

ERIKA GOELLNER

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
ACIONAMENTO DE MOTORES DE PASSO
APLICADOS AO PROJETO DE EQUIPAMENTOS CNC**

DISSERTAÇÃO

UFSM
SANTA MARIA, RS, BRASIL
2006

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
ACIONAMENTO DE MOTORES DE PASSO
APLICADOS AO PROJETO DE EQUIPAMENTOS CNC**

por

ERIKA GOELLNER

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Centro de Tecnologia, da Universidade Federal de Santa Maria (RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **MESTRE em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Santa Maria, RS – Brasil

2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

A COMISSÃO ORGANIZADORA, ABAIXO ASSINADA,
APROVA A DISSERTAÇÃO

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
ACIONAMENTO DE MOTORES DE PASSO
APLICADOS AO PROJETO DE EQUIPAMENTOS CNC**

ELABORADA POR
ERIKA GOELLNER

COMO REQUISITO PARCIAL PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Dias da Silva – Presidente e Orientador – UFSM

Prof. Dr. Leandro Costa de Oliveira – UFSM

Prof. Dr. Luiz Airton Consalter – UPF

Santa Maria, RS, 20 de abril de 2006

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Alexandre Dias da Silva, pelo apoio, confiança e dedicação na condução do desenvolvimento e realização deste trabalho.

Ao meu namorado Paulo Roberto da Costa, pela confiança, apoio e incentivo para o meu ingresso e término deste mestrado.

A minha amiga Juçara, pela amizade, apoio e colaboração.

Ao meu novo amigo Ártton, pela ajuda no desenvolvimento deste projeto.

A minha família, pelo apoio, compreensão, alegria e estímulo constante.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal de Santa Maria

FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ACIONAMENTO DE MOTORES DE PASSO APLICADOS AO PROJETO DE EQUIPAMENTOS CNC

Autora: Erika Goellner
Orientador: Alexandre Dias da Silva
Santa Maria, 20 de abril de 2006

A alta competitividade entre as empresas, a complexidade de projetos, a modernização de maquinário, a flexibilidade da produção e a redução de custos, levam as pequenas e médias empresas a buscar novos equipamentos e diversificação de produtos para se manterem no mercado globalizado. Uma forma de buscar a melhoria da produção mecânica nesses aspectos é através da utilização de equipamentos de Comando Numérico Computadorizado (CNC). Esse trabalho tem o objetivo da criação de uma ferramenta computacional (programa) que opere como uma unidade de Comando Numérico Computadorizado. O sistema tem como função controlar a comunicação com os dispositivos da máquina, bem como possibilitar a criação ou utilização de um arquivo de texto com a programação CNC, interpretar, analisar, simular e executar as informações de uma seqüência pré-programada de operações (programação CNC). A implementação de funções de controle, de recursos de operação do equipamento, de simulação do programa CNC em tela gráfica e de técnicas de interpolação linear e circular, mostrou a viabilidade de aplicação de microcomputadores pessoais (PCs) como unidade de comando no desenvolvimento de máquinas CNC com acionamento por motores de passo.

Palavras-chave: Comando numérico computadorizado, motores de passo, microcomputador.

ABSTRACT

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal de Santa Maria

FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ACIONAMENTO DE MOTORES DE PASSO APLICADOS AO PROJETO DE EQUIPAMENTOS CNC

**(COMPUTERIZED TOOL FOR STEPPING MOTOR STARTING
APPLIED TO THE CNC EQUIPMENTS PROJECT)**

Author: Erika Goellner
Advisor: Alexandre Dias da Silva
Santa Maria, abril 20th, 2006

The high competitiveness between companies, the projects complexity, the machinery modernization, the production flexibility and the costs reduction, lead small and medium companies to aim new diversification of equipments and products to maintain themselves in a worldwide market. One way of seeking a better mechanic production concerning these aspects is using the equipments of the Computerized Numeric Command (CNC). This paper has the objective of creating a computerized tool (a software) that works as a Computerized Numeric Command unit. The system has the function of controlling the communication with the machine devices, and it also works to make possible the creation or usage of a text file with a CNC programming, to interpret, analyze, simulate and execute the information of a pre-programmed sequence of operations (CNC programming). The implementation of the control functions, of the equipment operation resources, of the software CNC simulation on a graphic screen and of the techniques of linear and circle interpolation showed the viability of the personal computers (PCs) application as a command unit developing the CNC machines with stepping motor starting.

Keywords: Computerized numeric command, stepping motors, personal computer.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – O edifício <i>The Bubble</i>	31
FIGURA 2 – O edifício <i>Fluid Vehicle</i>	31
FIGURA 3 – Eixos de Movimentação de Máquinas CNC.....	32
FIGURA 4 – Exemplo de Movimentação Rápida (G00) em Máquina Três Eixos.....	34
FIGURA 5 – Exemplo de Movimentação Linear (G01) em Máquina Três Eixos	35
FIGURA 6 – Exemplo de Movimentação Circular (G02 e G03).....	36
FIGURA 7 – Universo dos Motores Elétricos	43
FIGURA 8 – Motor de Passo.....	51
FIGURA 9 – Rotor com engrenagens e ímãs acoplados e Estator (com bobinas)....	52
FIGURA 10 – Movimentação do Motor de Passo.....	54
FIGURA 11 – Exemplo de Geometria	74
FIGURA 12 – Interpolação Linear Obtida.....	78
FIGURA 13 – Exemplo de Geometria	79
FIGURA 14 – Interpolação Circular Obtida	82
FIGURA 15 – Pinagem do Conector DB25	83
FIGURA 16 – Tempo Mínimo e Tempo entre Pulsos	86
FIGURA 17 – Tela Principal do Programa Desenvolvido	88
FIGURA 18 – Opção Arquivo e Opção Editar do Menu Principal.....	89
FIGURA 19 – Opção Simulação do Menu Principal	89
FIGURA 20 – Formas de Apresentação da Simulação	90
FIGURA 21 – Botões de Controle da Simulação e Ponto Zero do Trabalho	90
FIGURA 22 – Opção Configurações do Menu Principal.....	91
FIGURA 23 – Pasta Geral do Menu Configuração	91
FIGURA 24 – Pasta Sinais do Menu Configuração	92
FIGURA 25 – Tela de Teste da Máquina do Menu Configuração	93
FIGURA 26 – Tela de Controle de Execução do Trabalho.....	95
FIGURA 27 – Esquema do Equipamento desenvolvido no NAFA-UFSM	96
FIGURA 28 – Geometria 1 utilizada para teste do sistema.....	98
FIGURA 29 – Corte da geometria 1	100
FIGURA 30 – Geometria 2 utilizada para teste do sistema.....	101
FIGURA 31 – Corte da geometria 2	102
FIGURA 32 – Geometria 3 utilizada para teste do sistema.....	103

FIGURA 33 – Corte da geometria 3	104
FIGURA 34 – Geometria 4 utilizada para teste do sistema.....	105
FIGURA 35 – Corte da geometria 4	106
FIGURA 36 – Geometria 5 utilizada para teste do sistema.....	107
FIGURA 37 – Corte da geometria 5	108
FIGURA 38 – Geometria 6 utilizada para teste do sistema.....	109
FIGURA 39 – Corte da geometria 6	110
FIGURA 40 – Geometria 7 utilizada para teste do sistema.....	111
FIGURA 41 – Corte da geometria 7	112
FIGURA 42 – Geometria 8 utilizada para teste do sistema.....	113
FIGURA 43 – Corte da geometria 8	114
FIGURA 44 – Amostra das peças produzidas.....	115
FIGURA 45 – Equipamento que produziu as peças mostradas	115
FIGURA 46 – Exemplo de Prototipagem Rápida por Fatiamento	116
FIGURA 47 – Objeto modelo utilizado para teste de corte.....	118
FIGURA 48 – Projeto do objeto utilizado para teste de corte.....	118
FIGURA 49 – Divisão do objeto em partes	119
FIGURA 50 – Direção dos cortes	119
FIGURA 51 – Corte da parte frontal e respectivo programa CNC.....	120
FIGURA 52 – Corte da parte central e respectivo programa CNC.....	120
FIGURA 53 – Corte da parte posterior e respectivo programa CNC.....	121
FIGURA 54 – Corte da parte frontal	121
FIGURA 55 – Corte da parte central	122
FIGURA 56 – Corte da parte posterior	122
FIGURA 57 – Corte da parte central	123
FIGURA 58 – Sólido montado usando-se o princípio de prototipagem rápida	123

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Diferenças entre Servoacionamento e Acionamento Convencional	49
TABELA 2 – Diferenças entre Servoacionamento CA e CC.....	50
TABELA 3 – Comparação entre Motor de Passo Inteiro e Meio Passo	55
TABELA 4 – Motor de Passo Unipolar de Passo Inteiro	57
TABELA 5 – Motor Bipolar de Passo Inteiro.....	58
TABELA 6 – Motor de Meio Passo.....	59
TABELA 7 – Programa CNC para Geometria da Figura 24 utilizando G90 e G91	75
TABELA 8 – Algoritmo de Movimentação dos Eixos para Execução da Geometria de Figura 12 (saindo do ponto X15 Y10 para o ponto X35 Y10).....	76
TABELA 9 – Algoritmo de Movimentação dos Eixos para Execução da Geometria de Figura 12 (saindo do ponto X35 Y10 para o ponto X25 Y17).....	77
TABELA 10 – Programa CNC para Geometria da Figura 14 utilizando G2 e G3.....	79
TABELA 11 – Algoritmo de Movimentação dos Eixos para Execução da Geometria de Figura 14 (saindo do ponto X15 Y10 para o ponto X35 Y10).....	80
TABELA 12 – Direção dos Dados em Relação ao Computador.....	83
TABELA 13 – Endereços da Porta Paralela.....	84
TABELA 14 – Endereçamento do para Saída de Dados.....	85
TABELA 15 – Programas CNC que foram utilizados para produzir a geometria da figura 28	98
TABELA 16 – Programas CNC que foram utilizados para produzir a geometria da figura 30	101
TABELA 17 – Programas CNC que foram utilizados para produzir a geometria da figura 32	103
TABELA 18 – Programas CNC que foram utilizados para produzir a geometria da figura 34	105
TABELA 19 – Programas CNC que foram utilizados para produzir a geometria da figura 36	107
TABELA 20 – Programas CNC que foram utilizados para produzir a geometria da figura 38	109

TABELA 21 – Programas CNC que foram utilizados para produzir a geometria da figura 40	111
TABELA 22 – Programas CNC que foram utilizados para produzir a geometria da figura 42	113

LISTA DE SIGLAS

APT	<i>Automatically Programmed Tools</i> (Ferramentas Programadas Automaticamente)
ATC	<i>Automatic Tool Changer</i> (Troca de Ferramentas Automática)
Auto Prompt	<i>Automatic Programming of Machine Tools</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Projetos Assistidos por Computador)
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i> (Engenharia Assistida por Computador)
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> (Manufatura Assistida por Computador)
CAP	<i>Computer Aided Planning</i> (Planejamento Assistido por Computador)
CAPP	<i>Computer Aided Process Planning</i> (Planejamento do Processo Assistido por Computador)
CLP	<i>Programmable Logical Computer</i> (Controlador Lógico Programável)
CN	Controle ou Comando Numérico
CNC	Controle ou Comando Numérico Computadorizado
EIA	<i>Electronics Industry Association</i> (Associação da Indústria de Eletrônicos)
EPS	Espuma de Poliuretano Expandido
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Normalização)
M.I.T.	Instituto de Tecnologia de Massachusetts
MDI	<i>Manual Data Input</i> (Entrada manual de dados)
SDCD	Sistemas Digitais de Controle Distribuído
TTL	<i>Transistor -Transistor Logic</i>
U.S.A.F.	Força Aérea Norte-Americana

SUMÁRIO

RESUMO.....	5
ABSTRACT.....	6
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE SIGLAS.....	11
1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Justificativa.....	16
1.2 Objetivos.....	17
1.2.1 Geral.....	17
1.2.2 Específicos.....	17
1.3 Local do Estudo.....	17
1.4 Delimitação do Tema.....	17
1.5 Organização da Pesquisa.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Comando Numérico Computadorizado – CNC.....	19
2.1.1 Constituição básica de uma máquina CNC:.....	24
2.2 Troca de Ferramentas.....	25
2.3 Tipos de CNC.....	25
2.3.1 Controle Ponto-a-ponto.....	25
2.3.2 Controle Contínuo.....	26
2.4 Aplicação em Processos.....	26
2.5 Tipo de Indústrias que Utiliza CNC.....	27
2.6 Máquinas CNC.....	32
2.6.1 Definição de Eixos de Máquinas CNC.....	32
2.6.2 Ponto de Referência dos Eixos.....	33
2.6.3 Tipos de movimentos da máquina CNC.....	33
2.7 Linguagem de Programação.....	36
2.8 Geração de Programa CNC.....	37
2.8.1 Programação manual.....	38
2.8.2 Programação MDI.....	38
2.8.3 Programação assistida por computador - CAM.....	39

2.8.4	Programação CNC via CAD/CAM	39
2.8.5	Programação automatizada por computador	40
2.8.6	Programação do CNC.....	40
2.9	Formas de acionamento	41
2.9.1	Motor CA Assíncrono.....	44
2.9.2	Motor CA Síncrono	45
2.9.3	Motor CC	46
2.9.4	Servomotor	48
2.9.5	Motores de Passo.....	51
2.10	Aplicações de Motores de Passo em Máquinas CNC.....	61
2.11	Prototipagem Rápida	63
2.12	Sistemas Flexíveis de Produção.....	69
2.13	Sistemas Semelhantes Analisados.....	71
3	METODOLOGIA.....	74
3.1	Interpolação Linear	74
3.2	Interpolação Circular.....	78
3.3	Comunicação com a Porta Paralela.....	82
4	DESENVOLVIMENTO	87
4.1	Necessidades para Desenvolvimento.....	87
4.2	Estrutura do Programa.....	87
4.3	Estrutura de Menus.....	88
4.4	Execução de um Arquivo CNC	94
5	RESULTADOS	96
6	CONCLUSÕES.....	124
	REFERÊNCIAS.....	126

1 INTRODUÇÃO

Após a 2ª Guerra Mundial, com o início da chamada “Guerra Fria”, iniciou-se entre o capitalismo e o socialismo uma nova corrida armamentista. Com isto, surgiu a necessidade de modernização e desenvolvimento de novos armamentos com maior nível tecnológico. Os novos projetos deveriam empregar processos de fabricação que proporcionassem cada vez maior produtividade e qualidade de produtos e motivando com isto, a criação e aperfeiçoamento de máquinas ferramentas mais eficientes e precisas.

No início da década de 1950 foi firmado um convênio entre a Força Aérea Norte-Americana (U.S.A.F.) e o Instituto de Tecnologia de Massachusetts (M.I.T.) para o desenvolvimento de uma nova máquina-ferramenta, que fosse capaz de fabricar rapidamente peças com geometrias complexas. O Dr. John Pearson, pesquisador do M.I.T. e sua equipe, adaptaram a uma fresadora convencional um complexo sistema eletro-mecânico, que controlava a movimentação das ferramentas e peças na máquina. Estava sendo criada a primeira máquina de comando numérico, que utilizava basicamente um grande número de relés conectados por cabos.

O Comando Numérico pode ser utilizado em qualquer tipo de máquina-ferramenta e a sua aplicação tem sido maior nas máquinas destinadas a diferentes operações de usinagem, como tornos, fresadoras, furadeiras, mandriladoras e centros de usinagem.

As máquinas-ferramenta têm recebido há muito tempo métodos ou componentes automatizados buscando minimizar as perdas e adaptação aos processos mais complexos. Uma das mais amplamente utilizadas, especialmente na década de 70, era a automatização por programação eletro-mecânica. Este tipo de automatização apresentava altíssima eficiência e produtividade com máquinas de custo moderado a baixo. A grande desvantagem deste sistema estava na baixa flexibilidade, pois não envolvia diretamente as capacidades operacionais da máquina e sim sua programação. A mudança de peça a ser usinada, requeria uma reprogramação que envolvia várias etapas e perda de tempo de fabricação.

Já na década de 50, poucos anos após o advento do computador (leia-se ENIAC 1944), já se construíram máquinas de Comando Numérico (CN). Na década de 70 houve efetiva implantação comercial de sistemas CN. Porém, o sucesso

esbarrou em dois problemas: alto custo e flexibilidade baixa. O primeiro problema advinha do recente *boom* aplicativo da indústria eletrônica, que ainda possuía alto custo para seus componentes. O segundo resultava da baixa capacidade de processamento dos "computadores" empregados e disponíveis, exigindo alta capacitação do programador e grande tempo de programação.

Após isto, com o grande desenvolvimento da eletrônica, surgiu a miniaturização dos componentes e o barateamento dos sistemas lógicos de computação. Os computadores passaram a ser mais poderosos e baratos tornando viável a sua utilização integrados aos processos de usinagem, caracterizando assim, a máquina de comando numérico computadorizada (CNC). Dotado de características de processamento avançado e tendo como elemento principal gerador de recursos o *software*, garantindo as facilidades de programação, evolução e flexibilidade esperadas pela indústria. A produção de máquinas de comando numérico computadorizada registrou um aumento significativo a partir de 1975.

Na década de noventa, em decorrência da rápida difusão da automação da década anterior, viu-se emergir os novos sistemas integrados de automação flexível. Esses sistemas utilizavam ferramentas automatizadas como controladores lógicos programáveis (CLP), sensores e medidores digitais. O uso do CAD/CAM (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing) e a instalação de máquinas de CNC passaram a ser freqüentes dentro dos processos de trabalho, modernizando a produção e desencadeando o uso da automação flexível na organização do trabalho.

Atualmente as mais atrativas características de máquinas CNC são: baixo custo, altíssima flexibilidade e boa produtividade. Baixo custo, quando comparadas a custo versus produtividade de máquinas convencionais. A altíssima flexibilidade é devido à evolução dos comandos de programação e sistemas de ajuste e preparação da máquina (*setup*) que permitem que em tempos reduzidos mude-se a peça fabricada em determinada estação de trabalho. Isto, aliado aos sistemas de CAD/CAM integrados, que permitem elaborar modelagens e programas para peças com geometrias complexas em apenas algumas horas sem a necessidade de parada na máquina. Os custos destes sistemas são relativamente baixos para grandes empresas, mas altos para empresas de pequeno e médio porte, o que em muitos casos, inviabiliza a compra destes equipamentos.

Nos tempos atuais, as empresas investem maciçamente em tecnologia para aumentar a produtividade e a qualidade dos produtos, sem com isto, aumentar os

custos em demasia, condição necessária para a permanência no mercado em tempos de globalização, onde as margens de lucro são pequenas na produção.

Com a utilização de máquinas CNC na produção, pode-se mudar e alterar as características de um determinado produto com grande rapidez sem que as máquinas fiquem paradas por muito tempo, trocando-se apenas o programa CN desenvolvido para este novo produto, isto é, a flexibilidade na produção.

Portanto, a flexibilidade de um sistema de automação depende do tipo e da quantidade do produto desejado, significando que, quanto mais variados forem os produtos e menor a sua quantidade, mais flexível será o sistema de automação.

Entre os diversos processos de fabricação conhecidos, a usinagem de materiais é um dos mais amplamente utilizados na indústria mecânica e devido às características do processo, envolvendo intimamente homem e máquina, está bastante sujeito às perdas por falhas humanas. Com a incessante busca pelo aumento de produtividade e da qualidade dos produtos, diversos outros processos tiveram a tecnologia CNC incorporada.

Para empresas de pequeno e médio porte máquinas CNC ainda são consideradas caras, estas buscam métodos alternativos para a modernização de seus equipamentos e melhoria da produção, sem a necessidade de contratação de pessoas especializadas. Os equipamentos de corte (plasma, oxicorte, ect..) devido a suas peculiaridades, são máquinas-ferramentas que possuem características que podem ser facilmente transformadas em equipamentos CNC, com um custo mais baixo, motivando o desenvolvimento deste estudo.

1.1 Justificativa

Devido a existências de um parque fabril, ainda muito grande no país, que utiliza máquinas-ferramentas manuais, existe a necessidade do desenvolvimento de novos projetos de baixo custo, que utilizem comandos numéricos computadorizados, aliados ao controle de motores de passo que são fáceis de controlar e baratos, motivando, com isto, a modernização destas máquinas, para melhoria da qualidade e rapidez de entrega dos produtos. Motivado com esta problemática, decidiu-se fazer um estudo da viabilidade da modernização destas máquinas, para torná-las mais eficientes, rápidas, competitivas e flexíveis.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Desenvolvimento de um programa de computador utilizando as linguagens de programação Delphi e Turbo Pascal que opere como a unidade de comando de um sistema de comando numérico computadorizado (CNC), com a utilização de motores de passo.

1.2.2 Específicos

Controlar a comunicação entre o computador e dispositivos de controle e sensores, bem como editar, interpretar, analisar e executar as informações do programa CNC.

Viabilizar a modificação (modernização) de máquinas-ferramenta convencionais, com um baixo custo e utilização em novos projetos de CNC.

1.3 Local do Estudo

Esse trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Metrologia do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Maria, onde foi avaliado o desempenho deste programa em protótipo de equipamento CNC e na conversão de máquinas convencionais em CNC.

1.4 Delimitação do Tema

O sistema é restrito à interpretação de programa CNC e acionamento de motores de passo, não apresentando funções avançadas como ciclos de usinagem.

1.5 Organização da Pesquisa

O trabalho de pesquisa proposto está estruturado em cinco capítulos, cujos conteúdos resumidos, encontram-se a seguir:

No primeiro capítulo, além da exposição do tema e de sua organização, encontram-se a definição e a natureza do problema em estudo, apresentados de

forma sucinta, após comentários sobre modernização de máquinas-ferramenta, frente ao assunto que se está pesquisando. Na seqüência, apresentam-se os objetivos da pesquisa e a relevância do estudo para o segmento pesquisado.

No segundo capítulo, faz-se as revisões mais aprofundadas do problema, bem como a fundamentação teórica sobre CNC e tipos de acionamento.

No terceiro capítulo, a motivação para o desenvolvimento deste trabalho.

No quarto capítulo, descrevem-se os requisitos básicos para o desenvolvimento do software, apresenta-se a estrutura do sistema computacional, mostram-se os layouts utilizados no desenvolvimento do programa, os cuidados para o desenvolvimento de uma interface amigável que utiliza uma linguagem padronizada.

No quinto capítulo, faz-se testes de viabilidade do sistema desenvolvido, analisando-se os resultados obtidos.

No sexto capítulo, têm-se as considerações finais da presente pesquisa, a partir do objetivo geral que se pretendia alcançar e dos resultados obtidos, sugerindo recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Comando Numérico Computadorizado – CNC

Podemos considerar como precursoras das máquinas de comando numérico modernas, a máquina de Joseph Jacquard (1801) que estabelecia os padrões dos tecidos produzidos e utilizava cartões perfurados como comando, e as pianolas (1860) que eram controladas por cilindros com pinos salientes com rolos de papel perfurados através dos quais passava o ar.

Durante a década de 40, várias empresas e instituições trabalharam concomitantemente no conceito de máquinas de comando numérico e, por este motivo, existe uma disputa até hoje sobre quem foi responsável pelo início do desenvolvimento desta tecnologia.

Provavelmente, a primeira aplicação de comando numérico foi feita por John C. Parsons da *Parsons Corporation de Traverse City*, em Michigan, que era produtor de rotores de helicópteros. Na época, não se conseguia produzir gabaritos para os rotores na velocidade necessária o que levou Parsons a conectar um "computador" da época com uma máquina operatriz. Inicialmente, Parsons utilizou cartões perfurados para codificar as informações para o sistema Digitron, como foi chamado. (FIGUEIRA, 2002-2003)

A Força Aérea americana (*U.S. Air Force*), em 1949, contratou a Empresa Parsons para realizar um estudo da aplicação dos sistemas de comando numérico para acelerar a produção de componentes de seus aviões e mísseis, cada vez mais complexos. A Parsons por sua vez sub-contratou o laboratório de Servomecanismos do Massachusetts Institute of Technology (MIT). Uma fresadora de três eixos - Hydrotel, da *Cincinnati Milling Machine Company*, foi escolhida como veículo para esta experiência. Os controles de copia foram removidos e a máquina aparelhada com equipamento de comando numérico. O resultado do trabalho foi um protótipo das máquinas de comando numérico atuais. Os pesquisadores do MIT criaram o termo "numerical control" ou comando numérico. (KANITAR, 2005)

O desenvolvimento da tecnologia de comando numérico foi muito promovida pela *U.S. Air Force*, na produção de estruturas de avançados aviões militares a jato, com a construção em um curto espaço de tempo entre o projeto e a fabricação e em

pequenos lotes de peças, constituindo desta forma, uma excelente oportunidade para o teste do comando numérico.

Os fabricantes de aviões incrementaram muito o uso de equipamento de comando numérico, no fim da década de 50, com a geração contínua de contornos. Estas indústrias asseguraram grande progresso neste período, pelo cumprimento do programa de produção, obtenção do grau de precisão exigido no produto a custos compatíveis, os quais não poderiam ter sido obtidos sem o comando numérico. (FIGUEIRA, 2002-2003)

Ainda na década de 50 o método prático para aumentar o rendimento das máquinas existentes, num curto período de tempo, era a adaptação de comando numérico, apesar do considerável retrabalho. Entretanto, no fim desta década, esta alternativa deixou de ser a mais viável, pois a partir de 1955 as vendas deste tipo de máquina começaram a crescer e o preço a cair, devido em parte à aceitação do comando numérico na indústria e em parte a contínua miniaturização dos componentes eletrônicos necessários. Das válvulas, aos circuitos integrados de grande escala, os componentes diminuíram em tamanho e custo, a produção e confiabilidade das máquinas aumentou, e as máquinas comandadas numericamente continuaram a impressionar, realizando operações previamente consideradas impossíveis ou impraticáveis, com melhor precisão e repetibilidade que os métodos convencionais. (Histórico do CNC)

Em 1957, iniciou-se uma revolução no sistema de manufatura, intensificando-se o uso de máquinas de comando numérico. Surgiu um grande número de fabricantes de máquinas e de controles no mercado, sendo que alguns fabricantes passaram também a fabricar seus próprios controles. (MOTTA, 2002)

A partir de novembro de 1959, equipamentos com controles de posicionamento ponto a ponto e geração contínua de contornos, foram melhorados pelo trocador automático de ferramentas, o qual foi desenvolvido por uma fábrica de usinagem de metais para uso próprio.

As aplicações de controle de posicionamento começaram a crescer e logo o número de máquinas instaladas com este controle ultrapassou o daqueles de copiagem contínua de contorno. Assim sendo, em 1961, apareceu a primeira furadeira com posicionamento da mesa controlado por programa, notável por seu baixo preço quando comparada a outras máquinas de comando numérico da época. (FIGUEIRA, 2002-2003)

Em fins de 1962, todos os maiores fabricantes de máquinas-ferramenta estavam empenhados no comando numérico. Sendo que hoje poucos não oferecem este tipo de produto. (Histórico do CNC)

Com grande número de concorrentes e as diversificações existentes houve a necessidade de padronização. Nos estágios iniciais, o comando numérico necessitava de estreita coordenação de esforços técnicos nas áreas de codificação, formatos de dados de entrada, terminologia, sistema organizacional, os quais eram necessários principalmente para facilitar o intercâmbio de lotes de encomendas entre os fabricantes de aviões. Dessa forma, através de estudos organizados pela E.I.A. a partir de 1958, houve a possibilidade de padronização do formato de dados de entrada conforme padrão RS-244. (FIGUEIRA, 2002-2003, pág. 51)

Comumente eram usadas fitas perfuradas como dados de entrada com as instruções dos dados referentes à peça e condições de usinagem, definidas pelo programador. Estas fitas podiam ser executadas tanto pelo sistema manual como através do auxílio do computador.

A programação manual também podia e em boa parte das máquinas atuais ainda pode ser feita através de teclados alfanuméricos presentes e conectados as máquinas de comando numérico, principalmente onde a simplicidade do trabalho a ser feito e a natureza da operação não justificam gastos com programação. Por outro lado, o uso de programação com auxílio do computador proporciona, além da rapidez, uma maior confiabilidade. (Histórico do CNC)

Os principais fatores que induziram à pesquisa, aparecimento e introdução do uso de máquinas operatrizes comandadas numericamente foram: (FIGUEIRA, 2002-2003)

- O avanço tecnológico durante e após a segunda guerra mundial.
- A necessidade de adaptação dos equipamentos aos conceitos de fabricação como baixo custo em pequenos lotes.
- Produtos de geometria complexa e alta precisão.
- Menor tempo entre projeto do produto e início da fabricação do mesmo.

Hoje, as máquinas com comando numérico computadorizado (CNC) são encontradas em quase todas as empresas, desde as pequenas oficinas de usinagem até as grandes companhias de manufatura; na realidade quase não

existem produtos fabricados que não estejam de alguma forma relacionados à tecnologia destas máquinas-ferramenta.

As operações feitas em uma máquina CNC podem ser executadas em máquinas convencionais, as diferenças em questão de produtividade são: o tempo de produção e a repetição das peças, sendo que em alguns casos a diferença de tempos pode ser considerada infinita, pois a complexidade das peças pode exigir um grande empenho do operador. A partir da criação do CNC, foi possível desenvolver peças com geometrias de extrema complexidade em tempo muito curto, peças cuja fabricação era possível apenas pelas mãos experientes de um exímio modelador. (Mundo CNC)

Geralmente, quando se fala em máquinas CNC, se está referindo a máquinas-ferramenta. No entanto, as máquinas-ferramenta correspondem apenas a um tipo de máquina CNC. Assim, apesar dos comandos numéricos serem tradicionalmente usados em máquinas-ferramenta, essa não é sua única aplicação. A princípio, qualquer máquina que necessite de posicionamento, velocidade e aceleração controlados pode ser automatizada por meio de um CNC e podem ser encontradas nas indústrias têxtil, alimentícia, de embalagens, calçados, plásticos etc. Basicamente um CNC tem a função de controlar movimentos.

Esta rapidez proporcionada por máquinas CNC pode ser observada na alteração das linhas aerodinâmicas dos automóveis modernos com formas complexas e bonitas. No início da fabricação dos automóveis em série, como no caso dos modelos T de Henry Ford, todos os carros eram iguais e da mesma cor, o consumidor era obrigado a optar entre comprar aquele carro que todos tinham ou ficar sem. Hoje, a colocação de um novo modelo é tão rápida que o consumidor se sente às vezes até incapaz de se decidir qual escolher. (Mundo CNC)

As máquinas CNC estão tendo seus preços reduzidos pelo próprio aumento da demanda e é importante planejar bem quando se deseja implantar máquinas CNC em um parque pré-existente de máquinas convencionais, ou mesmo montar um parque de máquinas CNC a partir do zero. O lucro é certo se toda estratégia for bem estipulada. Tal planejamento exige estudos de: (Mundo CNC, Máquinas CNC ou máquinas Convencionais?)

- Pesquisa do tipo de máquina que o mercado ou a própria empresa necessita: Empresas que fornecem exclusivamente serviço de usinagem precisam estar atentas aos anseios de seus consumidores, tais como complexidade geométrica,

precisão, tamanho dos pedidos e prazo de entrega exigidos por eles, assim como, o volume de produção dos mesmos. Analisando estes itens pode-se determinar o tipo de máquinas que será utilizada. Por outro lado, se o setor de usinagem for um elemento da empresa, e os serviços de usinagem fizerem parte da concepção do produto desta empresa, o estudo pode se definir mais facilmente, pois pode-se encontrar na própria empresa as perspectivas necessárias para a definição do tipo de máquina ideal.

- Análise de custo x benefício das máquinas escolhidas: Conhecendo-se o tipo de máquina que se precisa, deve-se estudar o que o mercado oferece a esse respeito, as máquinas disponíveis ou até adaptáveis às necessidades. Analisar, enfim, os custos e os benefícios de cada item do mercado que se encaixem as necessidades.
- Assistência apropriada à implantação desta tecnologia: Talvez este item seja o mais importante e deveria constar como coadjuvante dos outros itens, pois quando uma empresa pretende ampliar seus horizontes munindo-se de tecnologias avançadas, é importante que pessoas experientes no ramo sejam consultadas, pois isto pode, sem dúvida, ser a diferença entre o lucro e o prejuízo. Esta assessoria torna-se imprescindível para instalação da máquina e suporte à produção nos primeiros meses de implantação. Conhecendo o nível de investimento e aplicação dos recursos pode-se planejar a melhor maneira de se integrar aos sistemas fabris o novo meio produtivo. Em poucas palavras, para um sistema completo, do projeto à peça pronta em máquina CNC, torna-se necessária a aquisição e implantação de alguns sistemas que se integrem e facilitem a flexibilização do sistema como um todo, e são eles:
 - Sistema de programação CNC - CAD/CAM
 - Sistema de simulação - Manufatura Digital
 - Pós-processador
 - Sistema DNC - gerenciamento e transferência de programas (rede) para a máquina

Todos estes sistemas, hardware e software, precisam ser compatíveis. Outro item imprescindível é a adequação da nova máquina ao layout da fábrica, que precisa ser estudado já na época da aquisição, pois neste instante se tem uma dimensão do novo equipamento e um bom layout leva tempo para ser planejado e implantado.

Além dos recursos físicos e eletrônicos descritos, é muito importante a preparação dos recursos humanos, visto que esta tecnologia exige pessoal especializado, no projeto, programação, operação e serviços de suporte.

2.1.1 Constituição básica de uma máquina CNC:

A composição básica de um equipamento CNC, começa pela máquina em si, que é a parte mecânica, o que antes era a máquina convencional, ou ainda conhecida por alguns como a cinemática do CNC.

O Comando ou Controle Numérico é o equipamento responsável pela interpretação do programa CNC, que contém instruções lógicas a serem executadas pela máquina, e tradução em comandos que são enviados ao CLP e aos *microswitches* para acionamento dos eixos. É ainda responsável pelo gerenciamento da interface da máquina com o operador - display, botões, acionadores, etc.

O controlador lógico programável (CLP) é um dispositivo ligado a um computador muito usado no controle de equipamentos em oficinas industriais. A quantidade de equipamentos que os CLPs podem controlar são tão variados quanto as instalações industriais deles. Em sistemas transportadores, linhas de máquinas de processamento de alimentos, máquinas CN e até mesmo sistemas de elevadores prediais, provavelmente haverá um CLP no seu controle de acionamento.

O servo-motor é o tipo de acionamento mais comum, principalmente utilizado em máquinas-ferramenta para usinagem, pois giram na velocidade e tempo necessários para que cada eixo atinja os valores de posição e velocidades, estipulados em cada bloco do programa CNC. Os demais tipos de acionamento serão descritos no item 2.9.

Todos estes sistemas, parte mecânica, controle numérico, controlador lógico programável e servo-acionamento funcionando sincronizados formam a máquina CNC.

As máquinas de comando numérico deveriam estar reservadas, principalmente, aos trabalhos unitários, em pequenas séries. A elas seria confiada a fabricação de protótipos, modelos, matrizes, etc. A grande vantagem desses equipamentos está na flexibilidade que apresentam, pois podem usinar peças com diferentes perfis, com uma simples troca de programa. (Telecurso 2000, aula 80)

2.2 Troca de Ferramentas

A maioria das máquinas-ferramenta CNC são equipadas com dispositivos conhecidos como *Automatic Tool Changer* (ATC), ou seja, Trocador Automático de Ferramentas. Este trocador automático de ferramentas tem a função de retirar uma ferramenta e colocar outra na posição subsequente de usinagem. O trocador trabalha com um carrossel, onde são montadas as várias ferramentas participantes do processo de usinagem.

O porta-ferramentas (magazine ou carrossel) e o trocador de ferramentas diferenciam as fresadoras dos chamados centros de usinagem. Nos centros de usinagem a troca de ferramentas é realizada automaticamente. A evolução em relação às fresadoras faz dos centros de usinagem as máquinas mais importantes para a implementação de sistemas de usinagem automatizados. (Telecurso 2000, aula 16)

Existem vários modelos de trocadores de ferramentas. Nos tornos, o porta-ferramentas é normalmente chamado de torre.

2.3 Tipos de CNC

Segundo Zeilmann, existem tradicionalmente o controle de posicionamento ponto a ponto e o controle de posicionamento contínuo que são descritos a seguir:

2.3.1 Controle Ponto-a-ponto

Este é um tipo de comando e controle de concepção simples com movimentação rápida de todos os eixos de forma independente, sem uma trajetória pré determinada e controlada, até que cada eixo tenha localizado a posição programada. Durante esta movimentação, logicamente, não deverá existir contato entre a peça e ferramenta. Este controle, simples e barato, é tipicamente usado em furadeiras, puncionadeiras, prensas, etc.

2.3.2 Controle Contínuo

É um sistema de comando e controle posterior ao ponto a ponto. Este tipo de controle garante posicionamento preciso, pois possui trajetória e velocidade precisa de posicionamento em qualquer ponto do espaço, uma vez que todos os eixos são precisamente controlados. Uma rotina chamada "interpolador" coordena os movimentos de cada eixo pelo cálculo dos pontos de saída e então controla o movimento relativo aos eixos para assegurar que o ponto final para cada eixo é alcançado simultaneamente, evitando, assim, erros de curso.

Dependendo do número de eixos controlados simultaneamente, existem 2, 3 ou mais controladores.

Interpolações sucessivas em duas dimensões (2D) em cada um dos três planos principais (xy, xz, yz) é chamada controle 2 1/2 D, e interpolações simultâneas nos três planos é chamada controle 3D.

2.4 Aplicação em Processos

A sociedade está exigindo, cada vez mais, produtos de melhor qualidade e de menores preços e isto têm forçado os fabricantes a desenvolver sistemas de produção que priorizem a flexibilidade e o melhor aproveitamento do parque fabril, para tornar seus sistemas produtivos economicamente competitivos para uma gama maior de produtos. Alimentados pelas perspectivas de diminuição de custos e garantia da qualidade, a grande maioria dos fabricantes tem adotado a filosofia da automação de processos como ferramenta para otimizar a produção.

O aparecimento de Máquinas-Ferramenta com Comando Numérico Computadorizado (MF-CNC) permitiu a execução de peças complexas com alta precisão e elevado acabamento superficial, com uma enorme redução dos tempos de fabricação, possibilitando a produção de peças com economia de alta complexidade.

As novas tendências do mercado (produtos personalizados, lotes menores e com grande variedade, exigências de qualidade e preço), obrigam o produtor a buscar soluções que possibilitem produzir com flexibilidade, rapidez, qualidade e preço atraente, e a resposta para estas exigências está na automação dos processos de fabricação. (DEMEC/EE/UFMG)

Ultimamente, os sistemas CNC têm sido incorporados em diversas máquinas e equipamentos considerados inicialmente como aplicações não-convencionais. As tendências para estas máquinas, orientam-se para a usinagem em alta velocidade, incluído a capacidade de monitoramento de eventos, alteração dos algoritmos de controle, etc. A adaptação de unidades CNC em máquinas-ferramenta convencionais oferece inúmeras vantagens, dentre as quais pode-se destacar:

- Maior produtividade e confiabilidade;
- Aumento da flexibilidade;
- Troca automática de ferramenta e/ou peças;
- Maior poder de processamento em arquiteturas mais modulares;
- Edição, simulação e manipulação de programas;
- Realização de tarefas de controle externo e comunicação, etc.

Em qualquer produto, estão agregados processos de transformação, que através de modificações geométricas e dimensionais lhe conferem funcionalidade. Dentre os múltiplos processos produtivos existentes os processos mecânicos com remoção e sem remoção de materiais, podemos citar:

- processos de usinagem;
- processos de conformação;
- processos de fundição;
- processo de corte;
- processos de soldagem.

2.5 Tipo de Indústrias que Utiliza CNC

No passado, uma fábrica de produção mecânica ou manufatura era constituída de máquinas-ferramenta tradicionais, tipo tornos e fresadoras. A maior parte do trabalho era realizada por operadores treinados que desenvolviam praticamente todas as tarefas envolvidas no processo de produção. As fábricas atuais são uma combinação de máquinas com sistemas eletroeletrônicos, mecânicos e de informática. Alguns exemplos destes sistemas, que podem ser encontrados em fábricas modernas, são máquinas-ferramenta com comando numérico computadorizado (CNC), sistemas automáticos de manuseio de materiais, robôs, controladores lógicos programáveis (CLP), computadores e *softwares* para controlar

tais sistemas e para supervisão de equipamentos de automação. Todos estes componentes consistem em uma integração de tecnologias provenientes das engenharias mecânica, elétrica, eletrônica, automação e da ciência da computação. Além disso, estes sistemas são integrados por redes de comunicação e bancos de dados distribuídos de forma a operar como um único sistema.

Hoje em dia, a grande maioria das empresas de médio e grande porte possui máquinas operadas por CNC. É uma tecnologia que além de aumentar a produtividade, melhora a qualidade do produto e reduz os tempos de produção. Bons exemplos disso são as indústrias metal-mecânicas como as fábricas de produção de máquinas e motores elétricos, produção de maquinário e ferramentas, fábricas de automóveis, montadoras e todas as fábricas agregadas ao processo de montagem de carros e caminhões.

As empresas de produção de calçados investem maciçamente em Design, para isto utilizam Projetos Assistidos por Computador (CAD), Engenharia Assistida por Computador (CAE) e Manufatura Assistida por Computador (CAM) (CAD/CAE/CAM) e sistemas CNC para melhorar as linhas de produção dos calçados nacionais e abrir novos mercados para a exportação. Estes sistemas CAD/CAE/CAM na área calçadista está sendo utilizado para beneficiar o ato de criação e da inventividade dos projetistas de calçados. Segundo Moreira (2004), os sistemas CAD/CAE/CAM diminuem o número de horas para se alcançar à solução mais viável, pois os recursos matemáticos, geométricos e visuais disponíveis nos *softwares* são quase ilimitados.

Ao longo dos últimos anos, a indústria moveleira brasileira tem experimentado mudanças significativas em sua base produtiva e uma rapidez muito grande em se ajustar às novas condições de abertura comercial da economia brasileira e da globalização dos mercados em nível mundial. Segundo Moraes (2001), os pólos que mais investiram em tecnologia e na exportação foram os de Bento Gonçalves (RS) e de São Bento do Sul (SC) e, basicamente, os investimentos foram em sua maioria realizados na aquisição de equipamentos com comando numérico computadorizado – CNC.

Nas grandes empresas de móveis para escritório em São Paulo também houve grandes investimentos na adoção de CNCs, cuja introdução tem sido feita em pontos estratégicos das empresas, paralelamente ao treinamento da mão-de-obra e

ao desenvolvimento de capacidade gerencial. São equipamentos, geralmente, importados da Itália, Alemanha e Espanha. (GORINI, 1998)

Conforme Gorini (1998), embora na década de 90 a indústria de móveis tenha investido pesadamente no parque de máquinas em automação e controle de qualidade, com conseqüente aumento da escala de produção das principais empresas do setor, as empresas mais modernas geralmente ligadas ao comércio internacional são poucas dentro de um universo grande de empresas desatualizadas tecnicamente e com baixa produtividade, tendo se restringido às grandes e médias empresas do setor. Portanto, percebe-se que o nível de tecnologia não é uniforme em todo o setor moveleiro, e que são necessários investimentos de modo a permitir que mais empresas possam concorrer com a qualidade dos produtos externos.

De acordo com a avaliação da Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos (Abimaq), existem hoje em operação no país cerca de 3.500 indústrias de moldes e matrizes, também conhecidas pelo nome de ferramentaria, os principalmente pólos ferramentais localizam-se no Grande ABC - SP, nas regiões de Caxias do Sul - RS e Joinville - SC. A maioria foi formada nos anos 90 e são decorrentes do processo de terceirização registrado naquela década.

Segundo Vallejos (2005, apud Weingaertner et al. 1998), devido à abertura do mercado as empresas brasileiras fabricantes de moldes e matrizes vêm sofrendo forte concorrência de indústrias estrangeiras, e, além disso, as empresas nacionais apresentam uma grande defasagem tecnológica em relação as suas congêneres de países desenvolvidos. Como indicação clara dessa situação, em 1997, em torno de 70 a 80% dos moldes e matrizes de maior peso e complexidade (como os utilizados na indústria automobilística) eram importados, cabendo aos fabricantes nacionais o fornecimento dos moldes e matrizes menores e mais simples, os quais geralmente possuem menor valor agregado.

No atual mercado globalizado onde qualidade com redução de custos finais é pré-requisito e o diferencial é o prazo de entrega, as ferramentarias brasileiras, como alternativa tecnológica imediata, voltaram-se à modernização de seu parque fabril com a aquisição de máquinas-ferramenta com *Comando Numérico Computadorizado* (CNC) e sistemas de *Projeto Auxiliado por Computador* (CAD), *Engenharia Auxiliada por Computador* (CAE) e *Manufatura Auxiliada por Computador* (CAM). No entanto, embora as estatísticas sobre a utilização destas novas tecnologias sejam positivas, a indústria brasileira ainda se encontra distante

do nível tecnológico alcançado pela forte concorrência externa, representada por países Europeus, como Alemanha, Itália, Portugal e Espanha, e por países Asiáticos, principalmente China, Coréia e Taiwan (VALLEJOS, 2005 apud WEINGAERTNER et al., 1998).

Luis Carlos Kis (técnico em qualidade e desenvolvimento da Daimler Chrysler) afirmou que “No passado toda ferramentaria era importada, porque o segmento no Brasil não era conhecido e as empresas existentes não tinham porte para atender as grandes indústrias. Hoje as ferramentarias nacionais concorrem com as européias”. (CIMM, 2006)

As fábricas de máquinas e equipamentos para o trabalho no campo, como colheitadeiras, tratores, plantadeiras, etc., também utilizam muito sistemas CNC, na estamparia, usinagem, conformação e soldagem.

Outro exemplo da utilização de máquinas CNC é na indústria de beneficiamento de rochas. Empresas de produção e exportação de granitos manufaturados utilizam máquinas CNC para produção, em larga escala, de tampos de cozinhas e banheiros, bem como mesas e peças especiais.

Até na construção civil há atualmente projetos pensados e executados de uma forma totalmente digital, com recursos das novas tecnologias CAD-CAM. Neste tipo de processos, a concepção, a análise estrutural e a escolha de materiais, fundem-se e resultam na produção do projeto diretamente através de máquinas de comando numérico (CNC). Exemplos disto são o edifício *The Bubble* (figura 1) e a parada de ônibus *Fluid Vehicle* (figura 2). O edifício *The Bubble*, que serviu por duas vezes como pavilhão da BMW em exposições na Alemanha (IAA – Internationale Automobil Ausstellung 1999, em Frankfurt; Expo2000, em Munique), foi desenvolvido pelo grupo Bernhard Franken, sob o tema “Energia Limpa”. E utilizou um processo contínuo desde desenho até à manufatura, que é executado digitalmente. As formas são geradas por campos e algoritmos e materializadas graças a máquinas de comando numérico (CNC), a fabricação das estruturas (costelas) foi efetuada em máquina de CNC de 3 eixos, por corte. (HENRIQUES, 2005)



Fonte: http://www.vitruvius.com.br/arquitextos/arq060/arq060_03.asp

FIGURA 1 – O edifício *The Bubble*



Fonte: http://www.vitruvius.com.br/arquitextos/arq060/arq060_03.asp

FIGURA 2 – O edifício *Fluid Vehicle*

Investir em inovação tecnológica e proceder à automatização em segmentos como, CLP, SDCD, CAD, CAM, CN, CNC, Robótica, etc., será essencial para empresas se manterem, competitivas, racionais e capazes de competir no mercado globalizado em qualidade, preço, além de durabilidade, logística, etc. Devemos, portanto, observar que investimentos em P&D, em capacitação tecnológica, não devem ser descartados do processo de atualização que deve ser continuado. Todos

estes processos de inovação tecnológica podem ser aplicados em diversos processos industriais e em diversos outros setores empresariais, inclusive domésticos.

2.6 Máquinas CNC

2.6.1 Definição de Eixos de Máquinas CNC

Definem-se como eixos CNC todos os movimentos direcionais sejam eles lineares ou angulares que podem ser programados contemporaneamente e ao mesmo tempo atingem o ponto final programado. Os equipamentos CNC's possuem um número de eixos principais, normalmente dois ou três e pela norma DIN 66217 são nomeados por eixos X, Y e Z. Além dos eixos principais, algumas máquinas CNC possuem também eixos complementares, isto é, dispõem de mesas giratórias e/ou cabeça orientável e são nomeados por eixos A, B e C pela norma ISO R841 são denominados rotativos U, V e W. O eixo rotativo A gira em torno do eixo X, assim como B em torno do Y e C em torno do Z, estes eixos são controlados de forma independente e são designados por eixos complementares de rotação. Pode-se usar a regra da mão direita (figura 3) para conhecer o sentido de giro dos eixos rotativos (A, B, C) em torno dos eixos lineares (X, Y, Z). (SANTOS)

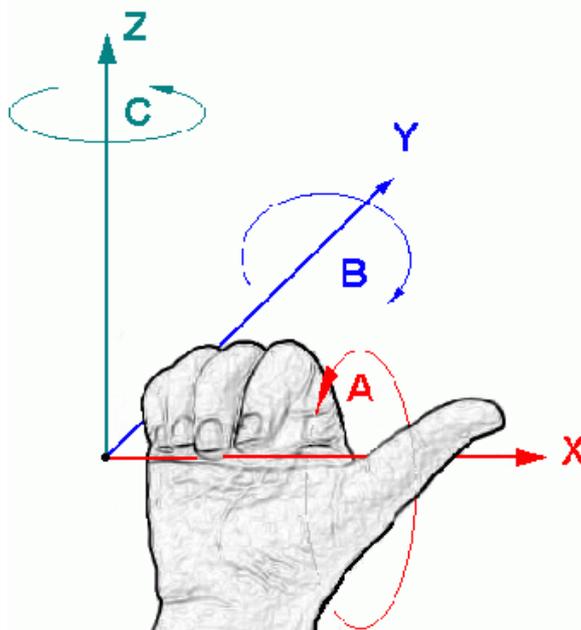


FIGURA 3 – Eixos de Movimentação de Máquinas CNC

2.6.2 Ponto de Referência dos Eixos

Um ponto de referência é a origem que o CNC utiliza para executar os movimentos dos eixos. A origem do sistema é definida pela interseção dos eixos das coordenadas principais.

A maioria das máquinas CNC utiliza uma única posição ao longo de cada eixo como ponto de referência. Este posicionamento pode ser conhecido como retorno a zero, "grid" de zeragem, zero máquina ou ainda *home position* (comando G53). Embora existam nomenclaturas diferentes, esta posição de referência é requerida por muitos controles como um ponto de referência preciso. Os controles CNC que utilizam um ponto de referência para cada eixo requerem que a movimentação do eixo da máquina seja enviada a seu ponto de referência em cada eixo como parte do procedimento de iniciação da máquina quando a mesma precisa ser reinicializada e após seu desligamento. Estando o procedimento completo, o controle estará sincronizado com a posição física da máquina. Assim, define-se o Zero Máquina com um ponto fixo na máquina CNC, onde se encontra a origem do sistema de coordenadas cartesianas (interseção dos eixos). (Mundo CNC – Conceitos Básicos sobre CNCs)

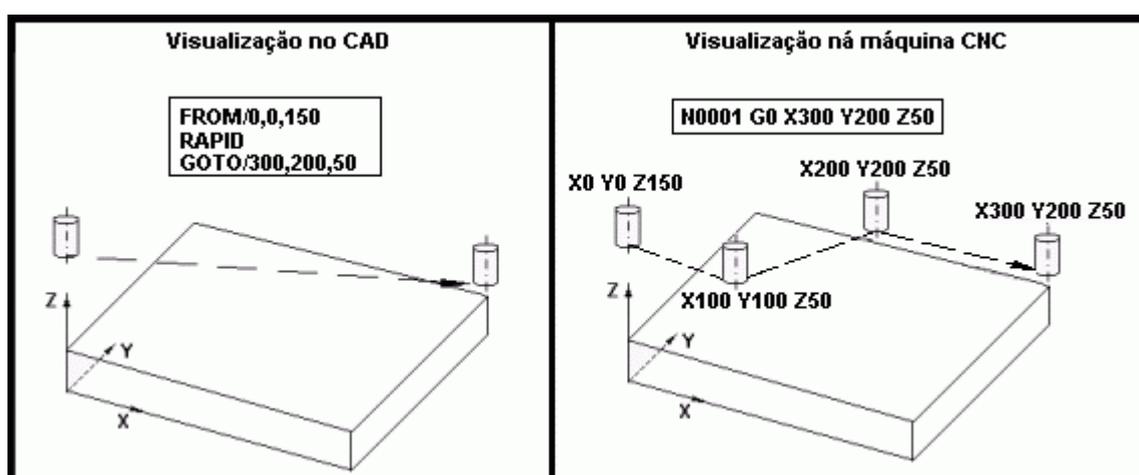
Segundo Costa, o Zero Peça é o sistema de coordenadas cuja origem é determinada pelo programador de maneira mais conveniente, sobre o desenho da peça. A definição do Zero Peça pode se feita, normalmente, de duas formas: através do programa é informada a distância do ponto zero em relação à origem da máquina (comando G92 ou G50), ou através de uma função de referência na máquina (*offset*), que determina a distância entre a origem da máquina e o zero da peça (comando G54).

2.6.3 Tipos de movimentos da máquina CNC

Durante o posicionamento, todos os eixos programados movem-se simultaneamente com velocidades especificadas, até que cada eixo tenha alcançado seu destino, esta movimentação nas máquinas CNC exige total sincronia entre eixos em relação ao posicionamento e a velocidade de movimentação. Cada ponto intermediário entre o ponto inicial e o ponto final é previamente calculado pela interpolação e isto é feito através de uma seqüência de pequenos passos (degraus),

que são normalmente iguais ao valor da resolução da máquina. A trajetória desejada é quebrada em um grande número de pequenas retas que definirão o movimento, esta movimentação é denominada de interpolações que podem ser linear, circular, helicoidal, parabólica, *spline*, etc... Os tipos mais comuns de movimentações de uma máquina CNC são: o movimento rápido, o movimento em linha reta, e o movimento circular. São movimentos chamados modais, isto é, uma vez definidos permanecem ativos até outro comando interrompê-los. O ponto final do movimento é especificado em cada comando, pois a posição atual da máquina será tomada como o ponto de partida.

O movimento rápido, também conhecido como de posicionamento é obtido com comando G00 e ocorre com a velocidade de avanço máxima da máquina, sendo usado para minimizar tempos não produtivos durante o ciclo de operação. Usos comuns para movimento rápido incluem posicionamento da ferramenta para se iniciar um corte, movimentos de desvios de partes auxiliares tais como grampos, fixadores e outras obstruções. Este tipo de movimentação deve ser utilizado com cautela, quando se trabalha com muitos eixos, pois a movimentação é constituída de vários movimentos como mostra a figura 4, podendo ocorrer até impacto entre barramentos e ferramentas. (Mundo CNC)

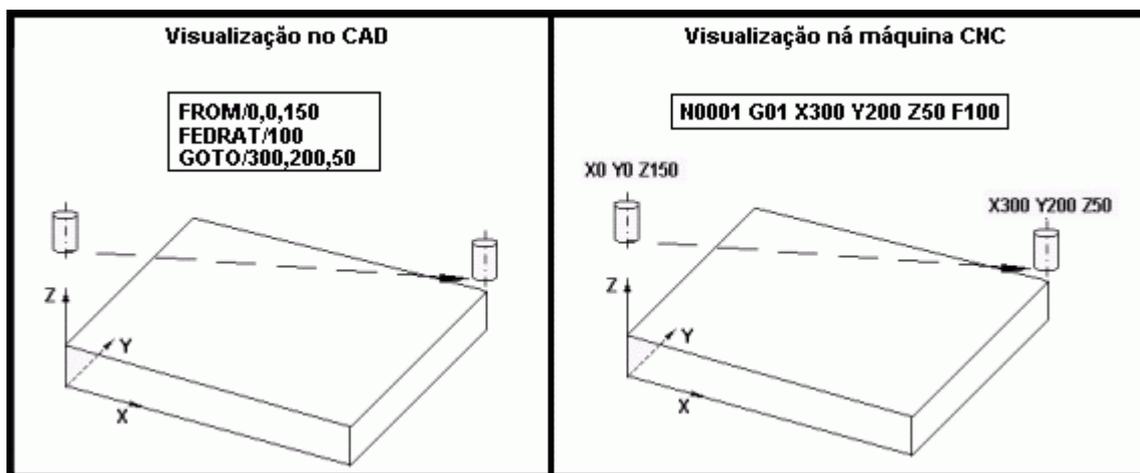


Fonte: <http://www.mundocnc.com.br/>

FIGURA 4 – Exemplo de Movimentação Rápida (G00) em Máquina Três Eixos

Segundo Costa, o movimento em linha reta ou linear (figura 5) se dá de forma retilínea contínua entre os pontos iniciais e finais, propicia controle total de uma linha e pode ser usado a qualquer momento. Um movimento cortante reto é requerido

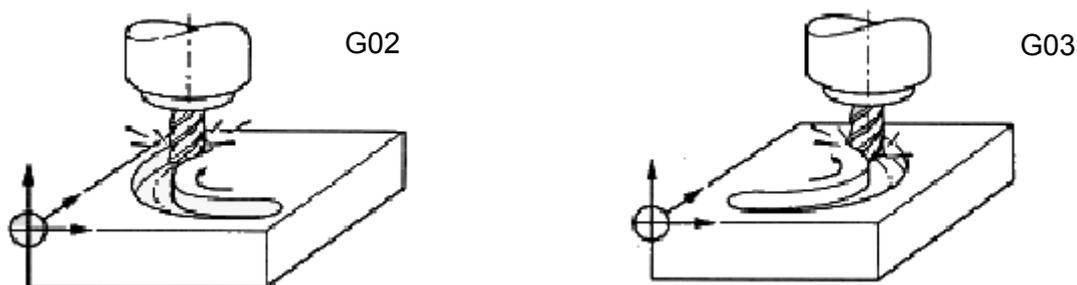
enquanto se faz uma furação, um faceamento ou o fresamento de uma superfície reta ou quando existem obstáculos no percurso. Neste tipo de movimentação se programa a velocidade de avanço (mm/min), também conhecida como taxa de avanço.



Fonte: <http://www.mundocnc.com.br/>

FIGURA 5 – Exemplo de Movimentação Linear (G01) em Máquina Três Eixos

O movimento circular causa à máquina movimentos na forma de um caminho circular e dois códigos G são usados para movimento circular, onde o comando G02 é usado para especificar movimento no sentido horário e o comando G03 para especificar movimento no sentido anti-horário (figura 6). Apenas o ponto final e o raio do arco (R) devem ser programados em máquinas CNC mais modernas, em máquinas mais antigas, vetores direcionais (especificado por I, J e K) especificam ao controle o local do ponto do centro do arco e todos os pontos intermediários são calculados pela interpolação circular. Este tipo de interpolação é limitada a um plano principal de superfície da máquina e é necessário informar para máquina qual é o plano de trabalho desta interpolação, a forma mais comum é pelos códigos G17, para plano XY, G18 para plano XZ e G19 para plano YZ. Em geral quando nenhum destes indicadores de planos são citados subentende-se que o plano de trabalho é XY, que é considerado com padrão. (mundo CNC)



Fonte: <http://www.mundocnc.com.br/>

FIGURA 6 – Exemplo de Movimentação Circular (G02 e G03)

2.7 Linguagem de Programação

Para que houvesse a possibilidade de uso de computadores no auxílio à programação das máquinas, foram desenvolvidos vários estudos visando um sistema de linguagem adequado para se obter facilidade de programação. A primeira linguagem a ser desenvolvida para tal fim foi o APT (Automatically Programed Tool) pelo MIT em 1954. Derivadas da APT, para geração contínua de contornos, foram desenvolvidas novas linguagens como Auto Prompt (Automatic ProgramminG of Machine Tools) - programa tridimensional, Adapt (1964 - Air Force Developed APT ou Adaptation of APT) - versão simplificada tridimensional desenvolvida pela IBM, Exalpt, Compact II, Action, IFAPT (France), MINIAPT (Germany) Autospot, Unialp, SPLIT e outras. Em todas estas linguagens existe um objetivo básico de simplificação das palavras e das terminologias utilizadas. (FIGUEIRA, 2002-2003)

Nos anos 70, foram introduzidas as máquinas CNC que passaram a depender menos da parte de "hardware", essencial nos circuitos das máquinas dos anos 60, e ter seu funcionamento baseado muito mais no "software". Os avanços substituíram a entrada manual de dados e as fitas perfuradas por armazenamento em disquete dos programas ou comunicação remota, e atualmente é possível inserir dados na máquina a partir de uma grande variedade de programas e linguagens.

No entanto, nos anos 80 a necessidade de elevar a produção com técnica e precisão chegou às empresas, sobretudo norte-americanas e européias, que estavam extremamente preocupadas com os reduzidos aumentos de produtividade obtidos por seus trabalhadores. Estes fatos levaram a um aumento considerável na

automação, principalmente nos EUA, numa tentativa de reconquistar uma posição competitiva num mercado global.

Os códigos de máquinas CNC mais utilizados no mundo foram padronizados inicialmente pela “ISO 1056:1975” e posteriormente atualizada pela “ISO 6983-1:1982” (*International Organization for Standardization* - Organização Internacional para Normalização) e de forma muito semelhante pela ANSI “NAS995-1996” (American National Standards Institute), pela Associação Alemã de Normas Técnicas “DIN 66025” e também pela EIA (Electronics Industry Association) no caso da indústria americana. As normas estabelecem os princípios básicos da programação CNC e indica o formato básico do programa, de modo que um conjunto de comandos compostos de palavras-chave possa dar instruções para o sistema de controle e as instruções podem referir-se a uma movimentação específica dos eixos da máquina, a uma indicação de sentido de giro do eixo-árvore ou mesmo a um pedido de troca de ferramenta. (SPECK, 2005)

2.8 Geração de Programa CNC

A operação das máquinas CNC requer a execução de uma série de atividades de suporte. Entre estas atividades está a elaboração do programa CNC. Para se obter uma produção eficiente com máquinas CNC a atividade de elaboração do programa, entre outras atividades de suporte, deve atender às exigências crescentes de redução de custos, diminuição dos tempos de fabricação e aumento da qualidade. Para tanto, é fundamental que os meios de apoio a essa atividade sejam eficientes e confiáveis (SHULZ et al, 1994).

Os conceitos envolvidos, os métodos e as técnicas disponíveis para execução da atividade de programação CNC incluem uma variedade de procedimentos que vão desde o método manual até o método altamente automatizado. Cada autor apresenta a sua classificação, com variações específicas. Groover (1987) e Lynch (1997), por exemplo, classificam as técnicas de programação em cinco tipos: programação manual, programação assistida por computador, programação MDI (Manual Data Input), programação via CAD/CAM e programação automatizada por computador.

2.8.1 Programação manual

Segundo Gibbs (1994), a programação manual refere-se à preparação de um programa sem a utilização de recursos computacionais para determinar trajetórias de ferramentas, pontos de intersecção de perfis, avanços, velocidades, etc.. Nesse tipo de programação as instruções de processamento são documentadas em um formulário chamado manuscrito do programa, que é uma listagem das posições da ferramenta em relação à peça que a máquina precisa seguir para executar o processamento. A listagem também pode incluir outros comandos com informações sobre velocidades, avanços, ferramental, etc.. Este tipo de programação é ideal para aplicações ponto a ponto simples e trabalhos de torneamento e fresamento que envolvam o processamento de peças geometricamente simples e que requeiram poucas operações (LYNCH, 1994).

2.8.2 Programação MDI

O sistema MDI (Manual Data Input - entrada manual de dados) é um procedimento no qual o programa CNC é inserido diretamente no comando da máquina-ferramenta. Conseqüentemente, o uso de sistemas de transferência de dados é desnecessário. O procedimento de programação é simplificado para permitir que, além dos programadores, os operadores de máquina também façam ou alterem o programa. O operador/programador insere os dados do programa e de comandos na unidade de controle da máquina.

Os sistemas MDI são entendidos como sendo o caminho para as pequenas fábricas introduzirem a tecnologia CNC nas suas operações, sem a necessidade de adquirir equipamentos especiais de programação e contratar programadores. Isso permite à fábrica fazer um investimento inicial mínimo, para iniciar a transição em direção à tecnologia CNC. É um sistema bastante adequado para ferramentarias e empresas que prestam serviços de usinagem, onde o *overhead* dos sistemas CAM ou CAD/CAM pode não ser aceitável. O uso eficiente do sistema dita que a programação da próxima peça seja executada enquanto se esteja usinando uma outra peça. Isso reduz o tempo de troca de um trabalho para outro (LYNCH, 1997).

É fundamental observar que nem todos os comandos CNC têm essa característica. Ainda no campo da programação MDI, existem as "máquinas

eletrônicas" que além de poderem ser programadas via MDI, possuem um controle com ciclos fixos, podem ser operadas manualmente e também tem recursos para serem programadas via *teach mode*. O operador usina a primeira peça conduzindo a máquina como se esta fosse convencional e os movimentos são gravados automaticamente no controle. Os dados são compilados num programa e armazenados no computador, permitindo a execução da segunda peça e peças subseqüentes no *teach mode* ou num disquete para uso futuro. (MASON, 1995 apud SIMOM)

2.8.3 Programação assistida por computador - CAM

Na programação assistida por computador muito do trabalho de cálculo requerido na programação manual é automatizado. Para peças com geometrias complexas ou trabalhos com muitas etapas de processamento, o uso do computador resulta em economias significativas de tempo de programação. A escolha entre programação manual e programação assistida por computador depende do tipo e complexidade das peças produzidas, do número de eixos programados em cada máquina CNC, do volume de programas CNC elaborados por período e do tempo médio de elaboração dos programas (LYNCH, 1997).

2.8.4 Programação CNC via CAD/CAM

Este tipo de programação é uma forma avançada da programação assistida por computador e nele um sistema gráfico interativo equipado com software de programação CNC é usado para facilitar a atividade de programação. Neste método o programador trabalha numa estação CAD/CAM para selecionar ferramentas, métodos e procedimentos para usinar a peça projetada no CAD. Os sistemas de programação CNC com base em sistemas CAD/CAM foram criados para solucionar as falhas da programação manual. São concebidos para programar tanto peças simples como complexas, de forma mais rápida, mais fácil e com um grau mais alto de precisão. Suas aplicações são bem sucedidas nas indústrias de fabricação de moldes e aeroespacial, que trabalham com usinagem de peças tridimensionais complexas e cujos programas são muito extensos (LYNCH, 1994). Segundo Anderl et al (1998), podem ocorrer neste tipo de programação problemas relacionados à

confiabilidade de transferência dos dados geométricos do sistema CAD para o sistema CAM, à velocidade de cálculo e confiabilidade das trajetórias geradas e à complexidade do processo em si.

2.8.5 Programação automatizada por computador

Este tipo de programação automatiza a atividade de programação completa, usando um software que é capaz de tomar decisões lógicas sobre como a peça deva ser usinada. Na programação CNC usando o sistema CAD/CAM, neste tipo de programação muitos aspectos do procedimento foram automatizados. O objetivo aqui é tornar possível automatizar o procedimento completo da programação CNC. A interação entre esta atividade e o CAPP, o Planejamento do Processo Assistido por Computador (Computer Aided Process Planning) é fundamental para o sucesso da técnica (LYNCH, 1997).

2.8.6 Programação do CNC

O programa CNC é formado por várias linhas de instruções. Cada linha é denominada bloco e deve conter uma instrução lógica a ser executada pela máquina, sendo que em cada bloco são inseridas, em seqüência lógica, uma ou mais palavras. A palavra é um código alfanumérico no qual a letra significa o endereço e o número define a magnitude ou variação de um parâmetro. O endereço define o tipo de função que está sendo utilizada. Cada bloco possui um formato que deve ser seguido e, normalmente, inicia com uma letra (N) e um número seqüencial, seguido por funções de interpolação, coordenadas, avanço, rotação e funções miscelâneas. O sinal "%" é usado por muitos controles para determinar o início e fim dos programas CNC.

Basicamente dois tipos de informação devem ser enviadas ao CNC que são a trajetória desejada (dados geométricos) e a comutação (dados tecnológicos). As informações referentes à trajetória dizem respeito ao posicionamento, ao tipo de movimento que deverá ser executado pela máquina (linear, circular, helicoidal, *spline*, etc.), a direção e o sentido deste movimento, a seqüência de movimentos (na mesma seqüência que são apresentados os dados) e os endereços normalmente utilizados são X, Y, Z, A, B, C, U, V, W, I, K, G e R. As informações de

comutação dizem respeito às condições de usinagem envolvidas no processo e pode-se citar como exemplo a escolha do tipo de ferramenta, a mudança de ferramenta, a velocidade e o sentido de rotação, os avanços, etc.

Os comandos utilizados na programação CNC são conjuntos de instruções compostas por um identificador e os parâmetros. Pode-se citar os seguintes identificadores:

- **Instrução N:** Mostra o número seqüencial das linhas do programa; se não for utilizado desvios de sub-rotina, esta numeração não é obrigatória ou necessária.
- **Instrução G:** Define os tipos de movimentos da ferramenta e existem vários parâmetros a serem utilizados; é a instrução mais utilizada na programação CNC.
- **Instrução F:** Tem a função de determinar o avanço da ferramenta em relação à peça.
- **Instrução S:** Define a velocidade do fuso principal.
- **Instrução T:** Determina o tipo de ferramenta a ser utilizado.
- **Instrução O:** Numeração de programas e subprogramas.
- **Instrução M:** Funções diversas, tipo miscelânea.
- **Instrução B:** Programação de funções específicas da máquina e funções adicionais.

2.9 Formas de acionamento

Entende-se por acionamento o conjunto composto pelo motor e seu sistema de partida, mais aparelho eletrônico de controle envolvido e dispositivo de movimentação, sendo que um acionamento elétrico é um sistema capaz de converter de forma controlada energia elétrica em energia mecânica. (WEG, 2005)

Estes sistemas são utilizados para acionar componentes de máquinas ou equipamentos que requeiram algum tipo de movimento controlado e são formados normalmente pela combinação dos seguintes elementos:

- Conversor eletro-mecânico = motor CC ou CA: converte energia elétrica em energia mecânica.
- Transmissão mecânica conversora = polia, correia ou coroa/pinhão: adapta a velocidade e a inércia entre motor e máquina (carga).
- Transformadores mecânicos = engrenagens cilíndricas ou polias.

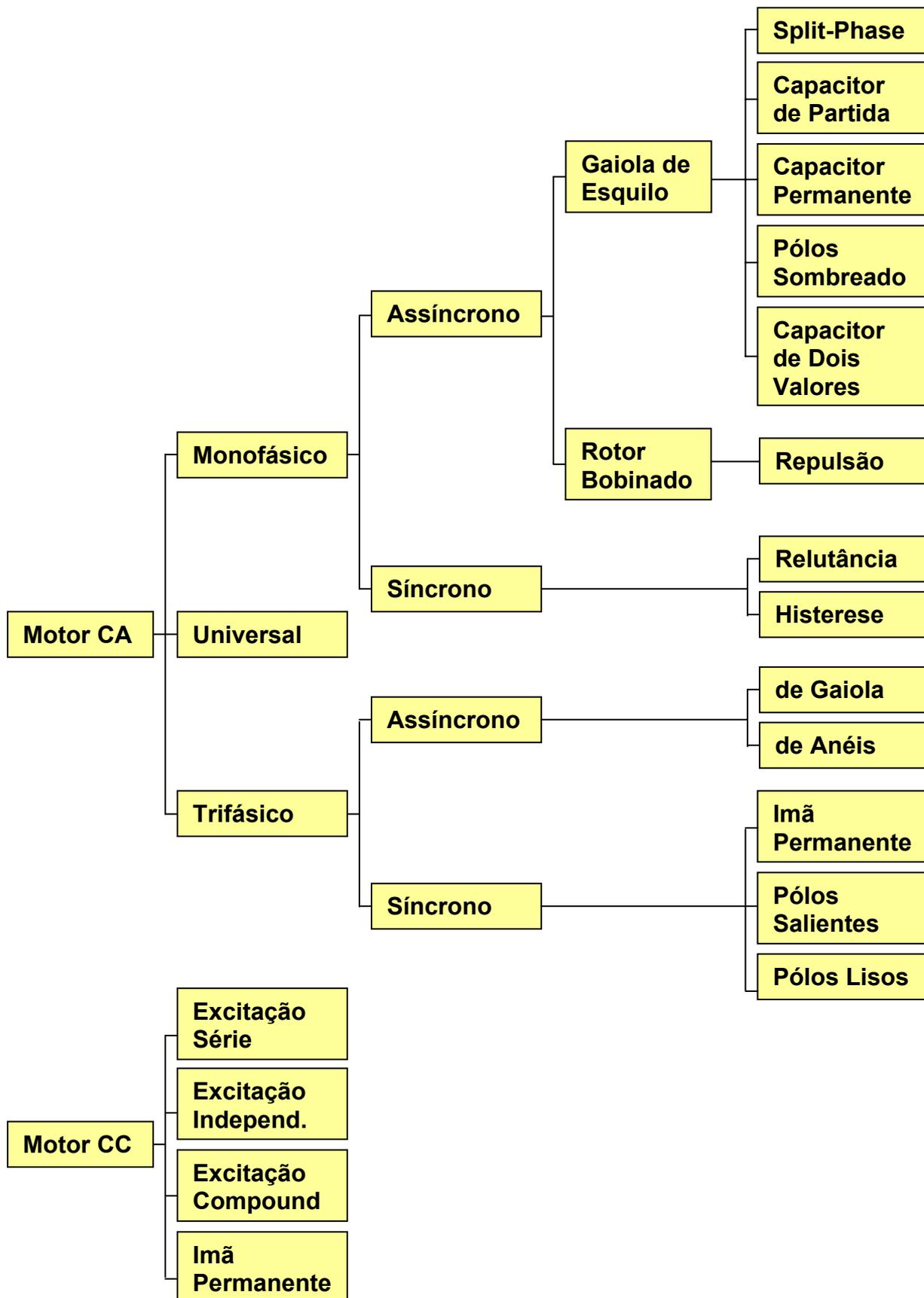
- Sensor de rotação: tacogerador ou encoder.
- Dispositivo eletrônico: comanda e/ou controla a potência elétrica entregue ao motor (controle eletrônico de rotação), para manter a velocidade constante.

Têm-se como as exigências de acionamento de avanço a alta precisão de posicionamento, homogeneidade e constância de velocidade, baixa inércia, alta dinâmica sem “overshoot”, alta capacidade de sobrecarga, movimentos e paradas rápidas com precisão, reversão nos quatro quadrantes e velocidade concêntrica para baixa rotação. (WEG, 2005)

O processo de seleção de um acionamento elétrico corresponde à escolha de um motor que possa atender a pelo menos três requisitos básicos:

- Fonte de alimentação: tipo, tensão, frequência, simetria, equilíbrio, etc.
- Condições ambientais: agressividade, periculosidade, altitude, temperatura, etc.
- Exigências da carga e condições de serviço: potência solicitada, rotação, esforços mecânicos, configuração física, ciclos de operação, confiabilidade, etc.

Existem dois tipos de motores elétricos no que se refere ao tipo de tensão de alimentação, os motores de corrente alternada (CA) e motores de corrente contínua (CC). Na figura 7 é mostrado a divisão básica dos motores elétricos.



Fonte: WEG. Módulo 2: Variação de Velocidade (2005)

FIGURA 7 – Universo dos Motores Elétricos

Os motores mais amplamente utilizados nos acionamentos elétricos são os motores de indução monofásicos e trifásicos. Estes motores quando alimentados com tensão e frequência constantes, sempre que não estejam operando a plena carga (potência de carga igual à potência nominal do motor), estarão desperdiçando energia.

É importante ressaltar também o fato de que um motor de indução transforma em energia mecânica aproximadamente 85% de toda a energia elétrica que recebe e os 15% restantes são desperdiçados. Sendo assim, o acionamento elétrico de máquinas e equipamentos mecânicos por motores elétricos é também um assunto de grande importância econômica. Em acionamentos industriais, avalia-se que de 70 a 80% da energia elétrica consumida pelo conjunto de todas as indústrias seja transformada em energia mecânica através de motores elétricos. (WEG, 2005)

2.9.1 Motor CA Assíncrono

Os motores assíncronos ou de indução, por serem mais robustos e mais baratos, são os motores mais largamente empregados na indústria. Nestes motores, o campo girante tem a velocidade síncrona, como nas máquinas síncronas.

Teoricamente, para o motor girando em vazio e sem perdas, o rotor teria também a velocidade síncrona. Entretanto ao ser aplicado o conjugado externo ao motor, o seu rotor diminuirá a velocidade na justa proporção necessária para que a corrente induzida pela diferença de rotação entre o campo girante (síncrono) e o rotor, passe a produzir um conjugado eletromagnético igual e oposto ao conjugado externamente aplicado. (WEG, 2005)

A rotação do eixo do motor é expressa por:

$$n_s = \frac{120 \times f}{2p} \times (1 - s)$$

Onde: n_s = Rotação síncrona (rpm);

f = Frequência (Hz);

p = Número de pares de pólos;

s = Escorregamento.

Basicamente os motores assíncronos se subdividem em dois tipos principais, que são: (WEG, 2005)

- Rotor de Gaiola: Os motores deste tipo também são comumente chamados de motores de GAIOLA DE ESQUILO, pois as barras rotóricas tem a característica de serem curto-circuitadas, assemelhando-se a tal.
- Rotor Bobinado: O motor de anéis possui a mesma característica construtiva do motor de indução com relação ao estator, mas o seu rotor é bobinado com um enrolamento trifásico, acessível através de três anéis com escovas coletoras no eixo. Graças à característica do ajuste da curva de conjugado \times rotação em função do aumento da resistência rotórica pela inclusão de resistores externos, são estes motores largamente utilizados no acionamento de sistemas de elevada inércia e nos casos em que o conjugado resistente em baixas rotações seja alto comparativamente ao conjugado nominal. Por outro lado, para acionamentos com baixa inércia, estes motores podem apresentar correntes de aceleração reduzidas.

2.9.2 Motor CA Síncrono

Os motores síncronos são motores de velocidade constante e proporcional com a frequência da rede. Os pólos do rotor seguem o campo girante imposto ao estator pela rede de alimentação trifásica. Assim, a velocidade do motor é a mesma do campo girante. (WEG, 2005)

Basicamente, o motor síncrono é composto de um enrolamento estatórico trifásico que produz o que se designa de campo girante e de um rotor bobinado (de pólos salientes ou de pólos lisos) que é excitado por uma fonte CC, onde esta tensão CC de excitação gera um campo estacionário no rotor que interagindo com o campo girante produzido pelo enrolamento estatórico, produz torque no eixo do motor com uma rotação igual ao próprio campo girante.

O maior conjugado que o motor pode fornecer está limitado pela máxima potência que pode ser cedida antes da perda de sincronismo, isto é, quando a velocidade do rotor se torna diferente da velocidade do campo girante, ocasionando a parada do motor (tombamento). A excitação determina também as porcentagens de potência ativa e reativa que o motor retira da rede, para cada potência mecânica solicitada pela carga. (WEG, 2005)

Este tipo de motor tem a sua aplicação restrita a acionamentos especiais, que requerem velocidades constantes em função da carga (até o limite máximo de torque do motor). A sua utilização com conversores de frequência pode ser recomendada quando se necessita uma variação de velocidade aliada a uma precisão de velocidade mais apurada.

A rotação do eixo do motor (rotação síncrona) é expressa por:

$$n_s = \frac{120 \times f}{2p}$$

Onde: n_s = Rotação síncrona (rpm);

f = Frequência (Hz);

p = Número de pares de pólos.

As vantagens de utilização de motores CA em acionamentos de avanço são a inexistência do comutador (baixo índice de manutenção), menores custos, maiores potências limites, maiores velocidades, maior grau de proteção, menor relação peso/potência e menor momento de inércia, e sendo a principal desvantagem de utilização de motores CA, o custo do acionamento eletrônico. (WEG, 2005)

2.9.3 Motor CC

As máquinas de corrente contínua, em função do seu princípio de funcionamento, permitem variar a velocidade de zero até a velocidade nominal aliada com a possibilidade de se ter conjugado constante. Esta característica é de fundamental importância, pois dessa forma torna-se possível fazer o acionamento em várias aplicações que exigem ampla faixa de variação de velocidade com uma ótima regulação e precisão de velocidade, como acontece em máquinas de comando numérico. (WEG, 2005)

O sistema de acionamento por corrente contínua é ainda um sistema largamente utilizado, pois em muitas aplicações é necessário que se tenha uma ótima precisão de velocidade (até 0,01 %), principalmente nas aplicações de sincronismo entre vários motores.

Sendo um sistema específico e direcionado a aplicações dedicadas, os motores de corrente contínua são dimensionados de forma a ter as suas

características definidas especialmente ao acionamento, vindo com isto a acarretar em uma elevação dos custos de produção e ser considerado como uma máquina diferenciada, onde na maior parte das situações é produzida sob encomenda, para um trabalho específico. (WEG, 2005)

Para controle de acionamento, os motores CC são realimentados, isto é, possuem um tacogerador acoplado ao seu eixo que fornece informação da velocidade do motor com o intuito de melhorar a sua regulação de velocidade.

Outra característica destes motores é que possuem, em sua maioria, ventilação independente e classe de isolamento melhorada (classe F), para que permitam a sua operação em velocidades reduzidas sem problemas de sobre aquecimento e redução de sua vida útil. A rotação do motor de corrente contínua é expressa por:

$$n = \frac{U_A - (R_A \times I_A)}{k \times \Phi_m}$$

Onde: U_A = Tensão de armadura (Vcc);

I_A = Corrente de armadura (Acc);

R_A = Resistência de armadura;

k = Constante;

Φ_m = Fluxo magnetizante;

n = Rotação (rpm).

Os motores de corrente contínua permitem também a operação com rotações além da rotação nominal, utilizando-se o que se caracteriza por "ENFRAQUECIMENTO DE CAMPO", que é o aumento da rotação através da redução do fluxo magnetizante e conseqüente redução de torque.

As vantagens da utilização deste tipo de motor é que a velocidade pode ser controlada pelo campo ou pela armadura, possui baixa velocidade com alto conjugado, dispensando reduções mecânicas e melhorando a precisão. Possui boa rotação concêntrica em baixa rotação, alta dinâmica para aceleração e frenagem com baixo momento de inércia. (WEG, 2005)

Possui como desvantagens a comutação mecânica (coletor-escovas), em altas rotações o conjugado admissível para aceleração e frenagem deverá ser

reduzido, possui alto momento de inércia devido às características construtivas, possui perdas de energia devido ao atrito mecânico e comutação da corrente.

2.9.4 Servomotor

Servomotores são os motores utilizados nos servoacionamentos, onde os circuitos de alimentação dos servomotores encontram-se em uma unidade chamada servoconversor. Assim sendo, servoacionamento é o conjunto de servomotor e servoconversor, isto é, um sistema eletromecânico de controle de precisão. Os motores utilizados em servoacionamento podem ser de corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC), mas os servomotores CA apresentam uma precisão menor em relação aos servomotores CC. (WEG, 2005)

Os servomotores CA assíncronos possuem acionamentos reguláveis de alta dinâmica, possuem complexidade nos sinais de regulação de corrente devido à não linearidade dos acoplamentos entre as partes da máquina (exigência de sistemas microprocessados), possuem altos picos de conjugado e corrente, resultando em altas perdas de energia.

Os servomotores CA síncronos possuem apenas um só enrolamento (estator). Este estator é um ímã permanente de terras raras (samário, cobalto) com alta capacidade de armazenamento de energia magnética por volume, possui um rotor com baixa massa e, desta forma, causa baixo momento de inércia. Possui acionamento regulável através da eletrônica inversora. Esta máquina se comporta semelhante a um motor CC.

Comparando-se um servomotor CA síncrono com um servomotor CC de mesma velocidade, o peso do servomotor CA é cerca de 50% menor, o volume cerca de 20% a 50% menor e tem momento de inércia cerca de 60% menor; devido à comutação eletrônica não há limitação de corrente com a velocidade e por isso o conjugado permanecerá constante em toda a faixa de velocidade. (WEG, 2005)

Antes do advento dos dispositivos semicondutores de potência com capacidade de condução e bloqueio, dos materiais magnéticos de elevado magnetismo remanescente e força coercitiva como o Nd-Fe-B ou o Sm-Co, e dos microprocessadores de baixo custo, ocorridos nas últimas décadas do século XX, os motores de corrente contínua (CC) ocupavam o maior espaço das aplicações em servoacionamentos, pois eram os motores que permitiam o controle do torque com

mais facilidade e precisão. Hoje os Motores Síncronos de Ímã Permanente (MSIP), acionados por circuitos de eletrônica de potência e controlados por microprocessadores digitais, representam o estado da arte dos servoacionamentos. (WEG, 2005)

Os servoconversores necessitam de informações de posição e/ou velocidade para controle dos servomotores. Estas informações podem ser estimadas ou medidas. Nas aplicações de maior precisão, impõe-se o emprego de medição por meio de sensores, e os principais tipos são encoders, tacogeradores, resolvers ou imãs.

A tabela 1 mostra a diferença entre servoacionamento e acionamento convencional.

TABELA 1 – Diferenças entre Servoacionamento e Acionamento Convencional

Servoacionamento	Acionamento Convencional
<ul style="list-style-type: none"> • Grande controlabilidade de velocidade (1:100000) 	<ul style="list-style-type: none"> • Controlabilidade moderada (1:20 a 1:100)
<ul style="list-style-type: none"> • Realimentação de malha fechada (precisa) 	<ul style="list-style-type: none"> • Realimentação simples ou malha aberta
<ul style="list-style-type: none"> • Controle sobre o torque 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor controle do torque
<ul style="list-style-type: none"> • Elevada dinâmica: rápida aceleração e frenagem 	<ul style="list-style-type: none"> • Dinâmica moderada
<ul style="list-style-type: none"> • Elevada capacidade de sobrecarga 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor capacidade de sobrecarga
<ul style="list-style-type: none"> • Menor relação peso/potência 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior relação peso/potência
<ul style="list-style-type: none"> • Especificado pelo torque 	<ul style="list-style-type: none"> • Especificado pela potência

Fonte: www.umc.br

A tabela 2 apresenta a diferença entre servoacionamento em corrente contínua e servoacionamento em corrente alternada.

TABELA 2 – Diferenças entre Servoacionamento CA e CC

Motor CA	Motor CC
• Carcaça : alumínio aletado	• Carcaça: ferro fundido
• Comutação eletrônica através de transistores	• Comutação mecânica através de escova e coletor
• Manutenção reduzida	• Manutenção das escovas
• Velocidade até 6000 rpm	• Velocidade de até 3000 rpm (limitação por faiscamento e força centrífuga)
• Baixa relação peso potência	• Maior relação peso potência
• Sobrecarga de 2 a 5 vezes a corrente nominal	• Sobrecarga de 2 vezes a corrente nominal
• Enrolamento no estator, imã permanente no rotor e ímãs de Samário e Cobalto	• Enrolamento no rotor, imã permanente no estator e ímãs de ferrite
• Melhor dissipação térmica	• Dissipação térmica dificultada (ventilação forçada)
• Realimentação de velocidade e posição por sensor (encoder ou resolver)	• Realimentação de velocidade por tacogerador • Realimentação de posição por encoder
• Torque constante em toda a faixa de rotação	• Queda de torque em rotações elevadas

Fonte: www.umc.br

Os servomotores são utilizados nas mais diversas aplicações industriais, onde é exigida elevada dinâmica, controle de rotação, torque constante, precisão de velocidade e de posicionamento e estes são fatores decisivos para o aumento da qualidade e produtividade. Possuem todas estas características aliada a um baixo custo, elevada performance e robustez.

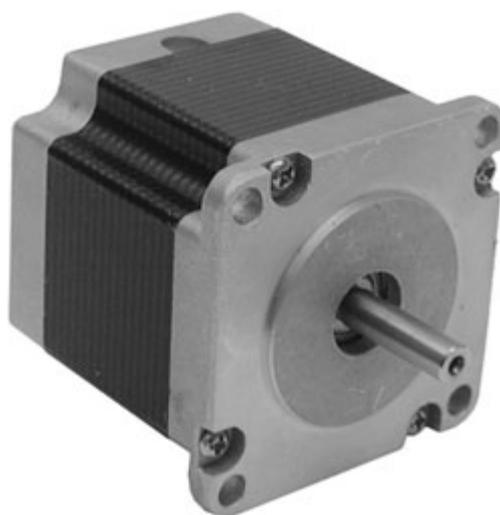
São geralmente utilizados em máquinas-ferramenta a comando numérico, sistemas de posicionamento, sistemas de transporte, robôs industriais e sistemas flexíveis de manufatura, mesas giratórias, misturadores, esteiras com paradas programadas, máquinas de embalagens, alimentador de prensas e máquinas têxteis, tornos de superfície, fresadoras e sistemas de dosagem.

2.9.5 Motores de Passo

Segundo Leite, o motor de passo é um tipo de motor elétrico que pode ser controlado por sinais digitais e é indicado em aplicações que requeiram um ajuste fino de posicionamento e em projetos de pequeno porte nas áreas de mecatrônica e robótica, pela sua precisão e pela facilidade do seu controle. Sua popularidade se deve à total adaptação deste dispositivo à lógica digital.

A principal vantagem do motor de passo é a possibilidade de controlar com precisão seus movimentos, sua posição e velocidade, sem a necessidade de realimentação da malha de controle. Enfatizando sempre que o preciso controle sobre seus movimentos é o que mais o diferencia dos demais motores elétricos e que a vantagem do motor de passos em relação aos outros motores é a sua estabilidade.

O motor de passo (*Stepping Motor*) (figura 8) é um transdutor que converte pulsos elétricos em movimento mecânico. (RIFFEL, 2002) Basicamente, converte energia elétrica em movimento controlado através de pulsos, o que possibilita o deslocamento por passo, onde o passo é o menor deslocamento angular. Devido ao seu tamanho e custo e pela facilidade do controle digital, tem aumentado muito o seu uso nos tempos atuais, podendo substituir os servomotores CC convencionais em alguns casos.



Fonte: <http://www.mercadobr.com.br/>

FIGURA 8 – Motor de Passo

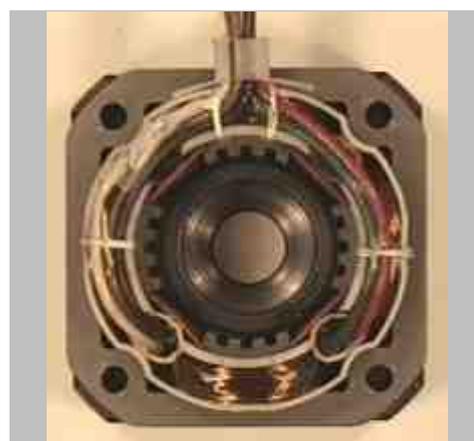
2.9.5.1 Definições para Motores de Passo

Conforme Leite, o motor de passo pode ser dividido em duas partes e para facilitar a compreensão do funcionamento deste motor utiliza-se os termos:

Rotor – É o conjunto eixo-imã que roda na parte móvel do motor (eixo girante).

Estator (figura 9) – É a trave fixa onde as bobinas são enroladas para gerar um campo magnético girante. A corrente só circula em um único sentido em cada uma dessas bobinas, isto é, cada uma das bobinas só pode ser polarizada em um único sentido.

O acoplamento entre o estator e o rotor é feito através de um sistema de engrenagens (figura 9), de modo a aumentar a precisão do motor diminuindo a angulação dos passos.



Fonte: http://recreio.gta.ufrj.br/grad/01_1/motor/

FIGURA 9 – Rotor com engrenagens e ímãs acoplados e Estator (com bobinas)

2.9.5.2 Tipos de Motores de Passo

Os motores de passo podem ser classificados da seguinte forma: (Motores de Passo)

- Relutância Variável - Apresenta um rotor com muitas polaridades construídas a partir de ferro doce, apresenta também um estator laminado. Por não possuir ímã, quando energizado apresenta torque estático nulo. Sendo assim, possui baixa inércia do rotor e não pode ser utilizado com carga inercial grande.
- Ímã Permanente - Apresenta um rotor de material alnico ou ferrite e é magnetizado radialmente e devido a isto, o torque estático não é nulo.

- Híbridos - É uma mistura dos dois anteriores e apresenta rotor e estator multidentados. O rotor é de imã permanente e magnetizado axialmente. Apresenta grande precisão, boa relação torque/tamanho e ângulos pequenos (0,9 e 1,8 graus). Para que o rotor avance um passo é necessário que a polaridade magnética de um dente do estator se alinhe com a polaridade magnética oposta de um dente do rotor.

2.9.5.3 Funcionamento Básico do Motor de Passo

Normalmente os motores de passo são projetados com enrolamento de estator polifásico, o que não foge muito dos demais motores. O número de pólos é determinado pelo passo angular desejado por pulsos de entrada. Os motores de passo têm alimentação externa. Conforme a quantidade de pulsos na entrada do circuito de alimentação, este oferece correntes aos enrolamentos certos para fornecer o deslocamento desejado.

Segundo Leite, os motores com imã permanente, além do número de fases do motor, existe outra subdivisão entre estes componentes que é a sua polaridade. Motores de passo unipolares são caracterizados por possuírem um center-tape entre o enrolamento de suas bobinas. Normalmente utiliza-se este center-tape (CT - terminal central) para alimentar o motor, que é controlado aterrando-se as extremidades dos enrolamentos.

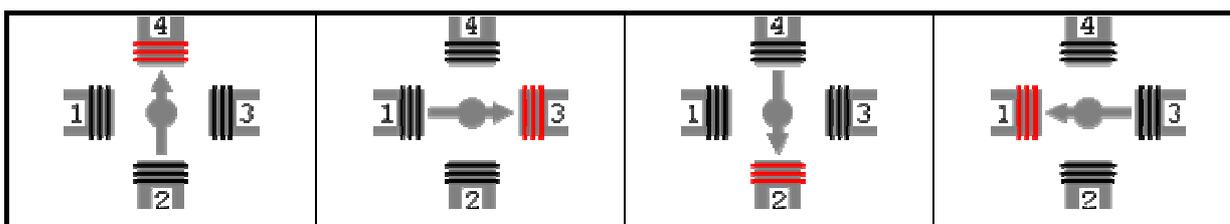
Diferentes dos unipolares, os motores bipolares exigem circuitos mais complexos. A grande vantagem em se usar os bipolares é prover maior torque, além de ter uma maior proporção entre tamanho e torque. Fisicamente os motores têm enrolamentos separados, sendo necessário uma polarização reversa durante a operação para o passo acontecer.

Para que um motor de passo funcione é necessário que sua alimentação seja feita de forma seqüencial e repetida. Não basta apenas ligar os fios do motor de passo a uma fonte de energia, mas é necessário ligá-los a um circuito que execute a seqüência requerida pelo motor. Um motor de corrente contínua, quando alimentado, gira no mesmo sentido e com rotação constante, ou seja, para que estes motores funcionem é necessário apenas estabelecer sua alimentação. Com o auxílio de circuitos externos de controle estes motores de corrente contínua poderão inverter o sentido de rotação ou variar sua velocidade. (SILVA, 2003)

Conforme Leite, existem três tipos básicos de movimentos: o de passo inteiro; o de meio passo; e o de micropasso. Isto serve tanto para o motor bipolar como para o unipolar. O de micropasso baseia-se no controle da corrente que flui por cada bobina multiplicado pelo número de passos por resolução.

A energização de uma e somente uma bobina de cada vez produz um pequeno deslocamento no rotor. Este deslocamento ocorre simplesmente pelo fato de o rotor ser magneticamente ativo e a energização das bobinas criar um campo magnético intenso que atua no sentido de se alinhar com as pás do rotor. Assim, polarizando de forma adequada as bobinas, pode-se movimentar o rotor somente entre as bobinas (passo inteiro).

Cada uma das bobinas do motor de passo pode ser acionada individualmente, gerando um campo magnético na sua direção, como sugere a figura 10 a seguir.



Fonte: http://br.geocities.com/gedaepage/Doc/MP_5fios.htm

FIGURA 10 – Movimentação do Motor de Passo

Logo, é possível controlar discretamente a direção e o sentido do campo magnético no estator do motor de passo.

Sendo o rotor um eixo magnetizado, ao ser submetido a um campo magnético este sofrerá ação de uma força no sentido do alinhamento do seu campo magnético com o campo externo. O mesmo fenômeno acontece com a agulha de uma bússola, que se alinha sempre na direção do campo magnético da Terra. (Controle de Motores de Passo Unipolares de Quatro Fases de Ímã Permanente)

Variando a direção do campo no estator, portanto, varia-se a posição do rotor. Note-se que diferentemente dos motores de corrente contínua, o acionamento de uma bobina do motor de passo não faz com que o motor gire a uma velocidade constante, mas apenas produz uma força para que o eixo alinhe-se em determinada posição.

No entanto, com apenas quatro bobinas o motor seria ainda muito impreciso, dando passos de 90 graus. Uma opção para reduzir esse passo seria ligar as 2

bobinas adjacentes simultaneamente, adicionando uma posição intermediária (entre as bobinas) nesse movimento. Essa estratégia de controle é conhecida como controle a meio passo. No entanto, a precisão do motor com o controle a meio passo seria ainda muito grosseira, dando agora passos de 45 graus. Na tabela 3 é mostrada uma comparação entre os motores de passo inteiro e meio passo.

TABELA 3 – Comparação entre Motor de Passo Inteiro e Meio Passo

Passo Inteiro	Meio Passo
• Gasta menos energia	• Gasta o triplo de energia
• Gira mais rápido	• Gira mais devagar
• É mais simples	• É mais complexo
• Possui maior torque	• Possui 30% menos torque
• Possui menos precisão	• Possui o dobro de precisão

Fonte: http://www.umc.br/~mmarques/umc_2004/cam/motor_2004.pdf

Para tornar o motor eficiente, acrescentou-se a esse arranjo um sistema de engrenagens de modo a diminuir o passo do motor. Assim, a cada volta do campo girante o rotor externamente girou apenas uma fração da circunferência completa.

Dependendo do tipo de motor de passo, sua precisão pode chegar a centésimos de graus. Grande parte dos motores de passo encontrados em periféricos de computador tem uma relação de 100 passos por volta, o que dá uma precisão de 3,6 graus com controle de passo completo, e de 1,8 graus com controle a meio passo.

Por se tratar de sinais digitais, fica fácil compreender a versatilidade dos motores de passo. São motores que apresentam uma gama de rotação muito ampla que pode variar de zero até 7200 rpm. Apresentam boa relação peso/potência; permitem a inversão de rotação em pleno funcionamento. Alguns motores possuem precisão de 97%, possuem ótima frenagem do rotor e podem mover-se passo-a-passo.

Segundo Leite, o sistema de controle se baseia em um circuito oscilador onde seria gerado um sinal cuja frequência estaria diretamente relacionada com a velocidade de rotação do motor de passo. Esta frequência seria facilmente alterada (seja por atuação em componentes passivos seja por meio eletrônico) dentro de um

determinado valor. Assim, o motor apresentaria uma rotação mínima e uma máxima. A função "Freio" se daria simplesmente pela inibição do sinal gerado pelo oscilador.

Ao circuito amplificador de saída cabe a função fornecer corrente elétrica as bobinas de forma segura, econômica e rápida. O circuito amplificador de saída é constituído de transistores e/ou dispositivos de potência que drenam corrente em torno de 500 mA ou mais. Motores de passo geralmente suportam correntes acima de 1,5 Ampère. O amplificador de saída é o dispositivo mais solicitado em um projeto de controle de motor de passo. Devido às variações de trabalho a que pode ser submetido o motor de passo, um amplificador mal projetado pode limitar muito o conjunto como um todo. Um exemplo destas limitações pode ser facilmente entendido pelo seguinte caso de aplicação: um motor de passo girando a altas rotações, repentinamente é solicitado a inverter sua rotação (como ocorre em máquinas CNC e cabeçotes de impressão). No momento da inversão as correntes envolvidas são muito altas e o circuito amplificador deve suportar tais drenagens de corrente.

O torque do motor de passo depende da frequência aplicada à alimentação. Quanto maior a frequência, menor o torque, porque o rotor tem menos tempo para mover-se de um ângulo para outro.

Segundo Leite, a faixa de partida deste motor é aquela na qual a posição da carga segue os pulsos sem perder passos; a faixa de giro é aquela na qual a velocidade da carga também segue a frequência dos pulsos, mas com a diferença de não poder partir, parar ou inverter, independente do comando.

Para a movimentação o mais indicado é o uso de correias dentadas de transmissão ao invés de engrenagens, devido ao fenômeno de ultrapassagem provocado pelo baixo amortecimento destes motores, que podem quebrar ou desgastar rapidamente os dentes. Mas deve-se sempre que possível utilizar a transmissão direta

2.9.5.4 Circuito de Controle

Os motores de passo se comportam de forma diferente dos outros motores, primeiramente por ele não girar livremente quando alimentado, mas como o próprio nome diz usam passos.

Para controlar o motor de passo é suficiente acionar seqüencialmente suas bobinas ligando-as e desligando-as de acordo com o movimento desejado. É possível controlar exatamente a velocidade e a posição do motor de passo dessa forma. (Controle de Motores de Passo Unipolares de Quatro Fases de Ímã Permanente)

No entanto, faz-se necessário um circuito que receba a lógica de controle do computador e ligue ou desligue cada bobina. O circuito responsável de converter sinais de passo e direção em comandos para os enrolamentos do motor é o controle lógico. Após esta fase de controle lógico é necessário o controle eletrônico que se encarrega de fornecer a corrente requerida pelos enrolamentos do motor.

As tabelas 4, 5 e 6 ilustram o funcionamento do motor de passo, mostrando a energização das bobinas pelos sinais de controle que são enviados pela porta paralela.

TABELA 4 – Motor de Passo Unipolar de Passo Inteiro

Passo	Bobina 4	Bobina 3	Bobina 2	Bobina 1	Exemplo
1	Ligada	Desligada	Desligada	Desligada	
2	Desligada	Ligada	Desligada	Desligada	
3	Desligada	Desligada	Ligada	Desligada	
4	Desligada	Desligada	Desligada	Ligada	

Fonte: http://br.geocities.com/gedaepage/Doc/MP_5fios.htm

Pode-se também excitar duas bobinas adjacentes, neste caso, elas serão ligadas simultaneamente, como mostra a tabela 5.

Note que nesse caso o campo magnético resultante será multiplicado pela raiz de dois. Logo, o torque do motor aumentará.

Outra vantagem desse algoritmo é que a bobina 2 é sempre o inverso da bobina 4, e a bobina 3 é sempre o inverso da bobina 1. Assim, é possível controlar o mesmo motor utilizando apenas dois sinais ao invés de quatro.

TABELA 5 – Motor Bipolar de Passo Inteiro

Passo	Bobina 4	Bobina 3	Bobina 2	Bobina 1	Exemplo
1	Ligada	Ligada	Desligada	Desligada	
2	Desligada	Ligada	Ligada	Desligada	
3	Desligada	Desligada	Ligada	Ligada	
4	Ligada	Desligada	Desligada	Ligada	

Fonte: http://br.geocities.com/gedaepage/Doc/MP_5fios.htm

Para demonstrar como funciona um motor bipolar de meio passo, as duas seqüências anteriores são misturadas a fim de reduzir o passo e aumentar a precisão, isto é demonstrado na tabela 6.

TABELA 6 – Motor de Meio Passo

Passo	Bobina 4	Bobina 3	Bobina 2	Bobina 1	Exemplo
1.a	Ligada	Desligada	Desligada	Desligada	
1.b	Ligada	Ligada	Desligada	Desligada	
2.a	Desligada	Ligada	Desligada	Desligada	
2.b	Desligada	Ligada	Ligada	Desligada	
3.a	Desligada	Desligada	Ligada	Desligada	
3.b	Desligada	Desligada	Ligada	Ligada	
4.a	Desligada	Desligada	Desligada	Ligada	
4.b	Ligada	Desligada	Desligada	Ligada	

Fonte: http://br.geocities.com/gedaepage/Doc/MP_5fios.htm

2.9.5.5 Aplicações dos Motores de Passo

Como os motores de passos têm movimentos precisos, qualquer equipamento que precise de precisão no movimento utilizaram estes motores. Pode-se citar por exemplo o controle de microcâmeras num circuito interno de vigilância, no auxílio de operadores, em clínicas radiológicas, para os mesmos orientarem o posicionamento das pessoas submetidas a uma radiografia, no posicionamento de uma mesa de trabalho em duas dimensões. (RIFFEL, 2002)

Podem ser utilizados em processos industriais de oxidação, plasma ou laser e em máquinas CNC de prototipação rápida. Em todas as aplicações citadas acima não existe a necessidade de alto torque (força), mas sim apenas sistemas de posicionamentos precisos.

2.9.5.6 Vantagens e Desvantagens na Utilização de Motores de Passo

Os motores de passos apresentam evidentes vantagens em função do seu tamanho, do custo reduzido e da total adaptação à lógica digital (o que permite o controle preciso da velocidade direção e distância), características de bloqueio, pouco desgaste e dispensa realimentação. (RIFFEL, 2002)

As desvantagens destes motores são muito poucas, mas pode-se citar a má relação entre potência e volume e principalmente controle relativamente complexo.

2.9.5.7 Driver de Controle do Motor de Passo

Apesar da porta paralela ser o dispositivo do microcomputador que se comunica com o meio exterior, ela não é projetada para controlar dispositivos de potência, sendo necessária uma interface ou "*driver*" de potência. Esta interface nada mais é que um amplificador de potência dos sinais emitidos pela porta paralela.

Drivers são circuitos lógicos que controlam os motores de passo, o *driver* fará a ponte entre o motor de passo e o microcomputador, convertendo os bits fornecidos em movimento. (FURQUIM, 2003)

No caso o *driver* utilizado possui apenas duas entradas digitais, uma entrada que representa o sinal de movimentação (pulso) e a outra entrada que representa o sinal de direção.

2.10 Aplicações de Motores de Passo em Máquinas CNC

Rego (2004) desenvolveu um trabalho com o objetivo da automação de um equipamento para a modelagem do perfil de temperatura no aquecimento na soldagem de topo, construído a partir de uma máquina de soldagem por pontos. Na automação foi utilizada uma fonte tiristorizada CA/CA para a alimentação, software de aquisição, controle e supervisão, fontes de alimentação, sistema para condicionamento de sinal e termopares. Foi desenvolvido, também, um sistema para controle de pressão, utilizando-se uma válvula pneumática acionada por motor de passo.

Sato (2002) desenvolveu um sistema de automação de ensaios estruturais, capaz de controlar velocidade de carregamento e deformações. O sistema é composto por um quadro isostático, cilindros de carga, bomba hidráulica elétrica e um sistema de aquisição de dados, sendo baseado na retro-alimentação. O programa computacional desenvolvido é ajustado com os parâmetros de velocidade, carregamento e tempo. Inicialmente a informação parte da célula de carga e é enviada ao sistema de aquisição de dados, que transforma as informações em dados digitais; o computador processa as informações e de acordo com os ajustes iniciais faz as correções nos motores de passo acoplados nas válvulas de pressão e vazão da bomba hidráulica. Ao final deste trabalho, chegou-se a um sistema automatizado para aplicação de cargas onde é possível determinar o histórico de carregamento desejado, ou então, o histórico de deformação pré-definido, eliminando-se do processo manual onde esses parâmetros são impossíveis de serem controlados satisfatoriamente.

Siqueira (2003) desenvolveu uma placa de circuito impresso e uma interface gráfica no ambiente Windows® para acionar os motores de passo de uma mesa X-Y (destinada a corte e solda de chapas metálicas), através da porta USB de um microcomputador rodando o programa AutoCAD®. A placa de circuito impresso possui cabos para ligar fisicamente a porta USB aos acionadores dos motores de passo. Os testes experimentais envolveram interpolação linear e circular, de modo a acionar os motores de passo, reproduzindo o projeto desenvolvido no AutoCAD®.

Silva (1998) apresentou uma bancada de acionamento de motor de passo de cunho didático com a utilização de duas técnicas de acionamento, uma em malha aberta e outra em malha fechada. A bancada de acionamento visa mostrar ao

usuário o funcionamento e características principais do acionamento do motor de passo sob condições de carga variável e influência de perturbações mecânicas externas.

Balduino (2001) relata a construção e ajuste de uma mesa de coordenadas ortogonal para atender ao processo de corte e solda na geração de geometrias complexas composta por segmentos de retas, arcos, círculos ou linhas de forma irregular. A técnica de construção adotada fez deste equipamento um modelo simples quanto à forma construtiva, operação e funcionamento, reduzindo o seu custo final. Quanto ao seu funcionamento, utilizou-se uma plataforma de trabalho a partir da estrutura do CAD, que permite a leitura e a interpretação de figuras geométricas, convertendo-as em sinais de pulsos elétricos para comandar os motores de passo dos eixos de movimento linear da mesa, na tarefa de corte e solda.

Postal (2000) realizou um trabalho que teve como objetivo o desenvolvimento e a implementação de um sistema CNC de baixo custo, baseado numa plataforma CAD. Utilizando um sistema CAD para controlar os motores de passo de uma mesa de coordenadas elimina-se a necessidade de uso de acionadores industriais para os motores. O sistema desenvolvido é capaz de receber como informação um desenho criado em CAD, o qual é processado e traduzido em pulsos para cada um dos eixos utilizados. Estes sinais são enviados à porta paralela a partir de onde o usuário faz a escolha do tipo de controlador a ser utilizado para os motores de passo da mesa de coordenadas.

Fedel (2004) apresentou o projeto de um alimentador de concepção relativamente simples e movimentos precisos para deficientes com restrições severas de movimentos. No desenvolvimento do trabalho constatou-se que uma mesa XY associada a um movimento rotacional pode realizar todos os movimentos típicos da coleta do alimento. Elaborou-se então um projeto de automação para a referida mesa, contemplando esses movimentos de forma otimizada. Utilizando o programa Excel da Microsoft®, construiu-se uma planilha de cálculo integrando as diversas planilhas de cálculo velocidade versus tempo das várias fases do movimento, que possibilitou simular as condições de projeto. Fisicamente o equipamento é composto da mesa XY projetada com elementos mecânicos padronizados e acionada por motores de passos operando em malha aberta,

comandados digitalmente por um microcontrolador de oito bits que controla os três movimentos envolvidos.

Ferreira (2003) desenvolveu um trabalho de planejamento de trajetórias e simulação que utiliza robôs manipuladores que empregam motores de passo como força motriz em cada junta. Tendo como dados a configuração do manipulador com suas articulações (juntas), barras, motores de passo e redutores, e uma trajetória ideal. Com complexidade é possível obter um nível de realismo bastante acentuado, que vai desde a trajetória desejada até o movimento realizado pelo robô. A saída desta simulação é visual, de tal forma que se possa observar o nível de concordância entre a trajetória desejada e a trajetória simulada (considerada como a realizada pelo robô). Exemplos teóricos são analisados e um exemplo prático de um braço com três barras e três motores é apresentado (configuração antropomórfica).

2.11 Prototipagem Rápida

Esta tecnologia, possibilita produzir modelos e protótipos diretamente a partir do modelo sólido 3D gerado de um sistema CAD. Ao contrário dos processos de usinagem, que subtraem material da peça bruta, para se obter a peça desejada, os sistemas de prototipagem rápida geram a peça a partir da união gradativa de líquidos, pós ou folhas de papel, camada por camada, a partir de seções transversais da peça obtidas do modelo 3D. As máquinas de prototipagem rápida produzem peças em plásticos, madeira, cerâmica ou metais e os dados para estas máquinas são gerados no sistema CAD.

Este método é muito peculiar, uma vez que eles agregam e ligam materiais, camada a camada, de forma a constituir o objeto desejado. Eles oferecem diversas vantagens em muitas aplicações quando comparados aos processos de fabricação clássicos baseados em remoção de material, tais como fresamento ou torneamento. (GORNI, 2003)

Os sistemas de prototipagem rápida têm um grande interesse no desenvolvimento de novos produtos, visto que numa fase inicial, eles servem para testar o "design" e a funcionalidade dos componentes projetados que é ideal para o emprego na produção de lotes pilotos; numa fase mais avançada é possível obter a partir deles ferramentas de produção, de menor custo e em menor tempo, destinadas à fabricação de pré-séries para ensaio dos componentes e para projeto

das ferramentas de produção definitiva e que nestas condições, ela deverá ser considerada como uma ferramenta básica num sistema de engenharia simultânea.

A prototipagem rápida possibilita a criação de protótipos concretos a partir de um projeto feito no CAD, ao invés de figuras bidimensionais, podendo ser utilizada para visualização do objeto projetado, testes da geometria proposta e simulações. Este processo permite maior rapidez e menor custo.

De fato, estima-se que a economias de tempo e de custo, proporcionada pela aplicação das técnicas de prototipagem rápida na construção de modelos sejam da ordem de 70 a 90%, possibilitando a produção de peças complexas que são impraticáveis ou impossíveis de construir com métodos tradicionais. (GORNI, 2003)

As técnicas de prototipagem rápida podem ser aplicadas às mais diversas áreas tais como, automotiva, aeronáutica, marketing, restaurações , educação, paleontologia e arquitetura.

Atualmente, existem pelo menos sete diferentes técnicas de prototipagem rápida disponíveis comercialmente, uma vez que tais tecnologias estão sendo cada vez mais usadas em aplicações não relacionadas diretamente com prototipagem. É preferível designa-las pelas expressões fabricação sólida com forma livre, manufatura automatizada por computador ou manufatura em camadas, sendo que, este último termo, descreve particularmente o processo de manufatura usado por todas as técnicas comerciais atuais. (GORNI, 2003)

Um pacote de software "fatia" o modelo do componente em CAD em várias camadas finas, com aproximadamente 0,1 mm de espessura, as quais são dispostas uma sobre a outra. O processo de prototipagem rápida é um processo "aditivo", combinando camadas de papel, cera ou plástico para se criar um objeto sólido. A natureza aditiva deste processo permite a criação de objetos com características internas complicadas que não podem ser obtidas através de outros processos como, por exemplo, usinagem (fresamento, furação, torneamento, etc.), que são processos "subtrativos", ou seja, removem material a partir de um bloco sólido.

Uma desvantagem da prototipagem rápida é o limite do volume do protótipo, geralmente limitado a 0,125 m³ ou até menos, dependendo do equipamento disponível.

Ainda é difícil fazer protótipos de metal, embora se acredite que isso deverá mudar num futuro próximo com o desenvolvimento da técnica, e no momento, as

técnicas convencionais de manufatura ainda são mais econômicas que as de prototipagem rápida, em se tratando de modelos de metal.

Segundo Gorni (2003) as etapas básicas do processo de prototipagem rápida são:

- Criação de um modelo CAD da peça que está sendo projetada;
- Conversão do arquivo CAD em formato STL, próprio para estereolitografia;
- Fatiamento do arquivo STL em finas camadas transversais;
- Construção física do modelo, empilhando-se uma camada sobre a outra;
- Limpeza e acabamento do protótipo.

Os principais sistemas de prototipagem rápida usados na fabricação de modelos são: (GORNI, 2003)

- Estereolitografia (SLA, Stereolithography): este processo pioneiro, patenteado em 1986, deflagrou a revolução da prototipagem rápida. Ele constrói modelos tridimensionais a partir de polímeros líquidos sensíveis à luz, que se solidificam quando expostos à radiação ultravioleta, e é construído sobre uma plataforma situada imediatamente abaixo da superfície de um banho líquido de resina epóxi ou acrílica. Uma fonte de raio laser ultravioleta, com alta precisão de foco, traça a primeira camada, solidificando a seção transversal do modelo e deixando as demais áreas líquidas, e a seguir, um elevador mergulha levemente a plataforma no banho de polímero líquido e o raio laser cria a segunda camada de polímero sólido acima da primeira camada. O processo é repetido sucessivas vezes até o protótipo estar completo. Uma vez pronto, o modelo sólido é removido do banho de polímero líquido e lavado, sendo os suportes retirados e o modelo introduzido num forno de radiação ultravioleta, para ser submetido a uma cura completa. Uma vez que a estereolitografia foi a primeira técnica bem sucedida de prototipagem rápida ela se tornou um padrão de avaliação (benchmark) para as demais, que surgiram.
- Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM, Laminated Object Manufacturing): nesta técnica camadas de material, na forma de tiras revestidas de adesivo, são grudadas umas nas outras formando-se o protótipo, sendo que o material original, consiste de bobinas de papel laminado com cola ativada pelo calor, e a partir daí, um rolo coletor avança a tira de papel sobre a plataforma de construção, onde há uma base feita de papel e fita com espuma nas duas faces.

A seguir, um rolo aquecido aplica pressão para fixar o papel à base e uma fonte de raio laser com alta precisão de foco corta o contorno da primeira camada sobre o papel e então quadricula a área em excesso, ou seja, o espaço negativo do protótipo. Esse quadriculado rompe o material extra, tornando fácil sua remoção durante o processamento posterior. O material em excesso proporciona um excelente suporte para projeções, saliências e seções com paredes finas durante o processo de construção e após o corte da primeira camada a plataforma é abaixada, liberando o caminho para que o rolo coletor avance a tira de papel e exponha material novo, então a plataforma se eleva até um ponto ligeiramente inferior à altura original, o rolo aquecido liga a segunda camada a primeira, e a fonte de raio laser corta a segunda camada. Este processo é repetido tantas vezes quantas forem necessárias para construir a peça, a qual apresentará textura similar à de madeira, uma vez que, os modelos são feitos de papel, eles devem ser selados e revestidos com tinta ou verniz para se evitar eventuais danos provocados pela umidade. Os mais recentes desenvolvimentos deste processo, permitem o uso de novos tipos de materiais, incluindo plástico, papel hidrófobo e pós cerâmicos e metálicos, sendo estes materiais pulverulentos e geram no final do processo uma peça "verde" que deve ser posteriormente sinterizada, para que se alcance máxima resistência mecânica.

- Sinterização Seletiva a Laser (SLS, Selective Laser Sintering): esta técnica, patenteada em 1989, usa um raio de laser para fundir, de forma seletiva, materiais pulverulentos, tais como náilon, elastômeros e metais, num objeto sólido. As peças são construídas sobre uma plataforma a qual está imediatamente abaixo da superfície de um recipiente preenchido com o pó fusível por calor, em que o raio laser traça a primeira camada, sinterizando o material. A plataforma é ligeiramente abaixada, reaplica-se o pó e o raio laser traça a segunda camada. O processo continua até que a peça esteja terminada, e o pó em excesso ajudará a dar suporte ao componente durante sua construção.
- Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM, Fused Deposition Modeling): aqui filamentos de resina termoplástica aquecida são extrudadas a partir de uma matriz em forma de ponta que se move num plano X-Y. A matriz de extrusão controlada deposita filetes de material muito fino sobre a plataforma de construção, formando a primeira camada do componente, a plataforma é mantida sob uma temperatura inferior à do material, de forma que a resina termoplástica

endurece rapidamente. Após esse endurecimento, a plataforma se abaixa ligeiramente e a matriz de extrusão deposita uma segunda camada sobre a primeira. O processo é repetido até a construção total do protótipo e são construídos suportes durante a fabricação para segurar o protótipo durante sua fabricação. Tais suportes são fixados ao protótipo, usando-se um segundo material, mais fraco, ou uma junção perfurada. As resinas termoplásticas adequadas a esse processo incluem poliéster, polipropileno, ABS, elastômeros e cera usada no processo de fundição por cera perdida.

- Cura Sólida na Base (SGC, Solid Ground Curing): é um processo bastante similar a estereolitografia, pois ambos usam radiação ultravioleta para endurecer, de forma seletiva, polímeros fotossensíveis. Contudo, ao contrário da estereolitografia, este processo cura uma camada inteira de uma vez. Em primeiro lugar, a resina foto-sensível é borrifada sobre a plataforma de construção e a seguir, a máquina gera uma foto-máscara (como um estêncil) correspondente à camada a ser gerada. Esta foto-máscara é impressa sobre uma placa de vidro acima da plataforma de construção, usando-se um processo similar ao das fotocopiadoras. Posteriormente, a máscara é exposta à radiação ultravioleta, a qual passa apenas através das porções transparentes da máscara, endurecendo seletivamente as porções desejadas de polímero correspondentes à camada atual e após a cura da camada, a máquina succiona por vácuo o excesso da resina líquida e borrifa cera em seu lugar para dar suporte ao modelo durante sua construção. A superfície superior é fresada de forma a ficar plana e o processo é repetido para se construir a próxima camada. Assim que a peça ficar pronta, é necessário remover a cera nela presente, através de sua imersão num banho de solvente, e sendo máquinas de grande porte pode-se produzir modelos de grande tamanho.
- Impressão por Jato de Tinta (MJT, Multi Jet Modeling; BPM, Ballistic Particle Manufacturing): ao contrário das técnicas expostas anteriormente, esta aqui se refere a uma classe inteira de equipamentos que usam a tecnologia de jato de tinta. Os protótipos são construídos sobre uma plataforma situada num recipiente preenchido com material pulverulento, tendo um cabeçote de impressão por jato de tinta que "imprime" seletivamente um agente ligante, que funde e aglomera o pó nas áreas desejadas e o pó que continua solto permanece na plataforma para dar suporte ao protótipo que vai sendo formado. A plataforma é ligeiramente

abaixada, adiciona-se mais material pulverulento e o processo é repetido e ao término do processo, a peça "verde" é sinterizada, removendo-se o pó que ficou solto, e podendo ser usados, para isto, pós de materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos.

- **Conformação Próxima ao Formato Final via Laser (LENS, Laser Engineered Net Shaping):** processo relativamente novo, que apresenta a vantagem de produzir protótipos de metal plenamente densos, com boas propriedades metalúrgicas e sob velocidades razoáveis de construção. Aqui um gerador de raio laser de alta potência é usado para fundir pó metálico fornecido coaxialmente ao foco do raio laser, através de um cabeçote de deposição, onde o raio laser passa através do centro do cabeçote e é focado para um pequeno ponto através de uma lente ou conjunto e lentes. Uma mesa X-Y é movida por varredura de forma a gerar cada camada do objeto. O cabeçote é movido para cima à medida que cada camada é completada, onde o raio laser pode ser conduzido até a área de trabalho através de espelhos ou fibra ótica. Os pós metálicos são fornecidos e distribuídos ao redor da circunferência do cabeçote por gravidade ou através de um gás portador inerte pressurizado. Mesmo nos casos onde não se necessitar de uma corrente de gás para se transportar o pó metálico é necessário ter uma corrente de gás inerte para se proteger a poça de metal líquido do oxigênio atmosférico, de forma a se garantir as propriedades metalúrgicas e promover melhor adesão entre camadas através de melhor molhamento superficial. Podem ser usados pós de diversas ligas metálicas, tais como aço inoxidável, inconel, cobre, alumínio e titânio. A potência do gerador de raio laser, varia conforme o material usado, taxa de deposição e outros parâmetros, podendo oscilar desde algumas centenas até 20.000 watts ou mais. Os protótipos produzidos requerem usinagem para acabamento, apresentando densidade plena, boa microestrutura e propriedades similares ou melhores ao metal convencional.

Todas estas técnicas de prototipagem rápida são capazes de produzir peças com geometria complexa e formas que são impraticáveis ou impossíveis, ou mesmo caras para construir com sistemas tradicionais.

Há uma outra forma de se obter o protótipo e é conhecida como prototipagem através de CNC. A usinagem é feita em uma máquina-ferramenta CNC, a partir dos dados gerados num sistema CAD/CAM, onde as instruções de programação para a fabricação da peça modelada no computador são transferidas para a máquina

ferramenta, os materiais mais utilizados para isto é o plástico, borracha, acrílico, nylon, madeira, outros compostos ou ainda materiais metálicos.

2.12 Sistemas Flexíveis de Produção

Automação pode ser definida como uma tecnologia constituída de aplicações mecânicas, eletrônicas e sistemas baseados em computador para operação e controle da produção (GROOVER, 2001). Os elementos de um sistema de produção automatizado pode ser separado em duas categorias: sistema automatizado de manufatura e sistema de suporte computadorizado a manufatura.

O sistema de manufatura automatizado pode ser classificado em três tipos básicos: automatização fixa, automatização programável e automatização flexível. (GROOVER, 2001)

Um sistema flexível de manufatura é um conjunto de equipamentos composto basicamente por diferentes tipos de máquinas-ferramenta de controle numérico e de robôs, sendo estes particularmente destinados a carga, descarga e movimentação dos materiais em cursos de produção entre os equipamentos que fazem a usinagem propriamente dita. Habitualmente, os sistemas de automação flexível são usados na produção em pequena escala, como de bens de capital e, no limite, podem prescindir quase completamente da atividade humana para seu funcionamento regular. Trata-se, nesse caso, de uma automação quase total da produção em pequena escala (TAUILE, 2001).

Do desenvolvimento da automação flexível resulta uma nova e crescente importância da noção de economia de escopo: a facilidade de reprogramação faz com que um mesmo equipamento ou conjunto, de equipamentos possam ser utilizados na produção de diferentes produtos ou de produtos similares, mas com diferentes especificações. Isso implica, potencialmente, uma economia de investimentos necessários à produção de bens com especificações técnicas razoavelmente similares, mas que não têm individualmente uma demanda e, conseqüentemente, um volume muito grande e estável de produção prevista que justifique a adoção da automação rígida.

Vários autores desenvolveram uma série de estudos com a finalidade de identificar as prioridades competitivas que a manufatura deve possuir para desenvolver e sustentar, a longo prazo, uma vantagem competitiva (TAUILE, 2001).

Corrêa & Gianesi (1993) e Slack (1993), destacam como as mais importantes prioridades: custo, qualidade, velocidade de entrega, confiabilidade de entrega e flexibilidade.

Bolwijn & Kempe (1990) sugerem, que os sistemas de manufatura na década de 90 devem se basear em: eficiência, qualidade, flexibilidade e inovação.

Já para Hazeltine & Baragallo (1990) o desenvolvimento de uma estratégia de manufatura deve considerar os seguintes elementos estratégicos necessários para competir no mercado quais sejam, flexibilidade, integração tecnológica e recursos humanos.

Segundo Martins (1993) as prioridades competitivas impuseram aos sistemas de manufatura um novo paradigma produtivo baseado em qualidade, flexibilidade e integração.

Todos os autores acima citam a flexibilidade como uma das necessidades para uma empresa ser competitiva nos dias atuais, e flexibilidade é a capacidade dos sistemas de produção responderem eficazmente a mudanças não planejadas. Estas mudanças tanto podem ocorrer na demanda por produtos, no fornecimento de insumos, como no processo produtivo propriamente dito.

Hazeltine & Baragallo (1990) afirmam que a flexibilidade é alcançada através da redução dos tempos de preparação de máquinas, treinamento de funcionários, eficiente *layout* de equipamentos, e utilização da engenharia simultânea.

Segundo Corrêa & Gianesi (1993) para estar preparado para estas mudanças, o sistema de produção deve desenvolver cinco tipos de flexibilidade:

- flexibilidade de novos produtos: habilidade de incluir ou alterar produtos
- flexibilidade de mix: habilidade de produzir determinado subconjunto da linha de produtos em determinado intervalo de tempo
- flexibilidade de volumes: habilidade de alterar os níveis agregados de produção de forma eficaz
- flexibilidade de entrega: habilidade de alterar as datas de entrega dos pedidos
- flexibilidade de robustez: habilidade do sistema continuar funcionando ou retomar o funcionamento.

2.13 Sistemas Semelhantes Analisados

Algumas empresas necessitavam das vantagens da máquina comandada numericamente, mas não dispõe do capital necessário á aquisição dos equipamentos convencionais deste tipo. Com a diminuição do preço dos computadores pessoais, ocorrida em meados da década de 90, começou a tomar-se economicamente viável a fabricação de máquinas CNC comandadas por PCs. O sucesso e a proliferação dessas máquinas, hoje denominadas “PC Based” deve-se em grande parte á melhoria e o aumento da confiabilidade dos motores de passo. Esses motores, além do baixo custo, facilitam a lógica de programação, pois trabalham no sistema de malha aberta, dispensando dispositivos de monitoramento e retro-alimentação.

Existem atualmente no mercado internacional, muitos softwares para o controle de motores de passo, cuja proposta é serem eficientes, fáceis de usar e de baixo custo. Um estudo sumário sobre estes softwares, com a finalidade de seleção dos mesmos para a utilização em uma mesa de coordenadas para oxicorte e plasma demonstrou que de uma maneira geral nenhum deles atende satisfatoriamente os requisitos necessários a essa aplicação. Tendo em vista a necessidade e a carência de informações por parte dos projetistas e desenvolvedores de softwares sobre as reais necessidades dos usuários de equipamentos de corte CNC.

Com a análise de alguns softwares, foi levantado os principais requisitos técnicos destes programas para que possam satisfazer eficazmente ás operações de corte.

Alguns requisitos gerais que os softwares de controle de motores de passo deveriam possuir:

- Rodar sobre o sistema operacional MS-DOS, LINUX e Windows 98, ME e XP;
- Possuir instalador;
- Ser de fácil configuração;
- Ser capaz de gerar pulsos através da porta paralela em freqüências superiores a 25 kHz;
- Possuir um layout lógico e simples, que possa ser operado por profissionais de baixo nível de escolaridade;
- Possuir a capacidade de interpretar a linguagem ISO do tipo G-Code;

- Plotar a superfície de trabalho e posicionar nela a peça, ou arranjo de peças a partir da importação do G-code;
- Possuir preço baixo em relação aos demais softwares CAD-CAM.
- Possibilitar a alteração manual do código importado, aceitando recursos como copiar e colar;
- Possibilitar movimentação da peça nos eixos X e Y (Offset);
- Possibilitar executar escalas no código importado;
- Ser capaz de localizar e substituir partes do código importado;
- Mostrar a peça a ser cortada e a posição atual da ferramenta durante o trabalho;
- Possuir uma maneira fácil de ajuste das velocidades de corte e deslocamento, inclusive durante a operação;
- Mostrar as velocidades de corte em uso;
- Possibilitar o controle manual da ferramenta (jogging);
- Realizar e ajustar automaticamente a velocidade de deslocamento, compensando o aumento de velocidade produzido durante as interpolações de eixos;
- Mostrar as coordenadas atuais da ferramenta;
- Trabalhar com os sistemas absoluto e incremental de coordenadas;
- Possuir teclas para acionamento de relés (fluido refrigerante, eixos de ferramentas, acionamento de plasma, oxigênio de corte, etc;)
- Possibilitar fácil configuração das portas de comunicação;
- Possuir uma maneira fácil e clara de configuração do acionamento (pulsos/mm, dimensões dos eixos, etc.)
- Trabalhar com os sistemas métrico e inglês de unidades;
- Possibilitar a impressão do código e da superfície de trabalho, com as respectivas peças, com os dados importantes para a operação como o nome do arquivo, processo e material a serem utilizados;
- Possuir um banco de dados configurável com materiais e velocidades recomendadas para que estas sejam carregadas automaticamente, no caso do código importado não informar esse dado;
- Possuir meio de inversão das coordenadas dos motores;
- Possuir um banco de dados com formas básicas onde haja possibilidade de geração desses formatos nas dimensões definidas pelo usuário;

- Possuir um sistema de simulação rápida da operação, com velocidade controlada pelo usuário;
- Possibilitar o retrocesso da ferramenta pelo mesmo caminho de avanço, ao invés de retomo somente á linha anterior do código;
- Possibilitar a qualquer momento uma pausa imediata no processo, com possibilidade de retomo sem que haja perda de passos.
- Possibilidade de execução de rampas de aceleração e desaceleração para proporcionar um maior aproveitamento das curvas de torque dos motores.
- Estimar a duração do trabalho;
- Alerta visual e sonoro para peças com dimensões maiores que da superfície de trabalho;
- Possibilitar o avanço passo-a-passo, ou a cada linha do código;
- Possibilitar a utilização de funções macro ou sub-rotinas criadas pelo usuário.
- Salvar o código editado pelo usuário;
- Possibilidade de compensação de folga nas inversões de sentido de movimento;
- Gravar uma ou mais configurações para que o mesmo programa possa ser utilizado em mais de um equipamento sem que haja necessidade de re-configuração manual;
- Possibilitar a entrada de sinal para o comando da partida, pausa, retrocesso, parada de emergência e relés;
- Manual em português com exemplos práticos;
- Ajuda em português;

Dentre os inúmeros requisitos citados, pode-se destacar como uma deficiência geral dos programas: a impossibilidade de retroceder a ferramenta pelo caminho exato do avanço, fácil configuração e possibilidade de acionamento dos comandos básicos através de dispositivos na máquina. Embora os requisitos levantados já esteja contemplados pelos programas existentes no mercado, não conseguiu-se encontrar nenhum que satisfizesse á todos.

3 METODOLOGIA

3.1 Interpolação Linear

Quando se quer movimentar um único eixo linearmente em qualquer direção, a máquina CNC move o eixo especificado causando um movimento retilíneo na direção desejada. Este tipo de movimento absolutamente retilíneo é conseguido exclusivamente quando se movimenta apenas um único eixo.

Para movimentar dois eixos simultaneamente, fazendo uma linha reta inclinada em relação ao eixo XY e chegar ao ponto final ao mesmo tempo, deve existir um sincronismo entre os eixos de movimentação. Este tipo de movimento é definido como interpolação linear.

Em uma interpolação linear a máquina não executa um único movimento, mas sim uma série de movimentos incrementais cujo tamanho do passo é igual à resolução da máquina, causando uma pequenos chanfros. Todo controle CNC calcula automaticamente uma série de pequenos movimentos em um ou nos dois eixos, mantendo a ferramenta tão perto do caminho linear programado quanto possível. Este tipo de interpolação é transparente ao programador da máquina, sendo uma função calculada apenas pelo controle de movimentação. (WECK, 1989)

Para explicar interpolação linear implementada no sistema foi adotado um exemplo de geometria, conforme a figura 11, sendo que o programa CNC para executar esta operação está descrito na tabela 7. Utilizou-se nesse caso a resolução de 1 mm/pulso. Isto significa que cada pulso gerado fará o motor de passo movimentar o eixo desejado em 1 mm.

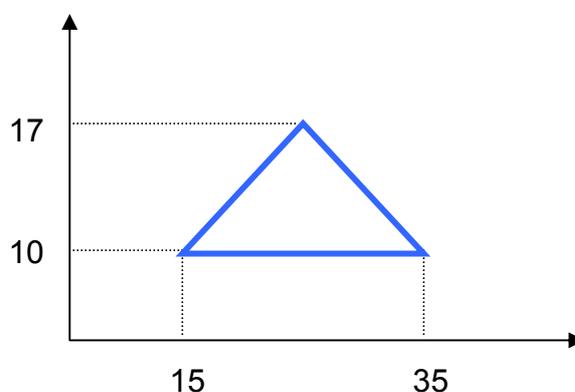


FIGURA 11 – Exemplo de Geometria

TABELA 7 – Programa CNC para Geometria da Figura 11 utilizando G90 e G91

G90 (coordenada absoluta)	G91 (coordenada relativa)
G0	G0
X15 Y10	X15 Y10
G90	G91
X35	X20
X25 Y17	X-10 Y7
X15 Y10	X-10 Y-7

Nas tabelas a seguir (tabelas 8 e 9) é mostrado o algoritmo utilizado para interpolação linear (G90 e G91). O algoritmo trabalha com informações do número de pulsos referentes à movimentação desejada que são processados em uma iteração. A necessidade de um pulso no motor é identificada quando um somatório de pulsos nesse procedimento atingir o valor limite dado por:

$$\text{Limite} = \text{int}(\sqrt{x^2 + y^2})$$

Onde: x – número de pulsos no eixo X

y – número de pulsos no eixo Y

A utilização dos valores de movimentação dos eixos depende do tipo de interpolação linear utilizada. Quando se usa G90 (coordenada absoluta) o valor da movimentação deve ser a diferença do valor absoluto menos o valor anterior, quando se usa G91 (coordenada relativa) o valor de movimentação é ele próprio, observando-se o sinal, que indica a direção de movimentação no eixo.

A função somatório utilizada para a movimentação do eixo X é dada por:

$$\text{Soma}_x = \text{Soma}_{x_{\text{anterior}}} + x$$

Onde: x – número de pulsos desejados

Se o resultado desta soma for maior que o limite, existe a movimentação da ferramenta deste eixo e subtrai-se o valor do limite, sendo este o novo valor de Soma_x (no instante inicial do algoritmo os valores de X e $X_{(\text{anterior})}$ são os mesmos).

Desta mesma forma, desenvolve-se sistemática idêntica para os demais eixos. Esta seqüência de operações deve continuar até que o número de movimentos no eixo seja igual ou superior ao do número de pulsos; Esta é a condição de fim de movimentação deste eixo, pois a distância percorrida é proporcional ao número de pulsos gerados, o que é definido pela resolução da máquina.

A movimentação em linha reta em um único eixo (X), saindo do ponto X15 Y10 para o ponto X35 Y10, corresponde a um deslocamento da ferramenta no eixo X de 20 pulsos (35-15), no caso da resolução da máquina ser definida como 1 mm/pulso. O algoritmo calcula inicialmente o limite e processa os dados conforme resultados apresentados na tabela 8. A simbologia (**) indica que o pulso de acionamento deve ser enviado ao respectivo motor. Neste exemplo não existirá a movimentação do eixo Y, pois é uma linha reta horizontal.

$$\text{Limite} = \text{int}(\sqrt{x^2 + y^2}) = \text{int}(\sqrt{20^2 + 0^2}) = \text{int}(\sqrt{400 + 0}) = 20$$

TABELA 8 – Algoritmo de Movimentação dos Eixos para Execução da Geometria de Figura 11 (saindo do ponto X15 Y10 para o ponto X35 Y10)

Eixo X	Movimentação do eixo X	Eixo Y	Movimentação do eixo X
X = 20		Y = 0	
20 + 20 = 40 > limite 40 – limite = 20	**	0 + 0 = 0 < limite	
20 + 20 = 40 > limite 40 – limite = 20	**		
20 + 20 = 40 > limite 40 – limite = 20	**		
Assim por diante até que o número de movimentações neste eixo seja igual ou maior que número de pulsos			

A movimentação em linha reta no eixo (X) e eixo (Y) simultaneamente, saindo do ponto X35 Y10 para o ponto X25 Y17, no exemplo proposto, que corresponde a movimentação da ferramenta no eixo X em 10 mm e no eixo Y em 7 mm, é obtida através de dados de entrada no algoritmo:

X = 10 pulsos (resolução = 1mm/pulso)

Y = 7 pulsos (resolução = 1mm/pulso)

Para o valor do limite, tem-se:

$$\text{Limite: } \text{int}(\sqrt{x^2 + y^2}) = \text{int}(\sqrt{10^2 + 7^2}) = \text{int}(\sqrt{100 + 49}) = 12$$

TABELA 9 – Algoritmo de Movimentação dos Eixos para Execução da Geometria de Figura 11 (saindo do ponto X35 Y10 para o ponto X25 Y17)

Eixo X	Movimentação do eixo X	Eixo Y	Movimentação do eixo X
X = 10		Y = 7	
10 + 10 = 20 > limite 20 – limite = 8	**	7 + 7 = 14 > limite 14 – limite = 2	**
8 + 10 = 18 > limite 18 – limite = 6	**	2 + 7 = 9 < limite	
6 + 10 = 16 > limite 16 – limite = 4	**	9 + 7 = 16 > limite 16 – limite = 4	**
4 + 10 = 14 > limite 14 – limite = 2	**	4 + 7 = 11 < limite	
2 + 10 = 12 = limite		11 + 7 = 18 > limite 18 – limite = 6	**
12 + 10 = 22 > limite 22 – limite = 10	**	6 + 7 = 13 > limite 13 – limite = 1	**
10 + 10 = 20 > limite 20 – limite = 8	**	1 + 7 = 8 < limite	
8 + 10 = 18 > limite 18 – limite = 6	**	8 + 7 = 15 > limite 15 – limite = 3	**
6 + 10 = 16 > limite 16 – limite = 4	**	3 + 7 = 10 < limite	
4 + 10 = 14 > limite 14 – limite = 2	**	10 + 7 = 17 > limite 17 – limite = 5	**
2 + 10 = 12 = limite		5 + 7 = 12 = limite	
12 + 10 = 22 > limite	**	12 + 7 = 19 > limite	**

Este algoritmo causará uma movimentação mostrada na figura 12.

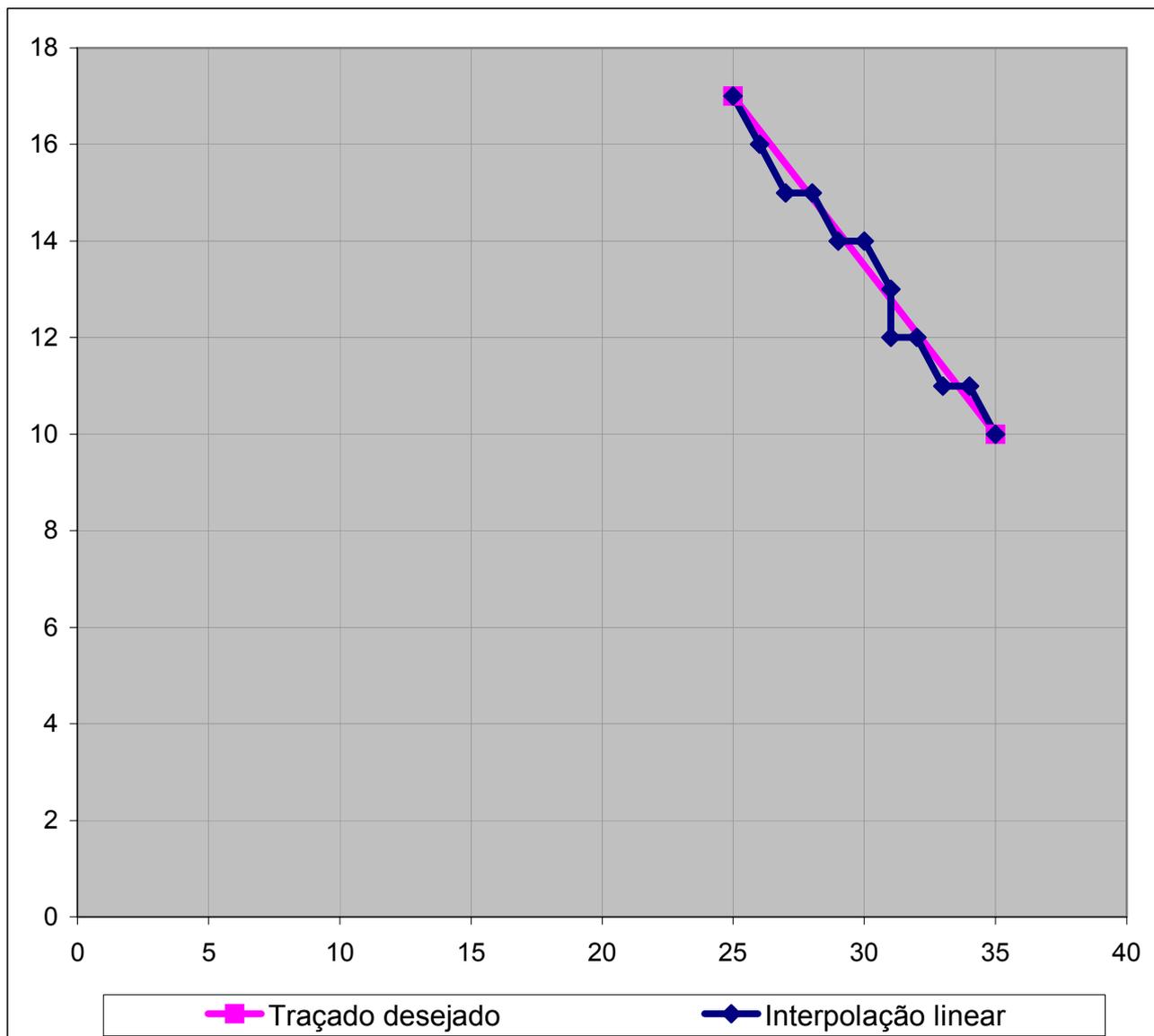


FIGURA 12 – Interpolação Linear Obtida

3.2 Interpolação Circular

Para a execução de um movimento circular em uma máquina CNC foi utilizado a técnica de interpolação circular conhecida como DDA (sigla do inglês para Digital Differential Analyse). (WECK, 1989) Movimentos circulares incluem raio de concordância entre faces de peças, furos circulares de grandes e pequenos diâmetros, etc. Assim, como na interpolação linear, na circular o controle gera movimentos que devem se aproximar o máximo possível do caminho circular desejado.

Na interpolação circular são utilizados os comandos G02 para especificar movimentos circulares no sentido horário e G03 para especificar os movimentos circulares no sentido anti-horário. Associado a estes comandos, é informado no programa CNC os dados geométricos do arco através do ponto final (função X, Y e Z) e o centro (função I e J). O ponto de início do arco é obtido pela posição da ferramenta imediatamente anterior no programa CNC.

Para exemplificar uma interpolação circular será utilizada a figura 13. O programa CNC para executar esta operação está descrito na tabela 10.

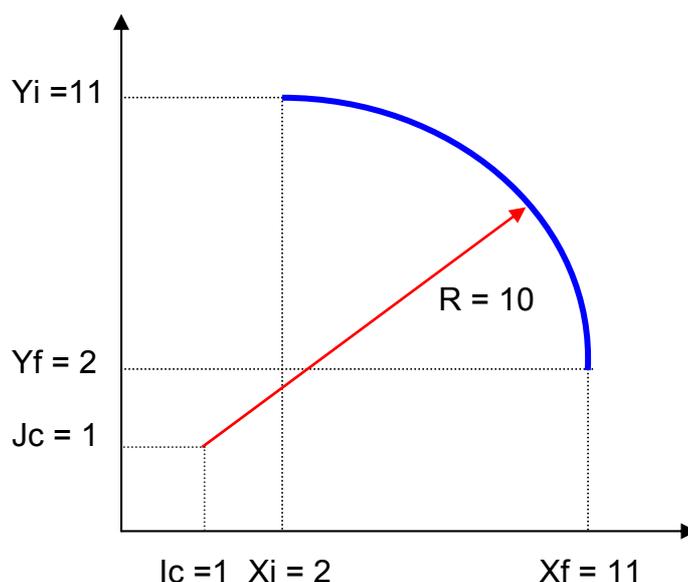


FIGURA 13 – Exemplo de Geometria

TABELA 10 – Programa CNC para Geometria da Figura 13 utilizando G2 e G3

G2 (sentido horário)	G3 (sentido anti horário)
G0 X2 Y11 G2 X11 Y2 I1 J1	G0 X11 Y2 G3 X2 Y11 I1 J1

A tabela 11 mostra a seqüência de processamento do algoritmo utilizado para interpolação circular (G2 e G3). Inicialmente é calculado o raio do arco pela distância entre o ponto inicial ou final e o ponto do centro do arco ($R = 11 - 1 = 10$). A constante K, no algoritmo é dada pela equação $1/R$ e o limite pela fórmula:

$$\text{Limite} = \sqrt{2 \times R^2}$$

A função somatório para movimentação dos eixos é dada por:

$$\text{Som } X_i = \text{Som } X_{i-1} + \Delta X_{i-1}$$

$$\text{Som } Y_i = \text{Som } Y_{i-1} + \Delta Y_{i-1}$$

Onde: $\Delta X_i = K \times \text{Coord } Y$

$$\Delta Y_i = K \times \text{Coord } X$$

Para a movimentação circular, saindo do ponto X2 Y11 para o ponto X11 Y2 com ponto central do arco em X1 Y1, o cálculo do raio, da constante K e o limite utilizados no algoritmo (a simbologia (**)) indica a movimentação no eixo correspondente), foram usados os seguintes cálculos:

$$\text{Raio} = 11 - 1 = 10$$

$$K = 1/R = 1/10 = 0,1$$

$$\text{Limite: } \sqrt{2 \times R^2} = \sqrt{2 \times 10^2} = \sqrt{200} = 14,142135 \text{ 1}$$

TABELA 11 – Algoritmo de Movimentação dos Eixos para Execução da Geometria de Figura 13 (saindo do ponto X15 Y10 para o ponto X35 Y10)

Som X	Eixo X	ΔX	Coord X	Som Y	Eixo Y	ΔY	Coord Y
0		$0,1 \times 11 = 1,1$	1	0		$0,1 \times 2 = 0,2$	11
$0 (+1,1) = 1,1 < \text{limite}$		$0,1 \times 11 = 1,1$	1	$0 (+0,2) = 0,2$		$0,1 \times 2 = 0,2$	11
$1,1 (+1,1) = 2,2 < \text{limite}$		$0,1 \times 11 = 1,1$	1	$0,2 (+0,2) = 0,4$		$0,1 \times 2 = 0,2$	11
$2,2 (+1,1) = 3,3 < \text{limite}$		$0,1 \times 11 = 1,1$	2	$0,4 (+0,2) = 0,6$		$0,1 \times 2 = 0,2$	11
$3,3 (+1,1) = 4,4 < \text{limite}$		$0,1 \times 11 = 1,1$	2	$0,6 (+0,2) = 0,8$		$0,1 \times 2 = 0,2$	11
$4,4 (+1,1) = 5,5 < \text{limite}$		$0,1 \times 11 = 1,1$	2	$0,8 (+0,2) = 1$		$0,1 \times 2 = 0,2$	11
$5,5 (+1,1) = 6,6 < \text{limite}$		$0,1 \times 11 = 1,1$	2	$1 (+0,2) = 1,2$		$0,1 \times 2 = 0,2$	11
$6,6 (+1,1) = 7,7 < \text{limite}$		$0,1 \times 11 = 1,1$	2	$1,2 (+0,2) = 1,4$		$0,1 \times 2 = 0,2$	11
$7,7 (+1,1) = 8,8 < \text{limite}$		$0,1 \times 11 = 1,1$	2	$1,4 (+0,2) = 1,6$		$0,1 \times 2 = 0,2$	11
$8,8 (+1,1) = 9,9 < \text{limite}$		$0,1 \times 11 = 1,1$	2	$1,6 (+0,2) = 1,8$		$0,1 \times 2 = 0,2$	11
$9,9 (+1,1) = 11 < \text{limite}$		$0,1 \times 11 = 1,1$	2	$1,8 (+0,2) = 2$		$0,1 \times 2 = 0,2$	11
$11 (+1,1) = 12,1 < \text{limite}$		$0,1 \times 11 = 1,1$	2	$2 (+0,2) = 2,2$		$0,1 \times 2 = 0,2$	11
$12,1 (+1,1) = 13,2 < \text{limite}$		$0,1 \times 11 = 1,1$	2	$2,2 (+0,2) = 2,4$		$0,1 \times 2 = 0,2$	11
$13,2 (+1,1) = 14,3 \geq \text{limite}$ $14,3 - \text{limite} = 0,15$	**	$0,1 \times 11 = 1,1$	3	$2,4 (+0,2) = 2,6$		$0,1 \times 3 = 0,3$	11
$0,15 (+1,1) = 1,25 < \text{limite}$		$0,1 \times 11 = 1,1$	3	$2,6 (+0,3) = 2,9$		$0,1 \times 3 = 0,3$	11
$1,25 (+1,1) = 2,35 < \text{limite}$		$0,1 \times 11 = 1,1$	3	$2,9 (+0,9) = 3,2$		$0,1 \times 3 = 0,3$	11

$2,35 (+1,1) = 3,45 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	3	$3,2 (+0,3) = 3,5$		$0,1*3 = 0,3$	11
$3,45 (+1,1) = 4,55 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	3	$3,5 (+0,3) = 3,8$		$0,1*3 = 0,3$	11
$4,55 (+1,1) = 5,65 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	3	$3,8 (+0,3) = 4,1$		$0,1*3 = 0,3$	11
$5,65 (+1,1) = 6,75 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	3	$4,1 (+0,3) = 4,4$		$0,1*3 = 0,3$	11
$6,75 (+1,1) = 7,85 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	3	$4,4 (+0,3) = 4,7$		$0,1*3 = 0,3$	11
$7,85 (+1,1) = 8,95 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	3	$4,7 (+0,3) = 5$		$0,1*3 = 0,3$	11
$8,95 (+1,1) = 10,05 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	3	$5 (+0,3) = 5,3$		$0,1*3 = 0,3$	11
$10,05 (+1,1) = 11,15 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	3	$5,3 (+0,3) = 5,6$		$0,1*3 = 0,3$	11
$11,15 (+1,1) = 12,25 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	3	$5,6 (+0,3) = 5,9$		$0,1*3 = 0,3$	11
$12,25 (+1,1) = 13,35 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	3	$5,9 (+0,3) = 6,2$		$0,1*3 = 0,3$	11
$13,35 (+1,1) = 14,45 \geq \text{limite}$ $14,45 - \text{limite} = 0,31$	**	$0,1*11 = 1,1$	4	$6,2 (+0,3) = 6,5$		$0,1*4 = 0,4$	11
$0,31 (+1,1) = 1,41 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	4	$6,5 (+0,4) = 6,9$		$0,1*4 = 0,4$	11
$1,41 (+1,1) = 2,51 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	4	$6,9 (+0,4) = 7,3$		$0,1*4 = 0,4$	11
$2,51 (+1,1) = 3,61 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	4	$7,3 (+0,4) = 7,7$		$0,1*4 = 0,4$	11
$3,61 (+1,1) = 4,71 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	4	$7,7 (+0,4) = 8,1$		$0,1*4 = 0,4$	11
$4,71 (+1,1) = 5,81 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	4	$8,1 (+0,4) = 8,5$		$0,1*4 = 0,4$	11
$5,81 (+1,1) = 6,91 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	4	$8,5 (+0,4) = 8,9$		$0,1*4 = 0,4$	11
$6,91 (+1,1) = 8,01 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	4	$8,9 (+0,4) = 9,3$		$0,1*4 = 0,4$	11
$8,01 (+1,1) = 9,11 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	4	$9,3 (+0,4) = 9,7$		$0,1*4 = 0,4$	11
$9,11 (+1,1) = 10,21 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	4	$9,7 (+0,4) = 10,1$		$0,1*4 = 0,4$	11
$10,21 (+1,1) = 11,31 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	4	$10,1 (+0,4) = 10,5$		$0,1*4 = 0,4$	11
$11,31 (+1,1) = 12,41 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	4	$10,5 (+0,4) = 10,9$		$0,1*4 = 0,4$	11
$12,41 (+1,1) = 13,51 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	4	$10,9 (+0,4) = 11,3$		$0,1*4 = 0,4$	11
$13,51 (+1,1) = 14,61 \geq \text{limite}$ $14,61 - \text{limite} = 0,47$	**	$0,1*11 = 1,1$	5	$11,3 (+0,4) = 11,7$		$0,1*5 = 0,5$	11
$0,47 (+1,1) = 1,57 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	5	$11,7 (+0,5) = 12,2$		$0,1*5 = 0,5$	11
$1,57 (+1,1) = 2,67 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	5	$12,2 (+0,5) = 12,7$		$0,1*5 = 0,5$	11
$2,67 (+1,1) = 3,77 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	5	$12,7 (+0,5) = 13,2$		$0,1*5 = 0,5$	11
$3,77 (+1,1) = 4,87 < \text{limite}$		$0,1*11 = 1,1$	5	$13,2 (+0,5) = 13,7$		$0,1*5 = 0,5$	11
$4,87 (+1,1) = 5,97 < \text{limite}$		$0,1*10 = 1$	5	$13,7 (+0,5) = 14,2 \geq \text{limite}$ $14,2 - \text{limite} = 0,05$	**	$0,1*5 = 0,5$	10
Assim por diante até que a coord X e Y cheguem ao ponto final							

Este algoritmo causará uma movimentação circular, como mostrada na figura 14.

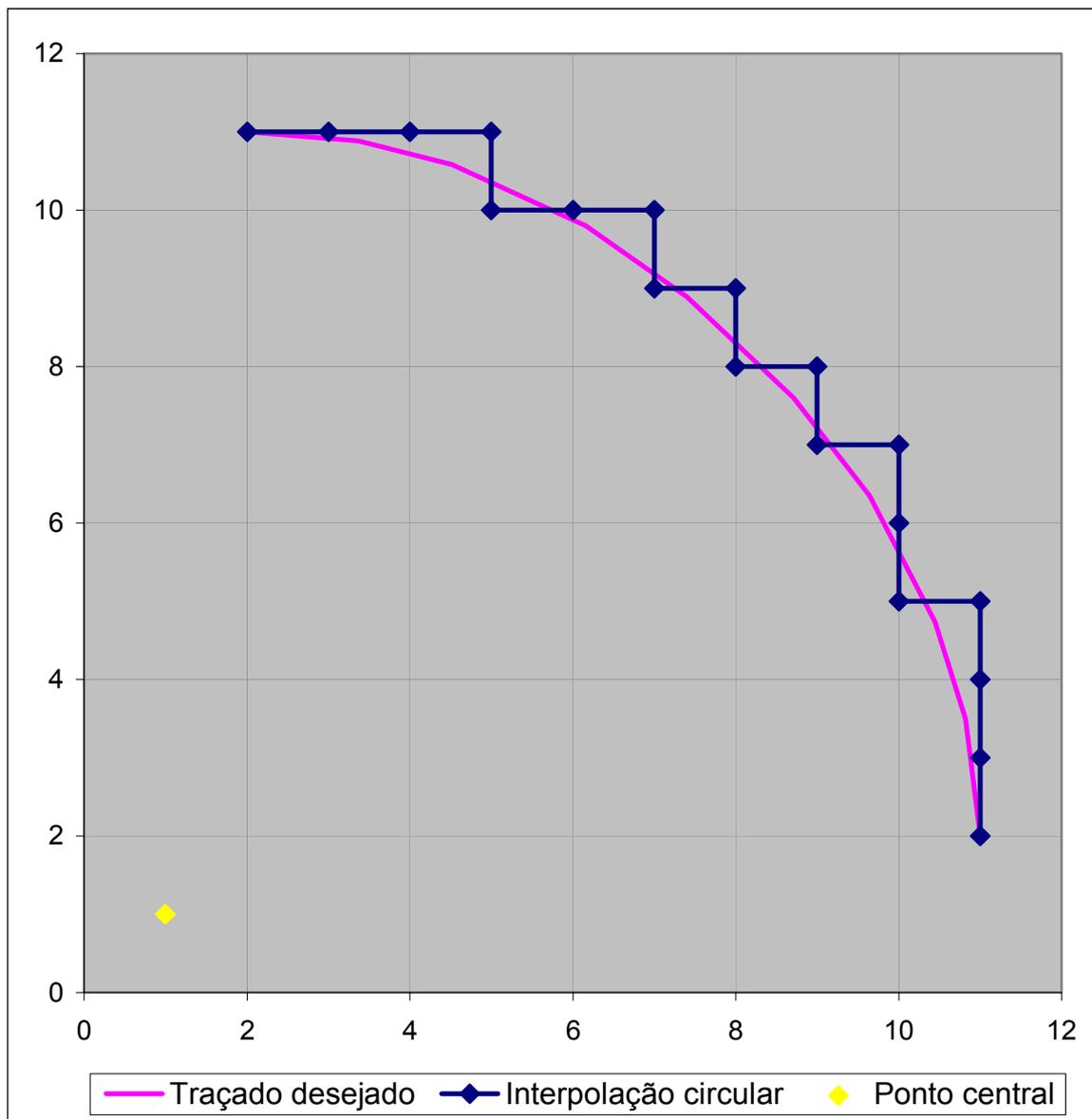


FIGURA 14 – Interpolação Circular Obtida

3.3 Comunicação com a Porta Paralela

A saída da porta paralela, chamada de DB25 é uma conexão do tipo fêmea que possui 25 orifícios, e é localizada na parte posterior do gabinete do microcomputador. A figura 15 mostra a pinagem do conector DB25 com a função de cada orifício deste conector. Na tabela 12 é mostrada a descrição, direção dos dados e função de cada orifício do conector DB25, os orifícios de número 10, 11, 12, 13 e 15 são reservados a entrada de dados no micro, os orifícios de número 18 a 25 não podem ser utilizados e o restante são orifícios de saída de dados e serão utilizadas no desenvolvimento do programa.

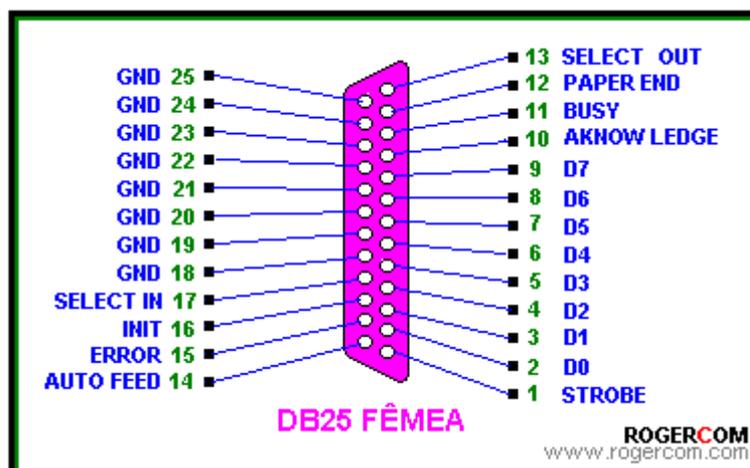


FIGURA 15 – Pinagem do Conector DB25

TABELA 12 – Direção dos Dados em Relação ao Computador.

Pino	Descrição	Direção dos Dados	Função
1	Strobe	Saída	Sinal de controle
2	Dados 0	Saída	Bit de dado 00
3	Dados 1	Saída	Bit de dado 01
4	Dados 2	Saída	Bit de dado 02
5	Dados 3	Saída	Bit de dado 03
6	Dados 4	Saída	Bit de dado 04
7	Dados 5	Saída	Bit de dado 05
8	Dados 6	Saída	Bit de dado 06
9	Dados 7	Saída	Bit de dado 07
10	Aknowledge	Entrada	Status
11	Busy	Entrada	Status
12	Paper end	Entrada	Status
13	Select out	Entrada	Status
14	Auto feed	Saída	Sinal de controle
15	Error	Entrada	Status
16	Init	Saída	Sinal de controle
17	Select in	Saída	Sinal de controle
18 a 25	GND		Sinal de terra

Fonte: <http://www.rogercom.com/pparalela/introducao.htm>

A Porta paralela é baseada na tecnologia TTL (Transistor-Transistor Logic), isto é, trabalha com 0 V ou + 5 V que significam respectivamente, nível baixo e nível

alto, ou ainda desligado (bit 0) e ligado (bit 1). Quando se envia um sinal para um destes pinos (bit 1) nesta saída existirá uma voltagem de + 5 V, enviar um bit 0, ausência de voltagem (0 V). (BRUSSO, 2002)

Todas as saídas da porta paralela são lógicas, isto é, escrevendo o lógico "1" em um bit da porta implica que esse pino terá saída + 5 v, entretanto os pinos 1 (Strobe), 14 (Autofeed) e 17 (Select in) possuem características diferentes em relação aos demais pinos e possuem sua lógica invertida. Quando eles estão ativos logicamente, fisicamente estão inativos, ou seja, quando se envia o bit 1 para um destes pinos fisicamente não há voltagem nesta saída (0 v). Já quando se envia o bit 0 a voltagem é enviada fisicamente (+ 5 v). Ou seja, funcionam da forma inversa aos demais pinos da porta paralela.

A porta paralela possui 3 endereços, o endereçamento do tipo *data* que envia um byte de dados à porta (pinos 2 a 9), o endereçamento do tipo *status* que é utilizada para receber um byte através da porta (pinos 10 a 13 e 15) e o endereçamento *control* que é utilizada para enviar dados através da porta (pinos 1, 14, 16 e 17). Estes endereços são mostrados da tabela 13.

TABELA 13 – Endereços da Porta Paralela

Nome	Endereços LPT1	Endereços LPT2	Descrição
Registro de Dados	378h	278h	Envia um byte para a porta
Registro de Status	379h	279h	Ler o Status da porta
Registro de Controle	37Ah	27Ah	Envia dados de controle

Fonte: <http://www.rogercom.com/>

Para controle de dispositivos externos utiliza-se o endereçamento de dados (378 em hexadecimal), os pinos 2 a 9 da porta paralela, para enviarmos um sinal a cada pino específico deve-se enviar uma *word* (palavra) de 8 bits, como mostra a balela 14, quando existir um sinal (1) no pino específico é gerada uma tensão neste pino.

TABELA 14 – Endereçamento do para Saída de Dados

Pino	Decimal	Hexadecimal	Binário
9 - D7	128	80	10000000
8 - D6	64	40	01000000
7 - D5	32	20	00100000
6 - D4	16	10	00010000
5 - D3	8	8	00001000
4 - D2	4	4	00000100
3 - D1	2	2	00000010
2 - D0	1	1	00000001

Fonte: <http://www.rogercom.com/>

Como se deseja trabalhar com motores de passo, no desenvolvimento deste trabalho, têm-se um *driver* de controle do motor de passo (item 2.9.5.7 Driver de Controle do Motor de Passo) ligado a saída da porta paralela do computador. Para o controle destes motores deve-se energizar as bobinas sequencialmente como já foi descrito sucintamente (item 2.9.5.4 Circuito de Controle deste trabalho). Deve-se mandar para o pino de controle específico a quantidade de pulsos necessários para girar o rotor do motor de passo para que se possa produzir um movimento correspondente à distância que se quer percorrer, isto depende da resolução do motor. Quando maior a resolução, menor será a quantidade de pulso gerados para percorrer a mesma distância. A fórmula abaixo mostra a equação de quantidade de pulsos necessários para a movimentação.

$$\text{Quantidade de pulsos} = \frac{\text{Distância}}{\text{Resolução}}$$

Para trabalhar de forma que o *driver* de controle do motor de passo tenha a capacidade de perceber a geração de um pulso, deve-se manter por certo tempo o pulso na porta (figura 16). Isto é, manter energizado por um determinado tempo o pino da porta paralela. Também deve ser definido um tempo mínimo entre um pulso e outro para que exista um intervalo mínimo de tempo em que o pino ficará desenergizado para que o *driver* possa perceber a existência de um novo pulso.

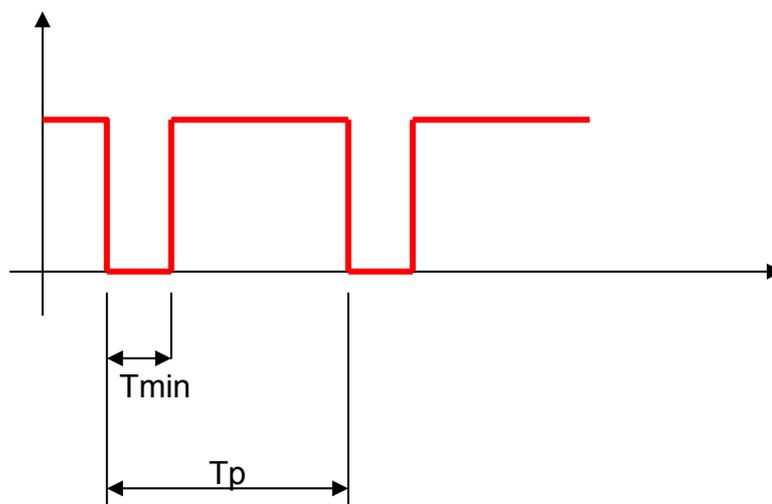


FIGURA 16 – Tempo Mínimo e Tempo entre Pulsos

O tempo mínimo (ms) entre um pulso e outro é definido através de testes. O tempo entre cada pulso é calculado pela fórmula mostrada a seguir:

$$\text{Tempo entre pulsos} = \frac{\text{Resolução}}{\text{Velocidade}}$$

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 Necessidades para Desenvolvimento

Para o desenvolvimento do sistema computacional proposto, procurou-se uma linguagem de fácil programação com recursos visuais e com capacidade de comunicação com a porta paralela do computador, para transferência de dados para os drives de controle dos motores de passo. A escolha recaiu sobre a linguagem de programação Delphi®, por apresentar todas as características necessárias ao desenvolvimento.

4.2 Estrutura do Programa

Para facilitar a utilização do sistema criou-se, como todos os softwares padrão Windows, uma janela com o nome do software em execução com os botões padrões, uma barra de menu e uma barra de ferramentas. Na figura 17, tem-se uma visão geral de como se apresenta este sistema, contendo uma entidade geométrica que foi executada pelo programa CNC inserido no editor.

A janela principal é dividida basicamente em quatro áreas: uma com o menu principal e barras de ferramentas, uma para edição do arquivo de texto com o programa CNC, uma área de simulação para demonstração da geometria executada pelo programa CNC e uma parte que contém botões de comando da parte de simulação e transferência de dados para os driver de controle dos motores de passo. Também existe nesta tela principal uma barra de status com o número da linha e coluna do editor e área de informação sobre o estado do programa.

A seguir será apresentada detalhadamente cada uma das funções contidas no menu principal e na barra de ferramentas.

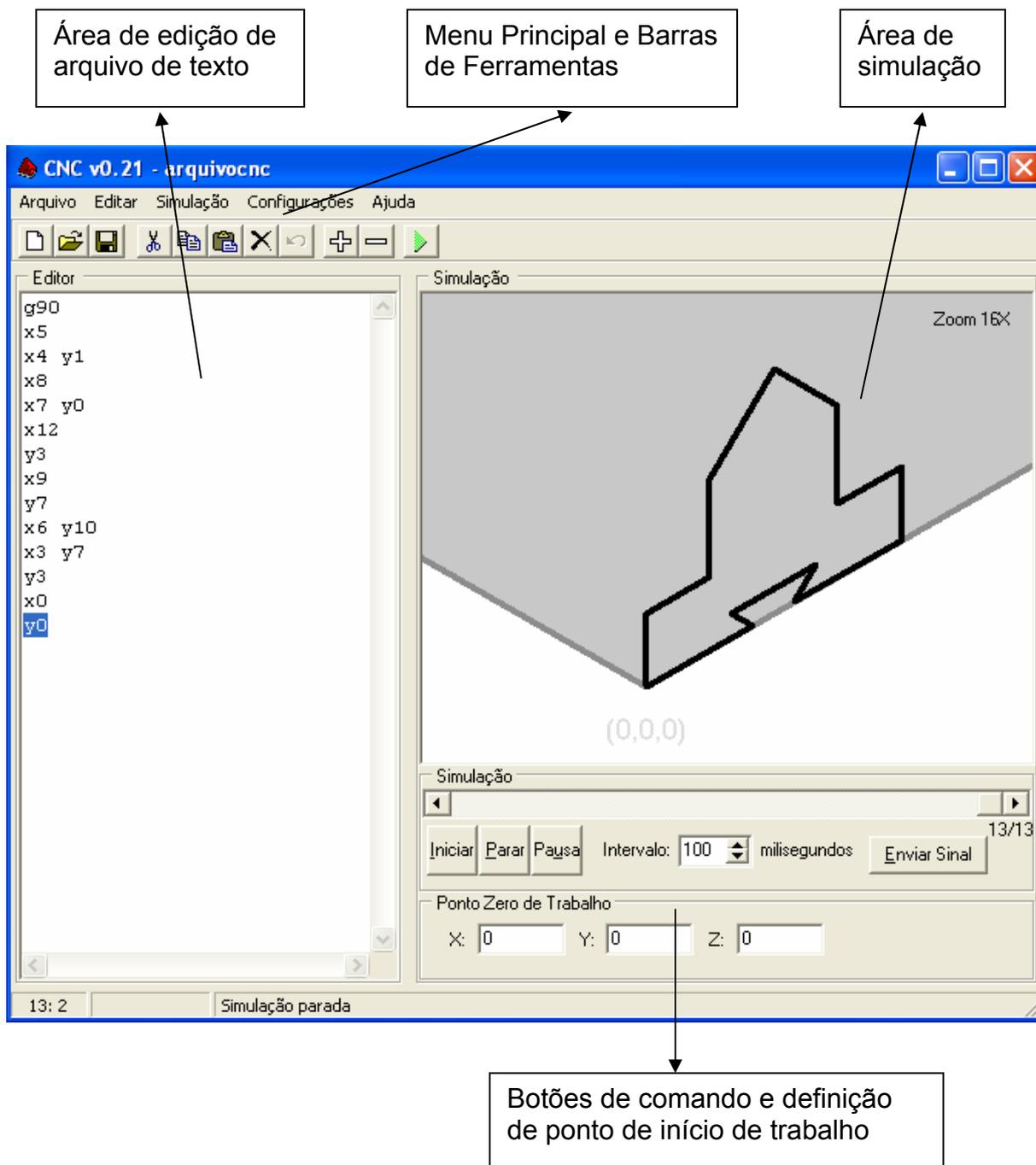


FIGURA 17 – Tela Principal do Programa Desenvolvido

4.3 Estrutura de Menus

No menu principal tem-se a opção Arquivo (figura 18), que contém as funções básicas referentes à manutenção de arquivos, referentes aos programas CNC, contendo as opções de criar **novo** documento, **abrir** documento existente, **salvar** o documento que está na tela, salvar o documento que está na tela com outro nome (**salvar como...**) e a opção **sair** do programa. Estes comandos também aparecem

em botões de atalho na barra de ferramentas. Na opção Editar (figura 18) aparece as funções de desfazer, recortar, colar, copiar, excluir e selecionar tudo, que seguem o padrão Windows. Algumas delas também estão representadas nos botões na barra de ferramenta.



FIGURA 18 – Opção Arquivo e Opção Editar do Menu Principal

A parte do menu principal que se refere à Simulação (figura 19) contém comandos de Execução do programa CNC, criando o desenho da geometria na tela de simulação. Durante a execução da simulação pode-se utilizar os comandos **Iniciar** para continuar a execução do programa CNC quando este é parado pela função **Pausa**, ou reiniciar a simulação quando este é parado pelo comando **Parar**. As funções de Zoom + e Zoom – servem para ampliação visual da tela de simulação. A função de Zoom + também é ativada clicando-se duas vezes seguidas sobre a área de simulação ou clicando-se sobre o botão de atalho . A função Zoom - também é ativada clicando-se duas vezes seguidas sobre a área de simulação com a tecla Ctrl pressionada ou clicando-se sobre o botão de atalho .

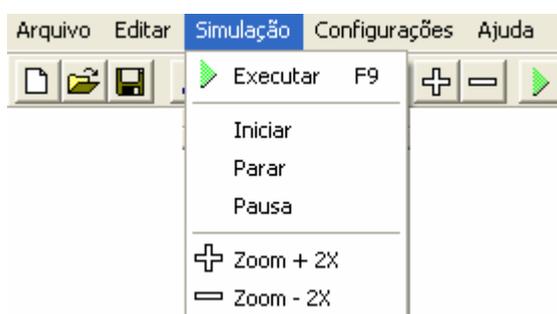


FIGURA 19 – Opção Simulação do Menu Principal

Quando se clica no botão direito do mouse com o cursor sobre a área de simulação, têm-se quatro formas de apresentação da geometria criada na área de

simulação: Perspectiva Isométrica; Vista XY; Vista ZY; e Vista de Profundidade, como está indicado na figura 20. Também é possível movimentar esta área de simulação clicando-se e segurando o botão esquerdo do mouse, movimentado a tela para melhor visualização da geometria executada.

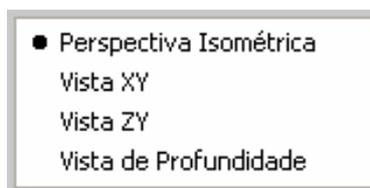


FIGURA 20 – Formas de Apresentação da Simulação

Todos os comandos contidos na opção simulação do menu principal, também estão representados em teclas de atalho na barra de ferramentas e nos botões de comando abaixo da área de simulação, mostrada na figura 21. Pode-se também, variar o intervalo de tempo de cada comando executado no programa CNC, gerando desta forma uma visualização mais precisa de como será executado quando estes sinais forem mandados para a porta paralela para execução desta geometria. Nesta tela temos também um contador de interpolações (mudanças de eixo), mostrando a evolução da execução. Também se pode variar o ponto de início do trabalho (ponto zero), alterando-se o valor de X, Y ou Z. O botão “Enviar Sinal”, é utilizado para, após a simulação e correção de possíveis erros, enviar os sinais para porta paralela para a execução de geometria simulada.

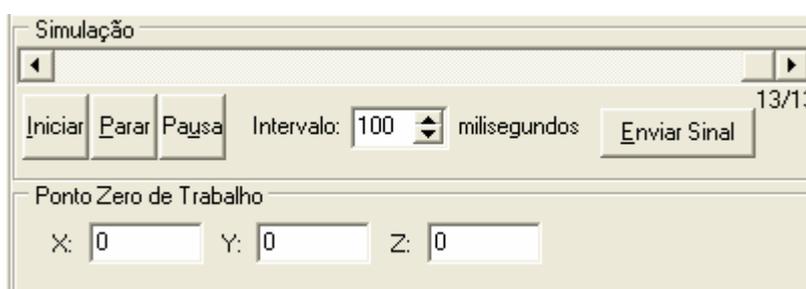


FIGURA 21 – Botões de Controle da Simulação e Ponto Zero do Trabalho

Na opção configuração tem-se duas alternativas, a configuração da máquina e o testar máquina (figura 22). Na opção configuração da máquina existe a pasta Geral (figura 23) que contém a identificação da porta de saída, parâmetros

operacionais como velocidades, tempo de intervalo entre pulso, precisão decimal utilizada no arquivo CNC a ser executado, resolução da máquina, compensação de folga e a pasta Sinais que configura os pinos de saída da porta paralela.

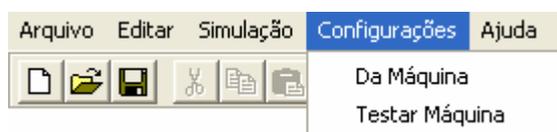


FIGURA 22 – Opção Configurações do Menu Principal

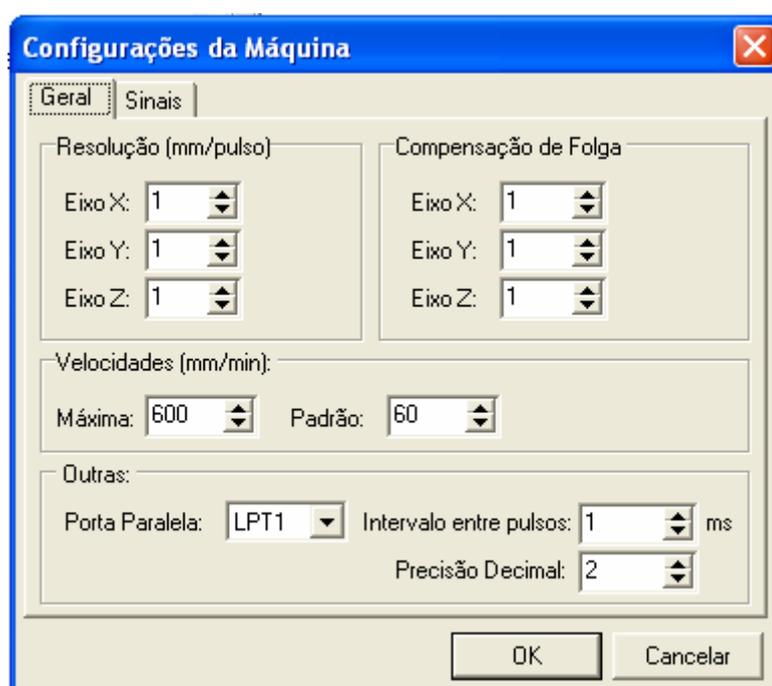


FIGURA 23 – Pasta Geral do Menu Configuração

A figura 23 mostra tela de configuração geral da máquina, onde na parte resolução (mm/pulso) configura-se a distância em mm que é percorrida com a geração de um pulso, como já foi explicado no capítulo anterior.

Na configuração de compensação de folga define-se um valor que deve ser acrescido ao movimento, toda vez que houver uma inversão no sentido de rotação dos motores. Quando existe a inversão no sentido de deslocamento em dispositivos que produzem transmissão de movimentos, existe uma folga que, quando significativa, deve ser acrescida ao movimento para que seja produzido o mesmo deslocamento previsto no programa CNC.

A velocidade máxima de avanço é o limite de velocidade de movimentação dos eixos e é utilizada quando se usa no arquivo CNC a função G0 (movimentação rápida). A velocidade de avanço representa a velocidade que os motores de passo devem girar para qualquer uma das funções de movimentação (G90, G91, G2, G3).

Na parte reservada para outras funções configura-se intervalo entre pulsos, explicado anteriormente, o número de casas decimais que se utiliza no programa CNC que será executado e também a porta de saída do sinal para o driver de controle do motor de passo. Alguns computadores possuem mais portas paralelas (saída para a impressora) definidas com LPT1, LPT2, LPT3 e assim por diante. Isto não é o padrão dos computadores pessoais utilizados, mas o sistema prevê a existência destas portas paralelas extras. Por default a saída LPT1 é considerada a saída padrão. No sistema proposto utiliza-se apenas duas portas (LPT1 e LPT2).

A figura 24 mostra a pasta de configuração dos sinais da porta paralela, isto é, a relação entre os pinos de saída e os eixos de movimentação e ao lado da numeração das pinagens existe uma caixa de marcar para configurar se este comando deve ser executado quando o sinal estiver em nível alto (bit 1) ou se o sinal estiver em nível baixo (bit 0). Essa forma de configuração permite que os *drivers* de controle dos motores de passo possam ser produzidos de uma forma independente quanto à entrada de dados.

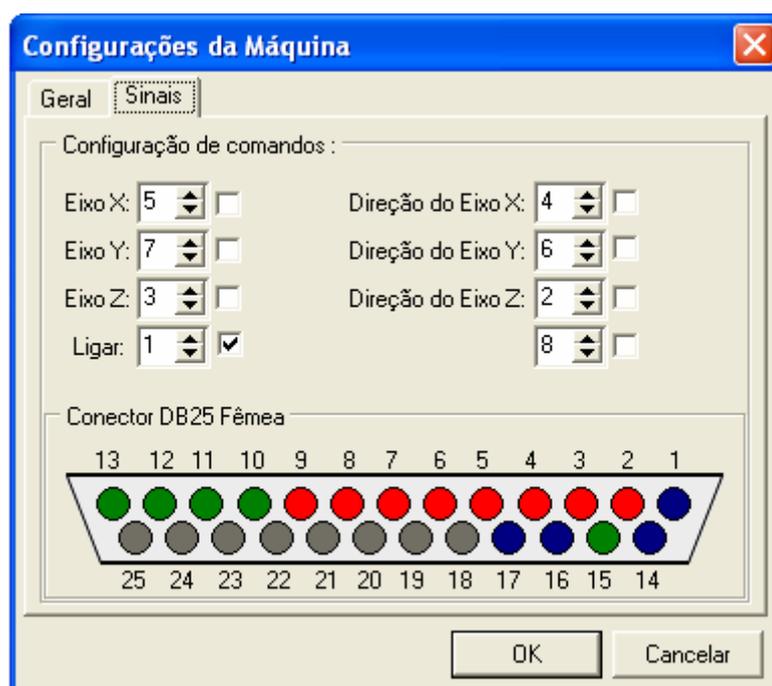


FIGURA 24 – Pasta Sinais do Menu Configuração

Dos 25 pinos existentes na porta paralela, poderão ser utilizados para as configurações apenas 17 pinos, definidos assim: 8 são pinos de dados e são representados em vermelho (*data*); 4 são pinos de controle e são representados em azul (*control*); 5 são pinos de status e são representados em verde (*status*). Os 8 pinos restantes para completar os 25 pinos não podem ser utilizados e nem se tem acesso a eles (GND). Porém, destas 17 saídas utilizadas, as 5 de status não podem ser alteradas internamente, ou seja, pelo programa. Assim, só podem ser alteradas por dispositivos externos conectados a porta. Portanto, não é possível selecionar as saídas em verde na hora de configurar a máquina.

Um instrumento de auxílio à opção de configuração se refere ao teste da máquina, isto é, uma determinada quantidade de pulsos é enviada para diferentes eixos para confirmação se a movimentação está sendo a desejada. É uma forma de conferir se os pinos da porta paralela foram ajustados corretamente.

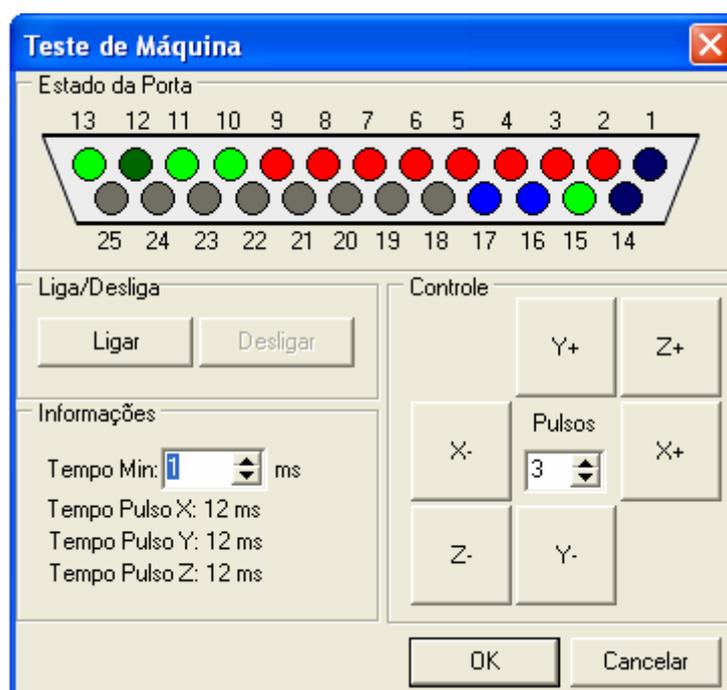


FIGURA 25 – Tela de Teste da Máquina do Menu Configuração

A janela de teste da máquina (figura 25) é dividida em 4 partes:

- O estado da porta, que mostra em desenho da saída da porta paralela com a pinagem nas cores definida anteriormente. Sempre que um pulso é gerado em um pino a sua representação no desenho da saída de porta muda de tom,

e é uma forma de verificação se as saídas estão corretas e se o tempo entre pulsos também é o correto.

- Na parte denominada “Liga/Desliga” tem-se apenas os botões de ligar e desligar a máquina.
- No campo “Informações” pode-se definir o tempo mínimo de permanência sem tensão nos pinos de saída (tempo entre um pulso e outro) e as informações de tempo de permanência dos pulsos nas saídas da porta.
- Na parte chamada de “Controle” se define a quantidade de pulsos que devem ser enviados para cada pino de saída e os botões que representam os eixos das coordenadas e suas respectivas direções. Quando se clica sobre um destes botões, a quantidade de pulsos desejados é enviada para o pino configurado na porta, gerando desta forma um movimento no eixo e também a mudança de cores no pino setado (Estados da Porta).

4.4 Execução de um Arquivo CNC

Após a execução de todas as configurações e testes da máquina, abre-se ou escreve-se um arquivo de texto contendo os comandos CNC. Na simulação o arquivo CNC é executado passo a passo na tela, desenhando a geometria que está descrita no programa CNC. Se tudo estiver a contento, envia-se o sinal para a máquina para a efetiva execução da tarefa.

Como mostra a figura 26, abre-se uma tela de andamento do trabalho que contém a contagem do tempo de trabalho e o tempo total de execução com uma barra de preenchimento para demonstração visual do tempo de execução do trabalho.

Esta janela possui também os botões de Executar, Pausar e Cancelar com as respectivas funções de iniciar e parar a execução do trabalho a qualquer instante da execução com a opção de continuar executando o trabalho do ponto de parada, ou cancelar o mesmo voltado à tela principal.

O desenho representativo da porta de saída para visualização dos pulsos de saída é também mostrado, mudando de tom para a representação do pino que está sendo acionado, nesta tela temos também, o tempo estimado e o tempo decorrido desde o início do processo de envio dos sinais à porta paralela.



FIGURA 26 – Tela de Controle de Execução do Trabalho

5 RESULTADOS

Partindo do princípio e idéia dos estudos realizados por Pelizan (2001), que em sua conclusão cita a necessidade da criação de um software capaz de, entre outras funções, transferir os códigos CN para uma fresadora, desenvolveu-se uma ferramenta computacional que comanda motores de passo e que podem ser acoplados a máquinas-ferramenta desde que não possuam grande carga em seus eixos como máquinas-ferramentas de corte (oxicorte e plasma).

Foi desenvolvido no Núcleo de Automação e Processos de Fabricação (NAFA/UFSM) um equipamento que opera com dois motores de passo, como mostra as figuras 27 e 45, associados aos movimentos de coordenadas X e Y (abscissa e ordenada), este equipamento é utilizado para reprodução de geometrias a partir de programas CNC.

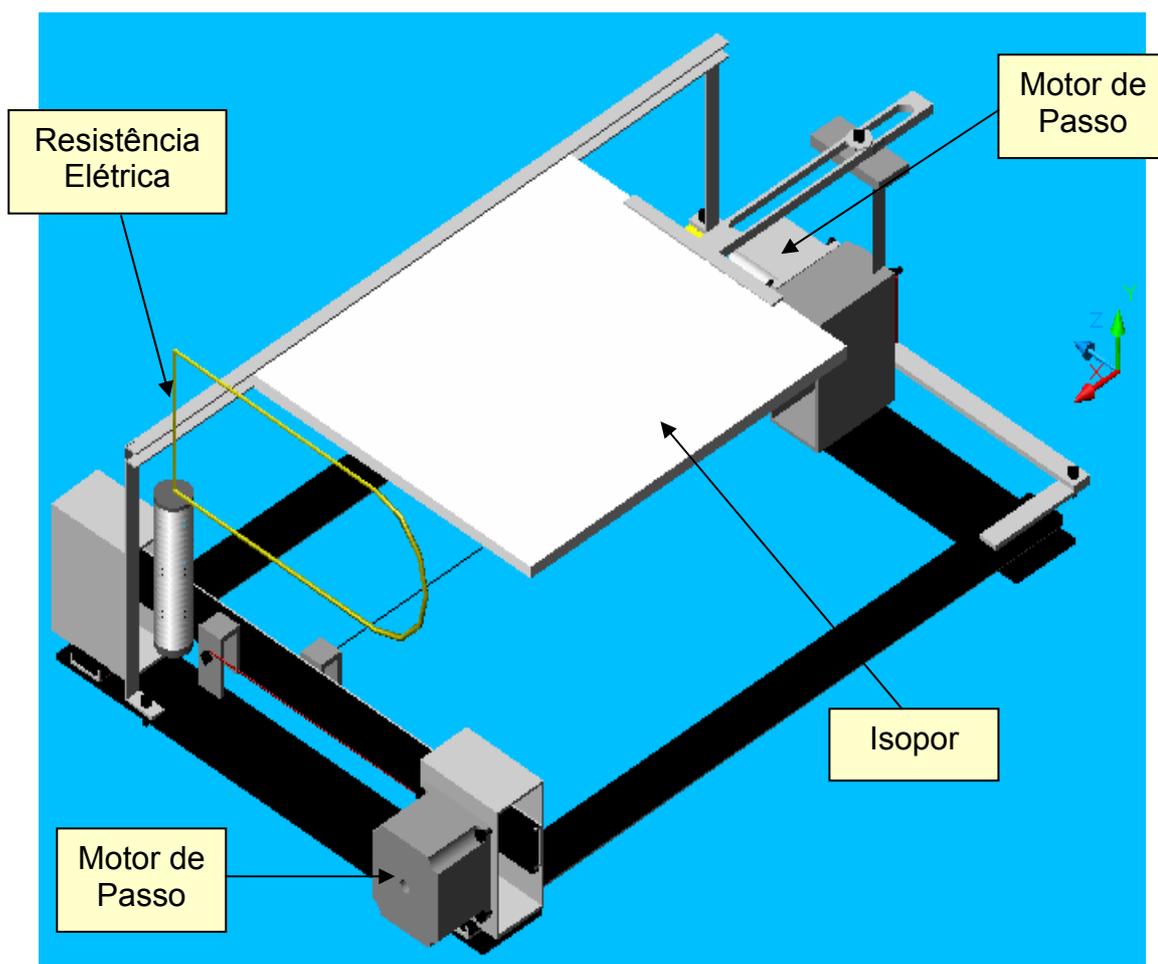


FIGURA 27 – Esquema do Equipamento desenvolvido no NAFA-UFSM

Para avaliar o desempenho do sistema, aplicações foram desenvolvidas para este equipamento que foi utilizado para realizar cortes em chapas de Poliestireno Expandido (Isopor), utilizando uma resistência elétrica. Foi projetado com o objetivo de servir de ferramenta para a implementação de uma técnica de prototipagem rápida, simular o processo de eletroerosão a fio e também, servir como equipamento de teste para softwares em desenvolvimento.

Para teste do sistema produziu-se geometrias variadas, cada uma com características diferentes, isto é, com cortes em linha reta (interpolação linear), utilizando ângulos diferentes. Para demonstrar o sincronismo entre os dois motores de passo (eixo X e eixo Y) e interpolações circulares.

Os exemplos usados como teste dos algoritmos de interpolação linear e circular, foram selecionados de forma a incluir as seguintes condições de operação:

- movimentos com início, término e centro (arco) nos mesmos quadrantes;
- movimentos com início e término em quadrantes adjacentes;
- movimentos com início e término em quadrantes opostos;
- movimentos com início e término sobre os eixos coordenados em quadrantes opostos;
- inversão no sentido dos movimentos.

Estes exemplos serão descritos sucintamente a seguir e cada um destes testes é identificado através da geometria e o programa CNC que a gerou com as referidas explicações das particularidades de cada problema. Para cada geometria mostrada foram gerados 4 (quatro) programas CNC, sendo dois testes apenas girando a peça para variar os quadrantes e os outros dois para demonstrar a utilização de interpolações circulares tanto no sentido horário como anti-horário.

➡ Teste 1

Observa-se através da geometria mostrada na figura 28 que este exemplo é o mais simples de todos, pois possui linhas retas (interpolação linear) apenas sobre os eixos das coordenadas X e Y e em todas as direções, e interpolações circulares que partem de um dos eixos até o eixo subsequente (arcos de 90°) com centro do raio nas coordenadas 0,0. Neste exemplo utilizou-se apenas números inteiros para definir os pontos do desenho como é mostrado nos programas CNC da tabela 15.

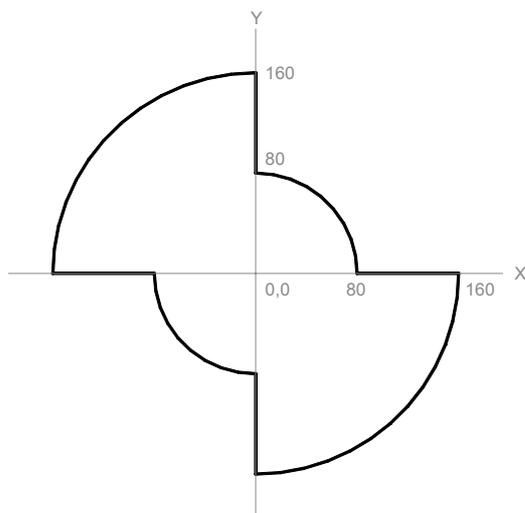


FIGURA 28 – Geometria 1 utilizada para teste do sistema

TABELA 15 – Programas CNC que foram utilizados para produzir a geometria da figura 28

Programa CNC 1	Programa CNC 2
g90	g90
y-80	y-160
G2 x-80 y0 i0 j0	G3 x160 y0 i0 j0
G90	G90
x-160 y0	x80
G2 x0 y160 i0 j0	G3 x0 y80 i0 j0
G90	G90
y80	y160
G2 x80 y0 i0 j0	G3 x-160 y0 i0 j0
G90	G90
x160	x-80
G2 x0 y-160 i0 j0	G3 x0 y-80 i0 j0
g90	
y-80	

Programa CNC 3	Programa CNC 4
g90	g90
y-160	y-80
G2 x-160 y0 i0 j0	G3 x80 y0 i0 j0
G90	G90
x-80	x160
G2 x0 y80 i0 j0	G3 x0 y160 i0 j0
G90	G90
y160	y80
G2 x160 y0 i0 j0	G3 x-80 y0 i0 j0
G90	G90
x80	x-160
G2 x0 y-80 i0 j0	G3 x0 y-160 i0 j0
	g90
	y-80

O programa CNC 1 executou interpolações circulares no sentido horário, começando pelo terceiro quadrante; o programa CNC 2 executou a mesma geometria executando as interpolações circulares no sentido anti-horário, começando pelo mesmo ponto, desta forma pelo quarto quadrante.

Os programas CNC 3 e 4 executaram a mesma geometria, mas rotacionada a 90°, isto é, mudando-se o quadrante dos arcos, CNC 3 no sentido horário e CNC 4 no sentido anti-horário, começando todos pelo mesmo ponto de partida.

A figura 29 mostra a operação de corte desta geometria.

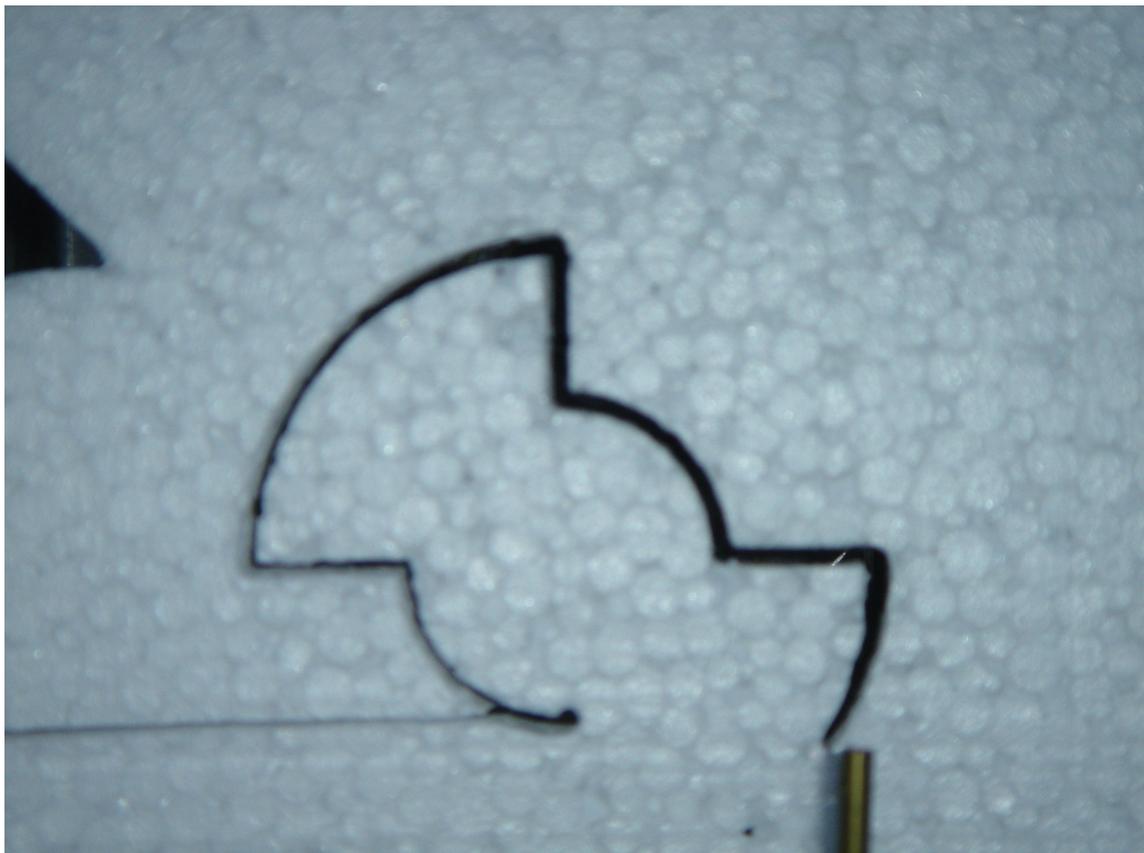


FIGURA 29 – Corte da geometria 1

➡ Teste 2

Este exemplo da figura 30 pode ser considerado como clássico, pois possui arcos começando e terminando no mesmo quadrante e em quadrantes subsequentes (arcos $< 90^\circ$) e linha inclinadas num ângulo de 15° em todos os quadrantes e em todos os sentidos. Neste exemplo são testadas quase todas as dificuldades possíveis no desenvolvimento deste sistema. Todas as interpolações circulares possuem centro nas coordenadas 0,0 dos eixos X e Y. Utilizando-se apenas números reais com uma casa decimal para definir os pontos do desenho, como mostra os programas CNC contido na tabela 16.