FLÁVIO CAMARINHO MOREIRA

Influência do ângulo entre trajetórias lineares no tempo de execução de blocos em usinagem CNC de superfícies

Documento apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção Mecânica.

Orientador: Prof. Tit. João Fernando Gomes de Oliveira

São Carlos
2010

DEDICATÓRIA

Ao meu pai (em memória)
que esteve ao meu lado
durante todo este trabalho

AGRADECIMENTOS

Ao professor João Fernando Gomes de Oliveira, pela dedicação, pelos conselhos parceria só durante a elaboração desse trabalho.

À Irene, pelo apoio e paciência.

Aos professores Reginaldo Teixeira Coelho e Eraldo Jannone da Silva, pela amizade e auxílio.

A todos do laboratório OPF, em especial Adolfo, Ariel e Ricardo Arai sem os quais esse trabalho não poderia ser realizado.

A CAPES pelo suporte na forma de uma bolsa de estudos e ao programa de pós-graduação do Departamento de Engenharia de Produção.

A todos da empresa Sensoft, especialmente Dinho e Fábio, pelo suporte.

A minha mãe, minha irmã e a Alexandrina, pelo apoio e compreensão.

MOREIRA, F. C. **Influência do ângulo entre trajetórias lineares no tempo de execução de blocos em usinagem CNC de superfícies**. 2010. 128p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

O presente trabalho trata do desenvolvimento e análise de uma ferramenta de auxílio à otimização de programas CN com relação aos parâmetros tecnológicos planejados. Os atuais módulos de otimização presentes em sistemas CAM não levam em consideração variáveis relativas ao desempenho da máquina ferramenta e do processo, tais qual a dinâmica e a potência da máquina ferramenta, e a capacidade de processamento do CNC. Tal lacuna de informação pode gerar discrepâncias entre os resultados planejados e a realidade, o que faz com que constantes reajustes do processo baseados na experiência do operador sejam necessários. Nesse trabalho, é proposta e avaliada uma ferramenta de monitoramento de variáveis características da máquina ferramenta, cuja principal função é a previsão do tempo de usinagem na fabricação de superfícies complexas. Uma vantagem adicional do sistema de monitoramento proposto é sua implementação através do próprio controle da máquina ferramenta, em máquinas CNC, caracterizadas como de arquitetura aberta, sem a utilização de sensores externos.

Palavras-chave: Otimização de sistemas CAM, Simulação, Monitoramento da usinagem.

MOREIRA, F. C. **Influence of the angle between linear interpolations in the execution time of a block in CNC machining of surfaces.** 2010. 128p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

The present work is about development and analysis of a support tool for optimization of NC programs with special regard to planned technological metal cutting parameters. The optimization modules presents in CAM systems do not consider the real performance of the machine-tool. Such an information gap can generate discrepancies between planned results and reality, demanding constant adjustments based on the operator's process experience. The present work consists of proposing and evaluating of a monitoring tool of the machine characteristic variables, whose the main function is to predict the machining time in the manufacturing of complex surfaces. As an additional advantage, the monitoring is carried through the machine-tool control, in open-CNC machines, without the use of external sensors.

Keywords: CAM system optimization, Simulation, Manufacturing Monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes de um sistema CNC.....	7
Figura 2 – Ciclo de controle de máquinas ferramenta CNC (adaptado de FERRAZ, 2006)	8
Figura 3 – Estrutura de camadas típica de um CNC de arquitetura aberta (adaptado de YUN,2007)	18
Figura 4 – Arquitetura do sistema (OSACA, 1998)	19
Figura 5 – Plataforma do sistema (OSACA, 1998)	21
Figura 6 – Arquitetura global de hardware HOAM-CNC (adaptado de ASATO, 2002).....	23
Figura 7 – Arquitetura OSEC (adaptado de ASATO, 2002)	25
Figura 8 – Papéis de um sistema de monitoramento	29
Figura 9 – Estratégia de tomada de decisão convencional	30
Figura 10 – Estratégia de tomada de decisão por modelo	31
Figura 11 – Ciclos de controle no monitoramento do processo	32
Figura 12 – Modelo triangularizado	37
Figura 13 – Estratégias diferentes de usinagem	38
Figura 14 – Representação do arquivo nativo CLF.....	38
Figura 15 – Métodos de interpolação (adaptado de SHÜTZER, 2004)	39
Figura 16 – Simulação de usinagem no ESPRIT	44
Figura 17 – Modificações de avanço propostas pelo software NCspeed	48
Figura 18 – Interface do software NCSimul.....	50
Figura 19 –Funcionamento do sistema OptiPath.....	53
Figura 20 – Diagrama esquemático do método TRM	55
Figura 21 – Processo tradicional	58
Figura 22 – Processo otimizado.....	60
Figura 23 – Centro de usinagem vertical HERMLE C800U	62

Figura 24 – Ferramenta utilizada	62
Figura 25 – Corpo de prova utilizado	63
Figura 26 – Modelo CAD utilizado	63
Figura 27 – Simulação do processo de usinagem no CAM	64
Figura 28 – Arquitetura do sistema de monitoramento.....	65
Figura 29 – Sistema de monitoramento on-line	66
Figura 30 – Interface da ferramenta de diagnóstico.....	67
Figura 31 – Ferramenta de análise 3D de avanços.....	68
Figura 32 – Processo de desbaste da peça.....	71
Figura 33 – Trajetória da máquina ferramenta para experimento da variável TRM	72
Figura 34 – Trajetória da máquina ferramenta para experimento de relação de inclinação	74
Figura 35 – Avanço real para velocidade A.....	75
Figura 36 – Avanço real para velocidade B	76
Figura 37 – Avanço real para velocidade C	76
Figura 38 – Avanço real para velocidade D.....	77
Figura 39 – Avanço e posições programadas.....	79
Figura 40 – Gráfico de potências para usinagem em vazio	80
Figura 41 - Gráfico de potências para usinagem utilizando um corpo-de-prova.....	80
Figura 42 – Relação entre potência de posicionamento e avanço.....	81
Figura 43 – Posições de interpolação distintas para valores de Y distintos.....	82
Figura 44 – Facetamentos diferentes no pico e vale da peça	83
Figura 45 – Regressão linear obtida pela relação avanço/tamanho de segmento	84
Figura 46 – Curva experimental da relação de ângulo de inclinação e avanço obtido (0,01 mm)	85

Figura 47 – Curva experimental da relação de ângulo/avanço para diversos tamanhos de segmento	86
Figura 48 – Curva da componente do avanço em X (segmento de 0,01 mm).....	87
Figura 49 – Curva do componente do avanço em Y (segmento de 0,01 mm)	88
Figura 50 – Curva de relação ângulo/avanço para eixos XY (segmento de 0,01 mm)	89
Figura 51 - Curva de relação ângulo/avanço para eixos XZ (segmento de 0,01 mm)	90
Figura 52 - Curva de relação ângulo/avanço para eixos YZ (segmento de 0,01 mm)	90
Figura 53 – Movimento sem inclinação seguido de movimento inclinado.....	91
Figura 54 – Possível comportamento da trajetória real na região de transição	92
Figura 55 – Curva teórica da componente de avanço paralela a trajetória inicial.....	93
Figura 56 – Curva teórica da resultante do avanço	94
Figura 57 – Curvas experimental e teórica comparadas.....	95
Figura 58 – Metodologia de otimização do processo	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais sistemas CAD/CAM e CAM	41
Tabela 2 – Principais sistemas CAD/CAM e CAM (continuação).....	42
Tabela 3 – Parâmetros monitorados	67
Tabela 4 – Parâmetros de usinagem utilizados.....	69
Tabela 5 – Análise das taxas de avanço obtidas para cada um dos ensaios	78
Tabela 6 – Relação entre tamanho de segmento e avanço máximo obtido.....	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	<i>Application Programming Interface</i>
APT	<i>Automatically Programmed Tools</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
CA	Corrente Alternada
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAI	<i>Computer Aided Inspection</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CC	Corrente Contínua
CLF	<i>Cutter Location File</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
CN	Comando Numérico
CNC	Comando Numérico Computadorizado
COM	<i>Component Object Model</i>
DDE	<i>Dynamic Data Exchange</i>
HOAM-CNC	<i>Open System Architecture Hierarchical Multi-processor for CNC machines</i>
HSM	<i>High Speed Machining</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IGES	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i>

IHM	Interface Homem Máquina
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NetDDE	<i>Network Dynamic Data Exchange</i>
NURBS	<i>Non Uniform Rational B-Spline</i>
OLE	<i>Object Linking and Embedding</i>
OMAC	<i>Modulate Architecture Controllers</i>
OPC	<i>OLE for Process Control</i>
OSACA	<i>Open System Architecture for Controls within Automation Systems</i>
OSEC	<i>Open System Environment for Controllers</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PROFIBUS	<i>Process Field Bus</i>
RPM	Rotações por minuto
SERCOS	<i>Serial Real-time Communication System</i>
TCP/IP	<i>Transfer Control Protocol/Internet Protocol</i>
TRM	Tempo de Resposta da Máquina
TTO	<i>Tape Try Out</i>
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>

SUMÁRIO

1. Introdução.....	23
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Estrutura da Dissertação	4
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Máquinas ferramenta CNC.....	5
2.1.1 Componentes de um sistema CNC	6
2.1.2 Linguagens de programação para máquinas CNC.....	9
2.2 CNC de arquitetura aberta.....	14
2.2.1 Definição e categorias de sistemas de controle aberto.....	15
2.2.2 Estrutura de um controle de arquitetura aberta	17
2.2.3 Padrões de sistemas de controle aberto	18
2.2.4 Monitoramento de CNC de arquitetura aberta.....	26
2.3 Monitoramento do processo de usinagem.....	29
2.3.1 Estratégia de tomada de decisão.....	30
2.3.2 Integração do processo de monitoramento no sistema da máquina ferramenta.....	31
2.4 Sistemas CAM	35
2.4.1 Geração de um programa CN através de um sistema CAD/CAM.....	36
2.4.2 Principais sistemas CAM.....	40
2.4.3 Módulos de otimização para sistemas CAD/CAM.....	45
2.4.4 Métodos de estimativa de tempo de usinagem	53
3. Proposta de sistema	57
4. Procedimento Experimental.....	61
4.1 Máquina ferramenta.....	61

4.2 Ferramenta utilizada	62
4.3 Corpo-de-prova	63
4.4 Modelo CAD utilizado.....	63
4.5 Sistema CAM utilizado.....	64
4.6 Arquitetura do sistema de monitoramento.....	64
4.7 Software de monitoramento	65
4.8 Ferramenta de diagnóstico	67
4.9 Planejamento de experimentos.....	69
4.9.1 Estudo de divergência entre velocidades de avanço programadas e reais	69
4.9.2 Estudo dos valores de potência de eixo árvore e eixo de posicionamento durante usinagem.....	70
4.9.3 Estudo da variável Tempo de Resposta da Máquina (TRM) para a máquina ferramenta utilizada	72
4.9.4 Estudo da relação entre o ângulo de inclinação entre duas interpolações lineares e o avanço máximo real alcançado no segmento	73
5. Resultados e Discussões.....	75
5.1 Estudo de divergência entre velocidades de avanço programadas e reais.....	75
5.2 Estudo dos valores de potência de eixo árvore e eixo de posicionamento durante usinagem.....	79
5.3 Estudo da variável Tempo de Resposta da Máquina (TRM) para a máquina ferramenta utilizada.....	83
5.4 Estudo da relação entre o ângulo de inclinação entre duas interpolações lineares e o avanço máximo real alcançado no segmento	84
6. Conclusões e sugestões	99

7. Referências Bibliográficas.....	101
------------------------------------	-----

Introdução

Em operações de fresamento, a estratégia de trajetória utilizada durante a usinagem tem uma significativa influência no tempo do processo (MONREAL, 2003). Para uma mesma quantidade de material a ser removido, diferentes tipos de movimento da ferramenta irão produzir resultados diferentes em termos de tempo de ciclo. O alto custo de usinagem em centros de usinagem faz com que a estimativa do tempo real de usinagem tenha um papel importante no planejamento do processo.

Nesse âmbito, softwares de otimização para sistemas CAM (*Computer Aided Manufacturing*) têm sido desenvolvidos, como forma de reduzir tempo e custo. Através de tais softwares é possível levar em consideração variáveis relativas à máquina ferramenta e ao processo, evitando colisões e interações não desejadas entre peça e ferramenta. Além disso também é possível se obter uma estimativa de tempo total da usinagem. Entretanto, há grandes divergências entre os resultados esperados e a realidade, principalmente com relação à velocidade de avanço implicando no tempo real do processo de usinagem. De acordo com Souza (2007), as divergências ocorrem principalmente devido a:

- Limitações dinâmicas da máquina: Quando a máquina executa trajetórias não lineares com elevadas velocidades, ela está submetida a efeitos da inércia e a dinâmica do sistema de controle. O CNC limita a velocidade de avanço de acordo com a estrutura física da máquina e um algoritmo interno controla suas características de acordo com um conjunto de parâmetros. O avanço é reduzido de forma a seguir precisamente uma trajetória não linear;
- Tempo de processamento do bloco CNC: Caso o tempo requerido para o software CNC processar um bloco do programa e fechar o ciclo de controle é maior que o requerido para que o ponto de referencia da ferramenta atinja a posição desejada, o sistema de movimento irá reduzir o avanço a um valor no qual para que o próximo bloco possa ser processado. Desse modo, a máquina se move com um avanço menor que o programado;
- Estratégia da trajetória: Quando a metodologia ordinária de interpolação linear usando pequenos segmentos (G01) é utilizada na usinagem de uma superfície não plana, o avanço é reduzido devido à diferença de direção da trajetória entre dois segmentos.

Tendo em vista a influência desses fatores e a dificuldade de se obter todas as informações necessárias para se construir um modelo analítico eficiente para previsão do processo que os considere, faz-se necessária uma abordagem experimental, que por sua vez implica no monitoramento do processo.

A maior flexibilidade dos controles numéricos de última geração classificados como de arquitetura aberta, permite que hoje o potencial do PC (*Personal Computer*) seja explorado e combinado com a robustez dos controles numéricos. Estabelece-se

assim uma comunicação bidirecional entre CNC-PC, onde sistemas de monitoramento podem ser implementados, não existindo mais a intrínseca ligação entre os hardwares e softwares utilizados na programação destas máquinas. Uma nova concepção de interface homem-máquina pode ser desenvolvida. A obtenção das informações do processo, seu monitoramento e controle serão mais facilmente executados, podendo-se introduzir soluções já desenvolvidas para o ambiente PC, devido à utilização dos sistemas de controle abertos. (OLIVEIRA, 2002).

Dessa forma, o monitoramento de variáveis de processo tais quais avanço e potência da máquina, podem ser obtidas em máquinas CNC de arquitetura aberta sem a necessidade de equipamentos adicionais ou de um especialista. Essas informações podem ser usadas de forma a gerar um diagnóstico sobre o desempenho da máquina ferramenta quando submetida a determinadas situações. A partir de então é possível prever o comportamento futuro da máquina ferramenta e estimar tempo total de usinagem e qualidade das peças produzidas.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivos:

- Estudar e desenvolver um protótipo de aplicação integrada para o monitoramento de máquinas ferramenta tendo em vista a avaliação de grandezas de controle em tempo real.
- Estudar experimentalmente e desenvolver um modelo que represente o tempo de usinagem dos blocos, tendo em vista as características da programação CNC (deslocamentos, avanços e ângulos) e o modelo inicial da variável TRM (tempo de resposta da máquina).

1.2 Estrutura da Dissertação

Este documento é composto pelas seguintes partes:

- Capítulo 1: Introdução onde se apresenta um breve contexto sobre máquinas ferramenta CNC e sistemas CAM, como forma de situar o leitor no contexto do presente trabalho. Também são apresentados os objetivos desse trabalho e sua estrutura.
- Capítulo 2: Apresenta a revisão da literatura abordada, necessária para um melhor entendimento do assunto estudado. Neste capítulo são abordados os seguintes temas: Máquinas ferramenta CNC, CNC de arquitetura aberta, Monitoramento de Processos de Usinagem, Sistemas CAM, Módulos de otimização de sistemas CAM.
- Capítulo 3: É proposto um sistema de monitoramento *online* de parâmetros de usinagem para uma máquina ferramenta CNC de arquitetura aberta
- Capítulo 4: É implementada uma solução de monitoramento online em CNC de arquitetura aberta de acordo com as propostas apresentadas no capítulo 3
- Capítulo 5: São realizados testes com a solução desenvolvida
- Capítulo 6: São apresentadas as próximas conclusões e sugestões de atividades
- Referências Bibliográficas que deram suporte a realização desse trabalho.

2

Capítulo

Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica que se segue tem como meta abordar assuntos necessários para um melhor entendimento da pesquisa a que se propõe esse trabalho de mestrado. O levantamento das referências foi feito mediante análise de livros, textos e artigos publicados nos periódicos de importância no cenário científico.

2.1 Máquinas ferramenta CNC

A sigla CNC, proveniente do inglês *Computer Numerical Control*, ou seja, controle numérico computadorizado, diz respeito ao controlador numérico utilizado no comando de máquinas ferramenta CNC.

Em tais máquinas, os comandos de um programa CN são os responsáveis pelo acionamento, informando todas as etapas de fabricação de uma determinada operação de uma peça. Uma linha de comando de um programa CN pode conter informações sobre o movimento da ferramenta (movimento rápido, interpolação, etc...), informações tecnológicas (velocidade, avanço, etc...), ou informações que acionam funções auxiliares (ligar refrigerante, eixo árvore, etc...). A obtenção dessas informações depende, sobretudo, dos dados da peça a ser usinada, considerando-

se as limitações da máquina, as características do CNC e da ferramenta (REMBOLD et al, 1994).

A função básica do CNC é comandar os movimentos dos eixos nas condições de posicionamento e velocidade determinados no programa CN. O CNC é constituído de um computador que converte as instruções do programa em sinais analógico, e de sensores de posição e velocidade que executam a retroalimentação para o controle do processo. As instruções numéricas são convertidas em sinais analógicos e amplificados para a tensão de funcionamento dos servo-motores. Os sinais dos sensores são utilizados pelos algoritmos de controle do CNC para manter o processo nas condições programadas.

2.1.1 Componentes de um sistema CNC

Um sistema CNC é composto por três unidades: a unidade CN que oferece interface com o usuário e executa o controle de posicionamento, a unidade do motor, e a unidade do driver. Entretanto, de senso comum, apenas a unidade CN é chamada sistema CNC.

Do ponto de vista funcional, um sistema CNC é formado pelos seguintes módulos:

- Módulo MMI (Man Machine Interface): é responsável pela interface entre o sistema e o usuário, permitindo a operação da máquina, além de também ser responsável por mostrar o status da máquina e oferecer funções para a edição do programa da peça;
- Módulo NCK (Numerical Control Kernel): é o coração do sistema CNC, responsável por interpretar o programa da peça e executar a interpolação,

controle de posição e compensação de erro baseado no programa interpretado. Essa unidade, portanto, controla o sistema servo que faz com que a peça seja usinada;

- Módulo PLC (Programmable Logic Control): responsável por controlar as trocas de ferramentas, velocidade do eixo árvore e processamento dos sinais de entrada e saída. Todo o controle de comportamento da máquina não relacionado ao controle de servo está diretamente relacionada ao módulo PLC.

Figura 1 – Componentes de um sistema CNC

2.1.1.2 Controle de uma máquina CNC

Um controle CNC típico em uma máquina ferramenta tem duas funções maiores: (1) o ciclo de controle dos servos e (2) o ciclo de interpolação, responsável por coordenar o movimento dos eixos da máquina ferramenta. O programa CN, assim como outros programas e rotinas de compensação de erro estão em um nível superior na hierarquia de controle (COELHO, 2008). Tarefas de supervisão tais quais controles e correções da trajetória podem cumpridas pelo CNC através da informação proveniente de outros controladores. Na figura 2, é possível observar a

estrutura de um controlador. Além disso, pode ser também observado o ciclo de controle do processo. Segundo LIANG et al (2004), o termo controle do processo se refere ao controle adaptativo, que será explicado posteriormente. Atualmente, o controle adaptativo é encontrado como opcional em alguns CNCs modernos. Entretanto, devido aos bons resultados gerados pelo uso do controle adaptativo, tais quais aumento de produtividade e qualidade, uma grande quantidade de pesquisas tem sido realizadas sobre esse tema.

Figura 2 – Ciclo de controle de máquinas ferramenta CNC (adaptado de FERRAZ, 2006)

O programa CN descreve os movimentos que a máquina ferramenta deve executar e o controle de movimentos faz a tradução da interpolação da trajetória da ferramenta para a movimentação individual dos eixos com as velocidades programadas. A distância total a ser percorrida pelos eixos é normalmente dividida em pequenos segmentos numa taxa repetitiva e de elevada exatidão. Esta taxa de atualização é tipicamente de 1 a 5 milissegundos. O controle aplica os movimentos

interpolados na seção do ciclo de controle de posição, onde a posição determinada pelo dispositivo de retroalimentação é comparada com a posição de *set point* e determinada a diferença. Esta diferença é aplicada como comando de velocidade no servo e o valor é comparado com a velocidade atual, através dessa comparação é gerado o erro de velocidade que é utilizado pelo controle para gerar o comando de torque. Nos motores utilizados pelos acionamentos tradicionais dos eixos, o torque é proporcional à corrente e os semicondutores de potência são comutados para aplicar a corrente desejada nos motores.

Do ponto de vista da máquina, aceleração, desaceleração e características cinemáticas podem limitar a velocidade de avanço no processo de usinagem. De acordo com RENTON e ELBESTAWI (2000), as principais preocupações em um servo controle são o planejamento da velocidade de avanço e as leis do ciclo de controle do servo. Os usuários e/ou os fabricantes de máquinas ferramenta tem que escolher entre erros de trajetória ou erros nos valores de avanço. Se o erro de trajetória é permitido, a máquina tenta executar o avanço programado; entretanto a trajetória não é garantida.

2.1.2 Linguagens de programação para máquinas CNC

Atualmente existe um grande número de linguagens de programação. A maioria delas se relaciona com movimentações contínuas ou ponto a ponto. Uma das linguagens mais populares e poderosas é a APT (do inglês *Automatically Programmed Tools*, isto é, Ferramentas Automaticamente Programadas) (SPECK, 2005).

A APT pode ser considerada um sistema CAM baseado em uma linguagem de propósito especial. Foi criada para simplificar a tarefa de se calcular os pontos geométricos pelos quais a ferramenta deve atravessar no espaço de forma a cortar os perfis cada vez mais complexos exigidos pela indústria aeroespacial. Era resultado direto da combinação entre a tecnologia CNC recente se tornando disponível e a tarefa intimidante que engenheiros e operadores enfrentavam ao calcular os movimentos que um CNC deveria fazer para usinar peças complexas. A indisponibilidade de sistemas CAD nessa época resultou que a APT tivesse que ser capaz de descrever a geometria do projeto em forma textual. Conseqüentemente, há três tipos de dados na linguagem APT: definição da peça, definição da máquina e plano de usinagem.

Em 1982, a ISO (Organização Internacional para Normalização) estabeleceu os princípios básicos da programação CNC (norma ISO 6983-1). A norma 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 (REMBOLD, 1994).

De acordo com a norma um programa de uma máquina CNC é estruturado em blocos de dados. Um conjunto fixo de caracteres alfabéticos, numéricos e especiais é usado. Qualquer caractere que não deve ser processado deve ser incluído com parêntesis. O caractere ":" ou "%" pode ser usada com propósito de display. Para identificar um programa de máquina, um identificador deve ser colocado imediatamente antes do início de programa e depois do caractere de "final de bloco".

Segundo XUN (2008), um bloco de dados consiste em uma palavra número seqüencial e uma ou mais de uma palavra de dados (também conhecidas como palavras CN). Caracteres de tabulação, que são usados na organização dos dados

quando é necessária uma impressão desses, podem ser inseridos entre palavras, mas são usualmente ignoradas pelo sistema de controle. Uma palavra de dados sempre começa com um caractere de endereçamento. Os caracteres são usualmente apresentados na seguinte seqüência e não são repetidos dentro de um mesmo bloco

- Palavras preparatórias “G”;
- Palavras “Dimensionais”. Essas palavras são arranjadas na seguinte seqüência: X, Y, U, V, W, P, Q, R, A, B, C;

- Palavras de “Interpolação de corte” I, J, e K;
- Palavra de “Função de avanço (F);
- Palavra de “Função velocidade do eixo árvore (S)”;
- Palavra de “Função ferramenta (T);
- Palavra de “Função miscelânea (M)”

Algumas palavras podem ser omitidas em blocos específicos de dados, indicando que não há mudança na condição da máquina com relação à função denotada pela palavra omissa. Esse tipo de palavra é denominada “modal”.

2.1.2.1 Palavras CN

Função preparatória: A função preparatória é expressa pelo caractere de endereçamento “G” seguido por um número código. O caractere G pode formar palavras CN para especificar direção de rotação do eixo árvore, tipos de funções de tavanço, espera e outras muitas funções. Dessa forma, esse é um dos mais importantes grupos de palavras na programação. Essa é a razão da expressão

“código G” ser freqüentemente usada para se referir à família inteira de códigos de programação listadas aqui.

Controle do eixo árvore: Um programador pode controlar precisamente quão rápido o eixo árvore gira em incrementos de RPM. A palavra S é usada para esse propósito. Se uma rotação de 350 RPM é desejada, a palavra S350 é usada.

Ativação e direção do eixo árvore: Um programador pode controlar a direção de rotação do eixo árvore. Dois códigos M controlam essa função. M03 ativa o giro do eixo árvore em uma direção; M04 ativa o giro do eixo na direção reversa. Já a palavra M05 desliga a rotação do eixo árvore. Velocidade constante na superfície (G96) e RPM constante (G97) podem ser desenvolvidas.

Avanço: Um programador pode controlar a taxa de movimentação de qualquer operação de usinagem. Isso é feito através de palavra F. Existem três tipos de funções de avanço suportadas: G93 - Tempo inverso, G94 - Avanço por minuto e G95 - avanço por revolução. Quando o avanço independe da velocidade do eixo árvore, os dígitos na seqüência representam diretamente o deslocamento vetorial em mm/min ou pol/min (G94). Os dígitos também podem representar diretamente o deslocamento vetorial em mm/revolução ou pol/revolução (G95). Quando o avanço é aplicado ao movimento de rotação somente, os dígitos representam diretamente o movimento vetorial em graus/min (G93). O código preparatório G00 é usado no posicionamento rápido.

Atraso: Denota um atraso entre movimentos e é programado em um bloco separado iniciado com G04. A duração do tempo de atraso é especificada pela palavra F. O atraso é medido em segundos quando G94 está ativo e em revoluções do eixo árvore quando o G95 está ativo. É uma prática comum que a resolução de palavra F deva ser 0.1 segundo ou 0.1 revolução, ou especificada.

Refrigerante: Um programador pode ligar ou desligar o sistema de refrigeração a qualquer momento na execução do programa. O comando M08 liga a refrigeração e o comando M09 desliga a refrigeração.

Troca de ferramenta: A maioria dos centros de usinagem possui trocadores de ferramenta automáticos que permitem que ferramentas sejam carregadas no eixo árvore automaticamente durante o programa de ciclo. Isso permite que muitas operações diferentes sejam realizadas com apenas um programa de ciclo. Apesar dessa função mudar levemente de um centro de usinagem a outro, muitos centros de usinagem utilizam a palavra T para rotacionar o porta ferramentas a posição desejada. Por exemplo, T05 rotaciona o porta ferramentas para a estação número cinco. O comando M06 é usado, por sua vez, para trocar a ferramenta na posição de troca do porta ferramentas com a ferramenta do eixo árvore.

Parâmetros CN: De forma a aumentar a flexibilidade de programação, cálculos de valores dos eixos ou atribuição de valores a parâmetros são permitidos. Essa característica é normalmente particular ao controle da máquina usada. As variações incluem: o endereço de caractere deve ser usado, por exemplo, P, Q, R ou #; as operações são permitidas, por exemplo, aritméticas, trigonométricas e lógicas; e os endereços de memória usados pelos parâmetros.

2.2 CNC de arquitetura aberta

Grande parte dos sistemas CNC existentes são fechados para os usuários. Engenheiros podem tipicamente apenas programar a máquina. Mesmo as chamadas interfaces de programação (incluindo visualização 3D e simulação do processo) não podem ser livremente modificadas pelo usuário. Os principais fabricantes, tradicionalmente desenvolvedores de hardware, criam sistemas com softwares embarcados. Para se executar uma aplicação de usuário, o usuário deve usar sistemas orientados a dispositivos com componentes (hardware e software) proprietários. Um sistema de controle de arquitetura aberta beneficiaria os utilizadores finais, permitindo que esses escolham os componentes de hardware e software independentemente para suas máquinas ferramenta, gerando mais flexibilidade e redução dos custos de manutenção e melhoramento (YUN, 2007).

Em todo o mundo, desde os meados dos anos 90, uma série de iniciativas vem sendo desenvolvidas, cujo objetivo principal é uma implementação e integração mais fáceis de controles específicos desenvolvidos pelos usuários, através de interfaces e de métodos de configuração abertos, concebidos num ambiente padronizado e não proprietário (JOVANE, 1998).

A disponibilidade e larga aceitação de tais sistemas resultaram em custos reduzidos e aumento da flexibilidade. O software pode ser reusado e algoritmos ou aplicações específicas podem ser integrados. Os usuários podem projetar seus controles de acordo com uma configuração desejada. Essa tendência foi forçada tanto pelo número crescente de máquinas de propósito especial com elevado nível automação quando pelos custos crescentes de desenvolvimento de novos produtos software (PRITSCHOW et al, 2001).

2.2.1 Definição e categorias de sistemas de controle aberto

Um controlador de arquitetura aberta deve ser flexível em hardware e em software em todos os níveis de controle (WRIGHT et al, 1996). Deve também ser padronizado de forma a permitir desenvolvimento de software e hardware por qualquer engenheiro ou técnico, e sua integração com outros controladores, sistemas de controle de células e sistemas de planejamento de alto nível (SCHOFIELD, 1996)

Além disso, o controlador deve permitir a integração de módulos de aplicação independentes, algoritmos de controle, e sensores e hardwares desenvolvidos por diferentes fabricantes (PRITSCHOW et al.,1993).

O “*Technical Committee of Open Systems*” do IEEE define um sistema aberto como: “Um sistema aberto disponibiliza capacidades que permitem aplicações corretamente implementadas executarem várias plataformas de diferentes fornecedores, interoperando com outras aplicações de outros sistema e apresentando uma interação consistente com o usuário” (IEEE, 1998). Para estimar o nível de abertura do controlador o seguinte critério pode ser aplicado (PRITSCHOW, 1993 e 2001):

- Portabilidade: os módulos da aplicação (MA) podem ser usados em diferentes plataformas sem a necessidade de nenhuma mudança, mantendo suas capacidades.
- Extendabilidade: Um número variado de MA podem executar em uma plataforma sem qualquer conflito.

- Interoperabilidade: Módulos de aplicação trabalham em conjunto de maneira consistente e podem trocar dados de uma maneira definida.
- Escalabilidade: Dependendo dos requerimentos do usuário, as funcionalidades dos módulos de aplicação e o desempenho e tamanho de hardware podem ser adaptados.

De forma a preencher os requisitos e critérios de controle aberto da definição IEEE, um sistema de controle aberto deve ser (IEEE, 1998):

- Neutro quanto a empresas proprietárias: Isso garante independência quanto a interesses próprios de empresas.
- Desenvolvido em consenso: Deve ser controlado por um grupo de usuários ou empresas (usualmente na forma de um grupo de usuários ou um grupo de interesse).
- Baseado em padrões: O que garante uma extensa distribuição na forma de padrões (padrões nacionais ou internacionais ou padrões de fato).
- Disponível livremente: por ser obtido sem custo por qualquer parte interessada.

Segundo Pritschown et al. (2001), as seguintes categorias de controle de arquitetura aberta podem ser identificadas:

- IHM aberta: A abertura é restrita a parte não *real-time* do sistema de controle. Adaptações podem ser feitas em aplicações orientadas ao usuário.
- *Kernel* com abertura restrita: o *kernel* de controle tem uma topologia fixa, mas oferece interfaces de inserção para filtros específicos mesmo para funções *real-time*.

- Sistema de controle aberto: A topologia do *kernel* de controle depende do processo. Isso oferece permutabilidade, escalabilidade, portabilidade e interoperabilidade.

A maioria dos sistemas de controle abertos disponíveis atualmente oferecem possibilidade de modificações na sua parte não real-time em uma topologia fixa de software. Eles não oferecem a flexibilidade necessária e não são baseados em padrões neutros.

2.2.2 Estrutura de um controle de arquitetura aberta

Os componentes comuns de um controle são o CNC e o controlador lógico programável (CLP). Se implementados corretamente, os controladores existentes baseados em PC são confiáveis o suficiente para o controle em tempo real da máquina ferramenta. Os sistemas de arquitetura aberta tipicamente têm um CLP baseado em PC e um *kernel* CNC, e permitem ao usuário misturar e combinar componentes e hardwares de forma a alcançar os requerimentos de controle desejados. Entretanto, um sistema de controle que usa a plataforma PC não é necessariamente um sistema aberto.

Arquiteturas típicas para de sistemas de controle de arquitetura aberta para operações de manufatura discreta apresentam três camadas, conforme a figura 3: camada de dispositivos, camada de controle e camada de sistema. A comunicação entre os níveis é aberta e padronizada (YUN, 2007).

Figura 3 – Estrutura de camadas típica de um CNC de arquitetura aberta (adaptado de YUN,2007)

2.2.3 Padrões de sistemas de controle aberto

2.2.3.1 Arquitetura OSACA

A arquitetura OSACA (Open System Architecture for Controls within Automation Systems) surgiu na Europa no programa 6379 do projeto ESPRIT III, sendo um dos maiores projetos envolvendo o padrão de controle de arquitetura aberta, que inclui conexão e aplicação em rede (KOREN et al, 1996). O projeto OSACA começou em 1992, em institutos de pesquisa da França, Alemanha, Itália, Espanha e Suíça.

O objetivo principal do projeto OSACA era a definição de um hardware independente e modular, que permitisse a adição ou remoção de módulos de controle numérico, controle de robô, controladores lógicos programáveis (CLPs), controles de células, etc. Para controlar esses módulos, foi criada a fase II do OSACA projeto 9115, que buscava estabelecer um sistema de software modular, interfaces de comunicação, operação e sistemas de banco de dados abertos para novas funções e o uso de um novo equipamento digital (PRITSCHOW et al., 1993).

Seguindo a mesma linha de pesquisa, foi criado na Alemanha o projeto HÜMNOS (Desenvolvimento modular para aplicação em sistemas do controle de arquitetura aberta orientados a objeto). O desenvolvimento do projeto é baseado nos resultados do OSACA. Teve a participação de usuários finais (BMW, Mercedes Benz), fabricantes de máquinas ferramentas (Alfing, Fritz Wener, Grunewald, Heller, Homag, Hüller Hille, Index, Mikromat, Pfauter, Trumpf and Unipo) e fabricantes de controladores (Bosch, DASA, Grundig electronics, ISG, SIEMENS), além de diversos institutos de pesquisa.

Figura 4 – Arquitetura do sistema (OSACA, 1998)

O objetivo é trocar informações entre fabricantes e usuários, trazendo benefícios a ambos. A arquitetura OSACA permite a montagem do controle da máquina ferramenta usando uma interface de usuário, sem a necessidade de rever o software inteiro (ALTINTAS, et al., 1996). O objetivo foi alcançado através do

conceito de plataforma. Uma plataforma é composta de grupos de hardware e software (sistema operacional, sistema de comunicação) que oferecem um serviço uniforme ao controle da unidade funcional. A interface de programação de aplicativos (API) com a unidade funcional é baseada em uma tarefa bem definida.

As três principais áreas de plataforma são (ASATO, 2002):

- Sistemas de comunicação: hardware e software são definidos independentemente da interface de troca de informações entre módulos diferentes da aplicação principal. O sistema de comunicação OSACA permite a troca de informações de uma maneira transparente entre as aplicações cliente e servidor.
- Arquitetura de referência: determina o controle da unidade funcional e especifica a interface externa. Isso é feito para permitir o uso e integração de unidades externas através de dados internos de maneira bem definida. Exemplos de unidades funcionais incluem Interface Homem Máquina (IHM), controle lógico de intertravamento e controle do movimento dos eixos. Para cada unidade funcional identificada é definido um módulo externo usando comunicação orientada a objeto na interface de dados com módulos aplicativos. A interface de leitura e escrita de acesso de dados é localizada na arquitetura orientada a objeto e esse acesso está disponível através do uso de comunicação orientada a objeto.
- Configuração do sistema: Permite uma configuração dinâmica do controlador através da combinação de diferentes módulos da aplicação. Isso não apenas permite determinar uma topologia

Architecture Controllers for Applications in the Automotive Industry” pelas empresas Chrysler, Ford e General Motors. Esse documento serviu como guia para API de controladores nas indústrias automotivas norte americanas.

O grupo OMAC é composto por usuários de sistemas de arquitetura aberta, cujo objetivo é trabalhar em conjunto, trazendo os seguintes benefícios (YEN, 1998):

- Estabelecer uma posição sobre os controladores de arquitetura aberta baseados na experiência dos usuários de software e dos fabricantes de máquina;
- Acelerar o desenvolvimento dos controles abertos usados nas indústrias, com o uso de APIs;
- Promover o desenvolvimento do controle aberto entre fabricantes de controladores;
- Desenvolver soluções coletivas no desenvolvimento, comercialização e uso de tecnologias de arquitetura aberta.

2.2.3.3 Arquitetura HOAM-CNC

A arquitetura HOAM-CNC (*Open System Architecture Hierarchical Multi-processor for CNC machines*) atua principalmente no hardware da máquina, oferecendo a vantagem de possuir dois protocolos de comunicação, o protocolo de controle CNC e outro protocolo que permite a introdução de novos componentes. Alguns centros de pesquisas envolvidos nessa linha de pesquisa são, segundo ASATO (2002):

- University of Michigan/Ann Arbor, USA – que estuda controladores de arquitetura aberta em *real-time* para máquina ferramentas de elevado

desempenho. Eles executam a implementação de diferentes tipos de controle de hardware com comunicações em rede para estudar a diferença de desempenho entre máquinas dependendo da arquitetura adotada.

- University British Columbia/Vancouver, Canadá – usam essa arquitetura buscando um controle adaptativo regulativo. Módulos que detectam danos na ferramenta e vibrações são inseridos usando sensores acústicos no controle da execução. Uma rede primária é usada para executar o processo de controle da máquina, e para monitorar tarefas e uma rede secundária de desempenho mais elevado é usada para comunicar com o CNC.

A figura 6 ilustra a arquitetura HOAM-CNC na qual um PC é usado. A rede principal padrão ISA lida com as atividades de monitoramento, processamento de dados, controle adaptativo e interface homem máquina.

Figura 6 – Arquitetura global de hardware HOAM-CNC (adaptado de ASATO, 2002)

A rede CNC lida com o controle de posicionamento e velocidade de cada eixo, operando o controle em tempo real com um processador dedicado (ALTINTAS et al, 1996). O sistema permite a adição de vários módulos de processamento na rede primária e a interação de eixos de controle com o bus secundário.

2.2.3.4 Arquitetura OSEC

Seis empresas japonesas, Toshiba Machine Co., Toyoda Machine Works Ltda., Yamazaki Mazak Co., IBM Japan Ltda., Mitsubishi Electric Co., SML Corporation, compõem o grupo OSEC (Open System Environment for Controllers), cujo objetivo foi desenvolver uma plataforma de arquitetura aberta para equipamentos de controle numérico (ASATO, 2002).

O propósito do grupo é criar uma arquitetura aberta baseada em um computador pessoal padrão IBM-PC para controlar equipamento de manufatura, melhorar seu desempenho e facilita sua manutenção (figura 7). O PC que controla o equipamento pode também atuar como base de um sistema de informação para a operação da fábrica. Em outras palavras, partes do equipamento baseado nessa arquitetura podem ser elementos de sistemas de aquisição e suporte a logística baseado em computador (YAMAZAKI, 1996).

Figura 7 – Arquitetura OSEC (adaptado de ASATO, 2002)

Existem muitos centros de pesquisa trabalhando nesse conceito de arquitetura aberta, tal qual a marinha americana com o projeto de controlador de máquina aperfeiçoado, que propõe uma arquitetura de cinco níveis:

- Planejamento da estação de trabalho
- Administração da estação de trabalho
- Interpretação do plano
- Geração da trajetória/ entradas e saídas discretas
- Servo controles

O projeto inclui compensação de erros de deformação térmica e interpolação NURBS (Non Uniform Rational B-Spline) (YAMAZAKI, 1996).

O Departamento de Energia dos EUA com o projeto TEAM-ICLP (*Technologies Enabling Agile Manufacturing – Intelligent Closed Loop Processing*) concentrou sua pesquisa no desenvolvimento de uma API orientada a arquitetura aberta.

O National Center for Manufacture Science (NCMS) que lançou o projeto NGIS (*Next Generation Inspection System II*) está procurando desenvolver uma interface de inspeção de processo por sensor.

2.2.4 Monitoramento de CNC de arquitetura aberta

Máquinas CNC de arquitetura aberta oferecem um ambiente padrão e neutro baseado em PC, fornecendo métodos para integrar aplicações específicas com os controles. Alguns exemplos recorrentes de aplicações são interfaces homem-máquina, sistemas de monitoramento, e aquisição automática de informação (máquina, processo e dados da produção).

Entre as categorias de CNC aberto listadas (IHM aberta, Kernel com abertura restrita, e sistema de controle aberto), a categoria de IHM aberta mantém o kernel de controle fechado, porém apresenta uma IHM baseado em PC com um ambiente padronizado e interface aberta. Isso significa que é possível integrar e implementar novas aplicações, além de estar disponíveis uma grande variedade de recursos para se obter dados, que podem ser integrados aos sistemas de informação da empresa, ou mesmo ser usados em sistemas de monitoramento. Entretanto, cabe destacar que CNC baseado em PC não é sinônimo de arquitetura aberta. Por exemplo,

alguns sistemas usam PC padrão como IHM, mas oferecem apenas protocolos proprietários para a comunicação. Segundo FERRAZ (2006), a fim de se ter um sistema aberto de IHM, é necessário ao menos:

- Um ambiente padrão (PC);
- Uma interface com tecnologia aberta, como por exemplo Dynamic Data Exchange (DDE), Network Dynamic Data Exchange (NetDDE), Object Linking and Embedding (OLE) for Process Control (OPC), ou ActiveX;
- Uma rede de comunicação padrão, como por exemplo Ethernet TCP/IP, SERCOS, Profibus, etc.

Uma arquitetura típica de sistema de monitoramento é composta por sensores externos (que não são originalmente instalados na máquina ferramenta), e sistemas de processamento de sinal que adquirem informações sobre o processo de usinagem. Os sistemas de monitoramento de CNC de arquitetura aberta, por sua vez, são implementados em máquinas CNC de arquitetura aberta cuja IHM é aberta. Isso permite a implementação e integração dos sistemas de monitoramento usando todos os recursos já disponíveis na máquina ferramenta – tais quais sensores, redes de comunicação, servidores de base de dados, aplicações, etc. Através das redes de comunicação estabelecidas entre os componentes de controle da máquina ferramenta (IHM, CNC, CLP, drives e painel de operações) é possível adquirir dados e informações sobre esses componentes, e sobre as aplicações executadas na máquina ferramenta através de protocolos e métodos padronizados (FERRAZ et al, 2008).

A redução da utilização de sensores de elevado custo, além de hardware e software para a aquisição e processamento do sinal é favorável a implementação desse tipo de sistema. Para a implementação de uma solução de monitoramento

baseada em arquitetura aberta, o principal investimento requerido é na programação do software. Finalmente, CNC com ambiente homogêneo e com IHM aberta permitem ao usuário escolher o ambiente de desenvolvimento da aplicação, descartando a necessidade do uso de software de fornecedores específicos.

2.3 Monitoramento do processo de usinagem

Em geral, um sistema de monitoramento deve ser capaz de exercer três papéis como mostra a figura 8 (INASAKI, 2001).

Figura 8 – Papéis de um sistema de monitoramento

Primeiro, o sistema deve ser capaz de detectar qualquer funcionamento não esperado que possa ocorrer durante o processo. Segundo, a informação obtida pelo sistema de monitoramento a respeito dos parâmetros do processo pode ser usada para aperfeiçoar o processo. Por exemplo, se a taxa de desgaste de uma ferramenta de corte pode ser obtida, ela pode ser usada para minimizar o tempo ou o custo da usinagem através da alteração da velocidade de corte e do avanço, de forma a obter um controle de otimização adaptativo. Terceiro, o sistema de monitoramento faz com que seja possível obter as casualidades ligadas às entradas e saídas do processo, que são úteis para se estabelecer um banco de dados sobre um processo particular. Esse banco de dados é necessário para determinar os parâmetros iniciais de *set-up* (TONSHOFF, 2002).

Monitorar visa o propósito de adquirir informações e conhecimento para assegurar qualidade, rastreabilidade e documentação. Esse propósito tem ganhado crescente importância devido as leis de responsabilidade do fornecedor e padrões como, por exemplo, leis de responsabilidade sobre o produto. Os casos de leis contra produtores e fornecedores podem ser extremamente caros quando reportadas em alguns países. Documentação confiável pode ajudar a comprovar responsabilidade. Em qualquer caso, pode ser a base de uma qualidade assegurada aceitável para a cadeia de suprimentos. Aquisição de dados pode ser também usada para estabelecer bancos de dados tecnológicos os quais podem ser usados como base para construção do leiaute do processo e programação dos programas para sistemas CN. Finalmente, monitoramento pode gerar conhecimento do processo em geral (TONSHOFF, 2002).

2.3.1 Estratégia de tomada de decisão

Há duas maneiras de agir para a tomada de decisão. Na primeira, os valores distintos dos sinais processados são comparados com um limite pré-determinado buscando determinar o estado do processo (figura 9). Como forma de alcançar uma identificação confiável e exata, uma base de dados deve ser preparada com antecedência (MORIWAKI, 2001). Essa aproximação é a escolha preferida para sinais de sensores usados para interpretar saídas.

Figura 9 – Estratégia de tomada de decisão convencional

Outra maneira de agir para a tomada de decisão é a identificação baseada em modelo (figura 10). Vários tipos de modelos físicos e empíricos são empregados utilizando conhecimentos de relacionamentos. Como resultado, o valor calculado é comparado com um limite como forma de avaliar o processo. Essa aproximação é a escolha preferida para os sinais de sensores que buscam monitorar as grandezas do processo.

Figura 10 – Estratégia de tomada de decisão por modelo

Os modelos contemplam características do processo, tais quais forças de usinagem e temperatura, e resultados tais quais topografia de superfície e integridade. Podem ser classificados em (TONSHOFF, 2002):

- Processos de modelagem física - aproximações analíticas, elementos finitos, cinemática, dinâmica molecular e modelos de regressão;
- Processos de modelagem empírica – regressão e modelos de redes neurais;
- Processos de modelagem heurística – modelos baseados em regras.

2.3.2 Integração do processo de monitoramento no sistema da máquina ferramenta

Basicamente, a informação adquirida pelos sensores pode realimentar o sistema em três níveis diferentes (figura 11) (TONSHOFF, 2002):

1. Grandezas do processo e grandezas de saída são medidas durante o processo e são utilizadas para adaptar o processo em um ciclo interno de controle da máquina.
2. Grandezas do processo e grandezas de saída (aqui medidos pós-processo) são usadas para adaptar o próximo ciclo de usinagem como parte de um ciclo de controle pós-processo. Isso beneficia a próxima peça.
3. Em um ciclo de controle superior, o uso direto de sinal de sensores para influenciar a operação de usinagem não está previsto. A informação obtida pelos sensores é processada e encaminhada a um sistema de informação de alto nível. Como resultado, a otimização do processo e de sua arquitetura é realizada por modelos de melhoria.

Figura 11 – Ciclos de controle no monitoramento do processo

Partes do ciclo de controle interno da máquina são sistemas de controle adaptativo (AC). A informação provinda do sinal do sensor é usada para ajustar o arranjo do processo on-line. Os objetivos dos sistemas AC são manter uma

qualidade desejada para a peça durante um número substancial de ciclos e usar em tempos reduzidos com mínimos custos.

O controle do processo em usinagem é tradicionalmente classificado nas seguintes categorias (LIANG, 2004):

1. Controle adaptativo forçado (ACC): tais sistemas têm como papel principal ajustar variáveis do processo tais qual força ou potência em tempo real de acordo com condições apropriadas de usinagem de forma a reduzir custo de usinagem e aumentar eficiência da ferramenta. Tais sistemas são capazes de manter condições de trabalho máximas durante o processo de usinagem. A uma grandeza escolhida do processo (como por exemplo, a força normal) não é permitido exceder um valor de limite fixo. Mesmo sobre influência de fatores de distúrbio tal qual mudança das características do material da peça ou desgaste da ferramenta, o valor máximo não vai ser excedido. Usualmente a grandeza a ser regulada em tais sistemas é uma grandeza de processo;
2. Controle adaptativo otimizado (ACO): foram desenvolvidos com o objetivo de se obter um controle sobre parâmetros de processo dentre os quais avanço, rotação da ferramenta ou profundidade de corte, de forma a maximizar a resposta do processo alcançando produtos de melhor qualidade. Baseado na estratégia escolhida, o processo é conduzido a alcançar um valor ótimo desejado. Esse valor ótimo deve ser definido, por exemplo, uma qualidade de peça desejada ou um tempo de usinagem. Assim que a grandeza a ser regulada é fornecida ao módulo, esse tipo de sistema opera com o processo da mesma

forma que com as grandezas de saída. A princípio, um sistema ACO representa um nível de organização estrutural maior quando comparado com um sistema ACC. Geralmente, usar um sistema ACO permite um ganho de desempenho do processo;

3. Controle Adaptativo Geométrico (GAC): O objetivo primário de tais sistemas é maximizar a qualidade dos produtos em termos de operações de acabamento. Sistemas GAC tomam em consideração a deflecção estrutural e o desgaste da ferramenta de forma a otimizar a qualidade do acabamento.

2.4 Sistemas CAM

A Manufatura Assistida por Computador (CAM) consiste no uso de sistemas computacionais para planejamento, gerenciamento e controle de operações de uma fábrica. O CAM pode ser classificado em duas grandes categorias (SPECK, 2005):

- Sistemas computadorizados de controle e monitoração - neste caso, o computador se liga diretamente ao processo a ser monitorado ou controlado.
- Sistemas de suporte da produção - trata-se de uma aplicação indireta. O computador é utilizado como ferramenta de suporte para as atividades de produção, não havendo interface direta do computador com o processo de manufatura.

Contudo, o senso geral quanto ao termo CAM remete a função desempenhada por tais sistemas responsável por construir a trajetória da uma ferramenta a partir da representação geométrica (modelo CAD) de uma peça e dessa forma gerar um arquivo CN interpretável por um sistema CNC.

KOCHAN (1986) afirma que pode ser dito que o CAM começou realmente em meados dos anos 50 com o desenvolvimento das máquinas ferramentas numericamente controladas. No começo, estas máquinas eram programadas através de perfuração manual de cartões de papel, sendo interpretável diretamente por aparelhos de controle eletromecânicos das máquinas CN (Comando Numérico), que consistia principalmente de coordenadas binárias e uns poucos comandos (por exemplo, as velocidades de eixo e de avanço).

Sistemas operacionais dos anos 60 foram projetados principalmente para o processamento em lotes. O desenvolvimento de sistemas CAD (Computer-Aided Design) evidenciou a necessidade de comunicação entre diferentes programas

independentes, que possibilitasse uma ligação flexível entre eles, e para a possibilidade de compartilhamento e transmissão de dados. Simultaneamente, o uso de programas gráfico e interativos cresceu rapidamente. Sistemas operacionais ofereciam ou somente uma ajuda pobre, ou normalmente nenhuma ajuda para projetistas de CAD/CAM com relação a estes pontos. Eles tinham ou que adaptar o sistema operacional, ou que desenvolvê-lo, ou ainda implementar diretamente em seus programas as facilidades necessárias. Tudo isso era feito em linguagem de máquina, não deixando nenhuma esperança de portabilidade. Como isto não é um trabalho normal do projetista de CAD/CAM, o resultado era bastante ruim (KOCHAN, 1986).

Então, no início dos anos 70 é que veio a idéia de se construir sistemas específicos para CAD/CAM, oferecendo facilidade de programação para manipulação de dados, comunicação homem-máquina e inter-relação entre programas.

As técnicas de CAD/CAM foram utilizadas inicialmente durante muitos anos na engenharia mecânica em indústrias especializadas, como a aviação (BESANT, 1985). Atualmente, o baixo custo de um sistema CAD/CAM aliado a grande capacidade de processamento dos computadores tornaram populares tais sistemas nas mais variadas aplicações.

2.4.1 Geração de um programa CN através de um sistema CAD/CAM

Através de um sistema CAD/CAM a manufatura de um produto qualquer é realizada pela geração de seu modelo geométrico num sistema CAD e transferência do mesmo ao sistema CAM. Para esta transferência, a maioria dos softwares utiliza-

se de uma malha de triângulos gerado sobre a geometria original proveniente do CAD (figura 12), e é essa malha que será utilizada como modelo geométrico para a geração do programas CN (SCHÜTZER e SOUZA, 2000).

Figura 12 – Modelo triangularizado

Para a comunicação entre sistemas CAD/CAM de fornecedores diferentes, foi desenvolvido no início da década de 80 um padrão neutro de comunicação em formato ASCII ou binário, denominado IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*) (BHANDARKAR et al, 2000). Além do padrão IGES, padrões como o VDA-FS da indústria alemã e o STEP, entre outros, estão em contínuo desenvolvimento, porém cabe destacar que ainda apresentam vários problemas de comunicação.

Após essa etapa, o programador do sistema fornecerá os dados da manufatura, tais como: dimensão da matéria prima, estratégias de usinagem e parâmetros tecnológicos. Os softwares CAM permitem uma grande flexibilidade ao

usuário quanto a trajetória da ferramenta, possibilitando que se desenvolva a estratégia de corte mais adequada para cada situação. A figura 13 contém alguns exemplos de tipos de trajetórias que podem ser desenvolvidas.

Figura 13 – Estratégias diferentes de usinagem

Com os dados de manufatura inseridos no sistema, o software então processa o cálculo da trajetória da ferramenta, gerando primeiramente um arquivo nativo, conhecido como *Cutter Location File* (CLF), que contém apenas o percurso da ferramenta representado por coordenadas no plano cartesiano (figura 14).

Figura 14 – Representação do arquivo nativo CLF

Na maioria dos casos, um módulo adicional integrado ao sistema CAM, conhecido como pós-processador, será o responsável por transformar o arquivo nativo em programa CN, contendo a linguagem apropriada para o CNC em questão. Essa linguagem está baseada na utilização de interpolações lineares (G1) e interpolações circulares (G2/G3) para informar à máquina sobre o percurso da ferramenta.

O método mais usado para representar a trajetória da ferramenta para a usinagem de superfícies complexas é a interpolação linear de segmentos de retas. No entanto, atualmente, existem outras metodologias, como a interpolação linear/circular e a interpolação NURBS (Non Uniform Rational B-Spline), mas que, por serem recentes, são pouco difundidas. A figura 15 ilustra as três metodologias de interpolação normalmente encontradas nos sistemas CAM (SCHÜTZER, 2004).

Figura 15 – Métodos de interpolação (adaptado de SHÜTZER, 2004)

- Interpolação linear: método mais utilizado para representar a trajetória da ferramenta, descrita pela interpolação de pequenos segmentos de retas, utilizando apenas o comando G1. Dentre as características desse método, é possível ressaltar: programas NC extensos, com dezenas de megabytes; tolerâncias na transformação dos caminhos da ferramenta em segmentos de retas; baixa qualidade de acabamento devido ao faceteamento da superfície usinada; grande volume de informações para o CNC processar, não permitindo, assim, alta

velocidade de avanço em regiões complexas, representadas por um grande número de pequenos segmentos de retas.

- Interpolação linear/circular: consiste na associação da interpolação linear com a interpolação circular para a representação da trajetória complexa da ferramenta. Utilizam-se programas NC contendo comandos G1, G2 e G3. Dentre as características desse método, estão programas NC menores, em relação aos da interpolação linear, e boa qualidade de acabamento devido à melhor representação da geometria original.

- Interpolação Spline: faz uso dos modelos matemáticos que os sistemas CAD atuais utilizam para a representação de curvas e superfícies complexas. No sistema CAM, esse modelo matemático irá representar a trajetória da ferramenta. Esses modelos são conhecidos como funções Spline, e a função mais apropriada dessa metodologia é conhecida como NURBS. Por meio desse modelo matemático, é possível representar uma trajetória complexa de ferramenta. Portanto, o programa NC gerado não irá conter os comandos tradicionais G1, G2 e G3 (em áreas complexas), mas uma nova codificação, que representará uma trajetória complexa.

2.4.2 Principais sistemas CAM

Existem inúmeros sistemas CAM disponíveis no mercado para as mais variadas aplicações. Grande parte dos softwares que apresentam funções de sistemas CAM também apresentam funções de sistemas CAD. Dessa forma, ao listar os principais softwares CAM é necessário também citar softwares CAD/CAM. A tabela a seguir contém os principais sistemas CAD/CAM e CAM disponíveis no mercado.

Tabela 1 – Principais sistemas CAD/CAM e CAM

Principais sistemas CAD/CAM e CAM		
Desenvolvedor	Produto	Tipo de sistema
Cadem	CAPSmill, CAPSturn, CAMLite	CAD/CAM
Camtek Ltd.	PEPS	CAD/CAM
Camsoft	Advanced System 3000	CAD/CAM
Cimatron	CimatronE	CAD/CAM
Cimplex	Cimskil Manufacturing Automation	CAM
CNC Software, Inc.	Mastercam	CAD/CAM
Dassault Systèmes S.A.	CATIA	CAD/CAE/CAM
Delcam International	PowerMILL, FeatureCAM	CAM
DP Technology	ESPRIT	CAM
Engineering Geometry Systems	FeatureCAM	CAM
ERCII	e-NC	CAM
EZ-CAM Solutions	EZ MILL & EZ-TURN Express	CAD/CAM
EXAPT	EXAPT	CAM
FastCAM	FastCAM	CAM
Geometric Technologies, Inc.	CAMWorks	CAM
Gibbs and Associates	GibbsCAM	CAM
ICAM Technologies Corporation	CAM-POST, Virtual Machine	CAM
Intelitek	spectraCAM Turning, spectraCAM Milling	CAM
Kubotek Corporation	KeyMachinist	CAM
LAB	SUM3D, BAMBOO, DRILLMATRIX, RHINONC	CAM
Lectra	Vector, GraphicPilot	CAM
MasterShip Software	MasterShip	CAD/CAM
MCS	ANVIL	CAD/CAM
MecSoft Corporation	VisualMill	CAD/CAM
Metalix CAD/CAM Ltd.	cncKad	CAD/CAM

Tabela 2 – Principais sistemas CAD/CAM e CAM (continuação)

Principais sistemas CAD/CAM e CAM		
Desenvolvedor	Produto	Tipo de sistema
Metamation	MetaCAM	CAM
MicroTech StellaData AB	CamModul	CAD/CAM
MicroTech StellaData AB	TrigFix-32	CAM
Missler Software	TopSolid'Cam	CAM
MMTechnologies	MachineWorks	CAM
Module Works	5AxCore	CAM
MTC Software, Inc.	ProNest, TurboNest, Design2fab, GeoPoint	CAM
NC Graphics	DEPOCAM, Toolmaker	CAD/CAM
Open Mind Software	hyperMILL	CAM
OptiTex	3D Runway	CAM
Parametric Technology Corporation	Pro/ENGINEER	CAD/CAM
Planit	EdgeCAM, AlphaCAM	CAM
Progressive Software Corp.	X-CAM	CAM
QARM Pty Ltd	OneCNC	CAD/CAM
Sescoi	WorkNC	CAM
SmartCAMcnc	SmartCAM	CAM
SolidCAM	SolidCAM	CAM
SolutionWare Corporation	GeoPath	CAD/CAM
SolutionWare Corporation	MazaCAM, PowerCAM	CAM
Sprut Technology	Sprutcam	CAM
Surfware	SurfCAM	CAM
Tebis	Tebis	CAM
UGS (Siemens PLM Solutions)	NX	CAD/CAE/CAM

2.4.2.1 ESPRIT

ESPRIT é uma família de softwares CAM para máquinas ferramenta CNC, desenvolvido pela DP Technology Corp. Atualmente é um dos principais softwares CAM disponíveis no mercado. A família de softwares ESPRIT inclui:

- ESPRIT SolidMill: módulo para usinagens em fresadoras de 2 a 5 eixos;
- ESPRIT SolidTurn: módulo para torneamento;
- ESPRIT SolidWire: módulo para máquinas de eletroerosão;
- ESPRIT SolidMillTurn: módulo para centros de usinagem;
- ESPRIT Mold: para fresamentos em altas velocidades (HSM).

Algumas das principais características da família ESPRIT serão listadas a seguir (DP TECHNOLOGY, 2006):

- Usinagem e modelagem de partes geométricas permitindo: modelagem sólida (Parasolid, ACIS), modelagem de superfície (NURBS), Modelagem STL, desenho, dimensionamento e anotação;
- Pós-processador universal: capacidade de edição do código G gerado e programa de comunicação DNC RS232;
- Simulação e verificação: simula o ambiente de fabricação completo, incluindo a máquina ferramenta, os dispositivos de fixação, a ferramenta e a peça, verificando colisões e comparando a peça usinada com o modelo da peça;

Figura 16 – Simulação de usinagem no ESPRIT

- Ciclos de usinagem adaptativos que se adaptam a variações de geometria na peça permitindo ao usuário automaticamente atualizar o caminho da ferramenta utilizado em peças anteriores de forma a suprimir diferenças geométricas no modelo sólido utilizado para programa e a peça original.
- Usinagem em altas velocidades (HSM): funcionalidade incluída em todos os ciclos de usinagem, permitindo o corte de materiais duros com tempo mínimo, enquanto são mantidos carregamentos constantes na ferramenta de corte utilizando movimentos contínuos e suaves, críticos na usinagem em altas velocidades 3D.. A otimização HSM utilizando NURBS, curva spline e arco otimizado é realizada no pós-processador universal do ESPRIT.
- Otimização do código G: Desenvolve estudos de tempo e sincroniza o programa CNC de forma a otimizar o código G e minimizar o tempo de

ciclo através da lista de sincronização ESPRIT. O ESPRIT apresenta uma linha do tempo da máquina em um gráfico de barras organizado por porta ferramentas, cabeça de usinagem e eixo árvore.

- Capacidade de ler dados nativos dos seguintes formatos: ACIS (SAT), AutoCAD (DWG), CSV, DXF, Autodesk Inventor, IGES, Mechanical Desktop, Parasolid (X_B, X_T), Solid Edge, Solid Works, TXT, VDA-FS, CATIA, Pro/ENGINEER, Unigraphics, STEP, STL.

2.4.2.1.1 Integração do software ESPRIT

Uma característica a ser destacada no do software ESPRIT é sua capacidade de integração com outros softwares. É disponibilizado para usuários do sistema um kit de ferramentas que possibilita utilizar funções do sistema ESPRIT em softwares terceiros ou mesmo criar um novo componente que pode ser usado como suplemento dentro do próprio sistema ESPRIT. Dessa forma é possível criar soluções customizadas para necessidades individuais.

O kit de ferramentas ESPRIT é composto por APIs (Application Programming Interface) - baseadas na plataforma da Microsoft para componentes de software COM (Component Object Model) – e objetos VBA (Visual Basic for Applications).

2.4.3 Módulos de otimização para sistemas CAD/CAM

Os sistemas CAD/CAM por si só não são capazes de alcançar o melhor resultado em um processo de usinagem. Variáveis relativas à máquina ferramenta e ao processo devem ser levadas em consideração, uma vez que a grande variedade

de ferramentas, fixações e outros componentes da máquina tornam o mecanismo da usinagem extremamente complexo, impossibilitando uma solução genérica.

Visando atingir um nível otimizado do processo, foram desenvolvidos módulos auxiliares ao sistema CAD/CAM. Tais módulos buscam informações extras relativas ao processo específico de usinagem através de cálculos e simulações. Com a utilização dos módulos auxiliares, é possível obter, (PLOTNIKOV, 2009):

- Menor tempo de usinagem;
- Prevenção de quebra de ferramenta;
- Aumento do tempo de vida da ferramenta;
- Aumento da acurácia e/ou qualidade da superfície usinada;
- Exclusão de movimentos desnecessários;
- Prevenção de erros de posicionamento do CAM.

Em termos de integração ao sistema CAM, os módulos podem ser divididos em (ČUBOŇOVÁ, 2007):

- Softwares de otimização independentes: Geram como resultado condições de corte que devem ser inseridas manualmente no programa CN. Normalmente são construídos em linguagem de programação padrão, tais quais Visual Basic, Delphi e C++. O software OptiCut, desenvolvido pela STU, é um exemplo desse tipo de software.
- Softwares de otimização colaborativos: Analizam um programa CN previamente gerado por um sistema CAM e sugerem otimizações. Esse tipo de software realiza uma simulação virtual da peça usinada, verificando através da seção transversal a quantidade de sobremetal que deverá ser removido e utilizando valores de avanço sugeridos pelo operador, retorna

valores de avanço otimizados. Em posições da trajetória onde a quantidade de material retirado é maior, o avanço tem seu valor reduzido. Nas posições em que menos material deve ser removido, o avanço tem seu valor aumentado. Alguns softwares desse grupo ainda são dotados de funções responsáveis por adaptar a velocidade do spindle de forma a otimizar a avanço. Exemplos desse tipo de software são os sistemas NCspeed, NC Simul e PS-Optifeed.

- Softwares de otimização implementados em sistemas CAM: Módulos que otimizam as condições de corte diretamente no CAM. Tais sistemas tem sua ação integrada a preparação dos dados CN feita pelo CAM. Um dos principais sistemas desse grupo é o módulo Vericut.

Alguns dos principais módulos auxiliares ao sistema CAM serem apresentados com mais detalhes a seguir.

2.4.3.1 Opticut (STU)

O software Opticut, desenvolvido pela STU, é usado para modificar programas CN para fresamento CNC (especificamente velocidade do eixo árvore e avanço), normalmente durante a fase de acabamento (ČUBOŇOVÁ, 2007).

A partir de arquivo CN, o software verifica mudanças bruscas de velocidade de eixo árvore e avanço e sugere mudanças graduais mais suaves. Tais modificações levam as qualidades superficiais melhores na peça, e menor possibilidade de quebra de ferramenta. No entanto, o sistema por si só não altera o

programa CN, cabendo ao usuário analisar as informações geradas e produzir modificações.

2.4.3.2 NCspeed (Formtec GmbH)

NCspeed é um software desenvolvido pela Formtec GmbH para a simulação de processos de fresamento de 3 e 5 eixos que atua otimizando os dados provenientes de um sistema CAM.

O software calcula o volume de material a ser removido pela fresa e ajusta o avanço da ferramenta de acordo com condições pré-definidas, conforme mostra a figura 17. Através da inserção de limites de valores de avanço desejados e condições adicionais, o sistema checa o sobremetal da seção transversal e retorna um avanço otimizado para o programa CN desenvolvido pelo CAM. Em áreas com pouco volume de material a ser removido e condições de fresamento favoráveis, o sistema aumenta avanço. Em áreas críticas, o avanço sugerido pelo operador não é alterado (FORMTEC, 2008).

Figura 17 – Modificações de avanço propostas pelo software NCspeed

Durante a simulação também são calculadas as cargas sobre a ferramenta e esses valores são comparados com um limite pré-especificado pelo usuário. Caso alguma área crítica que possa ocasionar quebra de ferramenta ou danos a peça é detectada, o sistema reduz o automaticamente o avanço nessa posição.

Além dessa função, o sistema também é capaz de detectar colisões da ferramenta com a peça, além de diminuir o tempo de usinagem através do aumento da velocidade de avanço em posições em que a ferramenta não se encontra em contato com a peça (FORMTEC, 2008).

O software atua como um pós-processador. Uma trajetória de ferramenta é lida, velocidades de avanço são sugeridas e um programa otimizado é devolvido. Cabe destacar, entretanto, que sozinho o sistema não substitui um sistema CAM, já que ele apenas atua fazendo otimizações em trajetórias já construídas e não construindo trajetórias.

De acordo com o fabricante, o uso do NCspeed é recomendado principalmente quando o avanço da operação de fresamento é limitada pelo avanço máximo da ferramenta de corte, ou seja, quando a máquina ferramenta é capaz de desenvolver avanços maiores, porém está limitada pelo avanço máximo estabelecido pelo fabricante da fresa afim de evitar quebras de ferramentas. Nesses casos, a redução do tempo de usinagem pode chegar a mais de 20%.

2.4.3.3 NC Simul (Spring Technologies SA)

Através do módulo de otimização Optitool, o software NC Simul, desenvolvido pela Spring Technologies, permite a otimização das condições de corte e do

movimento sem contato com a peça, assim como detecção de colisão no fresamento com 3 ou 5 eixos contínuos.

A principal característica desse sistema é a capacidade de verificar um programa CN não só pela perspectiva da peça e ferramenta, mas também pela perspectiva da máquina. O software permite a criação de uma máquina ferramenta virtual, incluindo todas as juntas cinemáticas entre as partes.

Figura 18 – Interface do software NCSimul

Ao contrário de outros módulos de simulação incluídos em sistemas CAD/CAM de classe média e baixa, o NC Simul permite a verificação dos dados de usinagem em sua forma final (programa CN) e não apenas em suas imagens geométricas contidas no arquivo nativo CL-DATA. Dessa forma, abre-se a possibilidade de serem revelados erros relativos, por exemplo, a um processamento pobre por parte do pós-processador do sistema CAD/CAM.

Entre as funcionalidades do sistema, cabe destacar (SPRING TECHNOLOGIES, 2006):

- Análise de programa CN – Análise com relação a erros de programação, pré-visualização da trajetória da ferramenta, e estimativa de tempo de ciclo;

- Simulação do material removido e da máquina ferramenta – simulação total do sistema máquina/ferramenta/peça, detectando todos os tipos de colisão;
- Análise dimensional – comparação entre o modelo CAD original e o modelo simulado;
- Análise e otimização de condições de corte – análise dos parâmetros de corte para cada bloco do programa, com geração de alarmes baseados em critérios definidos pelo usuário (máxima espessura de corte, etc), otimização do movimento de aproximação e afastamento e gráfico da trajetória da ferramenta relacionado aos respectivos avanços

2.4.3.4 PS-Optifeed (Delcam)

O sistema CAM PowerMILL contém um módulo adicional de otimização de valores de avanço chamado PS-Optifeed. Tal módulo é responsável por analisar a trajetória gerada pelo PowerMILL e automaticamente ajustar o avanço de forma a alcançar uma taxa de remoção de material constante.

Desenvolver uma taxa de remoção de material constante significa que há cargas mais consistentes na ferramenta de corte. Tal fato diminui o desgaste na ferramenta de corte e no próprio eixo árvore da máquina. O software OS-Optifeed também é responsável por diminuir automaticamente o avanço durante as entradas e saídas da ferramenta na peça.

Cargas consistentes na ferramenta de corte também produzem qualidades superficiais melhores na peça. Outras vantagens do sistema estão relacionadas ao decréscimo de necessidade de horas do operador da máquina.

Segundo o fabricante, é possível reduzir em até 50% o tempo de usinagem através da utilização dessa ferramenta (DELCAM, 2004).

2.4.3.5 Vericut (CGTech)

O sistema Vericut existe em diferentes versões, de acordo com o sistema CAM ao qual o módulo é implementado. Existem, por exemplo, versões do Vericut para o sistema Unigraphics (NX) e para o sistema Pro/ENGINEER (ČUBOŇOVÁ, 2007).

O software simula a usinagem de forma buscando encontrar erros de trajetória e movimentos desnecessários. Dessa forma, ele é capaz de diminuir problemas relativos a danos na ferramenta, no sistema de fixação, no componente ou mesmo impedir colisões, sem a necessidade de um teste físico na máquina.

Há ainda no software um módulo de otimização chamado OptiPath. Sua principal finalidade é otimizar os dados CN, aumentando a velocidade e desempenho. Baseado na quantidade de material a ser removido em cada segmento do corte o software calcula e insere valores modificados de avanço nos lugares necessários. Em lugares onde maior quantidade de material deve ser removido, o sistema diminui o avanço e em lugares onde pouco material deve ser retirado o avanço é aumentado (PRETE, 2007).

Figura 19 –Funcionamento do sistema OptiPath

2.4.4 Métodos de estimativa de tempo de usinagem

Os algoritmos de cálculo de tempo de usinagem são baseados em um procedimento simples, no qual o deslocamento total da trajetória de usinagem é dividido pelos avanços programados, com alguns fatores adicionais de correção (MAROPOULOS, 2000). Experimentos mostram que, em condições em que o avanço programado é elevado, há uma significativa discrepância entre o tempo de

ciclo ideal (trajetória percorrida/avanço programado) e o tempo de ciclo real (MONREAL, 2003).

Segundo COELHO; SOUZA; ROGER (2009), métodos analíticos para se prever o tempo total de usinagem não são convenientes devido à grande dificuldade em se obter todas as informações da máquina (por exemplo, perfis de aceleração, desaceleração e outros limites estruturais), do CNC (por exemplo, tempo de processamento do bloco, limitações de jerk, e outros) e também da maneira como o CNC foi implementado na máquina ferramenta (exatidão do movimento, precisão posicional, e outras configurações). O elevado número de máquinas ferramenta CNC existentes no mercado faz com que esse trabalho seja difícil de ser executado.

Em seu trabalho, COELHO; SOUZA; ROGER (2009) propõe uma variável chamada Tempo de Resposta da Máquina (TRM), como forma de avaliar essa combinação de fatores que a máquina ferramenta pode apresentar. O TRM representa uma característica da máquina relacionada à capacidade de executar uma trajetória complexa em elevados avanços. Essa variável pode ser obtida através de alguns experimentos e cálculos matemáticos nos quais a máquina executa várias interpolações lineares seqüenciais com tamanhos de segmento pequenos e constantes alcançando um avanço máximo real proporcional ao tamanho de segmento proposto, sendo que esse avanço é sempre menor que o programado. Essa redução está relacionada à capacidade da máquina em calcular o intervalo de interpolação, ou a capacidade da máquina em fechar ao menos o ciclo de controle de posição de um dos eixos em tempo de executar um bloco. Caso o interpolador, por exemplo, conclua que nenhum ciclo de controle possa ser fechado durante o bloco, o valor do avanço é recalculado utilizando o tempo mínimo de

interpolação possível para que um ciclo de controle seja fechado e o tamanho de segmento programado.

Através de experimentos é possível, portanto, estimar, através dos tamanhos de segmento das interpolações, o avanço máximo que pode ser alcançável pela máquina ferramenta. O diagrama esquemático da aplicação do método do TRM pode ser visualizado na figura 20.

Figura 20 – Diagrama esquemático do método TRM

Através desse método, é possível obter uma estimativa de tempo real de usinagem com um erro de 0,3% a 12%, enquanto a estimativa realizada pelo CAM apresenta um erro de 211% a 1244%. Por outro lado, o TRM não considera as reduções do avanço decorrentes de mudanças de trajetórias, ou seja, quando há um ângulo entre os dois segmentos. Isso envolve uma reação de todo o sistema no sentido de reduzir acelerações, o que pode limitar também a velocidade de avanço.

3

Capítulo

Proposta de sistema

Tradicionalmente, o processo de geração de programas CN a partir de sistemas CAM começa com o modelo CAD que é carregado dentro do software CAM. Deve-se então escolher a ferramenta e selecionar os parâmetros de corte. Tal seleção é baseada no uso de catálogos de fabricantes de ferramentas, os quais contêm recomendações de seleção de parâmetros. Essas recomendações contêm faixas de parâmetros de corte permissíveis para diferentes materiais usinados, como, por exemplo, faixas de avanço e faixas de velocidade de corte.

Após a seleção dos parâmetros de corte, ferramenta e estratégia de usinagem, o sistema CAM gera uma trajetória de corte. É nesse ponto que os módulos de simulação e otimização atuam, baseados na modelagem do processo de corte e nas características geométricas e dinâmicas do equipamento. Entretanto, tais módulos de simulação não levam em consideração o desempenho real da máquina ferramenta. Dessa forma, muitas vezes a estimativa de tempo de usinagem, por exemplo, é realizada apenas dividindo-se o tamanho da trajetória total pelo avanço programado. Essa estimativa difere drasticamente do tempo de processo real. Ao se considerar um avanço constante, também se ignoram problemas de qualidade que

podem surgir em regiões onde a máquina ferramenta desenvolve, devido as suas limitações, avanços muito diferentes do programado.

Figura 21 – Processo tradicional

O programa CN é então executado pela máquina ferramenta, e seu resultado é avaliado pelo operador, freqüentemente com a ajuda de sistemas CAI. Tais sistemas são alimentados por nuvens de coordenadas do produto usinado gerados por uma máquina de medir coordenadas. Qualidade da peça e tempo de processo são os principais fatores a serem analisados. O operador, então, deve realizar as modificações necessárias para obter os resultados desejados.

Nota-se, portanto, que nenhuma etapa do processo leva em consideração a características de desempenho da máquina ferramenta, bem como a capacidade de processamento do CNC. O processo é esquematizado pela figura 21.

O sistema apresentado na figura 22 tem como objetivo preencher essa lacuna de informação. Através do monitoramento de parâmetros da máquina ferramenta em determinadas condições é possível obter variáveis características do desempenho real da máquina. Tal monitoramento pode ser realizado em máquinas ferramenta CNC de arquitetura aberta utilizando-se apenas do controle da própria máquina, sem a necessidade de sensores adicionais. As variáveis de desempenho obtidas podem ser usadas para simular e prever o resultado da usinagem com mais precisão. O tempo total do processo pode ser previsto, assim como problemas de qualidade podem ser melhor diagnosticados.

Figura 22 – Processo otimizado

4

Capítulo

Procedimento Experimental

4.1 Máquina ferramenta

Os experimentos foram realizados em um centro de usinagem vertical HERMLE, modelo C800U, com as seguintes características:

Três eixos de movimentação, sendo que a capacidade de deslocamento na direção X é de 800 mm, na direção Y é de 600 mm e na direção Z de 500 mm.

- Potência do eixo árvore de 18kW com rotação máxima de 24.000 rpm.
- CNC SIEMENS Sinumerik 840D de alta capacidade de processamento, 1.8 Mbytes de memória disponível para programas e disco rígido de 40 Gbytes, para armazenamento e execução de programas
- Acessório *Pre-setter*, utilizado no referenciamento do corpo de prova na mesa da máquina.

Figura 23 – Centro de usinagem vertical HERMLE C800U

4.2 Ferramenta utilizada

A ferramenta utilizada foi uma fresa de topo Coromill® Ball Nose (ponta esférica) de 16 mm de diâmetro. Foi utilizado um suporte de haste cilíndrica Sandvik (cód. R216-16A20-045) com pastilhas Sandvik de 8 mm de raio (cód. R216-16 03 M-M).

Figura 24 – Ferramenta utilizada

4.3 Corpo-de-prova

Foi utilizado nos testes um corpo de prova de aço SAE 1045 com as seguintes dimensões: 135 mm de comprimento, 135 mm de altura e 30 mm de espessura.

Figura 25 – Corpo de prova utilizado

4.4 Modelo CAD utilizado

O modelo CAD utilizado é adaptado do modelo utilizado pelo NC Gesellschaft (NC Gesellschaft Recommendation, 2000) na análise de máquinas para HSM (High Speed Machining). O modelo foi construído utilizando o software SolidWorks®.

Figura 26 – Modelo CAD utilizado

4.5 Sistema CAM utilizado

O programa CN foi gerado através do sistema CAM ESPRIT. Tal sistema foi preferido devido a sua capacidade de integração com outros sistemas, o que permitiria uma futura integração do software de monitoramento com o sistema CAM.

Figura 27 – Simulação do processo de usinagem no CAM

4.6 Arquitetura do sistema de monitoramento

O sistema de monitoramento foi implementado em um PC externo com comunicação direta com o CNC SIEMENS Sinumerik 840D do centro de usinagem vertical HERMLE. O CNC SIEMENS Sinumerik 840D caracteriza-se por ser um CNC de arquitetura “híbrida”. Esse tipo de CNC, que é também o tipo mais comumente encontrado em chão de fábrica, disponibiliza protocolos e tecnologias abertas (não proprietárias) para a troca de dados, tais como DDE (*Dynamic Data Exchange*), NetDDE (*Network Dynamic Data Exchange*), OPC (*OLE for Process Control*), *ActiveX*, entre outras, e redes de comunicação padrões como as redes Ethernet TCP/IP, SERCOS, Profibus, etc. Entretanto, tal tipo de CNC mantém seu cerne fechado.

Figura 28 – Arquitetura do sistema de monitoramento

Um PC externo executando uma rotina programada em LabVIEW ® monitora (conforme a figura 28) os parâmetros da máquina ferramenta através de uma placa de comunicação Profibus (CP 5611 – Siemens) e um servidor DDE (NC-DDE Server). Segundo FERRAZ (2006), a placa de comunicação gerencia toda a camada física e camada de rede de comunicação OPI. A rede OPI é uma rede proprietária da Siemens, apesar de se basear em redes ProfiBUS que são bastante difundidas na área de tecnologias de automação. Através de tal rede é possível alcançar taxas de 1,5 Mbps. O servidor DDE (NC-DDE Server), por sua vez na camada de aplicação encapsula as particularidades da rede OPI, permitindo comunicação através do protocolo DDE. A rotina em LabVIEW ® realiza a leitura dos endereços DDE que são processados e armazenados. Toda comunicação foi realizada via rede RS-485. Através dessa arquitetura de monitoramento (figura 28) é possível se obter uma comunicação determinística e de alta velocidade.

4.7 Software de monitoramento

O software de monitoramento foi desenvolvido em LabVIEW ®. Sua principal função é gravar um arquivo de dados com os parâmetros da máquina ferramenta obtidos durante o teste. Além disso, o software analisa a frequência de aquisição de

dados e contabiliza o tempo total de usinagem, através do avanço resultante alcançado para cada bloco de processamento. Em todos os testes realizados, o software de monitoramento conseguiu adquirir dados a uma taxa de 37 aquisições por segundo, sendo que cada aquisição corresponde a leitura de 8 parâmetros da máquina ferramenta.

Sistema de monitoramento online
Hermle C800U

	Posição (mm)	Avanço (mm/min)
X	112.346	1298.338
Y	33.500	0.000
Z	-10.564	909.145

Frequência da aquisição: 37 Pontos/s

Potência Eixo árvore: 1.379 %

Potência Eixo posicionamento: 2.975 %

Caminho do arquivo de dados salvo: C:\Usuarios\Flavio\Testes\AcabamentoEs02En04.xls

Salvar dados?

Figura 29 – Sistema de monitoramento on-line

Os parâmetros monitorados com seus respectivos endereços DDE podem ser observados a seguir (SIEMENS, 2000).

Tabela 3 – Parâmetros monitorados

Parâmetro monitorado	Endereço DDE
Posição eixo X (mm)	/Channel/GeometricAxis/actPos
Posição eixo Y (mm)	/Channel/GeometricAxis/actPos
Posição eixo Z (mm)	/Channel/GeometricAxis/actPos
Avanço eixo X (mm/min)	/Channel/GeometricAxis/actFeedRate
Avanço eixo Y (mm/min)	/Channel/GeometricAxis/actFeedRate
Avanço eixo Z (mm/min)	/Channel/GeometricAxis/actFeedRate
Potência do eixo árvore	/DriveHSA/State/load
Potência dos eixos de posicionamento	/DriveVSA/State/load

4.8 Ferramenta de diagnóstico

Foi desenvolvida uma ferramenta de diagnóstico também utilizando o software LabVIEW ®. Tal ferramenta (figura 30) permite uma análise combinada dos dados obtidos pelo monitoramento com os parâmetros contidos no programa CN.

Figura 30 – Interface da ferramenta de diagnóstico

A análise é realizada a partir do arquivo de monitoramento resultante do software de monitoramento, e do arquivo do programa CN gerado pelo CAM. Foram programadas as seguintes funções:

- Plotagem 3D dos pontos de posição adquiridos pelo sistema de monitoramento;
- Plotagem 2D das posições, avanços e potência em função de um eixo de posição obtidos pelo sistema de monitoramento, em conjunto com os pontos de interpolação programados no programa CN;
- Cálculo e plotagem da curva de aceleração;
- Cálculo de velocidades de avanço média e máxima durante usinagem;
- Cálculo de potência média e máxima desenvolvida pela máquina ferramenta.
- Análise 3D de avanço (figura 31)

Figura 31 – Ferramenta de análise 3D de avanços

4.9 Planejamento de experimentos

Como abordagem inicial, foram realizados dois experimentos, de forma a principalmente testar a capacidade de monitoramento do sistema proposto. Tais experimentos serão descritos a seguir.

4.9.1 Estudo de divergência entre velocidades de avanço programadas e reais

Nesse estudo, a usinagem foi realizada em vazio, sem a presença de um corpo de prova. O principal objetivo era verificar o comportamento das velocidades de avanço real durante a usinagem de uma superfície complexa. Para isso, uma mesma estratégia de corte foi programada com diferentes velocidades de avanço. Os parâmetros utilizados na geração do programa CN foram os seguintes:

Tabela 4 – Parâmetros de usinagem utilizados

	Velocidade A	Velocidade B	Velocidade C	Velocidade D
Ferramenta	Ballnosed	Ballnosed	Ballnosed	Ballnosed
Diâmetro da ferramenta	16,000 mm	16,000 mm	16,000 mm	16,000 mm
Tipo de estratégia	Raster	Raster	Raster	Raster
Passo lateral	0,200 mm	0,200 mm	0,200 mm	0,200 mm
Tolerância	0,100 mm	0,100 mm	0,100 mm	0,100 mm
Rotação do eixo árvore	1888 RPM	3776 RPM	3776 RPM	3776 RPM
Velocidade de avanço	792 mm/min	1585 mm/min	3500 mm/min	7000 mm/min
Tipo de interpolação	Linear (G1)	Linear (G1)	Linear (G1)	Linear (G1)

Onde:

- Velocidade A: Usinagem abaixo da velocidade de corte máxima especificada pelo catálogo da ferramenta (50%)

- Velocidade B: Usinagem na velocidade de corte máxima especificada pelo catálogo da ferramenta (100%)
- Velocidade C: Usinagem em velocidade acima da velocidade de corte máxima especificada pelo catálogo da ferramenta (220%)
- Velocidade D: Usinagem em velocidade muito acima da velocidade de corte máxima especificada pelo catálogo da ferramenta (440%)

Todos os testes foram executados com o parâmetro G64 ativo.

Os programas foram executados na máquina ferramenta com seu comportamento registrado pelo sistema de monitoramento. Os dados colhidos foram posteriormente analisados através da ferramenta de diagnóstico desenvolvida nesse trabalho

4.9.2 Estudo dos valores de potência de eixo árvore e eixo de posicionamento durante usinagem

Nesse estudo, buscou-se verificar a possibilidade de se obter informações relativas ao processo de usinagem em função da potência utilizada pelo eixo árvore e pelos eixos de posicionamento para cada bloco do programa CN. Para isso executou-se um mesmo programa CN em vazio e no corpo de prova. Antes da execução dos testes no corpo de prova, esse passou por um processo de desbaste, conforme mostrado na figura 32. O processo teve como objetivo gerar uma superfície irregular, de forma que diferentes profundidades de corte ocorressem durante o acabamento.

Processo de desbaste

Peça pós desbaste

Figura 32 – Processo de desbaste da peça

O programa CN de acabamento foi gerado pelo CAM com os seguintes parâmetros:

Ferramenta: Ballnosed

Diâmetro da ferramenta: 16,000 mm

Tipo de estratégia: Raster

Passo lateral: 0,200 mm

Tolerância: 0,100 mm

Rotação do eixo árvore: 3776 RPM

Velocidades de avanço: 1585 mm/min

Tipo de interpolação: Linear (G1)

Espessura média de corte: 1 mm

Após essa abordagem inicial, foi possível notar alguns comportamentos inerentes ao sistema, os quais poderiam ser alvo de estudo. Foram delineados, então, novos experimentos, nos quais o comportamento do sistema foi estudado

mais profundamente com relação ao avanço desenvolvido. Tais experimentos serão descritos a seguir.

4.9.3 Estudo da variável Tempo de Resposta da Máquina (TRM) para a máquina ferramenta utilizada

Durante o estudo de divergência entre as velocidades reais e programadas, notou-se que os valores de avanço máximo real eram menores que o programado. Buscou-se então verificar se essa redução do avanço poderia ser explicada pela variável Tempo de Resposta da Máquina (TRM), como sugerido por COELHO et al (2009). Para tanto, o seguinte experimento foi conduzido:

A máquina ferramenta executava um programa CN contendo diversos segmentos lineares (G01) seqüenciais de tamanho definido. Um valor de avanço de 4000 mm/min era programado. A ferramenta deveria então executar uma trajetória retilínea de aproximadamente 26 mm, porém usando incrementos de posição pequenos (figura 33). O teste foi realizado para os seguintes valores de incremento: 0,005 mm, 0,01 mm, 0,015 mm e 0,02 mm.

Figura 33 – Trajetória da máquina ferramenta para experimento da variável TRM

O avanço máximo alcançado pela máquina foi capturado utilizando o sistema de monitoramento proposto. Após realizar os testes para todos os valores de

incremento proposto pode-se encontrar uma relação linear entre o valor máximo de avanço e o tamanho do segmento. A partir dessa relação é possível, através de um programa CN, estimar os avanços máximos reais que podem ser alcançados para cada segmento de interpolação programado. Comparando-se esses valores com os valores reais obtidos em teste, pode-se verificar se a redução do avanço real em cada região é ocasionada pela limitação relacionada ao TRM.

4.9.4 Estudo da relação entre o ângulo de inclinação entre duas interpolações lineares e o avanço máximo real alcançado no segmento

Esse estudo teve como objetivo definir a influência do ângulo entre duas interpolações lineares e o avanço máximo atingido.

Durante o ensaio do estudo de divergência entre valores de avanço reais e programados, os valores de avanço máximo apresentavam valores menores que o esperado pela limitação do TRM da máquina. Tal característica evidencia a presença de outro fator limitante ao avanço. Um fator que parece ser relevante, de acordo com os experimentos, é o ângulo de inclinação entre duas interpolações. Dessa forma foram realizados experimentos para averiguar essa influência.

Os experimentos consistiam em executar um programa CN com a seguinte seqüência de movimentos:

A máquina executa inicialmente diversas interpolações lineares de tamanho definido seqüenciais. Em seguida a máquina continua executando interpolações lineares com o mesmo tamanho de segmento definido, porém, alternando entre interpolação com ângulo 0 em relação ao eixo e interpolação com ângulo incremental, conforme:

- uma interpolação linear com ângulo em relação ao eixo de 0 graus;
- uma interpolação linear com ângulo em relação ao eixo de 1 grau;
- uma interpolação linear com ângulo em relação ao eixo de 0 graus;
- uma interpolação linear com ângulo em relação ao eixo de 2 graus.
- uma interpolação linear com ângulo em relação ao eixo de 0 graus;
- uma interpolação linear com ângulo em relação ao eixo de 3 graus.
- uma interpolação linear com ângulo em relação ao eixo de 0 graus;
- (...)

E assim sucessivamente até alcançar o ângulo de 90 graus, gerando dessa forma a seguinte trajetória (figura 34):

Figura 34 – Trajetória da máquina ferramenta para experimento de relação de inclinação

Todos os testes foram executados em vazio e com avanço programado de 4000 mm/min e parâmetro G64 (*lookahead* – suavização da transição do bloco) ativo. Foram realizadas curvas no plano XY, XZ e YZ para averiguar possíveis divergências entre os valores de avanço obtidos. Os tamanhos de segmento utilizados foram 0,005 mm, 0,01 mm, 0,015 mm e 0,02 mm. O avanço alcançado pela máquina em cada região foi capturado pelo sistema de monitoramento proposto.

Resultados e Discussões

5.1 Estudo de divergência entre velocidades de avanço programadas e reais

Com os dados obtidos pelo monitoramento, executou-se a ferramenta de diagnóstico. A seguir (figuras 35, 36, 37 e 38) podem-se observar os gráficos de avanço em relação à trajetória executada.

Figura 35 – Avanço real para velocidade A

Figura 36 – Avanço real para velocidade B

Figura 37 – Avanço real para velocidade C

Figura 38 – Avanço real para velocidade D

Nota-se que a máquina apresenta um limite máximo de avanço nas curvas, que pode acabar por gerar um avanço médio real muito diferente do avanço programado. Isso influi na qualidade superficial, uma vez que o avanço por dente é diferente do calculado inicialmente, a qual considera o avanço programado e a velocidade de rotação do eixo árvore. Através da ferramenta de diagnóstico foi possível calcular a relação entre as taxas obtidas e a taxas programadas, como mostra a tabela 5.

Tabela 5 – Análise de avanços obtidos para cada um dos ensaios

	Velocidade A	Velocidade B	Velocidade C	Velocidade D
Avanço médio em X (mm/min)	640.002	1055.843	1369.37	1467.821
Avanço médio em Y (mm/min)	0.523551	0.405354	2.6471	2.3473
Avanço médio em Z (mm/min)	364.058	683.898	752.917	797.1189
Avanço médio total real (mm/min)	756.679	1330.769	1605.395	1714.981
Avanço médio total programado (mm/min)	792	1585	4000	8000
Relação Avanço real / Avanço programado (%)	95.54	83.96	40.13	21.43

Observa-se também nos gráficos um comportamento mais instável das taxas de avanço em velocidades mais elevadas. Para uma mesma região ao longo do eixo Y podem ocorrer avanços bem distintos quando o avanço programado não consegue ser atingido.

Outro dado interessante a ser observado é o comportamento do avanço em relação aos pontos de interpolação programados. Nos gráfico a seguir (figura 39) observam-se os pontos de interpolação do programa CN e o comportamento do avanço real. Pode-se notar uma desaceleração do avanço ao término de cada interpolação.

Figura 39 – Avanço e posições programadas

5.2 Estudo dos valores de potência de eixo árvore e eixo de posicionamento durante usinagem

Os valores de potência obtidos na usinagem em vazio e no corpo de prova foram analisados pela ferramenta de diagnóstico, como mostram as figuras 40 e 41.

Figura 40 – Gráfico de potências para usinagem em vazio

Figura 41 - Gráfico de potências para usinagem utilizando um corpo-de-prova

É interessante notar que não há diferença significativa entre a usinagem em vazio e a usinagem com o corpo de prova com relação à potência do eixo árvore. Isso pode ser explicado devido à pouquíssima potência requisitada pelo eixo árvore em operações de acabamento. Para obter um sinal significativo de potência seria necessário aumentar a espessura do corte, o que não condiz com as práticas industriais.

Uma característica que pode ser observada diz respeito à potência despendida pelos eixos de posicionamento (figura 42). Através da curva de aceleração do avanço, calculada pela ferramenta de diagnóstico, pode-se observar que os picos de aceleração correspondem aos picos de potência.

Figura 42 – Relação entre potência de posicionamento e avanço

Também foi possível verificar em todos os testes realizados, que apesar da geometria ser sempre a mesma, os pontos de interpolação principalmente na região do vale da peça não se apresentavam sempre nas mesmas posições em todos os passes ao longo do eixo Y, conforme mostra a figura 43.

Figura 43 – Posições de interpolação distintas para valores de Y distintos

Essa divergência entre os valores de posição em cada passagem pode ter gerado a característica de facetamento desigual na região do vale da peça, ao longo do eixo Y, como mostra a figura 41.

Faceamento uniforme no pico

Faceamento disforme no vale

Figura 44 – Facetamentos diferentes no pico e vale da peça

5.3 Estudo da variável Tempo de Resposta da Máquina (TRM) para a máquina ferramenta utilizada

Os valores de avanço máximo alcançados para cada tamanho de segmento podem ser observados na tabela 6 a seguir:

Tabela 6 – Relação entre tamanho de segmento e avanço máximo obtido

Tamanho do segmento (mm)	Avanço máximo obtido (mm/min)
0,005	900
0,01	1800
0,015	2700
0,02	3600

Através deles, foi possível obter a seguinte relação entre tamanho de segmento e avanço máximo possível (figura 45):

Figura 45 – Regressão linear obtida pela relação avanço/tamanho de segmento

Entretanto, ao se analisar o programa executado pode-se verificar que os valores de avanço reais alcançados são muito menores do que a estimativa de avanço obtida pela limitação do TRM. As interpolações lineares executadas pelo programa CN apresentam tamanhos de segmentos com valores acima de 1 mm. Pela limitação do TRM, o avanço máximo obtenível para 1 mm seria de 18000 mm/min. Entretanto, os valores avanço reais monitorados chegam a ser reduzidos a 200 mm/min. Pode-se concluir, portanto, que a redução do avanço, nesse caso, não é ocasionada somente pela limitação de TRM.

5.4 Estudo da relação entre o ângulo de inclinação entre duas interpolações lineares e o avanço máximo real alcançado no segmento

A curva experimental obtida (conforme explicado em 4.9.4) para tamanho de segmento de 0,01 mm pode ser observada no gráfico abaixo (figura 46).

Figura 46 – Curva experimental da relação de ângulo de inclinação e avanço obtido (0,01 mm)

Na região em que a coordenada X é menor que zero, a máquina desenvolve uma trajetória retilínea, porém executando diversas interpolações curtas de 0,01 mm. Como esperado, a máquina ferramenta não consegue atingir o avanço máximo programado (4000 mm/min), alcançando o valor de 1800 mm/min, que é a limitação prevista pelo TRM. A partir de $X > 0$, a máquina ferramenta inicia o movimento alternado entre um segmento linear de 0,1 mm sem inclinação em relação ao eixo X e um segmento linear de 0,1 mm com inclinação crescente em relação ao eixo X. Nessa situação o gráfico mostra, portanto, o comportamento do avanço da máquina

quando esta se encontra sujeita a duas interpolações lineares com diferenças angulares entre si. Pode-se verificar uma curva bem definida, que tende a um valor mínimo.

O mesmo teste foi executado para diferentes tamanhos de segmentos (0,005 mm, 0,01 mm, 0,015 mm e 0,02 mm). O objetivo era verificar se a limitação do avanço ocorria devido a uma ação conjunta do ângulo entre as interpolações e da limitação do TRM, ou se apenas um dos fatores era o determinante do avanço máximo alcançado. As curvas comparadas podem ser observadas no gráfico a seguir (figura 47).

Figura 47 – Curva experimental da relação de ângulo/avanço para diversos tamanhos de segmento

Nota-se que independentemente do tamanho do segmento, o gráfico apresenta os mesmos valores mínimos de avanço. Entretanto, quanto maior o tamanho do segmento, maiores são os avanços máximos alcançados, independentemente do ângulo desenvolvido. Esse comportamento pode ser explicado separando-se as componentes de avanço, como mostram os gráficos para tamanho de segmento de 0,01 mm a seguir (figuras 48 e 49):

Figura 48 – Curva da componente do avanço em X (segmento de 0,01 mm)

Figura 49 – Curva do componente do avanço em Y (segmento de 0,01 mm)

Pode-se observar que as variações na curva ocorrem devido ao comportamento intermitente da cada componente do avanço. Analisando a trajetória executada pela ferramenta verifica-se que a componente de avanço Y deve alternar entre um valor crescente (nas regiões nas quais o ângulo em relação a X é crescente) e zero (nas regiões nas quais o ângulo entre a trajetória e o eixo X é zero, ou seja, não há movimento em Y, e, portanto, não há componente de avanço em Y). O comportamento da componente de avanço em X deve acompanhar as variações da componente em Y, de forma a manter a trajetória do movimento.

Quanto maior o tamanho do segmento, mais tempo a máquina ferramenta tem para acelerar o eixo Y, e conseqüentemente, maior a resultante do avanço. Levando em consideração esse comportamento, pode-se concluir que as curvas de variação angular encontradas apresentam a mesma limitação de avanço para

diferentes tamanhos de segmento, ou seja, a limitação de avanço devido à variação de ângulo entre duas interpolações, nesse caso, não está relacionada predominantemente ao TRM, sendo, na prática, fatores distintos e independentes que podem influenciar o avanço.

O experimento da curva foi realizado tendo como referência os outros eixos de interpolação. Os gráficos podem ser observados nas figuras 50, 51 e 52. Verifica-se que não há diferença substancial com relação à curva de valores mínimos de avanço para essa máquina ferramenta. Pode-se notar, entretanto, uma variação de avanço um pouco maior nos gráficos que envolvem o eixo Z.

Figura 50 – Curva de relação ângulo/avanço para eixos XY (segmento de 0,01 mm)

Figura 51 - Curva de relação ângulo/avanço para eixos XZ (segmento de 0,01 mm)

Figura 52 - Curva de relação ângulo/avanço para eixos YZ (segmento de 0,01 mm)

A explicação para o comportamento de limitação do avanço da máquina quando duas interpolações possuem graus de inclinação diferentes reside na dinâmica do processo. Considere uma trajetória na qual a máquina execute um movimento paralelo ao eixo X e logo em seguida um movimento com ângulo α diferente de zero em relação ao eixo X (figura 53).

Figura 53 – Movimento sem inclinação seguido de movimento inclinado

Analizando as componentes de avanço na região entre os pontos P_0 e P_1 , nota-se que a componente do avanço em X (F_x) apresenta um valor igual à resultante do avanço, enquanto a componente do avanço em Y (F_y) apresenta valor nulo (Eq. 1 e 2).

$$F_x = F \quad (1)$$

$$F_y = 0 \quad (2)$$

Considerando o movimento na região entre os pontos P_1 e P_2 , para garantir a trajetória especificada, as componentes de avanço devem passar a ser (Eq. 3 e 4):

$$F_x = F \times \cos(\alpha) \quad (3)$$

$$F_y = F \times \sin(\alpha) \quad (4)$$

Na região de mudança de inclinação, portanto, o valor da componente de avanço em X terá que desacelerar ao valor de $F \times \cos(\alpha)$ e o valor da componente de avanço em Y terá que acelerar ao valor de $F \times \sin(\alpha)$, instantaneamente. Devido às acelerações da máquina serem limitadas, o único modo possível de se executar o movimento garantindo a trajetória seria se o valor da resultante do avanço na região de transição fosse igual a zero. Ou seja, a máquina ferramenta teria que parar seu

movimento entre as duas interpolações para garantir a trajetória ideal. Entretanto, os usuários e/ou os fabricantes de máquinas ferramenta podem escolher entre erros de trajetória ou erros nos valores de avanço. Se o erro de trajetória é permitido, a máquina tenta executar o avanço programado; entretanto a trajetória não é garantida. No caso da máquina ferramenta em questão é o que ocorre quando o parâmetro G64 (*lookahead*) é ativado. Um possível comportamento pode ser observado na figura 54 (SO, 2007).

Figura 54 – Possível comportamento da trajetória real na região de transição

Essa compensação entre o erro de trajetória e o erro do valor de avanço é diferente para cada fabricante de máquina ferramenta e para cada configuração de cada máquina ferramenta em si. Dessa forma é muito difícil encontrar uma forma analítica de se prever a redução do avanço.

Independente da estratégia utilizada pelo fabricante para que o avanço não seja tão drasticamente reduzido o resultado final será um valor de avanço na componente perpendicular a trajetória maior que zero, na região de transição entre os blocos. Conseqüentemente, isso garantirá um avanço resultante também maior

que zero. A componente do avanço na direção da trajetória inicial, de forma a manter a trajetória do próximo bloco, será uma função do inverso da tangente do ângulo de inclinação α , como mostram os cálculos a seguir (Eq. 5).

$$\tan(\alpha) = \frac{F_y}{F_x} \rightarrow F_x = \frac{F_y}{\tan(\alpha)} \quad (5)$$

Devido à tolerância do erro de posição do interpolador ser normalmente muito pequena, a velocidade atingida na direção perpendicular à trajetória é normalmente muito menor do que a necessária para se manter a velocidade de avanço programada. Isso faz com que o valor da componente de avanço perpendicular a trajetória seja aproximadamente constante na transição entre dois blocos, independentemente do ângulo de inclinação entre eles. Já a componente do avanço paralela a trajetória inicial irá variar em função do inverso da tangente do ângulo, como mostra o gráfico (figura 55).

Figura 55 – Curva teórica da componente de avanço paralela a trajetória inicial

Considerando a componente do avanço perpendicular constante, pode-se calcular a resultante do avanço (Eq. 6).

$$F = \sqrt{F_Y^2 + F_X^2} \rightarrow F = \sqrt{F_Y^2 + \left(\frac{F_Y}{\tan(\alpha)} \right)^2} \quad (6)$$

A curva característica da resultante do avanço na região de transição entre os blocos, pode ser observada no gráfico da figura 56. Pode-se notar que seu valor tende ao valor constante da componente do avanço perpendicular a trajetória.

Figura 56 – Curva teórica da resultante do avanço

O valor da componente perpendicular a trajetória durante a transição entre dois blocos pode ser estimado como o mínimo valor de avanço obtido durante o experimento, ou seja o valor obtido durante a transição entre dois blocos quando a máquina ferramenta executa um movimento com ângulo de 90 graus em relação a trajetória anterior. No caso da máquina ferramenta utilizada nos testes, o valor obtido para a curva de 0,01 mm de tamanho de segmento é 36,062 mm/min. Esse valor é aproximadamente o mesmo para as curvas 0,005 mm, 0,015 mm e 0,02 mm. Usando tal valor podemos chegar a seguinte curva de avanço teórica (Eq. 7).

$$F = \sqrt{F_Y^2 + \left(\frac{F_Y}{\tan(\alpha)} \right)^2} = \sqrt{(36.062)^2 + \left(\frac{36.062}{\tan(\alpha)} \right)^2} \quad (7)$$

Tal curva apresenta valores bem próximos aos obtidos no experimento real como mostra o gráfico (figura (57)).

Figura 57 – Curvas experimental e teórica comparadas

Pode-se observar que a limitação de avanço devido ao TRM está presente e é o que determina a velocidade em ângulos menores que aproximadamente 2 graus, nesse caso. Entretanto, em ângulos maiores que 2 graus a limitação se deve particularmente ao ângulo de inclinação. Em valores de tamanho de segmento diferentes o mesmo comportamento pode ser observado, ou seja, a maior limitação de avanço é a determinante.

Portanto, através de um experimento simples é possível determinar a equação da curva de valores mínimos que serão obtidos quando os segmentos lineares apresentam diferenças de inclinação. Com essa equação e a variável TRM pode-se estimar com maior precisão o tempo total de usinagem de um programa CN.

Assim o sistema CAM poderia incorporar rotinas de cálculo dos valores de avanço esperados combinando a metodologia TRM com a proposta neste trabalho. Isso seria feito a partir de testes iniciais para a parametrização do sistema para cada máquina ferramenta. Nesses testes, seriam levantados os parâmetros TRM e da influência angular proposta.

Figura 58 – Metodologia de otimização do processo

Com a metodologia proposta na figura 58 é possível otimizar os processos de usinagem obtendo-se assim melhores resultados e também previsibilidade do tempo de execução.

6

Capítulo

Conclusões e sugestões

Durante o trabalho verificaram-se as seguintes conclusões:

Como mostraram os experimentos, o avanço programado não ocorre durante toda a usinagem devido a limitações da máquina ferramenta. Tais limitações não podem ser previstas analiticamente, devido à dificuldade de se obter grande parte das informações sobre o comportamento da máquina ferramenta.

A variável Tempo de Resposta da Máquina não é o único fator limitante do avanço da máquina. Outra variável que deve ser considerada para o cálculo de estimativa de tempo é o comportamento da máquina em relação ao ângulo de inclinação entre as interpolações.

Tal variável é dependente da característica do interpolador com relação à compensação entre alcançar o avanço programado e manter-se na trajetória desejada. Essa característica varia de acordo com o fabricante da máquina ferramenta e da configuração da própria máquina ferramenta em si.

Entretanto, através de experimentos simples é possível obter a equação da curva de relação entre avanço máximo necessário e variação de inclinação. Tal equação pode ser usada, juntamente com a variável TRM para estimar o tempo de usinagem total da máquina ferramenta com maior precisão.

Baseado nos resultados obtidos sugere-se as seguintes atividades de pesquisa:

Seria interessante realizar o experimento das curvas em diferentes eixos para outras máquinas ferramentas de forma a verificar se essas apresentam o mesmo comportamento independente dos eixos de interpolação.

Também seria interessante verificar a influência de outros fatores, como por exemplo, a região do quadrante que ocorre a interpolação. Verificações preliminares apontaram que para determinados ângulos de inclinação há diferença no valor do avanço máximo atingido.

Outro estudo que pode ser sugerido é verificar a relação de inclinação para interpolações não lineares. O estudo atual se restringiu a verificar apenas a influência da inclinação em interpolações lineares G1.

Referências Bibliográficas

ALTINTAS, Y.; NEWELL, N.; ITO, M. (1996). Modular CNC design for intelligent machining, part.1: design of a hierarchical motion control module for CNC machine tools. Transactions of the ASME - Journal of Manufacturing Science and Engineering, V.118, Nov, pp 508-521.

AMIC, P. J. (1997): "Computer Numerical Control". Editora Prentice-Hall, Inc, New Jersey. p. 2-28.

BESANT, C. B. (1985). CAD/CAM - Projeto e fabricação com o auxílio do computador. Rio de Janeiro, Campus Ltda.

BHANDARKAR, P. M; DOWNIE B.; HARDWICK, M.; NAGI, R. (2000) Migrating from IGES to STEP: one to one translation of IGES drawing to STEP drafting data. Computers in Industry, v.41 p.261-277.

CRANDELL, T. M. (2003). CNC machining and programming: An introduction. New York: Industrial Press.

ČUBOŇOVÁ, N.; MICHALCO, M. (2007). Optimization possibilities in CAD/CAM systems. 7th International Multidisciplinary Conference, Romania, p. 147-152.

DELCAM (2004). PS-Optifeed. Brochure. <http://www.delcam.com> (10 nov)

DP TECHNOLOGY (2006). Esprit, the most powerful CAM software ever. Brochure. <http://www.dptechnology.com> (10 nov)

ELBESTAWI, M. A.; DUMITRESCU, M.; NG, E. (2006); Tool condition Monitoring in Machining. Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing. Berlin: Springer. Cap. 3, p. 55-80

FERRAZ JR., F. (2006). Monitoramento e supervisão avançados de processos de usinagem em máquinas com controle de arquitetura aberta. São Carlos, 2002, 132p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

FERRAZ JR., F.; OLIVEIRA J. F. G.; COELHO R. T.; SILVA E. J. (2006). Architecture for machining process and production monitoring based in open computer numerical control. *Journal of Engineering Manufacture*, v. 222, p. 1605-1611

FORMTEC (2005). Cutting milling costs and machining times in die and mould production (NCSpeed). Brochure. <http://www.formtec.de> (10 nov)

IEEE (1998). Standards products catalog. IEEE/NEMI PR 1533-1998, IEEE/NEMI Low-Cost Open Architecture Controller Specification.

INASAKI, I; TÖNSHOFF, H.K. (2001). Roles of sensors in manufacturing and application ranges In: TÖNSHOFF, H.K.; INASAKI, I. *Sensors in Manufacturing Vol.1*. Wiley-VCH. Cap.1 p.1-6.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S.R. (2001) *Manufacturing Engineering and Technology*. 4o edição; Prentice Hall.

KOCHAN, D. (1986). *CAM - Developments in Computer-Integrated Manufacturing*. Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg. Capítulos 5, 6, 7 e 8.

KOREN, Y.; PASEK, Z.J.; ULISOY, A.G.; BENCHETRIT, U. (1996). Real time open control architectures and system performance. *Annals of the CIRP*, V.45, Jan.

LIANG, S. Y.; HECKER, R. L.; LANDERS, R. G. (2004). Machining Process Monitoring and Control: The State-of-the-Art. *ASME Transactions - Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 126 p 297-310

MAROPOULOS P.G., BAKER R.P., PARAMOR K.Y.G. (2000) Integration of tool selection with design. Part 2. Aggregate machining time estimation, *J. Mater. Process. Technol.* 107 135–142.

MONREAL M., RODRIGUEZ C.A. (2003) Influence of tool path strategy on the cycle time of high-speed milling, *Computer-Aided Design*. 35 395–401.

MORIWAKI, T. (2001). Sensors in mechanical manufacturing – requirements, demands, boundary conditions, signal processing, communication. In: TÖNSHOFF, H.K.; INASAKI, I. *Sensors in Manufacturing Vol.1*. Wiley-VCH. Cap.1 p.24-46.

NC Gesellschaft Recommendation (2000). Milling Cutters and Machining Centres. NCG 2004/Part 1. July 2000.

OLIVEIRA, J. F. G.; SILVA, E. J.; BIFFI, M. ; MATRAI, F. (2002). New Architecture control system for an intelligent high speed grinder. Abrasives Magazine, Estados Unidos, v. 2002, n. 06, p. 04-11.

OSACA (1998). Open System Architecture for Controls within automation Systems, result activities relaters. Switzerland, Set.

PLOTNIKOV, A. L.; CHIGIRINSKII, Y. L.; FROLOV, E. M.; KRYLOV E. G. (2009). Formulating CAD/CAM Modules for Calculating the Cutting Conditions in Machining. Russian Engineering Research, v. 29, n. 5, p. 512–517.

PRETE, A. D.; MAZZOTTA, D.; ANGLANI A. (2007) Control and optimization of toolpath in metal cutting applications through the usage of computer aided instruments. 8th AITeM Congress Montecatini Terme 10-12 set 2007

PRITSCHOW, G. et al. (1993). Open System Controllers - A Challenge for the Future of the Machine Tool Industry. Annals of the CIRP, v.42, n. 1. p. 499-453.

PRITSCHOW, G. et al. (2001). Open Controller Architecture - Past, Present and Future. Annals of the CIRP, v. 50, n. 2 p. 1-7.

REMBOLD, U; NNAJI, B. O.; STORR, A. (1994), Computer Integrated Manufacturing and Enginnering. New York, Addison-Wesley.

RENTON D., ELBESTAWI M.A. (2000). High speed servo control of multi-axis machine tools. International Journal of Machine Tools Manufacturing v.40 p.539–559

SCHOFIELD, S. (1996). Open Architecture Controller for Advanced Machine Tools, Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley apud ASATO, O. L. et al (2002). Analysis of open CNC architecture for machine tools. Journal Brazilian Society of Mechanical Sciencies, V. 24 n.3

SCHÜTZER, K.; SOUZA, A. F.; STANIK, M. (2000). Aplicação da Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte na Manufatura de Moldes e Matrizes. In: Anais do Congresso de Usinagem 2000. São Paulo.

SCHÜTZER, K.; HELLENO A. L. (2004) Fatores que Influenciam a Usinagem de Moldes e Matrizes com Altas Velocidades. Revista de Ciência & Tecnologia V. 12, n. 23 p. 7-14.

SIEMENS (2000). The SINUMERIK System DOC ON CD. 04/2000 Edition, eletronic manual (CD).

SO B.S., JUNG Y.H. , PARK J.W., Lee D.W. (2007) Five-axis machining time estimation algorithm based on machine characteristics, Journal of Materials Processing Technology. 37–40 187–188.

SOUZA A.F., COELHO R.T. (2007) Experimental investigation of feed rate limitations on high speed milling aimed at industrial applications. Int J Adv Manuf Technol. 32: 1104–1114

SOUZA, A. F.; COELHO, R. T.; ROGER, A. R. (2009). Mechanistic approach to predict real machining time for milling free-form geometries applying high feed rate. Int J Adv Manuf Technol. DOI 10.1007/s00170-009-2183-8

SPECK, H. J. (2005). Proposta de método para facilitar a mudança das técnicas de projetos: da prancheta à modelagem sólida (CAD) para empresas de engenharia de pequeno e médio porte. Florianópolis, 2005. 172p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

SPRING TECHNOLOGIES (2006). NCSimul, a digital workshop solution. Brochure. www.springplm.com/em (10 nov)

TÖNSHOFF, H. K. et al (2002) Process Monitoring in Grinding. Annals of the CIRP, v. 51, n.2, p. 551-671.

VALENTINO, J. V.; GOLDENBERG, J. (2003). Introduction to computer numerical control (CNC). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

XUN, X. (2008). Integrating Advanced Computer-Aided Design, Manufacturing, and Numerical Control: Principles and Implementations. New York. IGI Global.

WRIGHT, P.; SCHOFIELD, S.; WANG, F. C. (1996). Open Architecture Control for Machine Tools. Integrated Manufacturing Laboratory, University of California, Berkeley, nov. apud ASATO, O. L. et al (2002). Analysis of open CNC architecture for machine tools. Journal Brazilian Society of Mechanical Sciencies, V. 24 n.3

YAN X., SHIRASE K., HIRAO M., YASUI T. (1999) NC program evaluator for higher machining productivity, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 39 1563–1573.

YEN, J. (1998). The Biggest of the Big Three goes beyond the PC, *Manufacturing Engineering*, V.121, Jun., p. 90-92.

YUN, W.; MIN, B; PASEK, Z. (2007). Open Architecture Controller Interface Implementation for Machine Tools. *IPROMS 2007 Innovative Production Machines and Systems*.