de máquina ~~consistem~~ dos seguintes passo:

- a. Uma vez tendo-se definido os pontos intermediários de todas as trajetórias, com as devidas compensações e correções, cabe ao sistema gerar os sinais para a movimentação dos eixos e acionamento de líquido-refrigerante, rotação do mancal, etc.
- b. Com a definição dos pontos das trajetórias, são calculados os valores incrementais de deslocamento de cada um dos eixos X-Y, de maneira coordenada de forma a manter o sincronismo entre os mesmos. A cada ponto, está associado um valor correspondente de velocidade, também definido para cada eixo, sendo possível garantir as velocidades de avanço programadas. Após a definição desse conjunto de dados, estes são finalmente enviados para a placa responsável pelo controle da movimentação da mesa. Como já descrito no capítulo 4, a placa por sua vez, fica encarregada de fornecer os sinais de pulso e direção para os drivers de acionamento dos motores de passo.
- c. Os comandos lógicos serão enviados para o CLP, através de um protocolo específico, que foi estudado, mas não ~~sendo~~ efetivamente implementado, devido ao fato do sistema CNC se encontrar em fase de construção.

Atualmente, a prioridade maior consiste na análise dos erros envolvidos com as interpolações, tão logo o sistema de movimentação do Torno Moore esteja em condições de operação.

5.5 CONCLUSÕES

O projeto e implementação do sistema CNC vai muito além da programação dos sistemas de interpolação e geração de trajetórias (capítulo 1). O sistema de controle de movimentos, a interface com operador, intertravamento entre o CLP e o CNC, são apenas alguns dos subsistemas a serem implementados. Aspectos da programação automática do Torno Moore, como cálculo automático de

compensação de ferramentas, detecção e correção de erros em programas NC, introdução manual do programa na máquina, definição de subprogramas para utilização em operações repetitivas, encontram ainda em fase de estudo e estruturação.

O projeto de um único subsistema, no caso o interpretador de códigos “G” e do interpolador, exigem um conhecimento abrangente e bastante diversificado, incluindo aspectos referentes a geometria de ferramentas (Usinagem), identificação de trajetórias e perfis (geometria e projeto), programação, acionamentos, etc., sendo indiscutível o aprimoramento profissional da(s) pessoa(s) envolvidas.

Capítulo 6

Sistema de Segurança

6.1 INTRODUÇÃO

Os aspectos referentes à segurança do Torno Moore exigem um cuidado no projeto do sistema, uma vez que as falhas que porventura ocorrer^{em} podem inutilizar o equipamento, bem como acarretar danos as vidas dos operadores da máquina-ferramenta.

Em seguida é apresentada a problemática da segurança do Torno, sendo apresentada a lógica para a garantia do funcionamento do sistema, bem como das formas de comunicação do CLP com o CNC. Também é exposto a implementação da lógica num equipamento específico, discutindo as suas funcionalidades.

6.2 A SEGURANÇA DO SISTEMA

Nesta seção apresentam-se os aspectos referentes à modelagem do sistema de segurança, bem como os aspectos práticos da sua implementação. Inicialmente serão discutidas as necessidades do sistema (equipamentos e funcionalidades), sendo em seguida apresentado os aspectos referentes ao processo de modelagem (representação), sendo finalmente, exposta a tecnologia empregada na resolução do mesmo (solução).

Quebrar

6.2.1 ESPECIFICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE SEGURANÇA

Conforme apresentado no capítulo 3, a necessidade de um sistema dedicado ao controle do mancal é forte justificativa para o emprego de um controlador lógico programável (CLP), pois aquele corresponde a uma parcela relativamente crítica.

Dentre as diversas funções a encargo do CNC, existem aquelas relacionadas com as variáveis discretas do sistema, que executam funções lógicas (capítulo 1). Dentre as diversas possibilidades de implementação dessas funções lógicas pelo CNC, a que vai de encontro com os objetivos deste trabalho, corresponde àquela geração que se utiliza de um componente externo ao CNC para a execução de tal atividade (capítulo 1). A necessidade de uma arquitetura aberta, também constitui de forte argumento para escolha de um CLP.

Desta forma, cabe ao CLP executar os comandos lógicos do sistema CNC, os quais incluem a parte de garantia da segurança do Torno Moore.

Além do constante monitoramento ^{pelo?} do CLP, que também executa funções de comunicação com o controle numérico do Torno Moore, a implementação de uma lógica pneumática adequada que torne o sistema seguro a quedas de energia e falta de pressão nas linhas de alimentação de ar, torna-se de extrema importância.

6.2.2 DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO SISTEMA

O sistema pneumático consiste de um conjunto de atuadores (válvulas pneumáticas pilotadas, cilindros) e sensores (pressostatos). Estes equipamentos já faziam parte da antiga configuração do Torno Moore, que agora serão reconfigurados buscando satisfazer às novas especificações.

Procurando atender a uma metodologia de estudo do sistema, conforme exposto no início do capítulo, apresenta-se inicialmente a descrição das necessidades do sistema pneumático. Este compreende ~~da~~ parte que se encontra diretamente em contato com o torno, recebendo os sinais provenientes do CLP, e fornecendo as informações do estado do sistema.

6.2.2.1 FUNCIONALIDADES

Objetivando o levantamento das funções a serem desempenhadas pelo sistema de segurança, inicia-se uma descrição dos equipamentos desejáveis, de forma a satisfazer as especificações definidas no capítulo 3. Tais especificações correspondem às necessidades gerais do sistema.

a. Consumidores de ar comprimido.

Mancal: alimentação.

Freio a disco: 2 cilindros paralelos de simples ação (retorno por mola).

Tensionadores: 2 cilindros paralelos de dupla ação.

Aspersor de fluido de corte: alimentação.

b. Fornecedores de sinal:

Pressostato: ativa sinal quando a pressão na linha de alimentação de ar fica abaixo de 6 bar.

✕ Atualmente existe um, na entrada do mancal, estando previsto a utilização de mais um pressostato, para a verificação da pressão das válvulas e atuadores pneumáticos.

c. Requisitos

Mancal: 6 bar e alimentação direta.

Freio: condição inicial: cilindros estendidos (pressurizados). Comando tipo normalmente aberto, ou seja, freio pressurizado quando sem comando. Precisa sinal no solenóide da válvula para liberar freio.

Tensionador: condição inicial: cilindros estendidos, o que significa, correia relaxada, não transferindo movimento ao mancal. Pressão: ajustável. Avanço: rápido. Retorno: lento.

Aspersor de fluido de corte: 6 bar, do tipo liga/desliga.

d. Intertravamento

4. Pressão mínima no mancal: 6 bar.

5. O motor de corrente contínua encarregado do acionamento do mancal, não pode ser ligado enquanto o freio estiver fechado e o tensionador fechado, isto significa, que o motor é posto em movimento a vazio.

6. Só fecha tensionador após ligar motor e liberar freio. Esperar até atingir a velocidade nominal do motor para acionar tensionador.

7. Lógica: sistema deve garantir um estado seguro caso não exista sinal de comando (pane no sistema elétrico) e alimentação das válvulas (sem alimentação, devem levar o sistema para uma posição segura).

8. Sequência de partida: acelerar motor (rampa), abrir freio e fechar tensionadores. Verificação da pressão, caso menor que 6 bar: emergência e parada do sistema.

9. Sequência de parada normal: desacelerar motor (frenagem), abrir tensionadores e fechar freio gradativamente.

10. Quando da falta de ar (sub-pressão): fechar freio, desligar motor, abrir tensionadores, comunicar CNC e acender alarme. Parada geral do sistema. Não permitir o prosseguimento do funcionamento.

11. Possibilidade de parada geral do sistema pelo operador: botão de emergência no painel de comando. Mesma sequência de operações ocorridas caso a pressão fique abaixo de 6 bar.

12. Possibilidade de comunicação com o CNC durante o processo de usinagem, nos dois sentidos, isto é, do microcomputador para o CLP, requisitando alguma informação ou tarefa, ou do CLP para o CNC, informando das condições do sistema. Para a usinagem é necessário: ligar líquido refrigerante; acionamento da bomba de vácuo e do picador de cavaco; garantia de início de usinagem somente após a árvore atingir a velocidade nominal.

O intertravamento, em linhas gerais, relaciona um conjunto de atividades e componentes, sob a supervisão de um dispositivo dedicado, neste caso um CLP, de forma a garantir a lógica de segurança do sistema. Algumas justificativas para a escolha deste tipo de equipamento encontram-se discutidas no início deste capítulo. Tais atividades podem ser resumidas em:

- a. Acionamento do motor de corrente contínua;
- b. Acionamento da bomba de vácuo;
- c. Acionamento do picador de cavaco;
- d. Movimentação dos tensionadores;
- e. Acionamento/liberação dos freios;

- f. Lógica das válvulas pilotadas;
- g. Acionamento do líquido refrigerante;
- h. Intertravamento com o CNC.

6.2.2.2 MODELAGEM

Com a definição dos serviços e funcionalidades desejáveis ao sistema, procurou-se descrever os aspectos práticos envolvidos no problema, como os equipamentos disponíveis e a serem adquiridos. Em seguida, com o objetivo da interconexão dos equipamentos e do desenvolvimento de uma lógica consistente, definiu-se uma maneira de descrever ou representar todo o conjunto de informações e decisões necessárias ao sistema de monitoração da segurança do Torno Moore.

Neste sentido, fica evidente a necessidade de uma formalização da representação, possibilitando a análise de consistência lógica do modelo e de conformidade com as especificações. De acordo com [Lewis], a escolha de uma metodologia deve estar intimamente relacionada com os aspectos práticos do sistema.

Dentre as várias abordagens analisadas [Natale] e [Bollman] (Fluxograma de Processo ou Diagrama de Funções, Grafset e Fluxograma Lógico), o Fluxograma Lógico ^{parece} apresenta ser a ^{forma} mais adequada à representação das funções a serem executadas, uma vez ~~em~~ que o conjunto de atividades a serem desempenhadas não consistiam de tarefas complexas que exigissem um elevado número de variáveis. Além disso, com o conhecimento das especificações e do comportamento desejado para o sistema, a simplicidade na especificação do programa do CLP e da lógica pneumática também consistiram de fatores preponderantes na escolha do método de representação do sistema.

Os fluxogramas correspondente ao funcionamento do sistema encontram-se em anexo.

6.3 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

Com a descrição do funcionamento do sistema, prossegue-se com os aspectos práticos de implementação. A aquisição do CLP, a interconexão das válvulas e dos atuadores e sensores são os próximos passos a serem executados nesta fase do projeto.

6.3.1 LÓGICA PNEUMÁTICA

O projeto da lógica implementada pelo sistema pneumático deve garantir um estado seguro para o sistema, em caso de falhas. Este é o principal requisito para o seu funcionamento. Além desta função, a parte pneumática também participa do processo de usinagem propriamente dito, através do acionamento do líquido refrigerante ou de corte.

não era melhor dizer com arduos
X Para a implementação da lógica de segurança, utilizou-se de um conjunto de válvulas pneumáticas direcionais, que já faziam parte da estrutura da máquina, mas que tiveram suas funções redefinidas. Compreende de válvulas de quatro vias, pilotada por um solenóide, com retorno por mola. Com estas válvulas é possível implementar e garantir o requisito mais importantes à segurança do Torno Moore: um estado seguro caso ocorram falhas na alimentação de ar ou de energia elétrica.

Para a garantia da qualidade do ar de alimentação do mancal, foram instalados filtros. O ar que alimenta as válvulas necessita de lubrificação, devido às próprias características das válvulas, sendo, portanto, instalado um lubrificador.

qual deles? e necessário orientar para precisões
Em anexo, encontra-se o diagrama correspondente à implementação da lógica pneumática.

Os tensionadores, conjunto formado por dois cilindros de duplo efeito, são acionados por uma válvula direcional. Este tem por função fornecer tensão a correia, que transmite o movimento do motor para o mancal aerostático, de forma a que a tensão aplicada sobre a correia seja feita gradualmente, torna-se necessário um controle da velocidade dos cilindros. Na sua posição recolhido, os cilindros fornecem a tensão à correia, e quando totalmente acionados, ou abertos, os cilindros não encontram-se em contato com a correia. *Ainda,*

Para garantir um avanço suave dos tensionadores conectou-se à linha de pressão, uma válvula reguladora de vazão, de forma a limitar a velocidade de avanço dos cilindros. Para o retorno à posição aberta, foi empregado uma válvula limitadora de pressão, uma vez que uma pressão de 6 bar na linha de alimentação constitui de um valor elevado, podendo provocar danos devido a força demasiada elevada com que o cilindro é acionado. Também foram empregadas válvulas de retenção de forma a forçar o fluxo de ar somente por um dos dois caminhos possíveis.

O freio funciona de dois modos diferentes: em caso de emergência, onde é exigido uma ação extremamente rápida para impossibilitar a rotação do mancal, e outro, em modo de operação normal. Devido aos danos que podem ser gerados devido às paradas bruscas na rotação do mancal, em condições normais de usinagem, a parada do mancal será de forma gradativa, não sendo necessário uma pressão elevada para o acionamento dos cilindros do freio. Porém em situações de emergência, toda a pressão disponível deve ser empregada para a frenagem do mancal.

6.3.2 O CLP

A monitoração e o controle do Torno Moore, isto é, a verificação do estado e a geração dos sinais de comando para as válvulas pneumáticas são feitos pelo CLP. Neste projeto foi implementado somente o controle da segurança do mancal, entretanto estando previstas no projeto, as conexões referentes ao acionamento do líquido refrigerante, da bomba de vácuo, do picador de cavaco e da possibilidade de comunicação entre o CLP e o CNC através de um barramento, implementado a partir das entradas/saídas do CLP. Estas funções adicionais, ainda não implementadas, são previstas de forma a que o equipamento adquirido, CLP, suporte expansões e inclusões de novas funções no futuro. As principais alterações se encontram na parte referente a comunicação como sistema CNC, buscando atender as necessidades de acionamento de dispositivos para o acompanhamento do processo de usinagem.

Fatores práticos (necessidades) relevantes no processo de escolha do equipamento:

a. **Número de entradas:** inicialmente são necessárias quatro entradas de comando (início de operação, fim de operação, botão de emergência, sinal do pressostato) e seis entradas para a possível comunicação entre CLP e CNC via barramento.

b. **Número de saídas:** quatro válvulas pneumáticas (líquido refrigerante, freio normal, freio de emergência, tensionadores), indicadores luminosos (situação de emergência, máquina ligada, máquina desligada), picador de cavaco, bomba de vácuo, sinal de comando para acionamento do motor de corrente contínua e possibilidade de comunicação com um PC via barramento (seis saídas).

c. **Tipo de entradas e saídas:** digitais ou analógicas.

d. **Facilidade de programação e comunicação:** facilidades oferecidas pelo equipamento, como possibilidade de monitoração em tempo real do sistema, aspectos referentes ao tipo de comunicação entre CLP e computador (interface serial via RS232 ou RS422), linguagem e suporte à programação, dentre outras.

X e. **Arquitetura:** disponibilidade de registros internos, área de memória, suporte à interrupções, etc.

f. **Fatores econômicos:** preponderante na escolha do equipamento, a relação custo/benefício é de suma importância.

Em sua grande maioria, os CLP's executam o programa de forma cíclica, levando um determinado tempo, chamado de ciclo de varredura. Devido a extrema rapidez que é exigida ao CLP quando da ocorrência de uma pane no mancal, o tempo de ciclo de varredura não é suficientemente rápido para acionar as saídas correspondentes. Assim, faz-se necessário a utilização de mecanismos de interrupção de forma a desviar o programa para uma parte específica, possibilitando o tratamento do problema ocorrido dentro de um tempo adequado. Alguns CLP's fornecem a possibilidade de tratamento de interrupção, com tempos de respostas rápidos em relação às entradas normais do equipamento. No caso do Torno Moore tal procedimento é adotado na parada da rotação do mancal em situações de emergência.

O Torno Moore possuía um CLP que controlava o intertravamento das suas funcionalidades, porém não sendo mais possível a utilização de tal equipamento pois os componentes que armazenavam o programa encontram-se danificados, requerendo a substituição do mesmo.

6.3.3 INTERCONEXÃO ENTRE O CLP E A PNEUMÁTICA DO SISTEMA

As funções do CLP são de controle da partida do equipamento para a usinagem de peças, e a parada do mesmo, seja em condições normais ou em situações de emergência.

A ^{ONDE!} funcionamento básico do CLP consiste em caso seja acionado o comando de início de operação, por em rotação o mancal, verificando os valores de pressão, e controlando as sequências de acionamento, conforme os fluxogramas em anexo. Em situações de emergência o CLP deve garantir que o mancal pare imediatamente de girar, informando ao CNC do problema encontrado, tendo este por sua vez, a função de interromper o processo de usinagem.

O acionamento do motor de corrente contínua é feito por um conversor monofásico, que recebe um sinal proveniente do CLP ~~para o acionamento do motor de corrente contínua.~~

\hookrightarrow ϕ /início/fim de operações?
As válvulas pneumáticas pilotadas recebem os sinais provenientes do CLP, ativando ou não os respectivos atuadores conforme a lógica do programa. Tais válvulas são alimentadas por uma fonte de tensão de 24V, consumindo cada uma .28 A. Devido a este consumo não é possível utilizar a fonte de 24VDC existente no CLP.

X A interface entre o sistema era feita através de um painel de comando. Este painel era composto por um conjunto de botoeiras e indicadores, além de conter em seu interior a eletrônica responsável pela alimentação das válvulas e do antigo CLP. No novo projeto, este painel passará a conter o atual CLP, os drivers para o acionamento dos motores de passo, as fontes para alimentação dos drivers e das válvulas.

A reutilização do painel de controle (botoeiras, indicadores e chaves) está prevista neste projeto, porém não se encontrando implementado. Na interface manual com o sistema serão utilizadas chaves para a partida do acionamento do mancal, para a parada normal do mesmo, e para

as condições de emergência (botão ou pressostato). O estado do sistema (funcionando, parado ou emergência) são dados por indicadores também situados no painel de comando (ou de controle).

O CLP adquirido corresponde ao modelo C40 da Aromat. Este apresenta, dentre outras, as seguintes características técnicas:

- a. Possibilidade de programação de desvios de programa, controle de interrupções e loops.
- b. Comunicação via interface serial do tipo RS232 e RS422.
- c. 24 entradas digitais (24VDC), do tipo relê.
- d. 16 saídas digitais (24VDC), do tipo relê.
- e. Uma fonte interna de 24V
- f. Módulos de expansão: conversão A/D e D/A, adaptadores para interface de comunicação, dentre outros.
- g. Comunicação em rede (vários CLP's conectados ao mesmo barramento de comunicação).
- h. Limite de 2720 passos no programa.
- i. Linguagem composta por 43 instruções básicas (lógicas) e mais 108 para comunicação, manipulação de dados internos, desvios de programas, etc.
- j. Tempos de resposta da ordem de 200 μ s (entrada de interrupção) e 2 ms (entradas normais).

Com relação ao item k, pode-se verificar a possibilidade de utilização de rotinas de interrupção, neste modelo é possível programar até sete entradas, com tempo de resposta relativamente pequenos, sendo um fator de grande relevância para a segurança do mancal.

Observa-se, ainda, que as características acima mencionadas possibilitam o acionamento manual, ou seja, através do painel de controle. Com a utilização do sistema CNC (ainda não implementado), também estão previstas o acionamento através do próprio terminal de computador, exigindo uma maior complexidade na programação do CLP.

Neste projeto foram implementadas as conexões entre o CLP e as válvulas pneumáticas, e as botoeiras, além das ligações entre os componentes pneumáticos. A interface referente com o sistema CAD/CAM/CNC não foi feita, devido ao fato do mesmo estar ainda sendo construído.

6.3.4 PROGRAMAÇÃO DO CLP

Após o estudo do sistema, definindo as necessidades de equipamentos, a modelagem do mesmo, a lógica pneumática, coube ao CLP a monitoração do sistema. Para isto se faz necessário a implementação de um programa que corresponda aos requisitos de funcionamento. Neste caso, a linguagem utilizada pelo CLP corresponde ao diagrama de Ladder ou de escada.

A tradução do fluxograma para a linguagem proprietária do CLP, no atual estágio de desenvolvimento, não consiste de tarefa exaustiva, uma vez que o conjunto de funções e variáveis envolvidas é relativamente baixo. Objetivando a implementação do sistema de segurança, mesmo com o sistema CNC ainda em fase de construção, optou-se pela programação de um conjunto de operações que garantissem o mínimo funcionamento. Isto é, elaborar um programa que garantisse a segurança do mancal aerostático, monitorando a pressão do sistema e com a correta ação sobre as válvulas pneumáticas, mas simulando ainda a comunicação com o microcomputador.

A simplicidade na programação é proporcionada pela linguagem compacta (dentro do ponto de vista de programação de CLP's), oferecendo muitas possibilidades, como rotinas, interrupções, módulos opcionais, o que contribuem para a implementação do sistema. Através de um microcomputador é possível modificar e corrigir o programa do CLP, acompanhar o seu funcionamento verificando entradas, saídas e registros internos. Assim é possível através do mesmo microcomputador onde é executado o programa do sistema CNC e a programação/monitoração do CLP.

realizar

Com a compactação da eletrônica do sistema, devido a utilização de componentes mais modernos, e a simplicidade de programação e entendimento do CLP, confere-se ao sistema uma certa versatilidade e facilidade de reprogramação. Tal aspecto propicia o desenvolvimento de novas funcionalidades, não somente aquelas previstas e desenvolvidas pela equipe de projeto, mas também aos possíveis usuários do equipamento.

Quibaa

6.3.5 INTERTRAVAMENTO/COMUNICAÇÃO ENTRE CLP E CNC

Para a implementação da comunicação entre o CLP e o CNC três são as possíveis soluções:

- a. Interface serial
- b. Interface paralela
- c. Barramento

X A construção de um barramento dedicado, através das saídas e entradas digitais do CLP é procedimento comum, sendo adotada em algumas máquinas CNC. A possibilidade de comunicação via barramento foi cogitada nas fases iniciais, sendo previsto inclusive um determinado número de entradas e saídas para a implementação deste tipo de comunicação. Porém ^{a ideia} esse tipo de comunicação foi descartada em função da possibilidade de utilização de uma interface serial.

X A programação, bem como o acompanhamento on-line do CLP, são feitas através de uma interface serial presente no controlador lógico programável. Além disto a linguagem proprietária do CLP dispõem de um conjunto de primitivas para a utilização deste tipo de interface, que pode ser feita através de um cabo RS-232 ou RS-422. Essas são as principais justificativas para a opção de implementação da comunicação entre CLP e CNC através da interface serial.

No anexo encontram-se os diagramas correspondentes às conexões entre o CLP e o resto do sistema.

ONDE

6.4 CONCLUSÕES

O estudo detalhado do comportamento do sistema, bem como a atenção dada na parte de implementação correspondem, talvez, ao aspecto mais importante de todo o processo de *retrofitting* do Torno Moore. Vidas podem ser colocadas em risco devido aos riscos envolvidos na utilização do mancal aerostático. Por isso, todos detalhes relevantes no projeto do sistema de acionamento e controle do mesmo devem ser garantidos.

as perigo

Capítulo 7

Conclusões e Perspectivas

A construção de um sistema CNC para controle, gerenciamento e monitoração da máquina-ferramenta, com possibilidade de integração com um sistema CAD/CAM, consiste do projeto global dentro do qual esse trabalho se encontra inserido.

Dessa forma, este trabalho apresentou uma das etapas do processo de *retrofitting* de uma máquina-ferramenta, o Torno Moore que se encontra nas dependências do Laboratório de Mecânica de Precisão, do Depto de Eng^a. Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Foram discutidos, analisados e implementados os aspectos referentes ao intertravamento entre um dispositivo dedicado á segurança do sistema, no caso um controlador lógico programável para controle do mancal aerostático, que se constitui da parcela mais crítica do sistema. É de extrema importância a atenção dedicada ao projeto desse sistema de segurança, uma vez que vidas humanas podem ser colocada em risco, além da perda total do equipamento decorrente de uma eventual falha no funcionamento da máquina.

A implementação de um sistema para interpretação de programas NC, e de geração de trajetórias também consistiu de um dos objetivo do projeto. A possibilidade de integração com sistemas CAD/CAM, através da interpretação de uma linguagem pós-processada, constitui-se de um elo de ligação entre o sistema CNC em desenvolvimento e os sistemas CAD/CAM. A interface entre um sistema CAD/CAM e o protótipo do sistema CNC foram feitas, ainda que em fase experimental, mas já possibilitando tal integração.

A geração de trajetórias, notadamente a interface entre o interpretador e a tecnologia utilizada para a realização dos movimentos foram estudas e implementadas parcialmente. Tal estudo consiste de uma preparação para a futura motorização dos eixos, sendo importante para o processo de modernização do Torno Moore.

Devido às características do atual projeto, notadamente do mancal aerostático e da posterior utilização em usinagem de ultraprecisão, tornam o processo de *retrofitting* do Torno Moore bem peculiar. A abrangência das áreas do conhecimento técnico e científico envolvidas é relativamente grande, englobando diversos ramos da engenharia, entre eles:

- usinagem de ultraprecisão
- *retrofitting* de máquinas-ferramentas
- tecnologia CNC
- princípios de usinagem
- controle de movimento
- controladores lógicos programáveis
- pneumática
- servoacionamentos

Essa abrangência na área de conhecimentos necessários ao processo de *retrofitting* constitui de valiosa oportunidade de aprendizado, seja no campo acadêmico ou no ramo profissional, servindo como elemento motivador e impulsionador do trabalho.

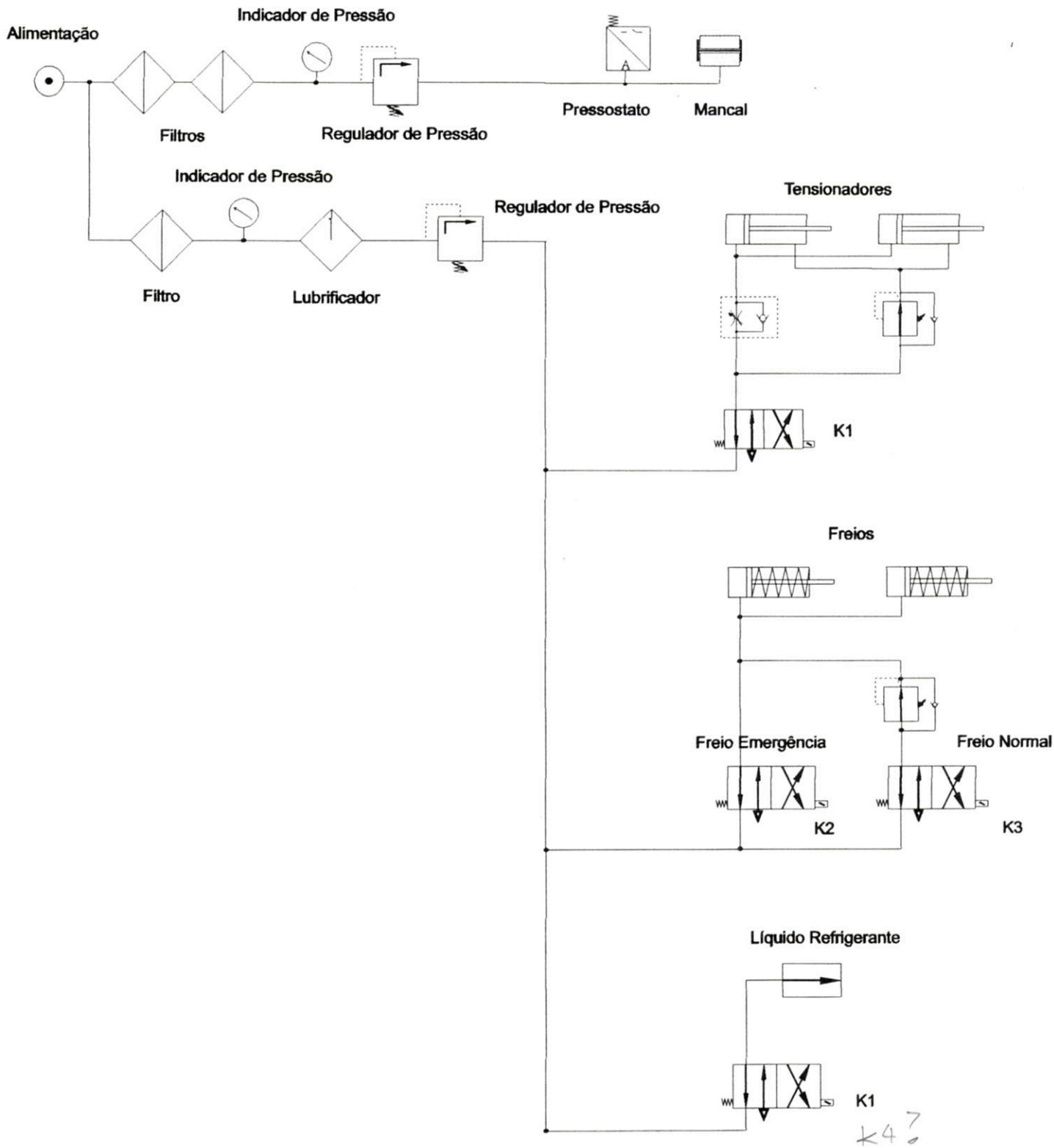
A oportunidade de trabalhar em um ambiente onde tecnologias novas e mais avançadas estão sendo constantemente discutidas e estudadas, contribui para o aprimoramento profissional. Além disto, o contato mais direto com uma equipe de profissionais altamente qualificados, com experiência na área de automação, auxiliam no processo de integração com o mercado profissional, aprimorando e lapidando os conhecimentos adquiridos durante o período acadêmico.

Muitas são as atividades a serem desenvolvidas, uma vez que o projeto ainda não se encontra concluído. Além do processo de conclusão do *retrofitting* do Torno Moore, também ^{se} incluem as pesquisas acadêmicas a serem feitas, mais precisamente, dentro da área de Usinagem de Ultraprecisão.

Como perspectivas futuras para a integração do sistema CNC, salienta-se que tal sistema requer ainda a implementação de uma série de atividades, entre elas citam-se as mais prioritárias no atual estágio de desenvolvimento do projeto:

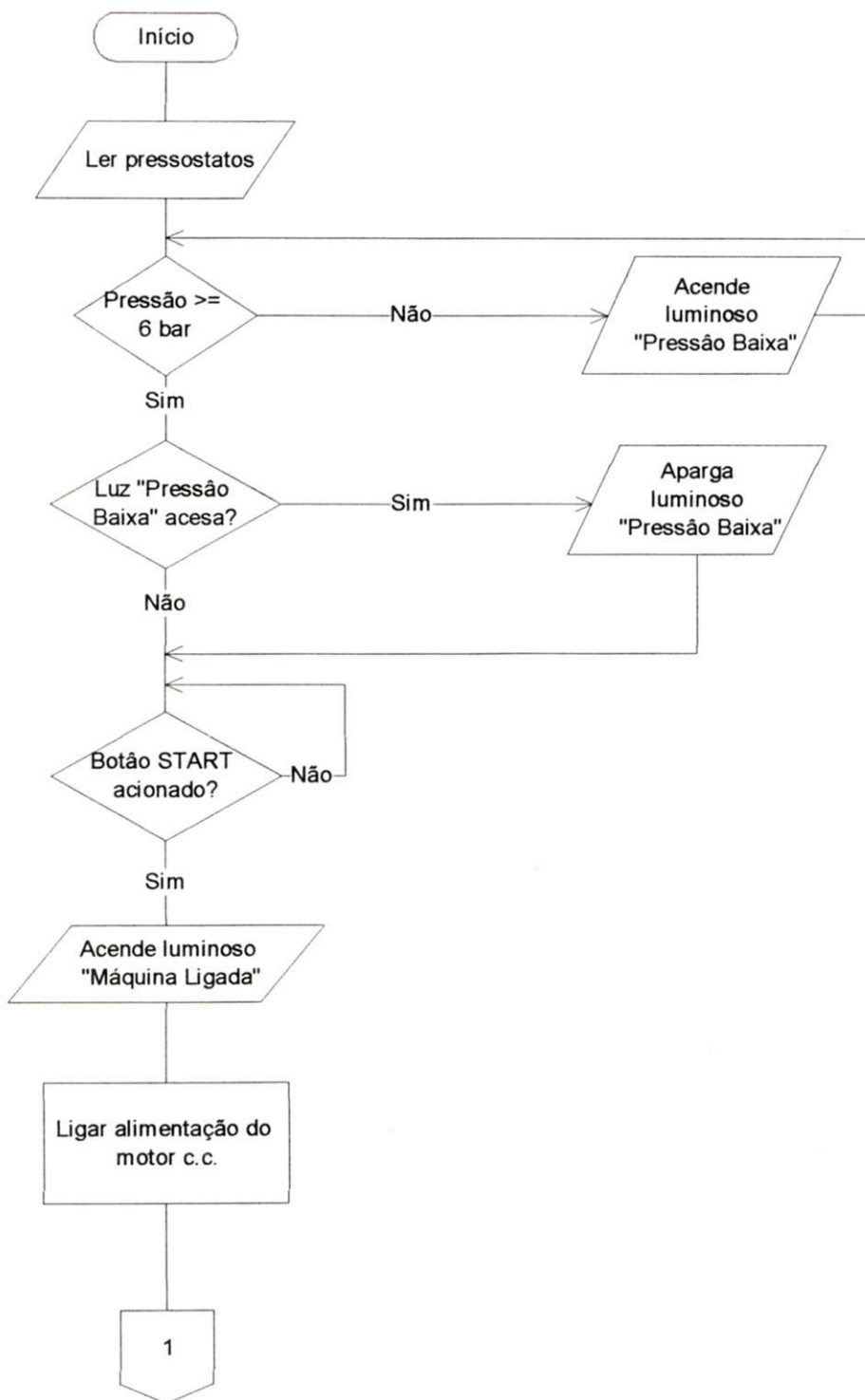
- acionamento do eixo árvore
- motorização dos eixos da máquina
- estudo da performance da utilização de motores de micropasso em usinagem
- análise da influência das interpolações utilizadas para geração de trajetória
- implementação da motorização dos eixos com servomotores de corrente contínua, exigindo a análise do desempenho de algoritmos de controle em malha-fechada
- análise das condições mecânicas das guias, mancais, rolamentos, procurando ^{determinar} ~~analisar~~ possíveis influências sobre a usinagem de peças
- implementação de um sistema CNC completo, encarregado do controle da máquina CNC
- testes de integração do sistema CAD/CAM com o sistema CNC

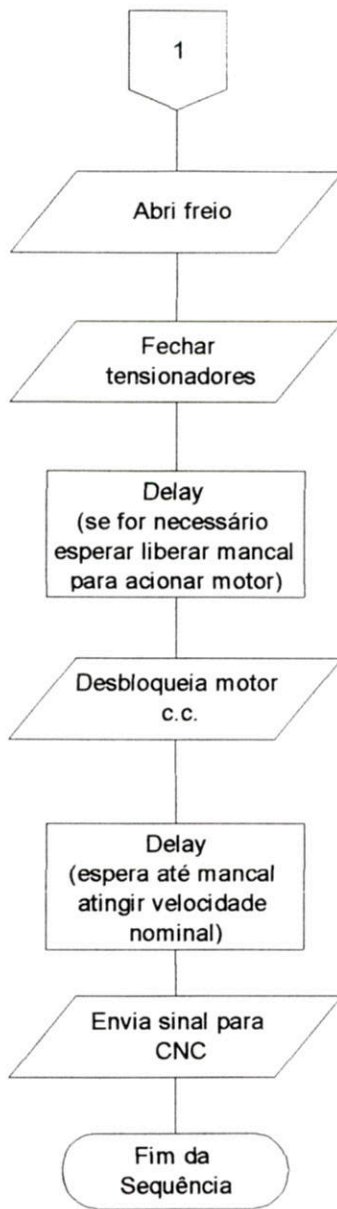
ANEXO 1
Lógica Pneumática para a Segurança
do Mancal Aerostático



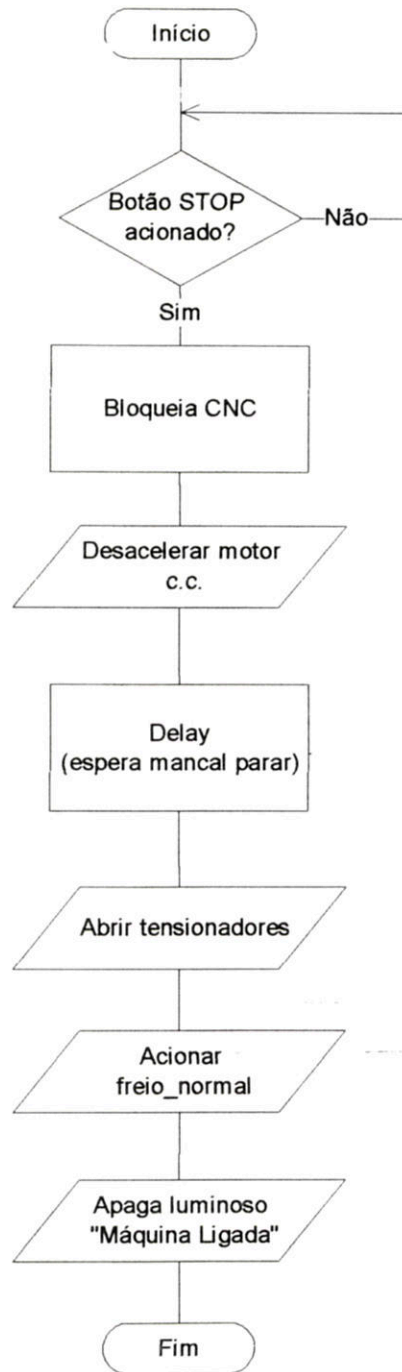
ANEXO 2
Fluxograma Lógico para
Intertravamento do Sistema de Segurança

Fluxograma de funcionamento do CLP Seqüência de partida (START)

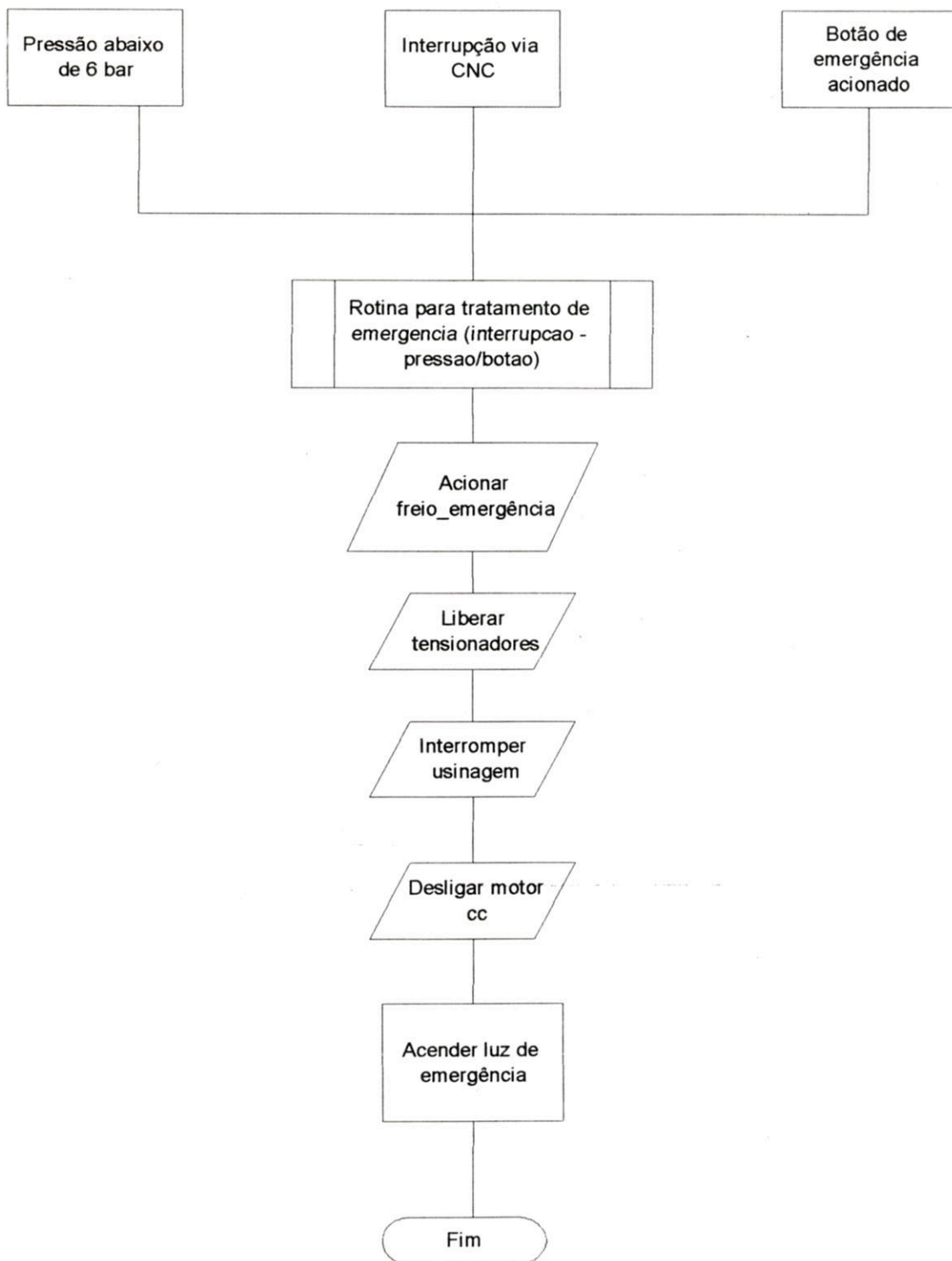




Fluxograma de funcionamento do CLP Sequência de parada(STOP)



Fluxograma de funcionamento do CLP Condição de emergência (interrupções)



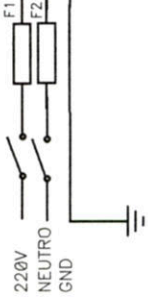
ANEXO 3

Diagrama com motores de passo, drivers de micropasso, fonte de alimentação e CLP.

***Eletrônica para Acionamento do Eixo Árvore,
Bomba de Vácuo e Picador de Cavao.***

Diagramas contendo as entradas e saídas do CLP.

Alimentacao

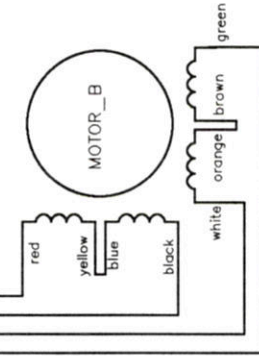
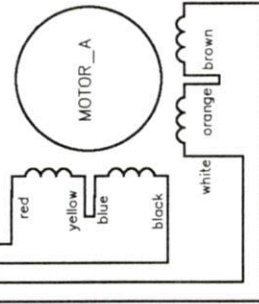
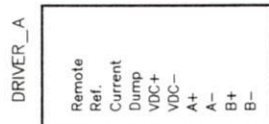
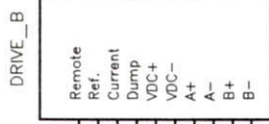


F3

CLP
100-240VAC
F.G.

FONTE 24V

BARRAMENTO 24V



Title

Size
A4

Number

Rev

Date

Drawn by

Filename

Sheet

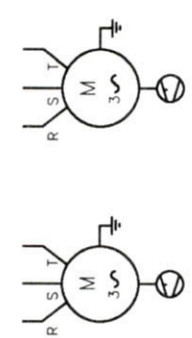
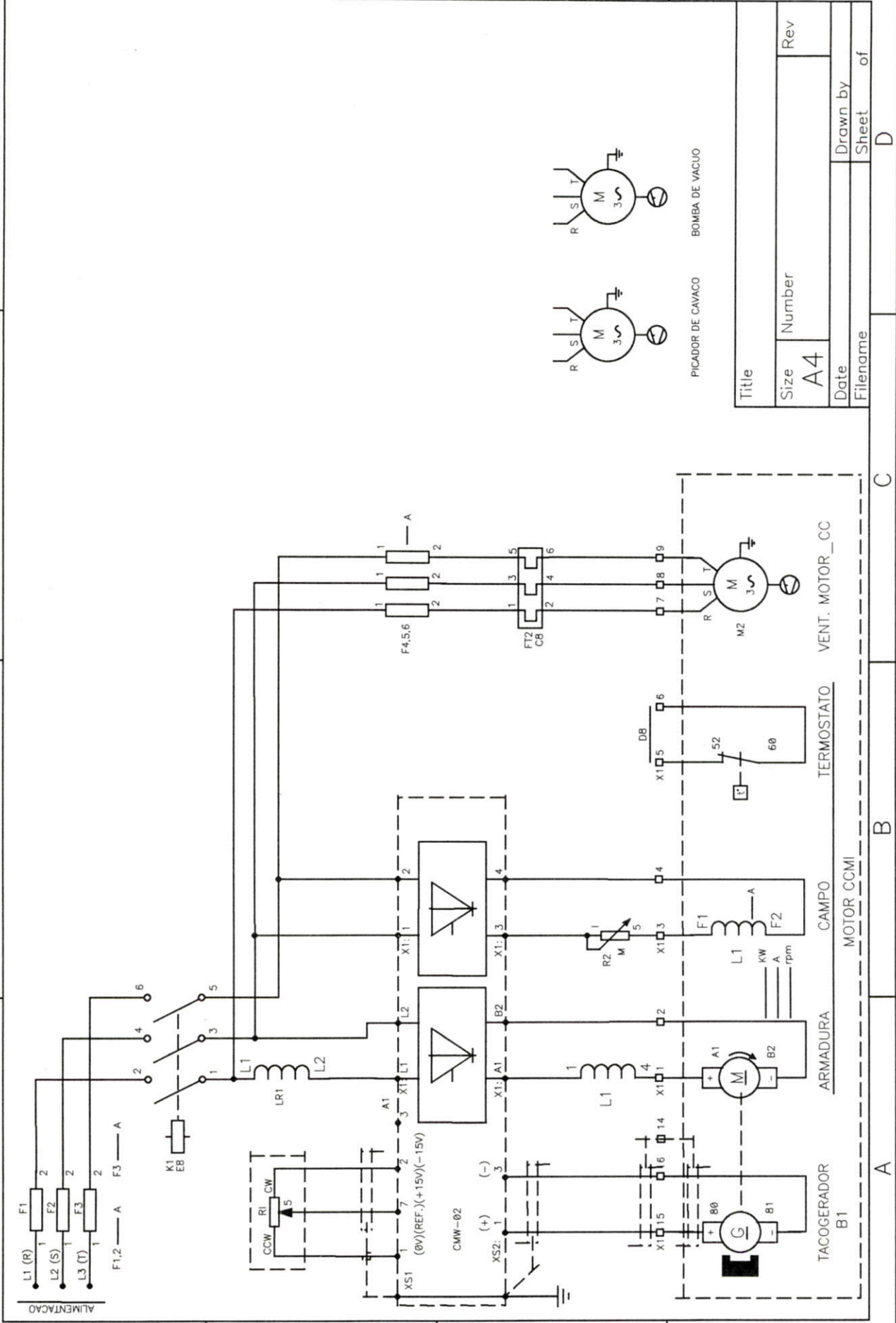
of

D

C

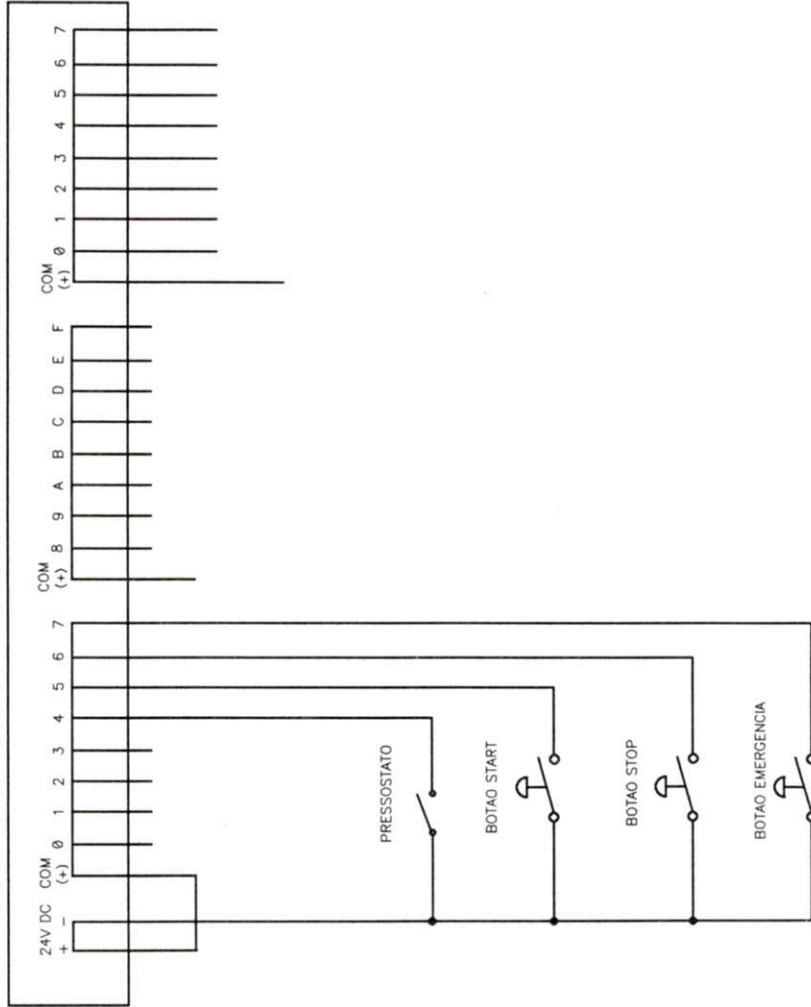
B

A



Title	
Size	Number
Date	Rev
Filename	Drawn by
	Sheet
	of

CLP_INPUTS



Title	
Size	Number
A4	
Date	Rev
Filename	Drawn by
	Sheet of
	D

1

2

3

4

1

2

3

4

A

B

C

D

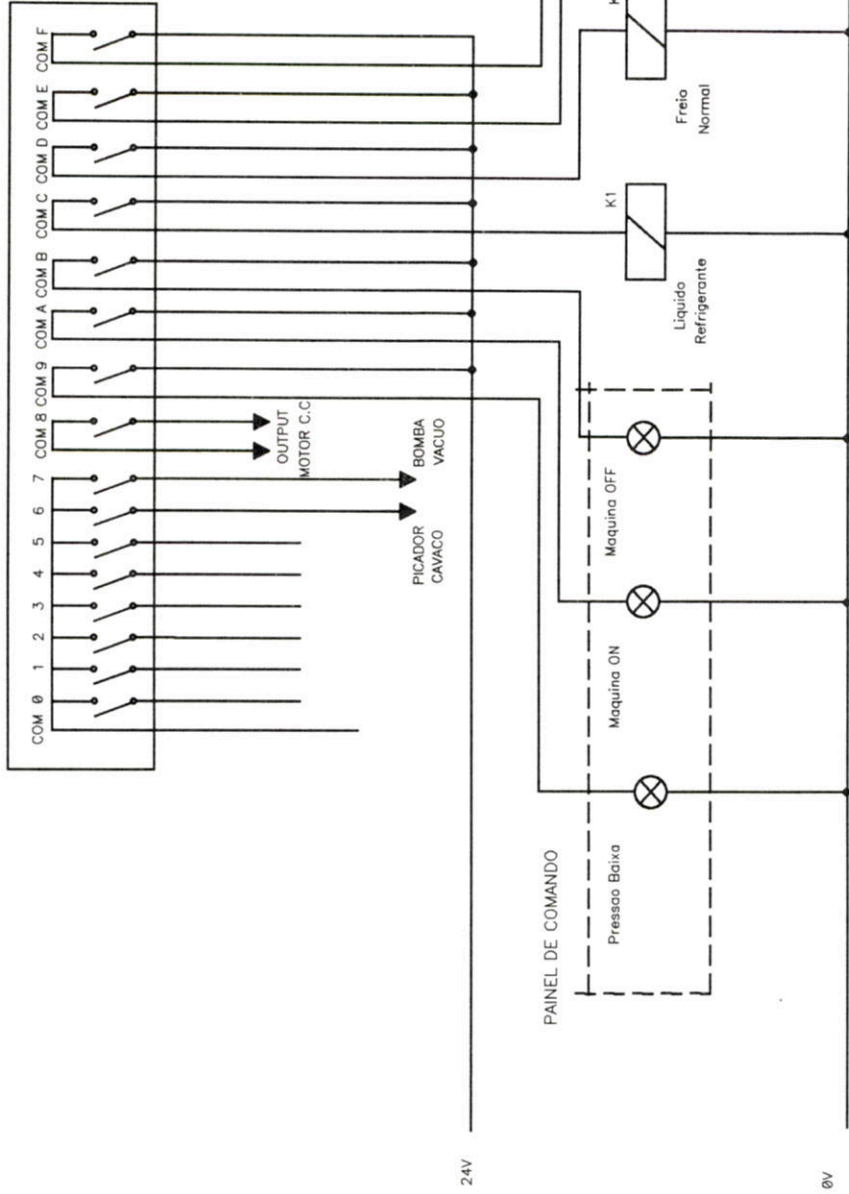
A

B

C

D

CLP_OUTPUTS

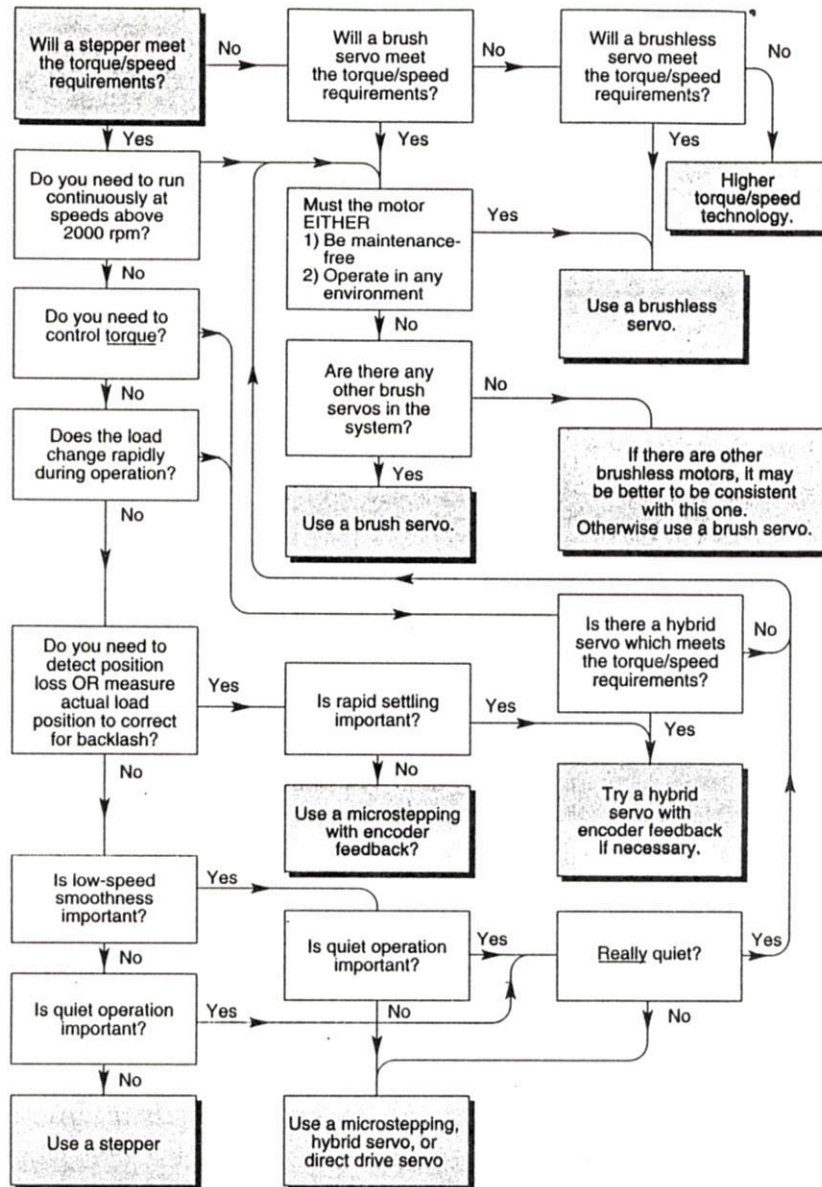


Title	
Size	Number
A4	
Date	Drawn by
Filename	Sheet of
	D

ANEXO 4

Passos para a escolha de Servoacionamentos [Compumotor]

Start Here



Bibliografia

[Alique] José Ramón Alique López, "*Control Numérico*", 1981.

[Bollman] Arno Bollman, "*Apostila de Automação Industrial Pneumática*", Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos - LASHIP, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, 1994.

[Campos] Áureo Campos Ferreira, "*Apostila de Comando Numérico*", Grupo de Pesquisa e Treinamento em Comando Numérico e Automatização Industrial - GRUCON, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC.

[Conai] 2º Congresso Nacional de Automação Industrial, "*Tecnologias de Automação Industrial*", 1985.

[Compumotor] Parker Motion Control, "*Step Motor & Servo Motor Systems and Controls*", 1996 - 1997 Catalog.

[Centinkunt et al] S Cetinkunt, W. L. Yu, J. Filliben, and A. Donmez, "*Friction characterization experiments on a single point diamond turning machine tool*", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 34, No 1, pp. 19-32, 1994.

[ISA] ISA Engenharia Ltda., "*Manutenção CNC - Nível Básico*", Dezembro, 1996.

[Koren] Yoram Koren; "*Computer Control of Manufacturing Systems*", 1986.

[Lewis] R. W. Lewis, "*Programing Industrial Control Systems using IEC 1131-3*", Institution of Electrical Engineers - IEE Control Engineering Series 50, 1995.

[Natale] Ferdinando Natale, "*Automação Industrial*", Série Brasileira de Tecnologia, Siemens, 1989.

[Stemmer] Marcelo Ricardo Stemmer, "*Apostila de Informática Industrial*", LCMI, UFSC.

[Weingaertner] Walter Lindolfo Weingaertner, "*Desenvolvimentos na Usinagem de Ultraprecisão*", outubro, 1992.

[Tiller and Hanson] W. Tiller and E. G. Hanson, "*Offsets of Two-Dimensional Profiles*", IEEE, pp. 36-46, 1984.