



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MÁQUINA DE CONTROLE NUMÉRICO COMPUTADORIZADO

PAULO AUGUSTO SHERRING DA ROCHA JUNIOR

BELÉM
MARÇO 2013

PAULO AUGUSTO SHERRING DA ROCHA JUNIOR

MÁQUINA DE CONTROLE NUMÉRICO COMPUTADORIZADO

Dissertação de mestrado apresentada como requisito final de avaliação, para obtenção do título de *Mestre em Engenharia Elétrica*, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal do Pará (UFPA)

Área de Concentração: Sistemas de energia

Ênfase: Controle de sistemas

Orientadora: Profa. Dra. Maria Emília de Lima Tostes.

Co-orientador: Prof. Dr. Walter Barra Junior.

BELÉM

MARÇO 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“MÁQUINA DE CONTROLE NUMÉRICO COMPUTADORIZADO”

AUTOR: PAULO AUGUSTO SHERRING DA ROCHA JUNIOR

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: **04/04/2013**

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Maria Emília de Lima Tostes
(Orientadora – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Walter Barra Junior
(Co-orientador – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Jorge Roberto Brito de Souza
(Membro – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. André Maurício Damasceno Ferreira
(Membro Externo – IFPA)

VISTO:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
(Coordenador PPGEE/UFPA)

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha Noiva, Alessandra Gorayeb Martins, à minha Mãe, Maria Solange Araújo Tavares, ao meu Pai, Paulo Augusto Sherring da Rocha “Senior” e à minha Avó, Maria Leonor Monteiro Araújo.

Agradecimentos

Agradeço a minha família, Maria Solange, Paulo Rocha, Maria Leonor (in memoriam) e Catarina Sicsu, pois sem eles, este caminho não teria sido percorrido.

Agradeço à minha Noiva, Alessandra Gorayeb Martins, pela inspiração, pelo apoio incondicional e ideias imprescindíveis para este trabalho. E imprescindível para o resto também.

Agradeço aos Amigos: Vitor Kataoka, pois sem ele o trabalho não teria sido realizado, devido sua ajuda com a usinagem da máquina; Igor Loureiro: pelas orientações em projeto de software e pelo companheirismo na montagem da máquina; e Rogério Souza: mestre, com quem muito aprendi – e sempre que dá, continuo aprendendo.

Agradeço à Oyamota do Brasil, em especial ao Mário Roberto Barbosa e ao mecânico Wellington “Couro Velho”, por terem dedicado atenção e esforços para atender ao favor de usinar peças que são bastante fora da linha de operação da empresa e por terem apoiado a pesquisa e o desenvolvimento deste trabalho.

A toda família CEAMAZON, com quem dividi tempo e palavras, que foi de fundamental importância para a realização deste trabalho.

Aos Orientadores e Co-orientadores Maria Emília e Walter Barra, pelo conselhos e atenção dedicada.

Ao CNPq, pelo incentivo dado a esta pesquisa.

*“Sonho que se sonha é só um sonho que se sonha só.
Mas sonho que se sonha junto é Realidade” (Prelúdio. Raul Seixas)*

Lista de Abreviaturas

BCD	Binary-Coded Decimal	Binário Codificando Decimal
BJT	Bipolar Junction Transistor	Transistor Bipolar de Junção
CAD	Computer-Aided Design	Desenho Assistido por Computador
CAM	Computer-Aided Manufacture	Manufatura Assistida por Computador
CNC	Computer Numerical Control	Controle Numérico Computadorizado
CPU	Central Processing Unit	Unidade Central de Processamento
DAC	Digital-Analog Converter	Conversor Digital Analógico
DIL	Dual In-line	-
DLL	Dynamic-Link Library	Biblioteca de <i>Link</i> Dinâmico
DSP	Digital Signal Processor	Processador Digital de Sinais
ICSP	In-Circuit Serial Programming	Programação Serial em Circuito
IDE	Integrated Development Environment	Ambiente Integrado de Desenvolvimento
FPGA	Field Programmable Gate Array	Matriz de Portas Programáveis em Campo
LIB	Static Link Library	Biblioteca de <i>Link</i> Estático
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor	Transistor de Efeito de Campo de Óxido de Metal
NURBS	Non Uniform Rational Basis Spline	-
PC	Personal Computer	Computador Pessoal
PI	Proportional Integral	Proporcional Integral (controlador)
POO	Programação Orientada à Objetos	-
PWM	Pulse-Width Modulation	Modulação por Largura de Pulso
RAM	Random Access Memory	Memória de Acesso Randômico
RISC	Reduced Instruction Set Computer	Computador com Conjunto de Instruções reduzido
SFR	Special Function Register	Registrador de Função Especial
SIE	Serial Interface Engine	-
UART	Universal Synchronous Receiver/Transmitter	Receptor/Transmissor Assíncrono Universal
USB	Universal Serial Bus	Barramento Serial Universal

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Planta eletromecânica de uma máquina de com três graus de liberdade. (Fonte: MDA Precision)	10
Figura 2.2 - Exemplo de aplicação de trajetória contínua.....	12
Figura 2.3 - Aplicações mais comuns do CNC em usinagem de peças: a) torneamento; b) furação; c) fresamento de faceamento d) polimento (Adaptado de [1]).....	15
Figura 2.4 – Acoplamento mecânico entre o motor e fuso.	19
Figura 2.5 - Tipos de carregamento de um fuso (Adaptado de [31]). ..	20
Figura 3.1 – Perfil de deslocamento típico em usinagem CNC (Adaptado de [1]).....	28
Figura 3.2 – Perfis resultantes de aceleração obtidos a partir da diversas referências de $smáx$	30
Figura 3.3 – Perfis resultantes do planejamento de trajetória com restrições de segunda ordem das grandezas: posição (a), velocidade (b) e aceleração (c).....	32
Figura 3.4 – Perfis resultantes para grandezas de menor ordem obtidas com o planejamento de trajetória com restrições de quarta ordem.....	34
Figura 3.5 – Perfil resultante do <i>Snap</i> obtido com o planejamento de trajetória com restrições de quarta ordem.....	34
Figura 3.6 – Diagrama de blocos do processo de integração do perfil de quarta ordem criado.	41
Figura 3.7 – Descrição dos principais pontos de referência envolvidos no planejamento de trajetória de um arco.	46
Figura 4.1 – Diagrama do fluxo de dados no <i>software</i> desenvolvido...	50
Figura 4.2 – Diagrama UML do <i>software</i> desenvolvido.	51
Figura 4.3 – Janela “Parâmetros da Máquina” do <i>software</i> MicroMachine.....	56
Figura 4.4 – Janela “Informações sobre dispositivo USB” do <i>software</i> MicroMachine.....	57
Figura 4.5 – Janela “Offset da Origem” (esquerda) e “Ajustar a posição da máquina” (direita) do <i>software</i> MicroMachine.....	57

Figura 4.6 – Janela “Importar arquivo excellon” do <i>software</i> MicroMachine.....	58
Figura 4.7 – Janela “Abrir arquivo” do <i>software</i> MicroMachine.....	59
Figura 4.8 – Janela “Salvar arquivo” do <i>software</i> MicroMachine.....	59
Figura 4.9 – Janela “Localizar” do <i>software</i> MicroMachine, utilizada para localizar fragmentos de texto.	60
Figura 4.10 Janela “Substituir” do <i>software</i> MicroMachine, utilizada para localizar e substituir fragmentos de texto.	60
Figura 4.11 - Padrão de arquivo XML utilizado para configurar a máquina.....	62
Figura 4.12 – Fluxograma de execução do <i>loop</i> de controle de máquina.....	64
Figura 4.13 – Diagrama de execução da sub-rotina de controle automático.....	65
Figura 4.14 – Fluxograma de execução para comunicação com dispositivo externo.....	67
Figura 5.1 – Diagrama de blocos, apresentando <i>software</i> , <i>hardware</i> e periféricos.....	68
Figura 5.2 – Diagrama de serviços e variáveis que são executados pelo <i>firmware</i> do microcontrolador PIC18F2550.....	73
Figura 5.3 – Estrutura de dados dos pacotes USB.....	75
Figura 5.4 – Subestrutura de dados do campo “Informação” para o comando USB_COMMAND_TYPE::USB_COOLANT.	75
Figura 5.5 – Subestrutura de dados do campo “Informação” para o comando USB_COMMAND_TYPE::SPINDLE.....	76
Figura 5.6 – Subestrutura de dados do campo “Informação” para o comando USB_COMMAND_TYPE::USB_MOTION.	76
Figura 5.7 – Subestrutura de dados de cada byte componente do “Informação” para o comando USB_COMMAND_TYPE::USB_MOTION.....	77
Figura 5.8 – Fluxograma do serviço de comunicação do circuito de interface com computador;.....	79
Figura 5.9 – Fluxograma da rotina de tempo real do dispositivo de comunicação com PC.	81
Figura 5.10 – Diagrama de entrada e saídas do dispositivo mestre. ...	82

Figura 5.11 – Circuito utilizado para acionar o LED do optoisolador. ...	84
Figura 5.12 – Circuito Par de Sziklai utilizado para acionar múltiplas saídas sem sobrecarregar o pino do microcontrolador.	84
Figura 5.13 – Diagrama lógico do circuito integrado HE751A0510 (Fonte: datasheet do circuito integrado HE751A0510).....	85
Figura 5.14 – Diagrama esquemático da ligação das saídas de contato seco ao microcontrolador.	86
Figura 5.15 – Circuito eletrônico desenvolvido baseado em chave CMOS analógica para realizar a função de conversor digital analógico isolado.	87
Figura 5.16 – Componentes de um motor de passo híbrido: rotor (esquerda) e estator (direita).	89
Figura 5.17 – Circuito elétrico equivalente do enrolamento de um motor de passo.....	90
Figura 5.18 – Gráficos das relações de L_{11} e L_{22} , indutâncias próprias dos enrolamentos da fase 1 e 2, respectivamente, em relação ao ângulo mecânico do rotor, θ_m . Indutância nominal de 41 mH.	91
Figura 5.19 – Gráficos das relações de Torque Mecânico, para a fase L_{11} e L_{22}	92
Figura 5.20 – Diagrama eletromecânico equivalente de um motor de passo.....	93
Figura 5.21 – Forma de onda das correntes de cada fase a partir do acionamento <i>full-step</i> com duas fases ligadas.	94
Figura 5.22 – Forma de onda das correntes de cada fase a partir do acionamento <i>full-step</i> com uma fase ligada.	95
Figura 5.23 – Forma de onda das correntes de cada fase a partir do acionamento <i>half-step</i>	95
Figura 5.24 – Forma de onda das correntes de cada fase a partir do acionamento <i>microstep</i> (1/4).	96
Figura 5.25 – Circuito equivalente de uma Ponte H com chaves ideais.	97
Figura 5.26 – Diagrama simplificado do circuito integrado L298. (Fonte: do circuito integrado L298).....	98

Figura 5.27 – Circuito eletrônico proposto para regulador de corrente com referência variável.	99
Figura 5.28 – Ciclo ativo: Corrente flui da fonte para a carga, injetando energia no sistema.	100
Figura 5.29 - Ciclo passivo: Corrente recircula pelo diodo D3 e transistor Q4, mantendo a energia armazenada no sistema.	100
Figura 5.30 – Modelo térmico equivalente à interface entre o circuito integrado e o ambiente.	101
Figura 5.31 - Diagrama de serviços e variáveis presentes no <i>firmware</i> do microcontrolador dsPIC33FJ12GP201.	102
Figura 5.32 – Fluxograma do <i>firmware</i> executado pelo microcontrolador dsPIC33FJ12GP201.	103
Figura 5.33 – Fluxograma da rotina de interrupção dos pulsos.	104
Figura 5.34 – Fluxograma da rotina de interrupção de conversão A/D.	104
Figura 5.35 – Modelo utilizado para o sensor de corrente através de resistor em série com a corrente de carga.	105
Figura 5.36 – circuito eletrônico que permite o isolamento óptico entre o dispositivo mestre e o controlador de eixo.	107
Figura 6.1 - Forma de onda da quarta derivada da posição em relação ao tempo, $s(t)$	109
Figura 6.2 - Forma de onda da terceira derivada da posição em relação ao tempo, $j(t)$	109
Figura 6.3 - Forma de onda da aceleração, $a(t)$	109
Figura 6.4 - Forma de onda da quarta derivada da posição em relação ao tempo, $v(t)$	109
Figura 6.5 - Forma de onda da posição, $x(t)$	110
Figura 6.6 - Posição ao longo do tempo, antes e depois da discretização. O sinal apresentado em linha contínua apresenta valores não discretizados. O sinal tracejado ilustra os valores com o espaço discretizado.	110
Figura 6.7 - Valor absoluto da diferença entre o sinal de posição antes e depois da discretização.	110

Figura 6.8 – Forma de onda das correntes de fase A e B para o acionamento <i>full-step</i>	113
Figura 6.9 – Forma de onda das correntes de fase A e B para o acionamento <i>half-step</i>	113
Figura 6.10 – Forma de onda das correntes de fase A e B para o acionamento <i>microstep</i> 14	114
Figura 6.11 – Forma de onda das correntes de fase A e B para o acionamento <i>microstep</i> 18	114
Figura 6.12 – Forma de onda da corrente exibida em uma faixa de tempo menor.	115
Figura 6.13 – Formas de onda da corrente durante a subida e a descida, no momento em que ocorre um deslocamento de um passo.	115
Figura 6.14 – Aferição do corpo de prova de $9,975 \times 9,975 \text{ mm}^2$	117
Figura 6.15 – Aferição do corpo de prova de $8,412 \times 8,412 \text{ mm}^2$	117
Figura 6.16 – Estratificação do corpo de prova, devido aos passos de 0,5 mm na peça.....	118
Figura 6.17 – Placa de circuito impresso sendo furada.	119
Figura 6.18 – Desenho da peça e trajetória a ser seguida gerados no <i>software</i> CamBam.....	119
Figura 6.19 – Peça em fabricação.	119
Figura 6.20 – Resultado final obtido após a fabricação.	119

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Letras utilizadas nas palavras do padrão RS274NGC. ...	23
Tabela 2.2 - Principais códigos G utilizados pelo padrão RS274NGC	23
Tabela 2.3 – Principais códigos M utilizados pelo padrão RS274NGC	24
Tabela 5.1 – Relação entre as saídas físicas do microcontrolador, seu mapeamento na memória e a função realizada pela saída.	83
Tabela 5.2 - Relação entre as saídas físicas do microcontrolador, seu mapeamento na memória e a função realizada pela saída.	86
Tabela 5.3 – <i>Lookup table</i> utilizada para gerar as referências para o acionamento <i>full-step</i> (2 fase).	94
Tabela 5.4 – <i>Lookup table</i> utilizada para gerar as referências para o acionamento <i>full-step</i> (1 fase).	95
Tabela 5.5 – <i>Lookup table</i> utilizada o acionamento <i>half-step</i>	95
Tabela 5.6 – <i>Lookup table</i> utilizada para gerar as referências para o acionamento <i>microstep</i> (1/4).	96

Sumário

1.	Introdução.....	1
1.1	Objetivos do trabalho	6
1.2	Publicações oriundas deste trabalho	7
2.	Controle Numérico Computadorizado.....	9
2.1	Elementos de Controle Numérico	9
2.2	Controle Numérico Computadorizado	12
2.3	Aplicações do CNC em processos industriais.....	14
2.4	Características, vantagens e desvantagens do CNC.....	16
2.5	Funcionamento de uma máquina de CNC	17
2.5.1	Aspectos Mecânicos do Fuso	18
2.6	Programação da peça em Controle Numérico	21
2.6.1	O Padrão RS274NGC	22
2.7	Conclusão	25
3.	Planejamento de Trajetória.....	26
3.1	Visão geral do planejamento de trajetória.....	26
3.2	Trajétória em deslocamentos unidimensionais	31
3.2.1	O método dos quinze segmentos.....	32
3.2.2	Considerações sobre o efeito da discretização do tempo .	37
3.2.3	Considerações sobre a obtenção do sinal da posição	41
3.3	Classes de Movimentos	42
3.3.1	Movimento linear assíncrono	42
3.3.2	Movimento linear síncrono	44
3.3.3	Movimento em arco.....	46
3.4	Conclusão	48
4.	Apresentação do <i>Software</i> MicroMachine	49
4.1	Filosofia de programação aplicada ao MicroMachine	49
4.2	Elementos da interface gráfica.....	50
4.2.1	wxWidgets: Framework para o MicroMachine.....	52
4.2.2	Editor de Textos: TextEd	53
4.2.3	Ambiente de renderização tridimensional: Model.....	54
4.2.4	Outras funcionalidades gráficas	55
4.2.4.1	Configurações mecânicas da máquina.....	56

4.2.4.2	Configuração de comunicação USB	57
4.2.4.3	Ajustes de posição e offset da origem	57
4.2.4.4	Importação de arquivos de furação Gerber	58
4.2.4.5	Interface para manipulação de arquivos	59
4.2.4.6	Interface para manipulação de textos	60
4.3	Elementos funcionais do MicroMachine	60
4.3.1	VariablesManager: Administrador de Variáveis	61
4.3.2	RS274 NGC Interpreter	62
4.3.3	<i>Driver</i> do interpretador de códigos	62
4.3.4	Rotina de controle de máquina	63
4.3.5	Comunicação com dispositivo externo	65
4.4	Conclusão	67
5.	Detalhamento do Hardware Desenvolvido	68
5.1	Dispositivo Mestre	69
5.1.1	Apresentação do PIC18F2550	70
5.1.1.1	Transceiver USB	71
5.1.1.2	Temporizadores	72
5.1.2	Visão geral do <i>firmware</i> do dispositivo mestre	72
5.1.3	Rotina de comunicação	74
5.1.3.1	Estrutura de dados	74
5.1.3.2	Algoritmo de Comunicação	78
5.1.4	Rotina de controle em tempo real	79
5.1.5	Implementação da eletrônica do dispositivo mestre	82
5.1.5.1	Saídas para Controladores de eixos	82
5.1.5.2	Saídas de contato seco	85
5.1.5.3	Saída de tensão analógica	86
5.2	Controlador de Eixo	87
5.2.1	Apresentação e modelagem do motor de passo	88
5.2.2	Acionamento do motor de passo	92
5.2.2.1	Sequenciamento das bobinas	94
5.2.2.2	Circuito de Acionamento bipolar	96
5.2.2.3	Projeto Térmico	100
5.2.3	Implementação controlador de eixo	101

5.2.3.1	Visão Geral do <i>Firmware</i> do Controlador de Eixo.....	102
5.2.3.2	Algoritmo de Controle	103
5.2.3.3	Sensor de corrente e filtro <i>anti aliasing</i>	104
5.2.3.4	Interface com o microcontrolador	106
5.3	Conclusão	107
6.	Resultados Experimentais Obtidos.....	108
6.1	Planejamento de trajetória	108
6.1.1	Análise dos resultados	111
6.2	Regulação de corrente.....	112
6.2.1	Análise dos resultados	115
6.3	Usinagem de peças	116
6.3.1	Usinagem em alumínio.....	117
6.3.2	Circuito Impresso	118
6.3.3	Artesanato e miscelânea.....	119
7.	Conclusão.....	120
8.	Bibliografia.....	122

RESUMO

O Controle Numérico Computadorizado – CNC – é uma das principais tecnologias que auxiliam a indústria moderna a manter o acelerado ritmo de desenvolvimento. Juntamente com os processos de *Computer-Aided Design* – CAD – e *Computer-Aided Manufacturing* – CAM –, o ciclo produtivo CAD-CAM-CNC viabiliza a alta produtividade e criatividade em períodos cada vez menores. Contudo, os altos custos relacionados à implantação desta tecnologia a torna proibitiva para processos produtivos de pequena escala e também a distanciam da academia. O presente trabalho relata o processo de desenvolvimento de um sistema de CNC completo, com três principais componentes: um avançado algoritmo para planejamento de trajetórias tridimensionais; o *software* MicroMachine, para controle da máquina e interface com usuário; e *hardware* dedicado para interface lógica e eletromecânica. A função do planejamento de trajetória é gerar perfis de referência para as malhas de controle de posição. A preocupação com o planejamento de trajetória existe devido às diversas restrições mecânicas existentes nas plantas controladas pela tecnologia em questão. A função do *software* MicroMachine é a de prover intuitiva interface com usuário, com ambiente tridimensional, representado em tempo real o processo realizado. O *software* ainda permite ao usuário configurar os parâmetros da máquina e do planejador de trajetórias, através de seus *menus* e barra de ferramentas. O *hardware* dedicado possui a função de realizar as tarefas de comunicação e controle de posicionamento dos motores de passo. É composto por um dispositivo mestre de comunicação e três dispositivos escravos, iguais entre si. O dispositivo mestre inclui interface *Universal Serial Bus* – USB – presente em quase todos os computadores modernos, tornando grande a sua aplicabilidade. Os dispositivos escravos são configuráveis, dando flexibilidade em sequenciamento e capacidade de acionamento dos motores ligados a eles. Para verificar o desempenho do sistema desenvolvido, foram analisados dois componentes individuais, quais sejam: o algoritmo de planejamento de trajetória; e o acionamento dos motores de passo. Foi ainda analisada a performance geral do sistema, através da aplicação prática da máquina para: usinagem em alumínio; furação de placas de circuito impresso; fabricação de artesanatos e miscelânea. Observou-se o bom funcionamento do algoritmo de planejamento de trajetória, sendo obedecidas as restrições impostas. Verificou-se também o funcionamento do sistema de acionamento de motor de passo, onde a regulação de corrente para os acionamentos por *full-step*, *half-step*, *microstep* 1/4 e 1/8 apresentadas, através das quais foi constatado o bom funcionamento do mesmo. Para as três aplicações práticas desenvolvidas, os resultados foram positivos e o sistema de CNC não apresentou anomalias no seu funcionamento. Através de um cuidadoso planejamento e projeto, o sistema, que é bastante transversal a diversas áreas da engenharia moderna, foi desenvolvido, testado e implementado com sucesso.

Palavras-chave: Controle Numérico Computadorizado; Planejamento de Trajetória; Desenvolvimento de *Hardware*.

ABSTRACT

Computer Numerical Control – CNC – is one of the leading technologies that support modern industry on keeping up the fast development rate seen in the last years. Along with the Computer-Aided Design – CAD – and Computer-Aided Manufacturing – CAM –, the productive cycle based on CAD-CAM-CNC systems enables high productivity and intensifies the creative process, reducing time to market for a given good. Opposing to all benefits brought by CNC based manufacture, the high costs related to usage of this technology restricts its application for small scale productive processes as well as results in a bigger distance from academic community. The present work reports the development process of an entire CNC system, consisting of three main components: an advanced tridimensional trajectory planning algorithm; MicroMachine software, for machine control and user interface; and a dedicated hardware, for logical and electromechanical interface. The trajectory planning's function is to generate references profiles for position's control loop. The concern here arises from several mechanical restrictions inherent to the plants controlled by this technology. The MicroMachine software's function is to provide user friendly interface, with a real-time tridimensional environment representing the developed process. MicroMachine allows user to setup the machine parameters as well as trajectory planning algorithm through its menus and toolbars. Dedicated hardware develops the tasks of communication and positioning control of stepper motors. It is made of a master communication device and three slave devices, equivalent among each others. Master device includes an Universal Serial Bus – USB – interface, which is a very common communication bus in modern computers, enhancing its applicability. Slave devices are reconfigurable, increasing its flexibility for sequencing schemas and driving power. In order to verify the developed system's performance, two individual components were analyzed, which are: trajectory planning algorithm; and stepper motor's driving circuit. It was analyzed the overall system's performance as well, through practical machining tasks, which included: aluminum machining; printed circuit board drilling; artwork and miscellaneous manufacturing. The trajectory planning algorithm performed well and all imposed bounds were obeyed. The driving currents' wave forms of the stepper motor driving subsystem for full-step, half-step, microstep 1/4 and 1/8 sequencing schemas were presented and, through these wave forms, it was evidenced its well performance. Among the practical machining tasks, the results obtained were positive and the developed CNC system performed free of any malfunctioning. Through a careful planning and design process, the system, which is transversal to several areas of modern engineering, was successfully developed, tested and deployed.

Keywords: Computer Numerical Control; Trajectory Planning; Hardware Development.

1. Introdução

A indústria tecnológica está em evolução cada vez mais acelerada e o tempo entre uma ideia inovadora e outra cada vez menor. Para apoiar este fenômeno, diversas tecnologias foram desenvolvidas, dentre as quais se citam *Computer Aided-Design (CAD)*, *Computer Aided-Manufacturing (CAM)* e Controle Numérico Computadorizado (CNC).

As ferramentas CAD consistem no uso do computador pessoal (*Personal Computer – PC*) para auxiliar o desenvolvedor na criação, alteração, análise e otimização de um determinado projeto. As ferramentas CAM servem para planejar a fabricação de peças desenvolvidas com CAD, dessa vez levando em consideração as restrições do processo fabril e especificidades de cada sistema. Os sistemas de CNC por sua vez recebem informações provenientes do sistema CAM e as executa, de acordo com o planejado.

Com este conjunto de ferramentas, o desenvolvedor pode elaborar o conceito inicial no CAD, planejar a sua manufatura com o CAM e a executar com o CNC. A utilização deste fluxo de trabalho trás duas vantagens: redução do tempo de projeto de determinado produto e permite uma união maior entre o processo de criação e o de execução.

O Controle Numérico é uma forma específica de controlar sistemas onde o posicionamento é a variável principal a ser controlada. Como o nome sugere, valores numéricos representam os pontos desejados do atuador e também codificam informações simbólicas com funções secundárias. Estes valores são codificados em números e letras, ou seja, em códigos alfanuméricos.

Em um fluxo de trabalho completamente assistido por computador, ou seja, que utiliza CAD-CAM-CNC, este código é advindo do sistema CAM. Um técnico experiente é capaz também de programar diretamente utilizando o código alfanumérico, contudo, na prática isso se limita a apenas operações simples.

As máquinas de CNC utilizam computadores modernos para realizar o controle numérico. Essa tecnologia tem como características predominantes versatilidade, acurácia, alta precisão e reprodutibilidade [1]. Existem, em

contrapartida, diversas desvantagens de utilizar máquinas de controle numérico computadorizado de escala industrial, como por exemplo:

- Maior investimento inicial, que pode ir desde R\$9000,00, para máquinas usadas e de pequeno porte, até além de R\$1.500.000,00, para máquinas de porte industrial;
- Manutenção encarecida, por conta da alta complexidade eletromecânica;
- Alto custo de operação, por necessitar de mão de obra qualificada para operação das mesmas.

Por estes motivos, por cerca de vinte anos a pequena indústria ficou com acesso restrito a esta tecnologia, o que aumenta mais ainda a disparidade entre uma indústria de grande porte e a pequena indústria.

O que veio a mudar esse panorama foi um projeto do *National Institute of Standards and Technology* – NIST – dos Estados Unidos gerou um *software* de domínio público intitulado *Enhanced Machine Controller*, cuja documentação está disponível em [2]. Este programa foi desenvolvido para o sistema operacional Linux e foi através dele que se tornou possível aplicar a tecnologia do CNC em pequenas máquinas de baixo custo.

Após este programa pioneiro, diversos outros programas nele baseados foram produzidos, entre os quais estão o EMC2, o MACH 3 e o TurboCNC. Estes *softwares*, contudo, estão sujeitos à latência quando se utiliza um sistema operacional multitarefas com *soft real time*, como são os casos do Linux e do Windows. Isso ocorre devido à forma de funcionamento destes sistemas operacionais, que são baseados em fatiamento do tempo e em um agendador de tarefas (*time slicing* e *task scheduler*), onde o sistema operacional entrega o controle do processador de programa a programa, o que pode comprometer o desempenho de sistemas de tempo real. Além dessas limitações, os sistemas são baseados em porta paralela, uma interface que é cada vez menos comum de ser encontrada nos PCs atuais.

Como um sistema completo de CNC envolve diversas áreas do conhecimento, como controle de sistemas, eletromecânica, mecânica e programação de computadores, as linhas de pesquisa envolvendo sistemas de CNC são muito diversas. Alguns dos tópicos mais ativos nesta linha de pesquisa são: i) Planejamento de trajetórias; ii) Controle de máquinas aplicado

a sistemas de posicionamento; iii) controle em tempo real; iv) monitoramento de desempenho de máquinas.

Em diversos momentos do desenvolvimento do trabalho foi necessário o desenvolvimento de *software*, *firmware* e *hardware*. Para tanto, trabalhos como [3], [4], [5] e [6] foram utilizadas durante o desenvolvimento da seção baseada em PC e os *datasheets* das famílias de dispositivos dsPIC33F e PIC18F foram utilizados como suporte para o desenvolvimento da seção embarcada. Os conhecimentos apresentados nestes textos foram aplicados em conjunto com as referências apresentadas nos próximos parágrafos.

Foi possível dividir o planejamento de trajetória em dois segmentos distintos de maior relevância: trabalhos que são voltados para os conceitos originais do controle numérico e trabalhos que investigam o controle de máquinas a partir dos fundamentos do CAD. Enquanto originalmente o controle numérico se baseava em movimentos segmentados, desenvolvidos com o uso de formas primitivas como linhas e arcos, o CAD se baseia em *Non-Uniform Rational B-Spline* (NURBS), que são curvas de geometria complexa, popularizada justamente pelo aumento crescente da capacidade de processamento dos computadores.

A literatura básica para o planejamento de trajetória foi encontrada em [7]. Em [8] é apresentada uma técnica de quinze segmentos para o planejamento de trajetórias unidimensionais com restrições de até quarta ordem, aplicado a um sistema mecânico de posicionamento unidimensional, também descrita superficialmente em [7]. Já em [9] é delineado um algoritmo alternativo, onde o deslocamento é dividido em cinco momentos distintos, em contraste aos quinze momentos distintos aplicados em [8]. O trabalho de [10] apresenta um conjunto de técnicas para permitir a união de trajetórias distintas, buscando otimizar o tempo final utilizado no deslocamento.

Nos trabalhos [11] e [12] são apresentadas propostas para agregar as NURBS aos sistemas de controle numérico. O primeiro trabalho se propõe melhorar o erro de rastreamento. Já o segundo propõe um interpolador de tempo real para as curvas em questão.

Para o desenvolvimento dos acionamentos eletrônicos dos motores de passo, diversas fontes básicas foram consultadas. O livro [13] apresenta uma visão detalhada dos motores de passo, abordando tipos de acionamento,

dinâmica dos motores de passo e fenômenos relacionados, como ressonância em frequências médias e tensões reversas induzidas. O documento técnico [14] apresenta uma visão geral dos motores de passo enumerando superficialmente diversas características positivas e negativas acerca do uso deste tipo de acionamento. Além destes, livros como [15] e [16] serviram como suporte teórico para fenômenos eletromecânicos. Em complemento à teoria de máquinas elétricas, diversas referências na área de eletrônica foram consultadas, como o livro [17] e o documento técnico [18]. A teoria de eletrônica de potência foi extraída do livro [19].

Para contextualizar academicamente a tecnologia de acionamentos de motores de passo empregada neste trabalho, foram consultados alguns trabalhos atuais. Foram consultados trabalhos que apresentam técnicas bastante distintas para o controle de máquinas, quais sejam: controle em malha aberta com o uso de *half-step* e *microstep* para melhorar a resposta do sistema; e controle em malha fechada, utilizando diversas técnicas de controle para melhorar o desempenho dinâmico do sistema.

Em [20] é apresentado um conceito de sistema de controle adaptativo para motor de passo, aplicando-se eletrônica baseada em FPGA e diversas técnicas de controle moderno, como Filtro de Kalman e Controle *Fuzzy* adaptativo, e também controle clássico, fazendo uso do controlador Proporcional Integral (PI). Apesar de fazer diversas afirmações acerca do quão melhor é o sistema apresentado, não foram apresentados resultados palpáveis para suportar esta tese. Contudo, em trabalho mais atual dos mesmos autores [21], resultados mais sólidos são apresentados, embora, com uma implementação mais simples do que o conceito inicialmente proposto, uma vez que no novo trabalho é desconsiderado o controle adaptativo baseado em *Fuzzy*.

Em [22] é descrito um sistema de acionamento de motor de passo em malha aberta com emprego da técnica de micropassos, que permite melhorar a precisão de posicionamento e mitigar vibrações. Foi utilizado nesta implementação um Conversor Digital Analógico (*Digital Analog Converter* – DAC) que gera referências de corrente e este sinal é então comparado com a corrente atual circulando na máquina. Através da modulação do sinal resultante por oscilador, gera-se um sinal *Pulse Width Modulated* (PWM) que por fim é

utilizado para comandar os transistores que acionam os enrolamentos efetivamente. Curiosamente, os diagramas eletrônicos apresentados são todos utilizando componentes lógicos de baixa densidade de transistores.

Em relação ao controle de tempo real aplicado a sistemas de CNC, o trabalho de [23] apresenta uma implementação de um interpolador de trajetórias, baseado em sistema embarcado executando o Windows.CE. O autor do trabalho acredita que o Windows.CE é a plataforma ideal para sistemas de CNC, devido sua capacidade de comunicação, recursos de *software* disponíveis, *kernel* compacto e leve.

O trabalho [24] apresenta o desenvolvimento de controle numérico computadorizado baseado em PC executando o sistema operacional Windows 2000/XP. O autor faz uso de *hardware* comercial dedicado, que executa o papel de temporização. Conforme mostrou o autor, o conjunto Windows – PC não satisfaz as condições necessárias para controle em tempo real de sistemas de alto desempenho.

Já [25] apresenta o desenvolvimento de um sistema baseado em PC – Linux, com estrutura *dual-kernel*, dividindo as etapas de tempo real, onde o controle é realizado, e de tempo compartilhado, onde são executadas interface com o usuário e programas de CNC, baseado no padrão RS274.

No trabalho [9], é feita uma análise de vantagens e desvantagens do uso de sistemas operacionais de tempo real executando em sistemas embarcados aplicados ao CNC. O autor utiliza o sistema de tempo real μ C/OS – II executando em um processador com arquitetura ARM para tarefas menos matematicamente intensivas e um *Digital Singal Processor* (DSP) para executar tarefas mais exigentes.

Ao longo dos trabalhos pesquisados, foi possível verificar que nenhum deles apresentava interface amigável, possuindo apenas informações de posicionamento de maneira pouco polida, rústica e não amigável. O único trabalho que mostrou informações mais relevantes através de espaço tridimensional, mas ainda assim de maneira pouco elaborada, foi [26].

1.1 Objetivos do trabalho

O principal objetivo deste trabalho foi o de desenvolver um sistema de CNC completo. Para tanto, as metas específicas do trabalho foram: i) o desenvolvimento de *software* para interface com sistemas CAM; ii) eletrônica para interface com sistemas de acionamento, baseado em Universal Serial Bus (USB); iii) sistema eletrônico para acionamento de motores de passo, para fazer o posicionamento e iv) o desenvolvimento de uma planta mecânica piloto, controlada através dos outros sistemas citados.

Para a implementação do sistema, prezou-se pelo baixo custo, de modo que todos os componentes utilizados foram desenvolvidos desde o conceito inicial até o protótipo, sempre dando preferência pelo uso de ferramentas abertas ou gratuitas, para evitar o aumento do custo final do sistema desenvolvido. De fato, duas ferramentas não livres foram utilizadas ao longo deste trabalho, são elas o *Integrated Development Environment* (IDE) Microsoft Visual Studio 2010 e o ambiente de modelagem 3D SolidWorks 2010.

O trabalho apresenta quatro subprodutos: i) o *software* de controle da máquina; ii) interface USB entre o PC e a máquina; iii) acionamento dos motores de passo; iv) e planta mecânica. Cada elemento foi desenvolvido desde o seu conceito inicial até a fabricação de um protótipo, sendo todo o processo de desenvolvimento, projeto e construção realizado localmente.

O *software* apresenta um inovador ambiente tridimensional, destacando-se dos demais produtos existentes, pois facilita ao usuário visualizar o procedimento realizado, podendo futuramente ser aplicado para simulações do processo de fabricação.

Além desta inovação visual, o *software* ainda possui um avançado algoritmo de planejamento de trajetórias, novamente destacando-se dos demais produtos, uma vez que permite ao usuário parametrizar elementos indisponíveis em outras soluções.

Uma vez que se detém o código fonte completo do programa, funcionalidades diversas podem ser adicionadas ao programa, à exemplo da importação de arquivos de furação de programas CAD para desenvolvimento de circuitos eletrônicos, que já é uma funcionalidade inclusa.

Devido à arquitetura desenvolvida, o sistema não sofre ação da latência do PC, o que melhora o seu desempenho, pois atende mais irrestritamente aos requisitos do controle de tempo real, como é o caso de diversos produtos comerciais e acadêmicos atualmente disponíveis. Além de facilitar o controle, a baixa latência reduz vibrações advindas da falta de periodicidade introduzida pelo *jitter*. Isso só foi viável por que a temporização foi delegada a um microcontrolador dedicado presente na interface USB.

O acionamento do motor de passos foi desenvolvido utilizando microcontrolador com funcionalidades de DSP embutidas, o que permite a adição de novas funcionalidades ao código do mesmo. Apesar de já ser bastante comum, a única funcionalidade extra atualmente implementada no microcontrolador é o ajuste da tecnologia de *stepping*, podendo ser *full-step*, *half-step* e *microstep*.

Este trabalho está dividido em sete capítulos, sendo este o primeiro. O segundo Capítulo apresenta uma visão geral da máquina de controle numérico computadorizado, explorando suas características e principais componentes. O terceiro Capítulo descreve o algoritmo de planejamento de trajetória aplicado no sistema desenvolvido. O capítulo quatro relata o desenvolvimento do *software* de controle, denominado de *MicroMachine*, através do detalhamento dos seus componentes bem como dos algoritmos que implementam o controle da máquina. O quinto capítulo apresenta o *hardware* desenvolvido, que consiste em dois tipos de dispositivos: dispositivo mestre, que realiza a comunicação USB; e controlador de eixo, responsável pelo controle e acionamento dos motores de passo. O sexto Capítulo apresenta resultados obtidos e suas análises, buscando verificar o desempenho geral do sistema desenvolvido, ressaltando características positivas e negativa. Por fim, o sétimo Capítulo conclui o trabalho, apresentando as considerações finais ao trabalho.

1.2 Publicações oriundas deste trabalho

Anteriormente à publicação do texto desta dissertação, os seguintes trabalhos científicos foram publicados: [27] é o trabalho de conclusão de curso, relatando o projeto completo de uma versão anterior de sistema de controle numérico computadorizado; [28] e [29] são relatórios sintéticos da mesma

versão anterior do sistema; e [30], que relata o sistema de planejamento de trajetória aplicado neste trabalho.

2. Controle Numérico Computadorizado

Controle Numérico é uma forma específica de controlar sistemas onde o posicionamento é a variável principal a ser controlada [30]. Como o nome sugere, valores numéricos representam os pontos desejados do atuador e também codificam informações simbólicas com funções secundárias. Estes valores são codificados em números e letras, ou seja, em códigos alfanuméricos.

O controle numérico foi originalmente utilizado pela aeronáutica dos Estados Unidos, na década de 1940. A ideia era utilizar algum mecanismo de armazenamento de dados para definir e usinar a superfície de aerofólios de aviões. Nesta ocasião, os computadores eletrônicos ainda eram apenas projetos, de forma que as tecnologias utilizadas eram cartões perfurados, fitas magnéticas ou perfuradas, dentre outras possibilidades tecnológicas que então existiam [1].

Com a introdução dos computadores eletrônicos no meio industrial, emergiu o controle numérico computadorizado – CNC – que veio a suceder a tecnologia de controle numérico. Falar-se-á neste Capítulo, mostrando os seus elementos internos, formas de funcionamento, aplicações e uma breve análise construtiva dos principais elementos.

2.1 Elementos de Controle Numérico

Um sistema de controle numérico consiste basicamente em três componentes: uma sequência de comandos; uma unidade de controle de máquina; e uma planta eletromecânica [1].

A sequência de comandos é um conjunto de instruções que irão descrever o comportamento do atuador em relação à peça a ser trabalhada. Estas instruções devem ser codificadas de forma que seja compatível com a linguagem nativa da unidade de controle de máquina. Dois exemplos de linguagens entendidas são os código G e código M.

A unidade de controle de máquina é a eletrônica necessária para decodificar e interpretar a sequência de comandos e controlar o posicionamento do atuador. Nas primeiras máquinas de controle numérico, a

unidade de controle de máquina era usualmente baseada em relés de contato seco e válvulas. Com o passar do tempo, estas unidades de controle de máquina passaram a ser implementados com microprocessadores. De fato, a utilização de microprocessadores tornou o processo computadorizado, passando a ser conhecido como Controle Numérico Computadorizado (CNC).

A planta eletromecânica é o elemento que apresenta maior variedade de topologias, uma vez que existem máquinas tão simples como as com dois graus de liberdade, como em um plano cartesiano XY, como máquinas com seis graus de liberdade como em um plano cartesiano XYZ combinado com movimentos de rotação em torno dos três eixos da peça a ser trabalhada. O exemplo mais comum destas são as máquinas de três graus de liberdade, varrendo o espaço nas direções dos eixos XYZ, conforme apresenta a Figura 2.1.



Figura 2.1 - Planta eletromecânica de uma máquina de com três graus de liberdade. (Fonte: MDA Precision)

Um dos principais problemas a ser tratado na elaboração de uma máquina CNC é o controle de movimento. Existem processos que são executados em pontos definidos no espaço, onde apenas o preciso posicionamento do atuador é importante. Estes processos levam a soluções de controle ponto a ponto, não importando para o fim o caminho tomado pelo atuador final.

O problema do controle ponto a ponto é a definição do caminho ótimo para a execução do posicionamento, de forma a percorrer o menor caminho sequencialmente, sendo um problema de otimização do código da peça.

Existem também processos que são executados ao passo que o atuador final se move, por exemplo: o processo de torneamento, de fresamento, solda de arco contínua e prototipagem de placas de circuito impresso. Já para estes processos, controle de movimento contínuo é necessário, uma vez que o caminho pode ser uma reta, um arco ou um caminho curvilíneo qualquer.

Já o problema do controle de movimento contínuo é um pouco mais complexo, uma vez que pode envolver o movimento simultâneo de dois ou mais eixos, permitindo assim controlar a trajetória do atuador em relação à peça. Quando o controle contínuo é utilizado para realizar movimento em relação a apenas um eixo da máquina, esta trajetória é chamada de corte reto. Quando o controle contínuo é usado para movimentar eixos simultaneamente, esta trajetória é chamada de contorno.

Existem aplicações, como por exemplo a prototipagem de placas de circuito impresso, nas quais se faz necessário realizar movimentos ponto a ponto e movimentos contínuos. A Figura 2.2 apresenta uma placa de circuito impresso típica criada a partir de um processo mecânico.

Nesta placa, o isolamento – ou ilhamento – do cobre é realizado através da remoção do excesso do mesmo por uma ferramenta de corte lateral – fresa. Neste, a trajetória percorrida pela ferramenta é crítica, já que se a máquina simplesmente se deslocar respeitando apenas os pontos inicial e final, o resultado não será condizente com o esperado.

Já a furação da placa é inerentemente um problema de movimentação ponto a ponto, onde a máquina se desloca para a localização de um furo e

realiza um ciclo de furação. Neste caso, o que é de maior relevância é o correto posicionamento da máquina, não sendo importante a trajetória em si.

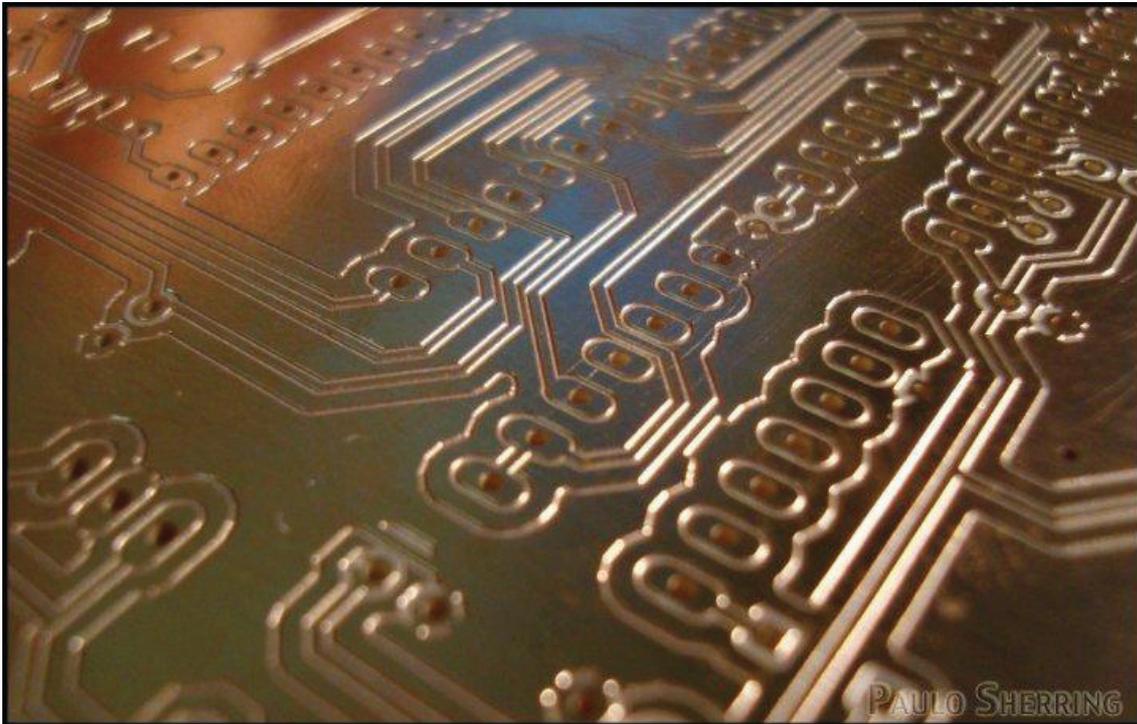


Figura 2.2 - Exemplo de aplicação de trajetória contínua.

2.2 Controle Numérico Computadorizado

Controle numérico computadorizado é uma tecnologia que evoluiu do controle numérico, a partir da aplicação de microcomputadores para gerar, interpretar e executar o controle sequencial que descreve o comportamento do atuador. O principal objetivo do CNC é reduzir o tempo de programação da peça, o que aumenta a capacidade operacional da máquina. De forma secundária, objetiva-se também tornar o processo de usinagem mais amigável com o operador do processo.

Com estudos mais avançados, a introdução de computadores no controle numérico também tornou possível o aumento da vida útil da ferramenta do atuador, a redução do custo final do produto, a mudança facilitada de programação e possibilitou ainda outros diagnósticos de mais alto nível, como predição de custos extras e melhor agendamento produtivo.

De forma resumida, as principais características da aplicação do CNC em processos industriais são [1]:

- Armazenamento de mais de uma programação – permitindo fácil adaptação da máquina para o seu uso atual;
- Várias formas de gravar uma programação – com o advento dos computadores, existe a possibilidade de se desenhar uma peça em um *software* CAD e simplesmente o exportar para um disquete, um cartão de memória ou mesmo transferir a programação;
- Edição da programação na própria máquina;
- Execução de ciclos – fazendo uso da crescente capacidade de armazenamento, podem-se programar macros e fazer chamadas a estas periodicamente, ao invés de gravar a instrução inteira repetidamente;
- Interpolação por métodos diversos;
- Propriedades de posicionamento alteráveis;
- Compensação de tamanho e comprimento da ferramenta do atuador – sendo de grande importância para o reaproveitamento de ferramentas desgastadas pelo uso;
- Interfaces de comunicação – seguindo a tendência de diversificação dos meios de comunicação entre o computador e os equipamentos a ele ligados, a maioria das máquinas de CNC modernas possuem comunicação através de rede ethernet, RS-232, USB ou porta paralela;
- Ferramentas de diagnóstico – com a inteligência embarcada nas unidades de controle de máquina, os diagnósticos ficam cada vez mais completos, podendo monitorar os principais aspectos da máquina, como óleos lubrificantes, desgaste de escovas e também eventuais problemas elétricos.

O principal elemento de uma máquina de CNC é a unidade de controle de máquina. Este é o responsável por toda a inteligência embarcada em uma máquina e é também o elemento que difere uma máquina simples, como as de dois graus de liberdade, de uma máquina de diversos graus de liberdade, conforme discutido anteriormente.

A interface de entrada e saída provê a comunicação com os vários componentes do sistema CNC, podendo ser um barramento, paralelo, serial ou um misto de ambos, como num canal multiplexado. Pode permitir ainda comunicação de mais alto nível, fazendo a interface com *displays*, teclado, rede local ethernet e dispositivos.

Em números crescentes desde a década de 80, os computadores estão sendo utilizados cada vez mais na indústria para implementar controle de processos. Seguindo esta tendência, as máquinas de CNC apresentam duas topologias: na primeira, o PC é utilizado para escrever e simular a programação de uma peça, ou mesmo gerar a codificação a partir de um desenho de alto nível, como ocorre nos sistemas CAD e CAM; na segunda, o computador pessoal é dotado de uma interface com a máquina, utilizada para controlar diretamente o acionamento da mesma.

2.3 Aplicações do CNC em processos industriais

O controle numérico computadorizado foi aplicado primeiramente em processos de usinagem de materiais ferrosos. Entretanto, com a popularização desta técnica, diversas áreas passaram a utilizá-la como, por exemplo, a área de robótica, com suas aplicações de robôs soldadores de tubos, cortadores de engrenagem, cortadores e soldadores baseados em chamas, lasers, plasma e braços robóticos para prototipagem rápida [30].

Apesar da grande possibilidade de aplicação, o comando numérico computadorizado pode ser dividido entre duas grandes categorias, são elas: aplicações de usinagem, normalmente associadas à indústria de metalurgia; e aplicações que não são de usinagem, envolvidas em uma gama cada vez maior de aplicações, de onde se podem citar trabalhos de inspeção, posicionamento e inserção de componentes [1].

A área da usinagem de peças é uma das mais importantes áreas da aplicação do CNC. Neste processo, são aplicadas as técnicas de torneamento, furação, fresamento e polimento. Desenhos esquemáticos de cada uma destas atividades são mostrados na Figura 2.3. Cada um dos quatro processos de usinagem é realizado por uma máquina-ferramenta, que vem a ser o atuador.

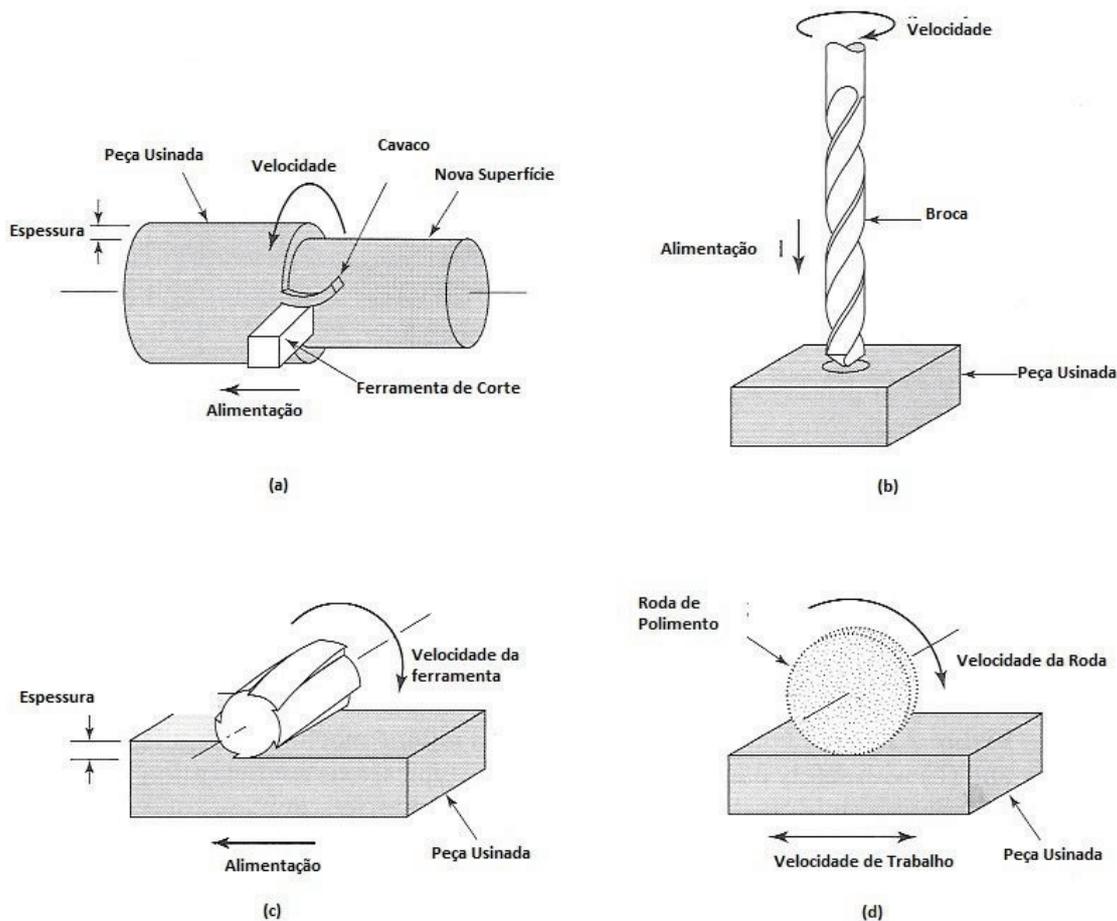


Figura 2.3 - Aplicações mais comuns do CNC em usinagem de peças: a) torneamento; b) furação; c) fresamento de faceamento d) polimento (Adaptado de [1]).

Podem-se citar diversos outros tipos de máquinas de CNC cuja aplicação final não é correlata de usinagem, como:

- Máquina de inserção de componentes eletrônicos - existem diversas máquinas no mercado que realizam o posicionamento e a inserção dos componentes eletrônicos de forma automática. O código alfanumérico pode ser gerado diretamente a partir dos arquivos de saída dos programas de desenvolvimento de circuito impresso, também conhecidos como *gerber*;
- Máquinas de medição de coordenadas – são máquinas utilizadas para realizar medidas ou para checar dimensões em uma determinada peça;

2.4 Características, vantagens e desvantagens do CNC

Existem algumas características peculiares ao sistema de controle numérico, advindas das especificações produtivas e comerciais das máquinas, quais sejam: alto custo por máquina; grande capacidade de adaptação; capacidade produtiva limitada. Estas características tornam a aplicação da tecnologia adequada a: [1]

- Peças com geometria complexa, como aerofólios e hélices de turbinas, que excluem quase totalmente a possibilidade de execução da peça com máquinas convencionais.
- Peças feitas sob encomenda, logo, em número reduzido, tornando a aplicação viável.
- Grande variedade de peças a serem produzidas;
- Processos com tipos diferentes de trabalho.

A aplicação da máquina de CNC é mais adequada em processos onde o número de peças a serem produzidas não seja muito grande. Em termos quantitativos, a aplicação é economicamente viável quando a produção que vai desde a unidade até algumas centenas de unidade. Isto ocorre devido a máquina não ser otimizada para um processo específico, mas, ainda assim, apresenta bons resultados quando a quantidade de peças produzidas não é exageradamente grande.

Algumas peças apresentam usinagem de formas diversas, necessitando de ferramentas para furação, rosqueadores, fresamento, etc. Normalmente, a realização da peça necessitaria de uma grande variedade de máquinas, aumentando muito o custo de produção para pequenas e até médias quantidades da peça. Com a aplicação de máquinas de CNC, este custo é bastante reduzido.

Uma vez observadas as características acima, a aplicação de controle numérico será muito vantajoso sobre os outros métodos produtivos. Condensando todas as vantagens da aplicação do controle numérico [1]:

- Tempo de produtividade nula reduzido, uma vez que a peça a ser trabalhada não precisará ser transportada entre as máquinas de aplicação específica;

- Maior acurácia e repetibilidade, quando comparado com outros métodos, que podem depender da habilidade do operador da máquina, resultando em um melhor padrão de qualidade da peça;
- Redução de perdas de material, alcançada com a redução da necessidade de manuseio da peça e devido a maior acurácia da máquina;
- Alteração do processo realizado de forma mais facilitada, já que isso pode ser alcançado apenas carregando um novo código na máquina. Esta possibilidade também leva a tempos de manufatura reduzidos;
- Elementos de fixação da peça a ser trabalhada mais simples em relação aos outros métodos;

Em compensação, são diversas as desvantagens do uso de máquinas de controle numérico computadorizado, como por exemplo:

- Maior investimento inicial, uma vez que as máquinas de CNC têm um custo inicial maior em relação às máquinas convencionais. Isso se deve a diversos fatos, como a utilização de *softwares* proprietários para o funcionamento da máquina, eletrônica embarcada de alto custo e peças mecânicas utilizadas com precisão aumentada;
- Manutenção encarecida, dado o relativo aumento da complexidade do sistema em relação a máquinas convencionais;
- Programação da peça geralmente leva a um custo maior por peça, dada uma produção reduzida de peças;
- Para maximizar os benefícios da máquina e reaver mais rapidamente o investimento inicial, o sistema deverá operar em períodos extras, podendo significar maiores custos com supervisores de máquinas;

2.5 Funcionamento de uma máquina de CNC

Os sistemas de posicionamento utilizados nas máquinas de controle numérico podem ser construídos utilizando motores de passo ou servomotores:

os motores de passo representam custos menores, já que suas características construtivas são inerentemente voltadas para posicionamento de precisão[15]; os servomotores podem ser implementados com motores de corrente contínua ou motores síncronos, acionados de maneira sistêmica de forma a realizar o controle do posicionamento.

Os servomotores são normalmente utilizados em sistemas de controle numérico onde uma maior potência é requisitada. Isso normalmente é observado em sistemas de usinagem de materiais pesados, de alta dureza. A implementação utilizando servomotor é normalmente mais cara, uma vez que a sua utilização tem requisitos especiais, como a utilização de acionamento especificamente projetado, sensores de fechamento de malha, como os *encoders* ópticos.

Os motores de passo são mais adequados em sistemas onde a potência requisitada para a operação do mesmo é reduzida, devido à limitada capacidade de produzir torque no motor de passo. Entretanto, o sistema final fica com preço sensivelmente menor do que nas implementações com servomotor, uma vez que a eletrônica de acionamento como um todo possui menor tecnologia agregada, levando a preços finais menores.

O movimento mecânico criado por ambas as máquinas é rotativo. Um elemento de conversão mecânica precisa ser utilizado neste ponto, para converter energia mecânica rotativa em energia mecânica translacional. Estes elementos podem ser cremalheiras ou fusos.

2.5.1 Aspectos Mecânicos do Fuso

A utilização do fuso vem de longa data, sendo sua primeira aplicação prática historicamente devida a Arquimedes, quando no século III a.C., utilizou um cano enrolado em um eixo para realizar o descarregamento de água de dentro de embarcações [31]. Este arranjo ficou conhecido como Parafuso de Arquimedes.

Na aplicação ao CNC, é mais comum se utilizar fusos com castanhas, já que estes conferem ao sistema uma precisão maior. A Figura 2.4 mostra uma vista lateral do acoplamento e da interação entre o sistema elétrico e o sistema mecânico.

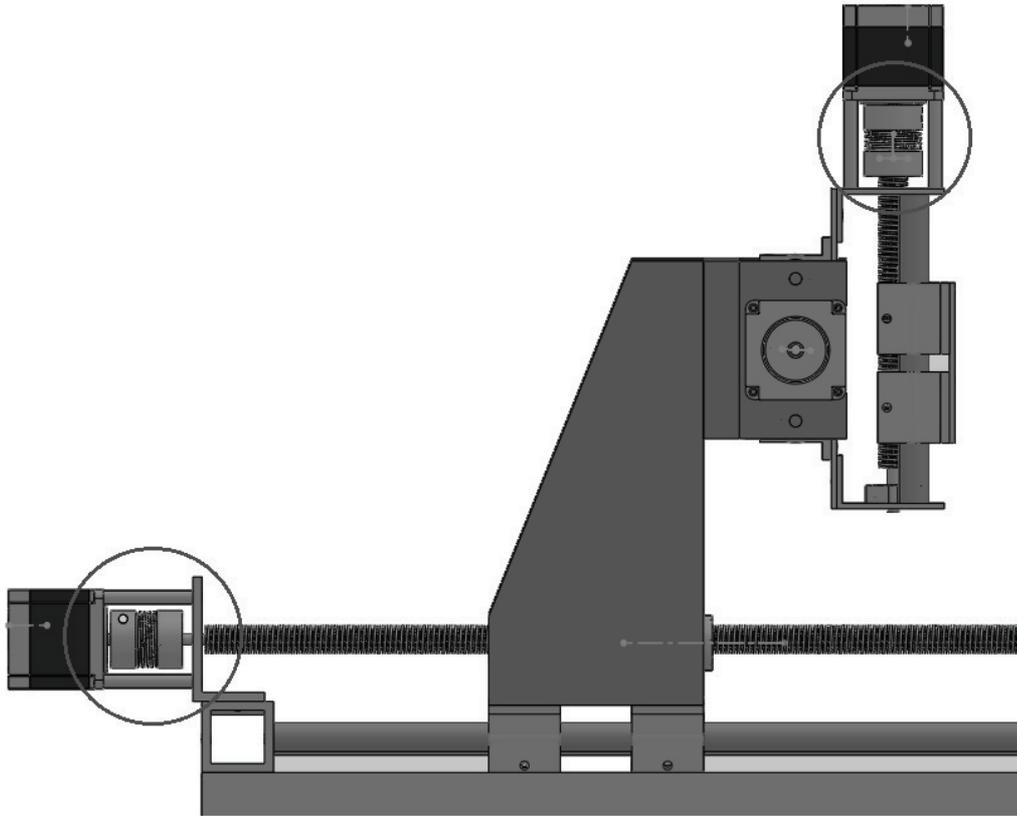


Figura 2.4 – Acoplamento mecânico entre o motor e fuso.

É claro que com os notórios avanços tecnológicos desde esta aplicação, a utilização destes sistemas foi otimizada. Existem dois tipos de fusos: fusos com sulcos retos e fusos esféricos. Daqueles, existem diversos tipos, quais sejam Acme, Trapezoidal – ou Acme métrico -, *Hileads* e *Torqsplines*. As máquinas de CNC comerciais utilizam uma combinação dos fusos de esferas recirculantes e fusos com sulcos retos, de forma a extrair as melhores características deste.

A eficiência na conversão de torque em pressão axial dos fusos com alta capacidade de acionamento varia de acordo com o modelo, podendo ser tão baixo quanto 20% a 30% para o Acme padrão e tão alto quanto 75% para alguns *Torqsplines* [31]. Já os fusos de esferas recirculantes podem chegar a até 90%.

Em relação ao carregamento do fuso, este pode se dar por: compressão do fuso; tensionamento do fuso; carregamento axial; carregamento radial; carregamento excêntrico. Todos são mostrados na Figura 2.5. O carregamento ótimo é o carregamento axial, onde a carga apresenta uma resistência ao movimento que é no mesmo eixo do fuso. Para reduzir os

outros tipos de carregamentos no fuso, faz-se necessário o uso de guias lineares, que suportam os carregamentos não desejados, reduzindo estes esforços sobre o fuso.

Considerações sobre a vida útil devem ser feitas cuidadosamente em relação aos fusos. A vida útil de fusos com sulcos retos depende de diversas variáveis: temperatura de operação, lubrificação, velocidade, carga e contaminação por outros materiais. Já a vida útil dos fusos de esferas é bem definida, devido ao grande número de pesquisas realizadas na área. Em geral, um fuso com sulcos retos operando em condições favoráveis, ou seja, com os carregamentos indevidos reduzidos, tendem a ter uma vida útil maior do que os com esferas [31].

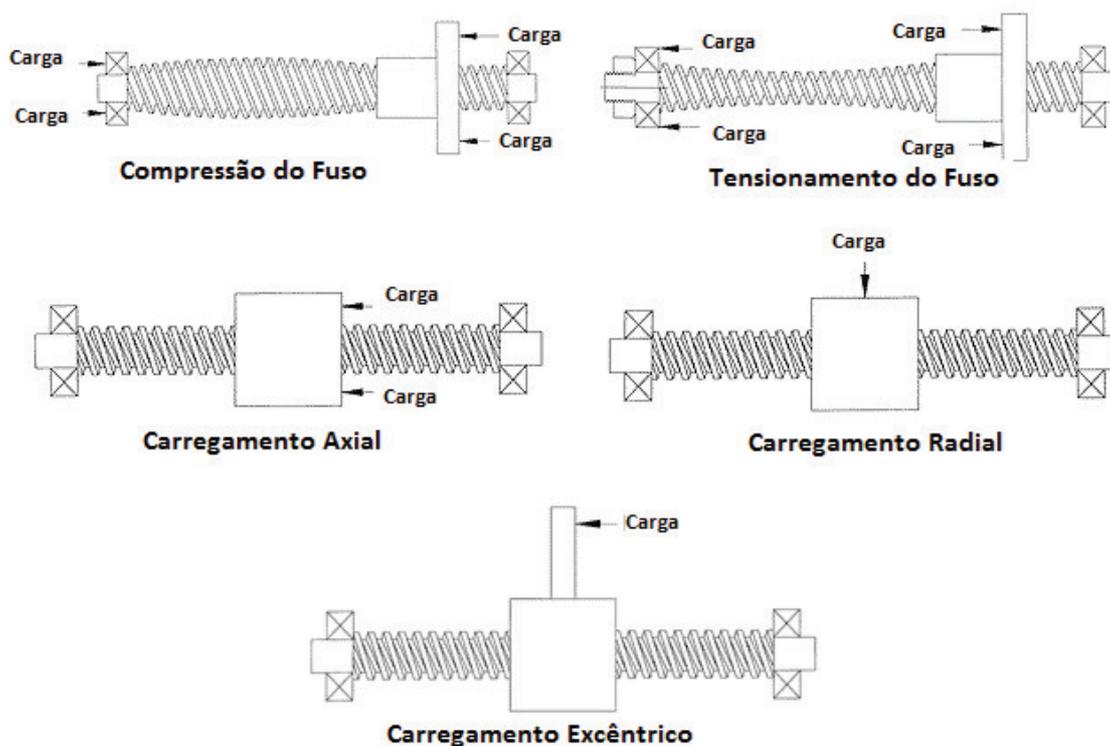


Figura 2.5 - Tipos de carregamento de um fuso (Adaptado de [31]).

Ao sofrer um deslocamento angular, causado por uma fonte de força motriz advinda de um motor de passo ou de um servomotor, o fuso atuará sobre a castanha com uma pressão axial. Esta pressão associa a força e a área de ação, sendo a área de ação dada justamente pela área de contato entre a castanha e o fuso.

A relação entre o deslocamento angular do fuso e a translação da castanha é regida pelo passo do fuso, p , dado em mm/revolução. p é dado pela distancia entre dois dentes do fuso. Assim, uma rotação completa – ou seja, $\Delta\theta = 360^\circ$ – irá gerar um deslocamento p . Com um sistema em malha aberta, utilizando motores de passo, seja α a resolução do motor, o deslocamento linear gerado por n_s passos é dado por:

$$x = n_s \cdot \alpha \cdot p \quad (2.1)$$

2.6 Programação da peça em Controle Numérico

Cada peça a ser fabricada deve ser previamente projetada. O projeto do código de CNC pode ser feito de formas mais diversas. Pode ser editado via editor de texto diretamente; pode ser desenvolvido utilizando CAD e posteriormente traduzido manualmente para texto; e pode ainda ser desenvolvido de forma completamente computadorizada, utilizando o CAD e posteriormente o CAM.

A primeira opção, de editar o texto diretamente, é bastante limitada, sendo aplicável apenas a peças de complexidade reduzida, uma vez que o mínimo erro de programação leva a resultados indesejados na peça final. A segunda opção consiste em desenhar primeiramente a peça em ambiente CAD, seguido de tradução das linhas e arcos da peça para código de CNC. Dessa forma, toda a geometria da peça é desenvolvida através do computador, reduzindo a possibilidade de erros.

A terceira opção, mais poderosa e utilizada largamente na indústria, consiste na utilização de computador para o projeto geométrico da peça em ambiente CAD, seguido do planejamento da manufatura, realizado por um *software* CAM.

Nas três metodologias, o resultado final é um código decimal codificado em binário (*Binary-Coded Decimal* – BCD) e em caracteres alfabéticos. Existem, no mundo, diversas normas para a codificação de CNC. Nos Estados Unidos da América, por exemplo, a sintaxe é definida pela norma RS274, que tem como revisão mais atual a RS274D, e EIA-274-D. Já na Europa, o padrão ISO 6983 é geralmente utilizado.

Ambos os padrões descrevem apenas o formato das instruções do programa para máquinas de CNC, de forma geral, sem tratar das especificidades de cada máquina. O objetivo maior das normas é então unificar os formatos anteriores de forma a obedecer a um padrão internacional para sistemas de controle de posicionamento. As revisões e atualizações das normas buscam introduzir formatação padrão para novas funcionalidades anteriormente não descritas.

2.6.1 O Padrão RS274NGC

A linguagem RS274NGC é baseada em linhas de códigos. Cada linha – também chamada de bloco – pode incluir comandos para que um centro de usinagem possa realizar diversas tarefas. Estas linhas de comando normalmente estão dispostas em um arquivo, compondo assim um programa de CNC.

Cada linha é composta por uma enumeração opcional seguida de uma ou mais palavras, que por sua vez consistem de uma letra seguida de um número. As palavras podem representar comandos propriamente ditos ou argumentos para os comandos. Por exemplo, “G00X25” contém duas palavras: a palavra “G00” representa o comando de avanço assíncrono rápido e “X25” é seu argumento, informando o destino no eixo X do comando em questão. A Tabela 2.1 relaciona as letras reconhecidas pelo padrão aos seus respectivos significados.

As principais palavras do padrão RS274NGC são as que começam com a letra G. Por isso, em diversas referências o padrão é chamado de código G. As palavras que começam com o código G normalmente causam alterações no estado mecânico da máquina, seja por efetuar um deslocamento ou por alterar como um deslocamento deve ser realizado. Existe ainda uma maioria de comandos que começam com a letra M, e dizem respeito aos periféricos da máquina, como configurações do atuador e sistemas de lubrificação e resfriamento. Na Tabela 2.2 estão relacionados alguns dos principais códigos G e a Tabela 2.3 relaciona os códigos M.

Tabela 2.1 - Letras utilizadas nas palavras do padrão RS274NGC.

Letra	Significado
A, B, C	Posição referente ao eixo A, B, ou C da máquina
D	Número para a compensação por raio da ferramenta
F	Taxa de alimentação
G	Função Geral
H	Índice do offset de comprimento de ferramenta
I, J, K	Offset no eixo X, Y ou Z, respectivamente
L	Número de repetições em um ciclo ou chave usada com a palavra G10
M	Função Miscelânea
N	Número da linha
P	Duração de pausa em ciclos ou com a palavra G04 ou chave usada com a palavra G10
Q	Incremento de alimentação em um ciclo G83
R	Raio de um arco
S	Velocidade de rotação do atuador, em RPM
T	Seleção de ferramenta
X, Y e Z	Posição referente ao eixo X, Y, ou Z da máquina

Tabela 2.2 - Principais códigos G utilizados pelo padrão RS274NGC

Código G	Significado
G00	Avanço assíncrono rápido
G01	Avanço síncrono à taxa de alimentação
G02	Interpolação em arco ou em hélice no sentido horário
G03	Interpolação em arco ou em hélice no sentido anti-horário
G04	Pausa
G10	Ajuste de origem das coordenadas do sistema
G17	Selecionar plano XY
G18	Selecionar plano YZ
G19	Selecionar plano ZX
G20	Selecionar unidades em polegadas
G21	Selecionar unidades em milímetros
G28	Retornar para posição de descanso
G30	Retornar para posição de descanso secundária
G40	Cancelar compensação por raio de ferramenta
G41	Iniciar compensação por raio de ferramenta à esquerda
G42	Iniciar compensação por raio de ferramenta à direita
G43	Ajustar offset por comprimento de ferramenta
G49	Cancelar offset por comprimento de ferramenta
G53	Deslocamento em coordenadas de máquina

G61	Ajustar controle de trajetória: modo de trajetória exata
G61.1	Ajustar controle de trajetória: modo de parada exata
G64	Ajustar controle de trajetória: modo contínuo
G80	Cancelar modo de deslocamento
G90	Modo de distância absoluta
G91	Modo de distância relativa

Tabela 2.3 – Principais códigos M utilizados pelo padrão RS274NGC

Código M	Significado
M00	Parada do programa
M01	Parada opcional do programa
M02	Fim do programa
M03	Girar atuador no sentido horário
M04	Girar atuador no sentido anti-horário
M05	Parar atuador
M06	Troca de ferramenta
M07	Ligar fluido de corte do tipo névoa
M08	Ligar fluido de corte do tipo <i>flood</i>
M09	Desligar ambos fluidos de corte
M30	Fim de programa, dispensar peça usinada e reset
M48	Desconsiderar velocidades e taxas de alimentação programadas
M49	Considerar velocidades e taxas de alimentação programadas
M60	Dispensar peça usinada e parada do programa

As palavras se dividem em dois grupos: modal e não-modal. As palavras modais são palavras que ficam memorizadas como última configuração ativa e têm efeito mesmo depois do bloco que as ativou. Já as não-modais somente têm efeito sobre o bloco em que ela é chamada.

As palavras modais se dividem em grupos, de modo que duas palavras de um mesmo grupo modal não podem ser ativadas em um mesmo bloco, caracterizando um erro de sintaxe. A razão para isso representar um erro é porque duas palavras do mesmo grupo modal possuem significados antagônicos, não fazendo sentido serem utilizadas na mesma linha. Por exemplo, a linha “G00X30G01Y20” é um exemplo de erro, pois nela existem duas palavras que ativam funções diferentes, são elas: “G00” ativa o avanço assíncrono rápido e “G01” ativa o avanço síncrono à taxa de alimentação.

2.7 Conclusão

A tecnologia de controle numérico computadorizado foi delineada neste capítulo, do ponto de vista mecânico, através da apresentação e descrição dos mecanismos envolvidos, e do ponto de vista lógico, com a introdução ao padrão de programação RS-274, utilizado no controle deste tipo de máquina. O padrão RS-274 representa o ponto de partida deste trabalho: desenvolver um sistema de controle numérico computadorizado compatível com o padrão RS-274. Para tanto, foram desenvolvidos algoritmos, *software* e *hardware*, que serão apresentados nos próximos Capítulos.

7. Conclusão

Sistemas de manufatura de alta produtividade e facilidade de uso formam a base produtiva moderna. Contudo, os custos envolvidos na sua utilização são demasiadamente altos, levando ao distanciamento entre o meio acadêmico e esta tecnologia. Estes custos também distanciam ainda mais o pequeno produtor da indústria de grande porte, em termos produtivos.

O trabalho desenvolvido envolveu diversas áreas da engenharia, como mecânica, controle, eletrônica de potência, *software* e microeletrônica. O objetivo de resgatar esta tecnologia para o meio acadêmico com baixos custos envolvidos foi alcançado com sucesso, sendo todos os componentes projetados, desenvolvidos e montados *in loco*.

Prezou-se pela redução do uso de ferramentas proprietárias, objetivando redução de custos de implementação. Quando não foi possível evitar por completo a sua utilização, buscou-se o uso de ferramentas gratuitas. Contudo, não foi possível evitar integralmente o uso de ferramentas proprietárias: o código da peça a ser manufaturada ainda é produzido com programas de terceiros. Do contrário, o usuário deve programar manualmente a peça, escrevendo os comandos alfanuméricos no programa MicroMachine.

O sistema desenvolvido compreende: i) um *software* de controle, baseado em PC, cujo desenvolvimento foi realizado utilizando C++ e diversas bibliotecas *open-source* ou livres para uso; ii) dispositivo com interface USB, responsável pela geração dos sinais de controle; iii) controlador de eixo, responsável pelo controle de posição dos motores de passo a partir dos sinais de comando.

O *software* integra um algoritmo de planejamento de trajetória avançado, com restrições parametrizáveis de até quarta ordem, e com excelentes resultados, além de ambiente tridimensional amigável ao usuário, sendo estes claros diferenciais deste trabalho. Os circuitos eletrônicos foram todos desenvolvidos, montados e testados de diversas formas, apresentando funcionamento aceitável em todos os aspectos analisados.

A montagem da planta mecânica apresentou algumas falhas, proveniente da usinagem das suas peças, levando a limitações nas velocidades de operação da

máquina. Contudo, desde que não se excedam os limites definidos de até 600 mm/minuto, a máquina apresentou funcionamento aceitável.

Como o sistema desenvolvido é composto por quatro componentes, os dividiu-se as propostas de trabalhos futuros individualmente. Todas as sugestões de alguma maneira buscam a obtenção de melhores resultados com a utilização da máquina, de uma maneira geral.

Para o controlado de posição de eixo:

- Desenvolver controlador de posição de eixo em malha fechada, com algoritmo para mitigar a ressonância do sistema;
- Utilizar chaves MOSFET no acionamento, com o objetivo de melhorar o desempenho do regulador de corrente;
- Utilizar métodos menos ruidosos para medição de corrente de carga, através da aplicação de amplificadores isoladores.

Para o dispositivo mestre:

- Substituir o microcontrolador de 8 bits por um de 32 bits, com maior capacidade de comunicação, com o objetivo de aumentar as margens de funcionamento da máquina;
- Implementar saídas configuráveis e programáveis pelo usuário, de acordo com os diagramas LADDER, para aumentar a flexibilidade do sistema desenvolvido, permitindo o uso de outros periféricos além dos já previstos e utilizados.

Para o *software* MicroMachine:

- Desenvolver um método que permita o uso de trajetórias descritas a partir de *splines*;
- Implementar a funcionalidade de mescla de trajetória,

Para a planta mecânica:

- Redesenhar a estrutura mecânica em certos pontos, onde foram detectados fragilidades no sistema que podem levar à redução do desempenho da máquina.

8. Bibliografia

- [1] M. P. Groover, *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. Upper Saddle River: Pearson, 2008.
- [2] T. R. Kramer, F. Proctor, and J. L. Michaloski. (1994, Apr.) The NIST RS274/NGC Interpreter - Version 1. [Online].
http://www.isd.mel.nist.gov/documents/kramer/RS274NGC_1.pdf
- [3] P. Deitel and H. Deiter, *C++ How to Program*, 7th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall Press, 2009.
- [4] R. Wazlawick, *Análise e Projeto de Sistemas de Informação Orientados a Objetos*, 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2010.
- [5] J. Smart, K. Hock, and S. Csomor, *Cross-Platform GUI Programming with wxWidgets*, 1st ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2005.
- [6] J. Axelson, *USB Complete*, 3rd ed. Madison: Lakeview Research LLC, 2005.
- [7] L. Biagiotti and C. Melchiorri, *Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots*. Berlin: Springer, 2008.
- [8] P. Lambrechts, M. Boerlage, and M. Steinbuch, "Trajectory planning and feedforward design for electromechanical motion systems," *Elsevier - Control Engineering Practice*, vol. 13, pp. 145-57, 2004.
- [9] Z. Zhanli, G. Shijun, W. Hengdi, and D. Sier, "A New Acceleration and Deceleration Algorithm and Applications," *Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA), 2012 Second International Conference on*, pp. 121-124, Jan. 2012.
- [10] J. Loyd and V. Hayward, "Real-Time Trajectory Generation Using Blend Functions," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Apr. 1991.
- [11] S. Fang, H. Yigang, H. Shuanghui, and H. Minghui, "Theory Research on NC Instruction Interpretation for Trajectory Trace," *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2011 Third International Conference on*, pp. 1008-1012, Jan. 2011.
- [12] L. H. C. Liangji, "NURBS Interpolation Method with Feedrate Correction in 3-axis CNC System," *Computer Engineering and Technology*, pp. 565-568, Jan. 2009.
- [13] V. V. Athani, *Stepper Motors : Fundamentals, Applications And Design*, 1st ed. Daryaganj: New Age International, 1997.

- [14] Industrial Circuits Application Note Stepper Motor Basics. [Online]. <http://www.solarbotics.net/library/pdflib/pdf/motorbas.pdf>
- [15] A. E. Fitzgerald, S. D. Umans, and C. Kingsley Jr., *Máquinas Elétricas*, 6th ed. São Paulo: Bookman Companhia Editora, 2006.
- [16] E. Bim, *Máquinas Elétricas e Acionamentos*, 1st ed. Rio de Janeiro: Campus, 2009.
- [17] P. Horowitz and W. Hill, *The Art of Electronics*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- [18] R. Mancini. (2002,) Op Amps For Everyone. [Online]. www.ti.com/lit/an/slod006b/slod006b.pdf
- [19] M. H. Rashid, *Eletrônica de Potência Circuitos, Dispositivos e Aplicações*. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1999..
- [20] N. Dahm, M. Huebner, and J. Becker, "Approach of an FPGA based adaptive stepper motor control system," *Reconfigurable Communication-centric Systems-on-Chip (ReCoSoC), 2011 6th International Workshop on*, pp. 1-6, Jun. 2011.
- [21] N. Dahm, M. Huebner, and J. Becker, "FPGA system-on-chip solution for a field oriented hybrid stepper motor control," *Systems, Signals and Devices (SSD), 2012 9th International Multi-Conference on*, pp. 1-6, Mar. 2012.
- [22] G. Baluta and M. Coteata, "Precision microstepping system for bipolar stepper motor control," *Electrical Machines and Power Electronics, 2007. ACEMP '07. International Aegean Conference on*, pp. 291-296, 2007.
- [23] H. Chaobin, L. Wanli, and X. Wuquan, "Study on the CNC system interpolation based on windows CE.NET and its real-time," *Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), 2010 International Conference on*, pp. 110-112, 2010.
- [24] W. Fang, M. Xunsong, and W. Kunqi, "Real time control of line contact machining CNC system based on windows," *Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on*, pp. 1487-1492, 2009.
- [25] H. Hai-peng, C. Guan-xin, and W. Zhen-long, "Development of a CNC System for Multi-axis EDM Based on RT-Linux," *Software Engineering, 2009. WCSE '09. WRI World Congress on*, pp. 211-216, 2009.
- [26] W. Fang, M. Xunsong, and W. Kunqi, "Real time control of line contact machining CNC system based on windows," *Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on*, pp. 1487-1492, 2009.
- [27] P. A. S. d. Rocha Junior, *Desenvolvimento de Máquina de Controle Numérico Computadorizado*. Belém, 2010.

- [28] P. A. S. Rocha Jr., R. Diogne de Silva e Souza, and M. E. de Lima Tostes, "Prototype CNC Machine Design," *Industry Applications (INDUSCON), 2010 9th IEEE/IAS International Conference on*, pp. 1-5, Nov. 2010.
- [29] P. A. S. Rocha Jr., R. Diogne de Silva e Souza, and M. E. de Lima Tostes, "Prototype CNC Machine Design," *Journal of Energy and Power Engineering*, pp. 1884-1890, Nov. 2012.
- [30] P. A. S. Rocha Jr., V. S. Kataoka, R. D. S. E. Silva, and M. E. L. Tostes, "Planejamento de Trajetória Aplicado a uma Máquina de Controle Numérico Computadorizado," *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática, 2012*, 2012.
- [31] J. Madison, *CNC Machining Handbook*. New York: Industrial Press Inc., 1996.
- [32] Roton. Application Engineering. [Online].
http://www.roton.com/application_engineering.aspx
- [33] G. Junker, *Pro OGRE 3D Programming*. New York: Springer, 2006.
- [34] C. Melchiorri and L. Biagiotti, "Smooth Trajectories For High-Performance Multi-axes Automatic Machines," *4th IFAC Symposium on Mechatronic Systems*, 2006.
- [35] S. S. S. Yeh, "Design of NURBS Curve Fitting Process on CNC," *American Control Conference*, pp. 3612-3617,, Jul. 2007.
- [36] T. Wang, Q. Liu, and L. Wang, "An RTOS-based embedded CNC system," *Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), 2010 International Conference on*, pp. 33-36, 2010.