

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA MONITORAR E
SIMULAR A MANUFATURA CNC**

ERIK GUSTAVO DEL CONTE

ORIENTADOR: PROF. DR.-ING. KLAUS SCHÜTZER

Santa Bárbara d'Oeste, SP

2013

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA MONITORAR E
SIMULAR A MANUFATURA CNC**

ERIK GUSTAVO DEL CONTE

ORIENTADOR: PROF. DR.-ING. KLAUS SCHÜTZER

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Santa Bárbara d'Oeste, SP

2013

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA MONITORAR E SIMULAR A MANUFATURA CNC

ERIK GUSTAVO DEL CONTE

Tese de Doutorado defendida e aprovada, em 22 de fevereiro de 2013, pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Schützer, Presidente
PPGEP - UNIMEP

Prof. Dr. Alvaro José Abackerli
IPT

Prof. Dr. Carlos Roberto Camello Lima
PPGEP - UNIMEP

Prof. Dr. Aparecido dos Reis Coutinho
PPGEP - UNIMEP

Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho
NUMA - EESC

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela sabedoria e força necessárias para a realização deste trabalho.

Ao Professor Dr.-Ing. Klaus Schützer, pela orientação, amizade e incentivo.

Ao Professor Dr. Alvaro José Abackerli, pelos ensinamentos, amizade e incentivo.

Ao Professor Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann pelas oportunidades de trabalho em conjunto no Instituto de Máquinas-ferramentas e Gestão da Fábrica (IWF) da Universidade Técnica de Berlim e no Instituto Fraunhofer de Sistemas de Produção e Tecnologia de Projeto (IPK).

Ao Professor Dr. Reginaldo Teixeira Coelho pelos ensaios no centro de usinagem Hermle® no LOPF - Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP).

Às companheiras e companheiros de trabalho do Laboratório de Sistemas Computacionais para Projeto e Manufatura, pelo apoio, incentivo, orientação e amizade.

À CAPES e ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos e pela iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura - BRAGECRIM.

Ao suporte técnico da empresa Siemens na área de automação e máquinas-ferramenta, pelo apoio técnico.

Desde a época de mestrado, inúmeras pessoas contribuíram para este trabalho e para a minha formação, dentre as quais gostaria de mencionar, os alunos de iniciação científica Carlos Eduardo Ribeiro Rodrigues, Marcos Paulo Ferreira Rodrigues do Prado e Oliveira Leutwiler Neto; os técnicos Danilo Paulo de Carvalho, Sergio Roberto Quijadas Aro, Adolfo Ferrarin Neto, Jens Püschel e Marco Antonio da Silveira Campos; os companheiros de trabalho Carlos Eduardo Miralles, Antonio Alvaro de Assis Moura, André Luis Helleno, Maria Célia de Oliveira Papa, Joselito Rodrigues Henriques, Roswitha Paul-Walz, Eckhard Hohwieler, Jan Mewis, Manfred Kraft, Lucas Winterfeld Benini, Marcella Venâncio do Valle, Patrícia Fernanda dos Santos, Beatriz Cristina Pantaroto, Marta Helena Teixeira Bragaglia, Cláudio Lopes da Silva, Manoj Rege e todas as pessoas que direta ou indiretamente me ajudaram nesta caminhada. A eles, meus especiais agradecimentos.

aos meus pais Elsa e José
e meus irmãos Adriana e Evandro

Sumário

Lista de Figuras	VII
Lista de Tabelas	IX
Lista de Siglas	X
Resumo.....	XI
Abstract.....	XII
1 Introdução	1
1.1 Cenário da pesquisa.....	2
1.2 Estrutura do trabalho	4
2 Revisão da Literatura	6
2.1 Tecnologia da Manufatura CNC	6
2.1.1 Planejamento da trajetória no interpolador	10
2.1.1.1 Perfil de velocidade trapezoidal	12
2.1.1.2 Perfil de velocidade com limitação no <i>jerk</i>	14
2.1.2 Manufatura de superfícies complexas	18
2.1.2.1 Métodos de interpolação da trajetória da ferramenta	18
2.1.2.2 Outros fatores que influenciam a qualidade da usinagem.....	19
2.2 Monitoramento do CNC de Arquitetura Aberta	21
2.2.1 CNC de arquitetura aberta	21
2.2.2 Casos de aplicação do monitoramento na manufatura CNC	23
2.3 Simulação do Sistema CNC	25
2.3.1 Simulação	26
2.3.2 Casos de aplicação da simulação	28
2.3.3 Validação	30
2.3.4 Controle em cascata	32
2.4 Fundamentação sobre controladores automáticos e modelagem matemática	33
2.4.1 Controladores automáticos.....	33

2.4.2	Modelagem matemática	36
3	Proposta do Trabalho	41
3.1	Objetivos	41
3.2	Método de Pesquisa.....	41
4	Desenvolvimento do Sistema Híbrido.....	45
4.1	Sistema de Monitoramento.....	45
4.1.1	Diagrama de Fluxo de Dados (DFD)	45
4.1.2	Módulo de aquisição de dados.....	47
4.1.3	Módulo de transmissão de dados.....	47
4.2	Validação e Aplicação do Sistema de Monitoramento	48
4.2.1	Validação do Sistema de Monitoramento	48
4.2.1.1	Análise da resolução da variável monitorada no CNC aberto	48
4.2.1.2	Dimensionamento do tamanho do bloco de aquisição de dados	50
4.2.1.3	Resposta à entrada degrau.....	51
4.2.2	Aplicação do Sistema de Monitoramento	52
4.2.2.1	Análise do desvio circular sob altas velocidades.....	53
4.2.2.2	Influência dos <i>set-points</i> gerados no interpolador	54
4.2.2.3	Análise do impacto de diferentes velocidades e interpolações no erro de contorno	56
4.3	Modelo do Sistema de Controle e Acionamentos.....	57
4.3.1	Modelo dos acionamentos.....	57
4.3.2	Controlador de posição digital	58
4.3.3	Modelo em cascata do sistema de controle e acionamentos.....	59
4.4	Validação do modelo	60
4.5	Sistema Híbrido.....	61
4.6	Aplicação do Sistema Híbrido na Manufatura de Superfícies Complexas.....	62
5	Análise dos Resultados	63
5.1	Validação do Sistema de Monitoramento	63

5.1.1	Análise da resolução da variável monitorada	63
5.1.2	Análise para o dimensionamento do tamanho de bloco de aquisição de dados	64
5.1.3	Resposta à entrada degrau	67
5.2	Aplicação do Sistema de Monitoramento	68
5.2.1	Análise do desvio circular sob altas velocidades	68
5.2.2	Influência dos <i>set-points</i> gerados no interpolador	71
5.2.3	Análise do erro de contorno para diferentes interpolações e velocidades	76
5.3	Validação do modelo	79
5.4	Aplicação do Sistema Híbrido na Manufatura de Superfícies Complexas.....	81
6	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	85
7	Referências	87
	Anexo 1 – Programação da ação síncrona	96
	Anexo 2 - Diagrama de blocos do módulo de transmissão de dados	98
	Anexo 3 - Programa NC com interpolação linear	99
	Anexo 4 – Programa NC com interpolação <i>spline</i>	103

Lista de Figuras

Figura 1.1: Conceito do Sistema Híbrido	4
Figura 2.1: Fluxo de informação de um comando CNC (traduzido de [2])	7
Figura 2.2: Diagrama de blocos do controle de movimentos [35]	8
Figura 2.3: Erro de defasagem influenciando na exatidão da trajetória da ferramenta [37]	9
Figura 2.4: Estratégias para controle da trajetória [24]	10
Figura 2.5: Perfil de velocidade trapezoidal (traduzido de [39])	13
Figura 2.6: Fluxograma do algoritmo para cálculo do período de interpolação (adaptado de [39])	14
Figura 2.7: Perfis cinemáticos para geração de velocidade de avanço com jerk limitado (traduzido de [39])	16
Figura 2.8: Estrutura típica de níveis do CNC de arquitetura aberta (traduzido de [19]) .	23
Figura 2.9: Arquitetura do sistema de um CNC virtual (traduzido de [15])	26
Figura 2.10: Técnica de inspeção (traduzido de [77])	31
Figura 2.11: Estrutura de controle de posição em cascata [9]	32
Figura 2.12: Diagrama de blocos de um sistema de controle industrial [82]	34
Figura 2.13: Diagrama elétrico de um motor dc [39]	37
Figura 3.1: Etapas de desenvolvimento do sistema.....	42
Figura 4.1: Diagrama de fluxo de dados do monitoramento	46
Figura 4.2: Centro de Usinagem Discovery 760 Romi®	49
Figura 4.3: Centro de usinagem LPZ 500.....	50
Figura 4.4: Placa de aquisição de dados CP5511	51
Figura 4.5: Montagem do interferômetro laser para o experimento	52
Figura 4.6: Detalhe da montagem do interferômetro	52
Figura 4.7: Máquina Hermle C800 U com o sistema ballbar.....	53
Figura 4.8: Montagem do ballbar.....	54
Figura 4.9: Modelo CAD da Superfície complexa [101]	55
Figura 4.10: Acelerômetro tri-axial Kistler® 8692C10M1	55
Figura 4.11: Montagem do acelerômetro no ponto central da ferramenta [100]......	56

Figura 4.12: Diagrama de blocos para dois elementos de primeira ordem com atraso [9].....	57
Figura 4.13: Localização dos pólos e zeros [9].....	58
Figura 4.14: Modelo em cascata para controle e simulação de um eixo linear [9]	60
Figura 4.15: Fluxograma de execução do sistema	61
Figura 5.1: Gráfico de controle da resolução para cada valor de velocidade [97]	64
Figura 5.2: Boxplot dos três tamanhos de bloco.....	67
Figura 5.3: Resposta para entrada degrau de 5.000 mm/min - dados do Laser e do CNC	68
Figura 5.4: Desvio circular: Ballbar [®] (A), CNC aberto (B)	69
Figura 5.5: Desvio circular sentido horário para velocidades de 25.000 e 15.000 mm/min	70
Figura 5.6: Espectro de frequência do eixo z com interpolação linear [100]	72
Figura 5.7: Espectro de frequência do eixo z com interpolação spline [100].....	72
Figura 5.8: Velocidade de avanço atual para as interpolações linear e spline [100]	74
Figura 5.9: Região de curvatura para os set-points monitorados.....	75
Figura 5.10: Comparação dos set-points monitorados com as coordenadas do programa NC - interpolação linear	75
Figura 5.11: Erro mediano para diferentes velocidades e interpolações.....	77
Figura 5.12: Resultado do teste de comparação múltipla para a velocidade de 2.500 mm/min	78
Figura 5.13: Resultado do teste de comparação múltipla para a velocidade de 6.000 mm/min	79
Figura 5.14: Resposta a entrada degrau no eixo Y.....	80
Figura 5.15: Regiões analisadas	81
Figura 5.16: Comparação erro de contorno interpolação linear 2.500 mm/min.....	82
Figura 5.17: Comparação erro de contorno interpolação linear 8.000 mm/min.....	83

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Parâmetros utilizados	55
Tabela 4.2: Parâmetros utilizados no experimento	57
Tabela 5.1: Tempos médios de aquisição para cada bloco	65
Tabela 5.2: Desvio Padrão calculado para cada bloco	66
Tabela 5.3: Taxa de transferência de dados	66
Tabela 5.4: Desvios circulares para o ballbar® e CNC aberto com 6.000 mm/min [98] ...	69
Tabela 5.5: Desvio circular e erro radial medidos pelo Open CNC [98]	70
Tabela 5.6: Resultados para interpolação linear e spline com 2.500 mm/min [100].....	71
Tabela 5.7: Resultado do teste de Kruskal-Wallis para a velocidade de 2.500 mm/min .	77
Tabela 5.8: Resultado do teste de Kruskal-Wallis para a velocidade de 6.000 mm/min .	78
Tabela 5.9: Parâmetros da resposta a entrada degrau no eixo Y	80
Tabela 5.10: Parâmetros do modelo após ajuste	80
Tabela 5.11: Comparação erro de contorno máximo e mediano interpolação linear 2.500 mm/min	82
Tabela 5.12: Comparação erro de contorno interpolação linear 8.000 mm/min	83

Lista de Siglas

API	<i>Application Programming Interface</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CNC	<i>Comando Numérico Computadorizado</i>
DFD	<i>Diagrama de Fluxo de Dados</i>
HSM	<i>High Speed Machining</i>
MPI	<i>Multi Point Interface</i>
NC	<i>Numerical Control</i>
NCDDE	<i>Numerical Control Dynamic Data Exchange</i>
NCK	<i>Numerical Control Kernel</i>
NURBS	<i>Non-Uniform Rational B-Spline</i>
OPI	<i>Operator Panel Interface</i>
PCI	<i>Peripheral Component Interconnect</i>
HSC	<i>High Speed Cutting</i>
PID	<i>Proporcional, Integral e Derivativo</i>
INPI	<i>Instituto Nacional da Propriedade Industrial</i>
TCP	<i>Tool Center Point</i>

Resumo

DEL CONTE, Erik Gustavo. **Desenvolvimento de um Sistema para Monitorar e Simular a Manufatura CNC**. 2013. 105p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

A importância das soluções computacionais para o suporte ao desenvolvimento de produtos e para a simulação da produção está consolidada. Porém, a aplicação desses recursos para a simulação do conjunto máquina-ferramenta CNC e processo ainda necessita de investigações para a obtenção de soluções com implementação simplificada e que repliquem a realidade. A combinação de monitoramento e simulação é apresentada como uma tendência na qual observa-se uma oportunidade de aplicar este conceito utilizando-se o CNC aberto de uma máquina-ferramenta com um modelo do sistema de controle e dos acionamentos. Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um sistema híbrido caracterizado pelo monitoramento do CNC aberto e pela simulação do sistema de controle e acionamentos de uma máquina-ferramenta. O monitoramento contínuo de variáveis do CNC aberto foi implementado e os dados de *set-point* de posição dos eixos foram monitorados e utilizados como entrada do modelo analítico do sistema de controle e acionamentos. Ensaios para a investigação do comportamento dinâmico da trajetória da ferramenta, assim como para a validação do sistema, foram aplicados na manufatura de superfícies complexas. Os resultados demonstram a capacidade do sistema em monitorar continuamente os *set-points* de posição e a respectiva influência das velocidades e interpolações no erro de contorno. A predição de valores de erro de contorno próximos da realidade foi obtida com a aplicação do sistema na manufatura de superfícies complexas.

Palavras-chave: Monitoramento, CNC, Simulação, Erro de contorno, Manufatura, Superfícies complexas.

Abstract

DEL CONTE, Erik Gustavo. **Development of a System for Monitoring and Simulation of CNC Manufacturing**. 2013. 105p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

The importance of computational solutions to support product development and the simulation of production is consolidated, however the application of these resources for the simulation of the CNC machine tool and process needs further investigations, in order to provide solutions with simplified implementation and good representation of reality. The combination of monitoring and simulation is presented as a trend and there is an opportunity of applying this concept using the open CNC machine tool and a model of the control system and drives. This study aims to develop a hybrid system, characterized by the integration of open CNC monitoring and the simulation of a machine tool control system and drives. Continuous monitoring of open CNC variables was implemented and position set-point data of the axes were monitored and used as input to the analytical model of the control system and drives. Experiments to investigate the dynamic behavior of the tool path, as well as for system validation, were applied in the manufacturing of complex surfaces. The results shows the system's ability to continuously monitor position set-points and the influence of feedrate and tool path interpolation in the contour error. The prediction of contour error values near of reality was achieved with the application of the system in the manufacturing of complex surfaces.

Keywords: Monitoring, CNC, Simulation, Contour error, Manufacturing, Sculptured surfaces.

1 Introdução

O aumento da competitividade da produção industrial no nível global, principalmente no setor metal mecânico, determina que o processo de manufatura somente será viabilizado se a planta de fabricação atender os requisitos de custos, qualidade, tempo e de aspectos ambientais [1].

A otimização do processo produtivo de peças metálicas em termos dos seus requisitos está estritamente relacionada ao desempenho da máquina-ferramenta CNC e do processo de usinagem.

Dentre os recursos para otimização da cadeia de manufatura, destacam-se os sistemas de monitoramento, as tecnologias de simulação virtual ou mesmo a combinação de ambas com a proposta de diagnosticar e otimizar o processo de produção com a utilização minimizada de recursos físicos [2].

A utilização das soluções computacionais para suporte ao desenvolvimento de produtos e para a simulação da produção está consolidada. Porém, a aplicação desses recursos para a simulação do conjunto máquina-ferramenta e processo ainda necessita de investigações para a obtenção de soluções com implementação simplificada e que repliquem, com exatidão aceitável, a realidade.

Os métodos de interpolação definidos no sistema CAM (*Computer Aided Manufacturing*) têm impacto direto na dinâmica da trajetória da ferramenta, pois a força que é gerada nos motores é função do tipo de interpolação. A força aplicada pelos motores, sua respectiva aceleração e variação da aceleração (*jerk*) são fontes significativas de excitação da estrutura da máquina-ferramenta [3].

O resultado da excitação da estrutura da máquina ao longo da trajetória influencia no sistema de controle e, conseqüentemente, na exatidão do movimento, sendo uma das principais causas do erro de contorno [4].

Tal situação é crítica, principalmente na usinagem de superfícies complexas, pois um elevado grau de curvatura da trajetória associado à aceleração e desaceleração dos eixos aumenta a dificuldade para que o controle de movimentos elimine o erro de contorno.

Portanto, a exatidão da trajetória da ferramenta é adicionalmente influenciada pelas interpolações e respectivos tempos de ciclo do sistema de controle, assim como pelas limitações de aceleração e *jerk* [3].

A medição de tais influências pode ser feita diretamente na peça, como por instrumentação na máquina-ferramenta. Em ambos os casos, é um processo que necessita experiência, pois diversos fenômenos ocorrem simultaneamente, tornando difícil sua separação e análise [3].

Trabalhos recentes têm a abordagem de incorporar modelos matemáticos em combinação com o *hardware* da máquina para criar sistemas baseados em simulação, chamados "*Hardware in the Loop*" (sistemas que integram o *hardware* com o modelo de simulação). Tais trabalhos apontam que pesquisas futuras devem combinar várias abordagens do problema para promover resultados melhores, considerando a interação da máquina e processo num ambiente de simulação de tempo real [5–7].

O potencial de aplicação industrial do conceito de simulação híbrida de processo (uma extensão da abordagem *Hardware in the Loop*) foi apresentada no trabalho de Harrison *et al.* [8]. No trabalho, o modelo virtual de um robô e sua conexão com o sistema de manufatura real foi validado. Tal abordagem proporciona uma rápida avaliação da reconfiguração do sistema de manufatura, porém a exatidão de posicionamento do robô em relação ao controle de movimentos não são realizados, pois a estratégia de simulação utilizada não contempla a modelagem contínua do movimento.

Os processos de fabricação desempenhados por máquinas-ferramenta têm como pré-requisito elevada exatidão de trabalho. Os comandos numéricos controlam os movimentos dos acionamentos e monitoram o andamento da fabricação. Em cada eixo de movimentação ocorrem distúrbios causados pelo processo ou mesmo pela construção e montagem da máquina. Em virtude disso, desvios de posição e de velocidade ocorrem na realidade [9].

A utilização de modelos matemáticos simplificados é necessária, principalmente quando conexões com o *hardware* exigem requisitos de tempo real, pois modelos matemáticos complexos geralmente utilizam um tempo maior para o cálculo, atrasando a atuação no processo [10,11].

Assim, identifica-se a necessidade de obter soluções computacionais de otimização do processo de usinagem com simplificada implementação e que proporcionem resultados próximos da realidade, viabilizando investigações reais e virtuais para a otimização do processo.

1.1 Cenário da pesquisa

Esta pesquisa está fundamentada no seguinte cenário:

- Os trabalhos atuais sobre simulação do CNC envolvem modelos de geração de trajetórias assim como de controladores e acionamentos considerados complexos, tanto no desenvolvimento, como na implementação. Uma característica da abordagem de pesquisa encontrada nesses trabalhos é a implementação de algoritmos e modelos matemáticos de toda a cadeia de simulação do CNC [5,12–15];
- Nos trabalhos sobre CNC virtual, observa-se uma ausência de investigação experimental sobre o comportamento dinâmico da trajetória da ferramenta [15–17];
- Nos trabalhos sobre CNC aberto, observa-se que não foi estabelecido um padrão de comunicação para o controlador de arquitetura aberta que seja amplamente aceito e utilizado no ambiente industrial [18–22];
- A combinação de monitoramento e simulação é apresentada como uma tendência em trabalhos com a abordagem *hardware in the loop* para a construção de protótipos, assim, observa-se uma oportunidade para a aplicação deste conceito utilizando-se o monitoramento de dados do CNC aberto de uma máquina-ferramenta e um modelo do sistema de controle e acionamentos para realização de um sistema híbrido aplicado na manufatura de superfícies complexas [6, 8, 10, 23–25].

Com base no cenário apresentado, o objetivo geral desse trabalho é o desenvolvimento de um sistema híbrido de monitoramento e simulação da manufatura CNC aplicado no processo de usinagem de superfícies complexas. Este objetivo está detalhado no Capítulo 3.

Assim, entende-se que a integração de monitoramento do CNC aberto com um modelo do sistema de controle e acionamentos pode contribuir com um sistema de simulação híbrido de implementação simplificada. As investigações experimentais de aplicação do sistema de monitoramento são necessárias para compreender determinados fenômenos que ocorrem no sistema CNC de uma máquina-ferramenta, principalmente devido aos métodos de interpolação da trajetória da ferramenta na manufatura de superfícies complexas.

A Figura 1.1 ilustra o conceito do sistema híbrido desenvolvido nesse trabalho.

Conforme apresentado na Figura 1.1, o conceito do sistema híbrido envolve o monitoramento de dados do CNC aberto e a utilização dos dados no modelo do sistema de controle e acionamentos para a simulação do erro de contorno. No próximo tópico é apresentado a estrutura do trabalho.

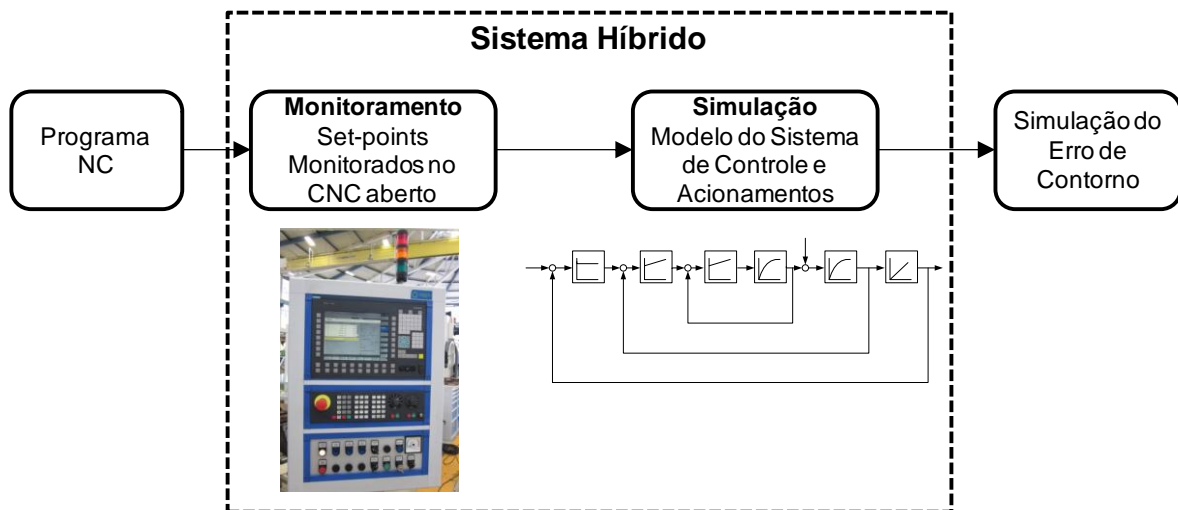


Figura 1.1: Conceito do Sistema Híbrido

1.2 Estrutura do trabalho

A estrutura deste trabalho é composta de sete capítulos, que são apresentados a seguir, com uma breve abordagem do respectivo conteúdo.

Capítulo 1 – Introdução – Apresenta uma contextualização sobre o tema da pesquisa e indica as necessidades que são desenvolvidas nesta pesquisa.

Capítulo 2 – Revisão da Literatura – Revisão bibliográfica sobre a tecnologia da manufatura CNC, monitoramento do controlador de arquitetura aberta e simulação do sistema CNC.

Capítulo 3 - Proposta do Trabalho – Apresentação dos objetivos e do método de pesquisa que determinam como o problema de pesquisa foi abordado, considerando as etapas de desenvolvimento, validação e aplicação do sistema híbrido.

Capítulo 4 – Desenvolvimento do Sistema – Apresentação do desenvolvimento do sistema de monitoramento com sua respectiva validação e aplicação. Implementação do modelo do sistema de controle e acionamentos e validação do modelo. Caracterização do sistema híbrido com a integração do monitoramento e simulação e aplicação do mesmo na manufatura de superfícies complexas.

Capítulo 5 – Análise dos resultados – Nesse capítulo, é apresentada a análise dos resultados sobre a validação e aplicação do sistema de monitoramento, além disso é discutida a validação do modelo do sistema de controle e acionamentos com os resultados da aplicação do sistema híbrido na manufatura de superfícies complexas.

Capítulo 6 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros – Nesse capítulo, são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 7 – Referências – Lista das referências utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

2 Revisão da Literatura

Neste capítulo, é apresentado o estado da arte sobre a tecnologia da manufatura CNC, incluindo o planejamento de trajetórias da ferramenta a serem executadas pelos eixos da máquina-ferramenta controlada numericamente. A revisão da literatura contempla também a manufatura de superfícies complexas, o cenário de aplicação do sistema híbrido, o monitoramento do CNC aberto com casos de aplicação do mesmo na manufatura CNC, assim como, revisão bibliográfica sobre os trabalhos que abordam a simulação do CNC. A fundamentação teórica sobre controladores automáticos e modelagem matemática, utilizados no modelo do sistema de controle e acionamentos, são apresentados no final do capítulo.

2.1 Tecnologia da Manufatura CNC

Dentre as propriedades de uma máquina controlada numericamente, pode-se citar como uma das mais importantes a exatidão da movimentação dos eixos. Tal exatidão é determinada pela velocidade de avanço dos eixos e pelo momento torsor ou força, gerados nos acionamentos [9].

O movimento que é gerado e controlado na manufatura CNC é obtido por meio do sistema mecatrônico que constitui a máquina-ferramenta. Esse sistema é formado pela união dos componentes mecânicos (estrutura da máquina, guias lineares, acoplamentos, etc.), eletroeletrônicos (motores, condicionadores de sinal, etc.) e de *software* (comando numérico, sistema de controle) [26].

A exatidão do movimento é um dos principais fatores para assegurar a qualidade da peça fabricada nas máquinas CNC. Os acionamentos, que são responsáveis pela aceleração e movimentação dos eixos, e o sistema de controle desempenham uma importante função em relação ao desvio da trajetória em altas velocidades de avanço. As incertezas contidas na medição de corrente, atrito, cargas e forças de corte têm também um impacto significativo na exatidão do movimento [27].

Como apresentado, a exatidão do movimento é influenciada por vários fatores que constituem o sistema mecatrônico da máquina. Esse trabalho não tem a proposta de modelar todos esses fatores, mas deve contemplar, por exemplo, uma das principais causas do erro de contorno, conhecido como erro de atraso ou *servo lag*.

A origem do erro de contorno, considerando o sistema mecânico funcionando corretamente e sem folga, acontece quando os controladores dos eixos "atrasam"

em relação aos comandos de referência de posicionamento. Assim, o erro de contorno depende da geometria e do erro de atraso individuais dos acionamentos [28–32]. O desvio ortogonal da trajetória real em relação aos comandos de posicionamento para a trajetória de referência dos eixos caracteriza o erro de contorno [33].

Na manufatura de superfícies complexas, devido ao aumento da velocidade de deslocamento nos eixos e possível variação na aceleração dos mesmos, tem-se a tendência de aumentar o erro de contorno da geometria usinada [34].

Devido as elevadas velocidades envolvidas nos deslocamentos dos eixos, o sistema CNC deve possuir elevada capacidade de processamento para geração de comandos de posição, cuja trajetória será executada pelos acionamentos e regulada pelos controladores dos eixos [2]. O fluxo de informação de um comando numérico computadorizado é apresentado na Figura 2.1.

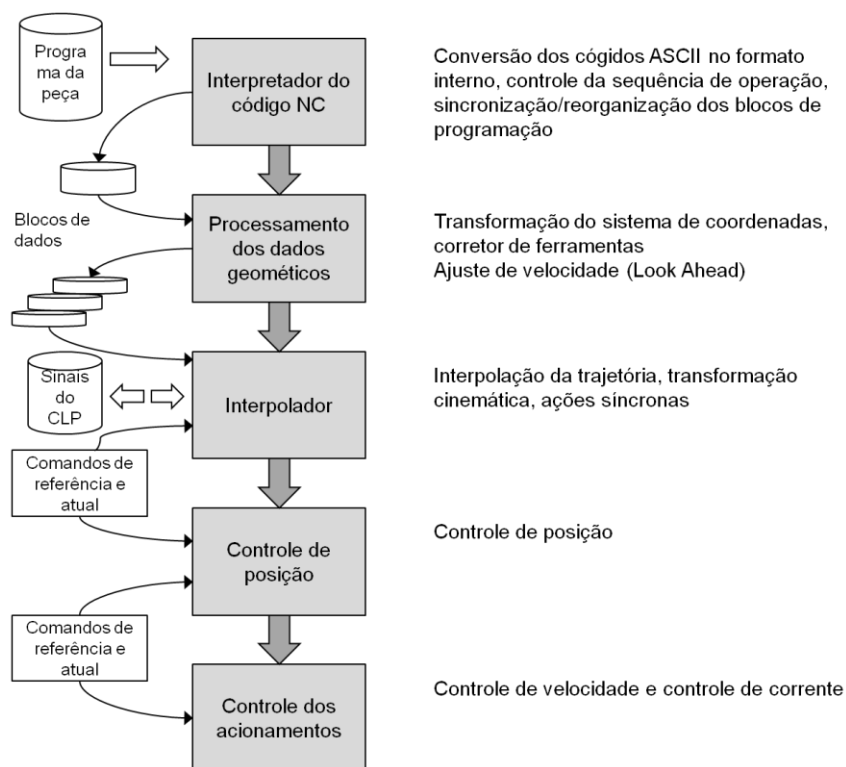


Figura 2.1: Fluxo de informação de um comando CNC (traduzido de [2])

Conforme pode ser observado na Figura 2.1, o fluxo de informação é iniciado com a preparação dos blocos com os códigos NC. Após a interpretação dos comandos, é feita a transformação das coordenadas do programa para as coordenadas da máquina. Essa transformação geométrica também considera a correção do raio e da altura da ferramenta. A próxima etapa envolve a interpolação da trajetória, onde são calculados os *set-points* para os eixos. Esses dados consideram os limites dinâmicos de velocidade, aceleração e *jerk* (derivada

da aceleração) da máquina. Os dados de *set-point* são então enviados para acionar os motores, e os controles de posição, velocidade e corrente, que tem a função de eliminar os erros entre os dados comandados e os dados atuais [2].

Todas as etapas apresentadas são desempenhadas pelo sistema CNC da máquina-ferramenta, exceto os controles de posição, velocidade e corrente. Assim, pode-se dizer que ao aplicar o monitoramento de dados do CNC, todas as operações que o CNC real realiza já estão "incluídas" nos dados de *set-point* de posição monitorados, resultando na possibilidade do monitoramento desses dados para a implementação do sistema simplificado.

Na Figura 2.2 é, apresentado um diagrama de blocos típico do controle de movimentos da manufatura CNC.

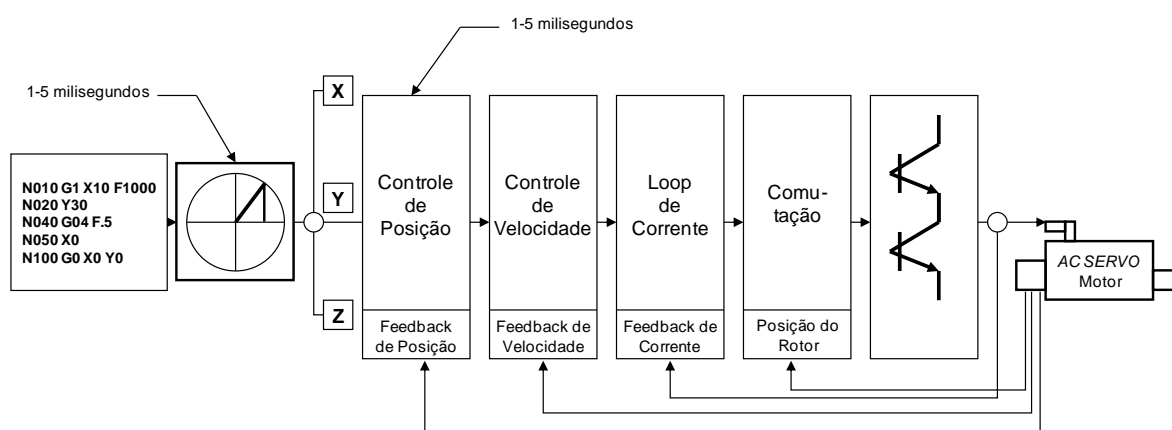


Figura 2.2: Diagrama de blocos do controle de movimentos [35]

Conforme apresentado na Figura 2.2, a distância descrita nos blocos do programa NC é dividida em pequenos segmentos numa taxa cíclica. Esta taxa caracteriza o tempo do ciclo do interpolador, sendo tipicamente de 1 a 5 ms. No controle de posição, o valor real é comparado com o valor de *set-point* e determinado o erro. Este erro é aplicado como comando de velocidade nos motores e o valor é comparado com a velocidade atual, resultando no erro de velocidade, que é utilizado para geração do comando de torque. O torque é proporcional à corrente aplicada nos motores [35].

O controle do servo tem uma característica inerente aos sistemas de controle retroalimentados, conhecida como erro de atraso (*servo lag*). O *loop* do servo trabalha com a diferença entre a posição comandada informada pelo programa NC e a posição atual da máquina, que é informada pela retroalimentação dos sinais do sistema de medição. O erro de atraso ou defasagem é a diferença entre a posição desejada e a posição real, gerando erros de posicionamento na

usinagem de contornos [36]. A Figura 2.3 ilustra a influência do erro de defasagem na exatidão da trajetória da ferramenta.

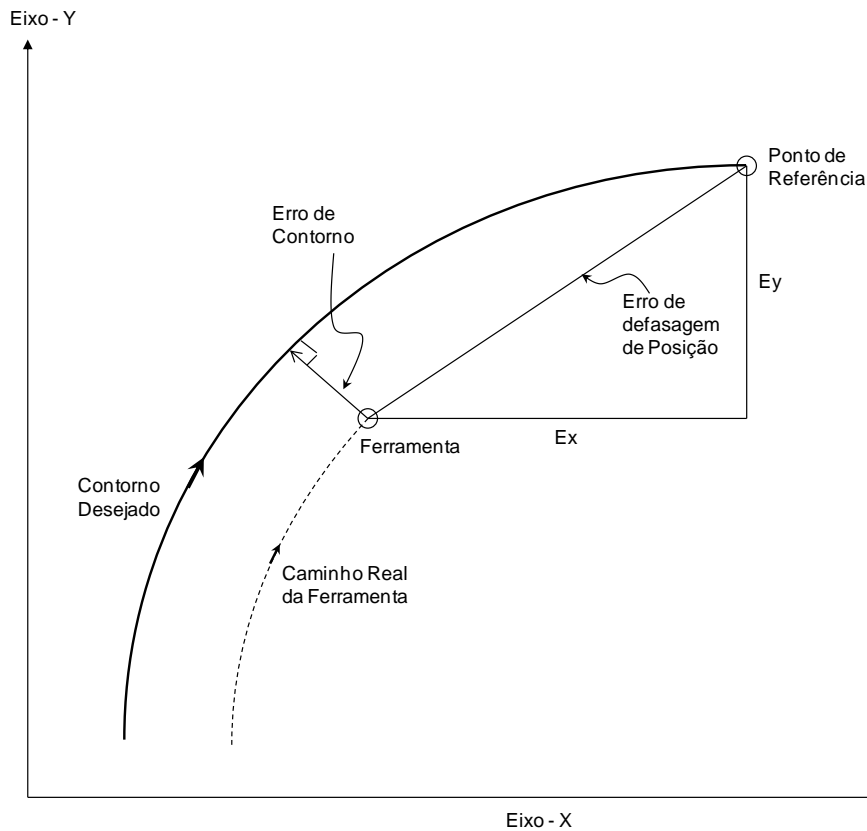


Figura 2.3: Erro de defasagem influenciando na exatidão da trajetória da ferramenta [37]

O erro de defasagem causa a diferença de posicionamento entre as coordenadas programadas e reais. Esse erro pode ser aproximadamente estimado pela seguinte Equação [38]:

$$\delta_e = \frac{v_f}{K_v} \quad (2.1)$$

onde:

δ_e = erro de atraso [mm]

v_f = velocidade de avanço programada [m/min]

K_v = ganho do controlador de posição [m/(min × mm)]

O erro de contorno pode ser considerado um dos principais fatores para a avaliação do desempenho no controle de movimentos na manufatura CNC. Para a obtenção de contornos com elevada exatidão, os valores de ganho dos controladores devem ser corretamente ajustados, proporcionando ao sistema o

comportamento de criticamente amortecido. Com este comportamento, o erro de contorno tende a ser minimizado, pois não ocorre o sobressinal nas variáveis controladas [33].

2.1.1 Planejamento da trajetória no interpolador

As coordenadas contidas nos blocos do programa NC são processadas no interpolador (Figura 2.2). O interpolador gera os *set-points* no ciclo de interpolação de acordo com a configuração cinemática da máquina. [24].

O planejamento da trajetória deve considerar os limites físicos da máquina-ferramenta. Isso significa gerar dados de referência cujos valores respeitem os limites máximos de velocidade, aceleração e do *jerk* proporcionados pelo conjunto de acionamentos elétricos e estrutura mecânica da máquina [24].

Assim, o comportamento do sistema mecatrônico, e respectivamente o erro de contorno, é influenciado pelos *set-points* de posicionamento dos eixos da máquina.

Os modernos CNC utilizam as tecnologias apresentadas na Figura 2.4 para a geração de comandos "suavizados", considerando os limites de aceleração e *jerk* do conjunto mecatrônico [24].

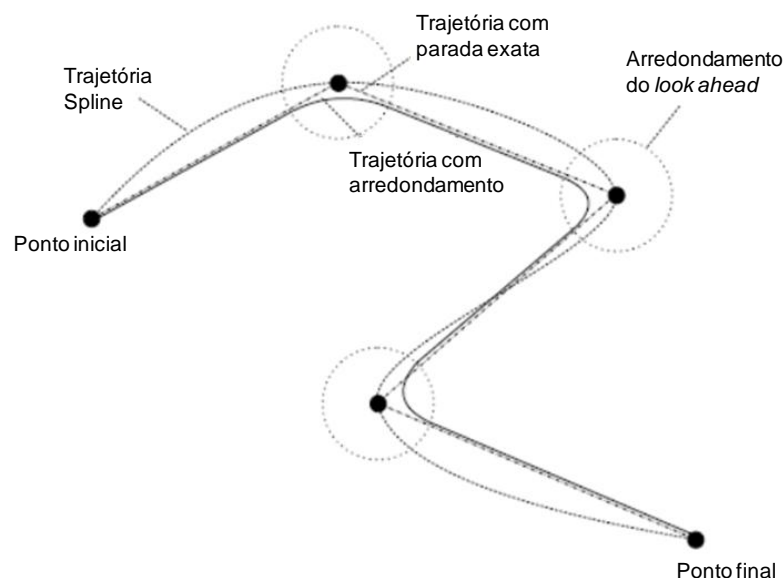


Figura 2.4: Estratégias para controle da trajetória [24]

Conforme apresentado na Figura 2.4, as estratégias para controle da trajetória desempenham as seguintes funções [24]:

- Trajetória com parada exata

O movimento é paralisado após a execução de cada segmento da trajetória. Essa paralisação, pode ou não conter um tempo de espera e o próximo segmento é executado respeitando-se os limites de aceleração. Essa estratégia pode deixar marcas na peça.

- Trajetória com arredondamento

A mudança de segmentos é executada considerando-se uma tolerância de arredondamento que permite o arredondamento da trajetória no ponto de intersecção dos segmentos. Essa estratégia pode proporcionar valores constantes de velocidade e aceleração, porém, dependendo do valor da tolerância, pode ocorrer desvios na trajetória.

- Trajetória *Spline*

Os comandos de referência são interpolados por curvas *Splines*. Isso resulta em uma curvatura suave na trajetória de referência, que pode ser ajustada de acordo com o desempenho dinâmico da máquina.

- Ajuste da velocidade (*look ahead*)

Com este comando, o planejamento da trajetória considera antecipadamente a aceleração necessária para execução do movimento e atualiza a velocidade de avanço de acordo com as características dinâmicas da máquina.

A tecnologia empregada na geração dos comandos para os acionamentos determina o comportamento da aceleração, e respectivamente, do *jerk*, que poderão influenciar no desempenho dinâmico da trajetória da ferramenta.

Os limites de aceleração, da desaceleração e do *jerk* são previamente especificados e configurados no comando da máquina. O segmento do caminho da ferramenta é quebrado em pequenos segmentos no intervalo do ciclo do interpolador. O tamanho do incremento de interpolação é calculado pela Equação 2.2 [39]:

$$\Delta u = f \cdot T_{min} \quad (2.2)$$

onde:

Δu = tamanho do incremento de interpolação [mm]

f = velocidade de avanço [mm/s]

T_{min} = tempo mínimo do ciclo de interpolação [s]

Para aplicações em que a velocidade de avanço é alterada durante o processo, como no caso do controle adaptativo, o tamanho do incremento pode ser mantido constante, conforme mostra a Equação 2.3 [39] :

$$T_i = \frac{\Delta u}{f} \quad (2.3)$$

onde:

$$T_i = \text{tempo de interpolação [s]}$$

Para obtenção da quantidade de iterações necessárias para descrever uma trajetória de tamanho L, o interpolador é executado N vezes no intervalo de tempo do ciclo de interpolação. A quantidade de iterações N pode ser obtida pela Equação 2.4 [39]:

$$N = \frac{L}{\Delta u} \quad (2.4)$$

onde:

$N = \text{quantidade de iterações}$

$L = \text{comprimento total da trajetória [mm]}$

O valor de N é arredondado para o próximo número inteiro resultante da Equação 2.4 para melhorar a eficiência computacional, sendo a velocidade de avanço reduzida de acordo com o arredondamento. O número total de iterações N é dividido em números de estágios, que dependem do perfil de velocidade utilizado, que pode ser o perfil trapezoidal ou com *jerk* limitado, conforme apresentado nos tópicos 2.1.1.1 e 2.1.1.2 [39].

Nos próximos sub-tópicos, são apresentados os princípios de implementação dos perfis de velocidade trapezoidal e com *jerk* limitado.

2.1.1.1 Perfil de velocidade trapezoidal

Nesse perfil, a quantidade de iterações de interpolação é dividida em três regiões: aceleração (N1), velocidade constante (N2) e desaceleração (N3), conforme apresenta a Figura 2.5 [39].

Considerada simples para implementação computacional, o perfil de velocidade trapezoidal gera taxas de aceleração e desaceleração constantes, causando variações no *jerk* no início do movimento, e nos momentos t_1 , t_2 e t_t apresentados na Figura 2.5. A frequência na qual são aplicados os comandos de aceleração e desaceleração é calculada a partir da velocidade de avanço programada, da

capacidade de aceleração e desaceleração dos eixos e do tamanho do incremento [39].

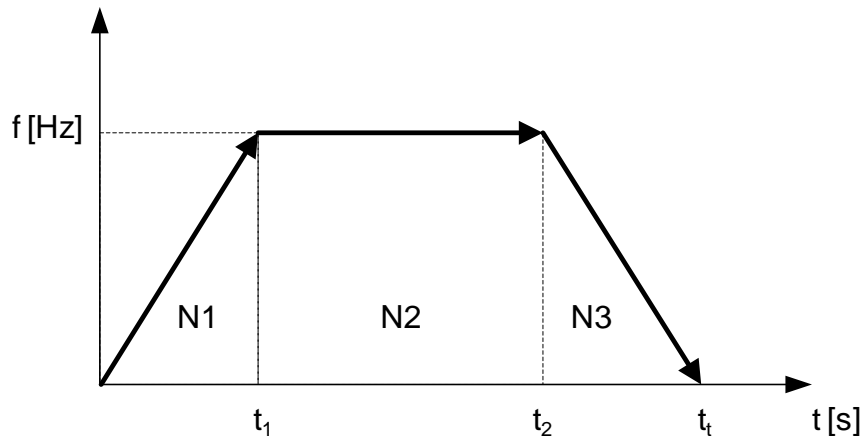


Figura 2.5: Perfil de velocidade trapezoidal (traduzido de [39])

O perfil de velocidade trapezoidal é um dos mais utilizados no ambiente industrial devido a sua simplicidade e facilidade de implementação [12]. A implementação do algoritmo de geração do perfil de velocidade trapezoidal é realizada com o método de interpolação linear.

O algoritmo que executa o cálculo para o tempo de interpolação, considerando as regiões de aceleração, velocidade constante e desaceleração, é apresentado no fluxograma da Figura 2.6 [39].

Com a implementação do algoritmo da Figura 2.6, podem ser gerados os comandos de velocidade e posição para os eixos. A principal desvantagem do perfil de velocidade trapezoidal é a alta probabilidade de excitação dos modos de vibração da estrutura da máquina devido à elevada variação que é gerada no sinal de aceleração e, respectivamente, no *jerk* [12].

Investigações sobre o erro de contorno devem também verificar o comportamento dos *set-points* de posição dos eixos, pois estes influenciam no comportamento dinâmico da máquina e respectivamente têm impacto no erro de contorno da trajetória. Esta abordagem é utilizada nesse trabalho na aplicação do sistema de monitoramento de dados do CNC aberto.

Assim, a utilização de perfis de geração de velocidade com *jerk* limitado é recomendada para aplicações de elevada solicitação dinâmica, principalmente no deslocamento em trajetórias complexas, conforme é apresentado no próximo tópico.

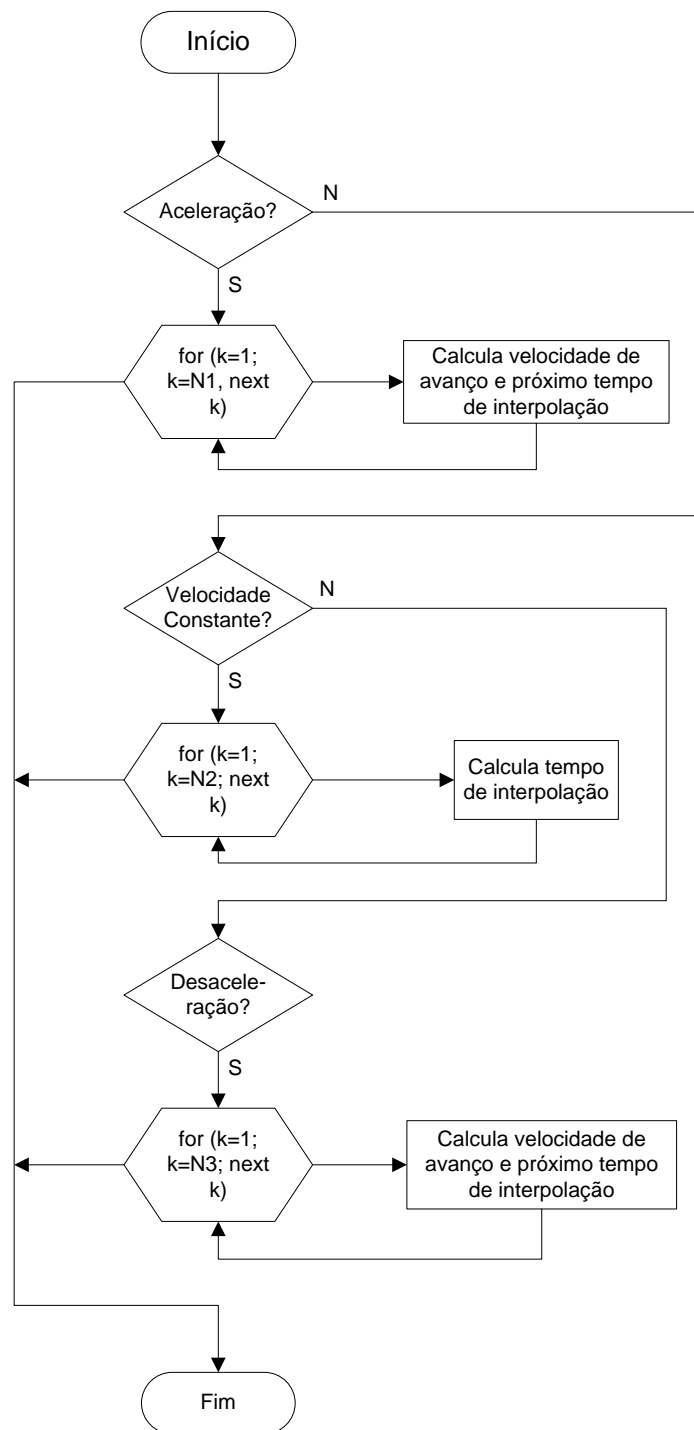


Figura 2.6: Fluxograma do algoritmo para cálculo do período de interpolação
(adaptado de [39])

2.1.1.2 Perfil de velocidade com limitação no *jerk*

Como apresentado, a tecnologia empregada na geração dos comandos para os eixos determina, de maneira significativa, o comportamento da aceleração e respectivamente do *jerk*.

O perfil de velocidade com limitação no *jerk* tem a proposta de minimizar as oscilações no sinal de aceleração na manufatura com altas velocidades. Tais variações são inerentes ao emprego do perfil de velocidade trapezoidal, que é característico da interpolação linear, conforme apresentado no item anterior [40].

Beudaert *et al.* [41] desenvolveram um algoritmo para geração de *set-points* que considera os limites de velocidade, aceleração e *jerk* ao longo da trajetória e para cada eixo. Segundo os autores, a geometria previamente definida é utilizada para o tratamento dos *set-points* utilizando-se restrições de intersecção para adicionar as limitações dos eixos, principalmente do *jerk*. No trabalho, os resultados da velocidade de avanço e *jerk* são comparados com a resposta de uma máquina com CNC comercial e ambas ficaram próximas, contudo uma variação no tempo previsto de usinagem é identificada nos resultados [41].

A conversão de códigos lineares e circulares em curvas NURBS (*Non-Uniform Rational B-Spline*, modelo matemático para representação de curvas e superfícies) foi realizado no trabalho de Lin *et al.* [42]. O método desenvolvido no trabalho é composto de duas etapas; a segmentação das coordenadas do programa NC (*Numerical Control*) e a aplicação do ajuste de curvas considerando-se condições de contorno de desvio e suavização da trajetória.

Heng e Erkorkmaz [43] afirmam existir dois desafios relacionados ao sucesso de geração de trajetórias com um interpolador NURBS. Um deles é a minimização da variação na velocidade de avanço; o outro, é a capacidade de modificar a velocidade de avanço para reduzir o valor do avanço para trajetórias de elevada curvatura. Segundo os autores, o ajuste de curvas polinomiais e a modificação do avanço durante a usinagem, auxiliam na suavização da aceleração e do *jerk*.

Conforme apresentado, a modificação da velocidade de avanço durante a usinagem tem a proposta de reduzir o avanço antes de executar uma trajetória com elevado grau de curvatura, por exemplo. Essa estratégia pode aumentar o tempo de usinagem.

No entanto, mesmo com o uso da interpolação *spline*, variações no *jerk* podem ocorrer, principalmente devido ao efeito das elevadas curvaturas geométricas presentes em superfícies complexas [44].

Para viabilizar o emprego de condições de contorno que limitam a variação do *jerk*, o artifício matemático da interpolação *spline* é utilizado. Dessa forma, antes de iniciar o movimento do respectivo bloco de programação NC, as posições iniciais e finais, os limites de velocidade de avanço, da máxima aceleração e desaceleração, assim como *jerk*, são definidos para cada valor comandado [44].

Os perfis cinemáticos no tempo para a geração de velocidade de avanço com limitação no *jerk* são apresentados na Figura 2.7.

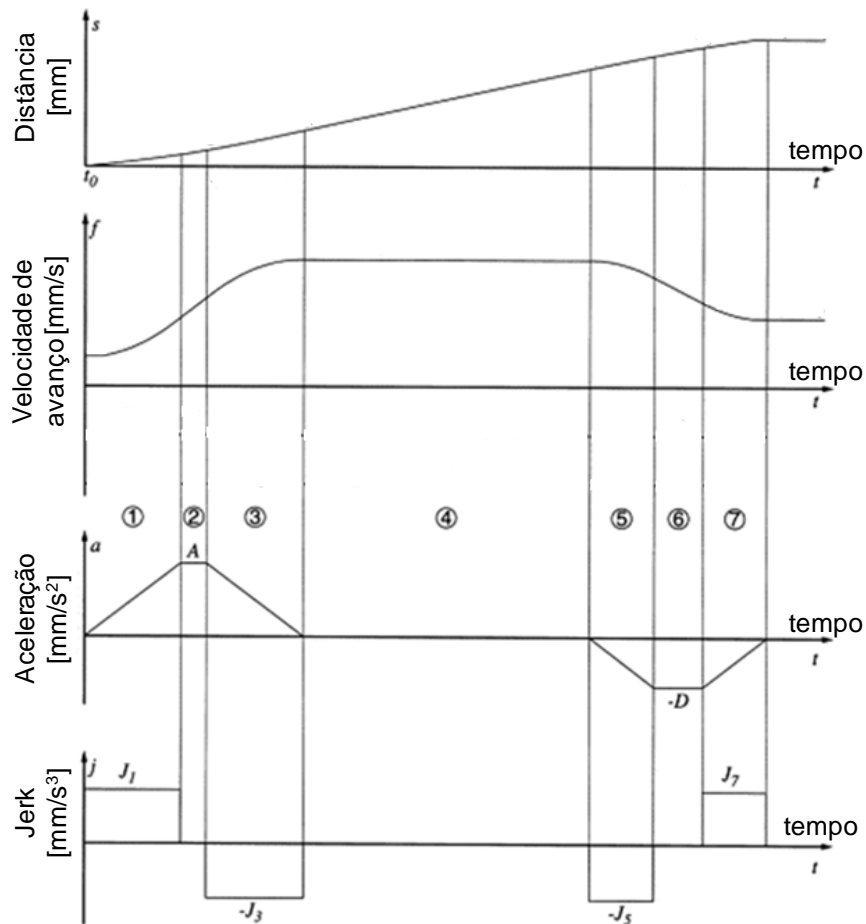


Figura 2.7: Perfis cinemáticos para geração de velocidade de avanço com *jerk* limitado (traduzido de [39])

Para a ilustração apresentada na Figura 2.7, os limites máximos de aceleração e desaceleração são calculados pelos limites de torque e força máximos dos motores. O limite do *jerk* é configurado pelo valor máximo de aceleração dividido pelo tempo de aceleração. O tempo de aceleração é uma constante de tempo que depende dos períodos de pico de torque/força fornecidos pelo amplificador do sinal. Assim a aceleração pode ser obtida pela integração do *jerk* , a velocidade pela integração da aceleração e a distância pela integração da velocidade.

No trabalho de Altintas [39], a formulação matemática e a implementação da interpolação *spline* é detalhada. No mesmo trabalho, um resumo para a implementação do perfil de velocidade com limitação no *jerk* utilizando-se a interpolação *spline* é apresentado:

- Passo 1: cálculo das derivadas nos nós da *spline* ;

- Passo 2: cálculo do comprimento do arco;
- Passo 3: cálculo dos coeficientes da *spline*;
- Passo 4: geração de comandos de movimento incrementais a partir da *spline* parametrizada com a variação do incremento, que é calculado pela divisão do comprimento do arco pelo número de iterações de interpolação;
- Passo 5: ajuste do número de iterações de interpolação e do intervalo de tempo de interpolação;

Os coeficientes da *spline*, as coordenadas dos nós e o comprimento do arco são utilizados para geração das coordenadas individuais dos eixos em tempo real, considerando os limites de velocidade, aceleração e *jerk* da máquina-ferramenta [39].

A implementação do algoritmo da interpolação *spline* é considerado complexo [39], e os fabricantes de CNC não disponibilizam documentação sobre o algoritmo utilizado nos CNCs comerciais.

Os benefícios da geração de trajetórias com *jerk* limitado também são verificados no aumento da vida útil da ferramenta de corte em até 60% num processo de torneamento de uma trajetória *trochoidal* (curva gerada por um ponto fixo de um círculo, quando o círculo faz o rolamento ao longo de uma linha reta). No estudo, uma comparação entre interpolação linear e *spline* foi realizada, onde o sinal de uma acelerômetro, montado próximo a ferramenta foi derivado para obtenção do *jerk* e a medição do desgaste da ferramenta foi realizada [45].

Um interpolador NURBS com *look ahead* foi desenvolvido e implementado, onde a velocidade de avanço é mantida na maior parte da trajetória e reduzida ao aumentar o grau de curvatura do caminho da ferramenta com a finalidade de garantir a exatidão geométrica. A capacidade dinâmica da máquina é respeitada durante a geração da trajetória considerando os limites de aceleração/desaceleração e *jerk* dos eixos e uma suavização no perfil de velocidade de avanço é obtido. Isso resulta em uma suavização da velocidade de avanço, garantindo um processo de corte suave e contribuindo para o aumento da qualidade superficial [46].

Ambos os perfis de velocidade, trapezoidal e com limitação no *jerk*, são empregados na manufatura de superfícies complexas por meio das interpolações linear e *spline*, e influenciam a qualidade da peça usinada, conforme abordado no próximo tópico.

2.1.2 Manufatura de superfícies complexas

A manufatura de superfícies complexas realizada em centros de usinagem pelo processo de fresamento é caracterizada pelas geometrias complexas que constituem a peça a ser usinada. Essas geometrias são curvas que mandatoriamente devem ser projetadas num sistema CAD, posteriormente utilizadas para a programação da fabricação no sistema CAM e, finalmente, serem usinadas na máquina-ferramenta pela tecnologia da manufatura CNC.

Os principais fatores que influenciam na qualidade da usinagem na cadeia CAD/CAM/CNC são apresentados nos próximos tópicos.

2.1.2.1 Métodos de interpolação da trajetória da ferramenta

Como já comentado, os perfis de velocidade são implementados por meio dos métodos de interpolação da trajetória da ferramenta.

Para a investigação dos métodos de interpolação na manufatura de superfícies complexas, Helleno *et. al* [47] realizaram uma comparação entre as interpolações linear e *spline* com diferentes velocidades de avanço e tolerâncias CAM. Os resultados demonstram que a interpolação linear promove uma maior exatidão geométrica devido à limitação na velocidade de avanço, porém a interpolação *spline* permite uma maior redução do tempo de usinagem [47].

Assim, deve-se avaliar, de forma prévia, qual é o erro de contorno máximo permitido para a peça a ser fabricada. Isso torna necessário o desenvolvimento de modelos de simulação capazes de prever o erro de contorno de forma antecipada, preferencialmente na fase do planejamento do processo de fabricação.

O método de interpolação *spline* apresentou maior eficiência na usinagem, mantendo um maior valor real de velocidade de avanço. No entanto, constatou-se que uma grande quantidade de informações ainda é gerada no sistema CAM e, para que a máquina tenha tempo para processar as informações, uma redução na velocidade de avanço é necessária. Assim, essa alternativa minimiza mas não é uma solução para o problema de tempo de processamento na usinagem em altas velocidades [48].

A limitação no tempo do processamento da informação pode ser minimizado, porém a eliminação dessa limitação somente será atingida com uma mudança na estrutura do sistema de controle da máquina, que, como apresentado no capítulo 2.1, possui o erro de atraso inerente ao emprego dessa tecnologia.

A interpolação da trajetória da ferramenta pode ser implementada de forma nativa, ou seja, a interpolação calculada no sistema CAM é utilizada diretamente no CNC, sem a necessidade de tradução dos códigos de programação NC. Assim, a otimização do caminho da ferramenta pode ser obtido considerando-se os limites geométricos e dinâmicos da máquina-ferramenta no método de interpolação *spline* nativo [49].

A viabilização da implementação da interpolação de forma nativa diretamente no sistema CAM, depende da utilização de uma linguagem padrão de códigos de programação NC pelos fabricantes de comando numérico. Atualmente cada fabricante implementa os códigos de interpolação *spline* de forma proprietária, tornando difícil a viabilização da leitura de diferentes códigos de forma nativa, dificultando a sua aplicação em larga escala no ambiente industrial.

Os comandos de posição gerados pelos métodos de interpolação são convertidos em sinais elétricos para acionamento dos motores. Portanto, se estes comandos apresentarem elevada descontinuidade, provavelmente a força que é gerada nos acionamentos irá excitar os modos de vibração da estrutura da máquina, prejudicando o comportamento dinâmico da trajetória da ferramenta [3].

A relação entre método de interpolação e erro de contorno, no ponto de vista do sistema de controle, é criada pela excitação dos modos de vibração. Nessa relação, os *set-points* de posição monitorados no CNC aberto, estão entre as origens desse problema.

Como já comentado, na cadeia CAD/CAM/CNC, a transferência de informação, principalmente no formato de curvas, é caracterizada pela discretização do caminho da ferramenta. No entanto, pesquisas atuais indicam tecnologias para evitar a discretização do caminho da ferramenta e, assim, proporcionar uma continuidade no deslocamento pela superfície [50].

Em relação ao sistema de controle da máquina, os métodos de interpolação e a velocidade de avanço estão entre as principais causas do erro de contorno. No próximo tópico são apresentados demais fatores que influenciam na qualidade da usinagem.

2.1.2.2 Outros fatores que influenciam a qualidade da usinagem

O processo de usinagem em altas velocidades de corte é altamente utilizado na usinagem de superfícies complexas. Para atingir as elevadas velocidades de corte e de avanço com exatidão dimensional e rigidez adequadas, centros de usinagem de alto desempenho são requeridos. O nível de qualidade superficial e geométrica

da peça é influenciado por diversas fontes de erro que ocorrem no conjunto máquina/ferramenta/processo [51].

A interação entre as diversas fontes de erro, em muitos casos é difícil de medir e principalmente de separar. Os sistemas de simulação auxiliam nessa separação, porém, incertezas de medição existentes na obtenção desses modelos dificultam essa tarefa.

O trabalho de Schmitz *et al.* [52] investigou a contribuição das causas de erro geométrico, térmico, do controlador, e das forças de corte na usinagem de uma peça padrão de testes utilizando um centro de usinagem HSM (*High Speed Machining*). No trabalho, a contribuição dos erros relacionados às forças de corte foi identificado como elevado para determinadas rotações do eixo-árvore e baixo para outras rotações, o que demonstrou condições de instabilidade e estabilidade do processo, respectivamente.

A instrumentação da máquina-ferramenta com acelerômetros, dinamômetro, sensores de temperatura foi necessária no trabalho citado anteriormente. Tais equipamentos possuem um elevado custo, que pode ser eliminado quando utilizados sensores da própria máquina, por meio do monitoramento de dados do CNC aberto.

Para a decomposição dos erros quasi-estáticos (não dependentes da velocidade) e dos erros dinâmicos (que dependem da velocidade), os sinais de saída do interpolador do CNC e os sinais do *encoder* foram gravados e comparados com o erro atual do ponto central da ferramenta, medido sem contato com o instrumento CapBall (instrumento de medição sem contato, para mais detalhes ver [53]). Os resultados indicam uma correlação linear do aumento da velocidade de avanço no valor rms (*root mean square*) do erro de contorno para uma geometria simples. Porém, é apontado que uma conclusão generalizada não se aplica a geometrias complexas, pois alguns parâmetros do ajuste de curvas do modelo dependem da geometria da peça [54].

A estimativa da deflexão da ferramenta com as forças de corte, calculadas por meio de um modelo, foi implementada num sistema CAM para auxiliar na escolha da estratégia de usinagem que permita uma melhor exatidão geométrica da peça [55].

A proposta de implementar simulação no sistema CAM, agiliza a tomada de decisão visando a otimização do processo.

Um estudo sobre a influência das estratégias de corte na qualidade superficial e na exatidão da forma de uma superfície complexa demonstrou que a altura da

crista deixada pela ferramenta na superfície é um importante fator a ser considerado na estratégia de corte. Nesse trabalho a altura da crista calculada foi menor que a usinada nas regiões de elevado grau de curvatura da superfície. Dentre as estratégias estudadas, identificou-se que a estratégia de trajetórias paralelas proporcionou melhor qualidade superficial e maior exatidão de forma devido a movimentação em dois eixos [56].

No estudo de Miralles [57] sobre estratégias de corte na usinagem em cinco eixos simultâneos, a utilização da superfície guia no sistema CAM para geração de trajetórias da ferramenta proporcionou melhor qualidade superficial e menor tempo de usinagem da peça.

A estratégia de corte, incluindo os parâmetros de corte, tem influência direta no comportamento da força de corte, que por sua vez também influencia o comportamento dinâmico da máquina-ferramenta.

O monitoramento de dados na usinagem de superfícies complexas auxilia na identificação da condição otimizada do processo, além de proporcionar diagnósticos do estado da ferramenta e de componentes da máquina.

2.2 Monitoramento do CNC de Arquitetura Aberta

O conceito do CNC de arquitetura aberta e a aplicação de sistemas de monitoramento na manufatura CNC são apresentados nesse tópico.

2.2.1 CNC de arquitetura aberta

Uma das tecnologias chave para promover o monitoramento de dados do CNC no chão de fábrica é o conceito de controlador de arquitetura aberta, também chamado de CNC aberto.

Este conceito recebeu grande atenção na década de 1990, principalmente devido à necessidade de implementação de sistemas flexíveis de manufatura. A possibilidade de customização de funções pelo usuário gerou a necessidade de se obter uma interface neutra de comunicação, que deveria ser independente do fabricante [18].

Desde então, surgiram propostas de protocolos de comunicação, assim como de configuração de sistemas para o controlador de arquitetura aberta, que, até os dias atuais, não resultaram em um padrão aplicado em larga escala no ambiente industrial [18, 22].

A dificuldade em obter um padrão de comunicação para o controlador de arquitetura aberta também está relacionada com as estratégias comerciais dos fabricantes de CNC e acionamentos, pois ao manter o protocolo de comunicação proprietário, é garantido um vínculo de dependência entre fabricante e cliente.

No trabalho de Pritschow *et al.* [18], as iniciativas apresentadas para obtenção de uma interface comum para o CNC aberto, mostram que todas elas tem a proposta similar de definição de um padrão para o controlador de arquitetura aberta. As principais características dos padrões apresentados são a neutralidade em relação aos fabricantes e a customização de funções por meio de módulos, com utilização de interface para programação da aplicação (*Application Programming Interface* - API). No entanto, o risco de se obter várias propostas incompatíveis entre si foi indicado.

Uma das principais vantagens do monitoramento de dados do CNC aberto é a utilização dos sinais dos sensores do próprio sistema CNC, sem a necessidade de condicionamento adicional do sinal. Isso torna viável a investigação de experimentos complexos devido ao baixo investimento em instrumentação [20].

A possibilidade de desenvolver aplicativos de monitoramento da máquina e do processo sem a necessidade de adicionar sensores está entre uma das principais vantagens do controlador de arquitetura aberta. Dessa forma aplicativos para dispositivos móveis podem ser desenvolvidos para acompanhamento do desempenho da máquina.

Segundo Teti *et al.* [19], a estrutura do sistema de controle de arquitetura aberta é geralmente constituída de três níveis: nível de dispositivos, de controle e de sistema. Para a realização da comunicação entre os níveis, é requerida uma interface aberta e padronizada, (Figura 2.8) [19].

Na estrutura da Figura 2.8, pode-se observar que as redes de comunicação são as interfaces padronizadas para a troca de dados entre os níveis especificados. No entanto, tais características não são sinônimo de um sistema totalmente aberto. A definição das plataformas do sistema, o encapsulamento dos dados e a modularização são os principais requisitos para a classificação de um sistema de arquitetura abertura [18, 58].

O *MtConnect*, padrão aberto para comunicação de dados em manufatura, é um exemplo do engajamento para a obtenção de uma interface comum de comunicação entre equipamentos. O *MtConnect* não tem a proposta de substituir os padrões de comunicação existentes, porém integra os sistemas com o uso de

um agente que faz a comunicação com os dispositivos de campo e os sistemas externos utilizando a linguagem XML (*eXtensible Markup Language*) [22].

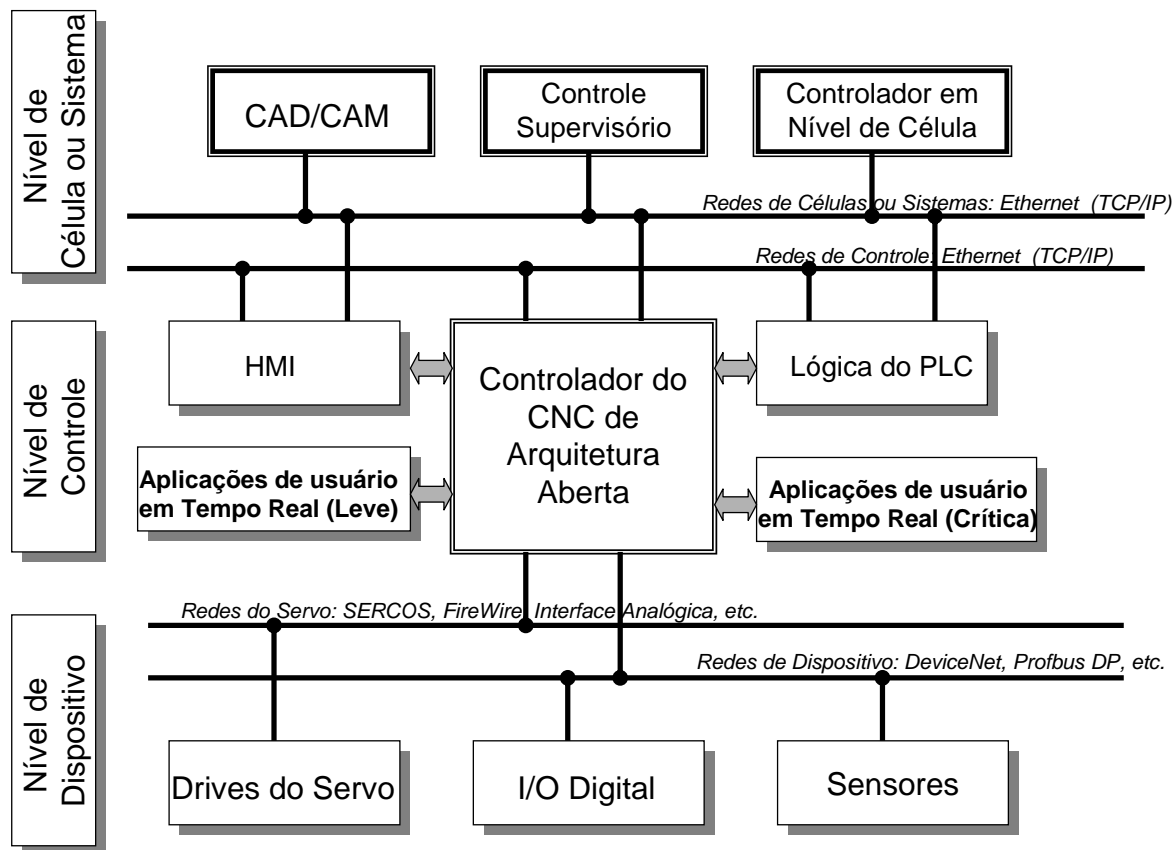


Figura 2.8: Estrutura típica de níveis do CNC de arquitetura aberta (traduzido de [19])

2.2.2 Casos de aplicação do monitoramento na manufatura CNC

Para atender as demandas da manufatura avançada, os sistemas de monitoramento devem possuir robustez, reconfigurabilidade, confiabilidade, inteligência embarcada e baixo custo. A viabilidade da aplicação destes sistemas no chão de fábrica requer que sua configuração e utilização sejam feitas de forma simples pelo operador [22].

Uma arquitetura de CNC aberto baseado em redes de campo e modelos de componentes da geração de trajetórias e do controlador dos eixos foi desenvolvida, permitindo a abertura da conexão proprietária entre o CNC e o controlador do servo. Com essa proposta, características de flexibilidade e reconfigurabilidade são obtidas, tanto para o CNC, como para os controladores [21].

O monitoramento de dados do *kernel* (núcleo de processamento) do comando numérico foi utilizado para avaliação indireta da rugosidade da superfície fresada. No trabalho, uma rede neural artificial foi treinada considerando os parâmetros do processo e os dados da corrente dos acionamentos e do eixo-árvore monitorados diretamente do CNC aberto. Foi feita uma comparação do resultado dos dados do CNC com os dados de vibração medidos por acelerômetros. Foram identificadas vantagens como a não necessidade de adição de sensores e a não aplicação de filtros nos sinais quando utilizado os dados do CNC aberto [59].

O trabalho acima apresenta as vantagens do monitoramento do CNC aberto, como não adição de sensores e utilização do sinal a ser monitorado no formato digital. Também apresenta a importância da estratégia para extração de características de interesse na variável monitorada.

O monitoramento indireto do *jerk* foi implementado por Morales-Velazquez *et al.* [60]. No trabalho, os dados de posição dos *encoders* foram utilizados para o cálculo do *jerk*, onde seu monitoramento foi implementado sem a necessidade de adição de sensores na máquina-ferramenta. Tal sistema possibilita detectar condições de *jerk* que podem prejudicar o processo de usinagem.

Com o monitoramento de dados do CNC aberto, a aquisição de informações da produção de diversas máquinas, incluindo informações do processo, é realizada automaticamente, proporcionando tempos menores para atualização das informações [61].

Aplicações do monitoramento de dados do CNC em sincronização com sensores externos auxiliam no controle adaptativo da velocidade de avanço, na detecção de quebra da ferramenta e no controle de qualidade executado de forma *online* [62].

Considerando a aplicação de sistemas de monitoramento com adição de sensores na máquina-ferramenta, foi desenvolvido um sistema de instrumentação para o monitoramento de vibração com o uso acelerômetro *tri-axial* e interface de comunicação com o CNC aberto. Os sinais de aceleração são analisados pela fusão do resultado da transformada rápida de Fourier (FFT) e resultados da transformada *wavelet* discreta (DWT), permitindo a detecção de falhas nos motores e vibrações durante a usinagem [63].

No trabalho de Denkena *et al.* [64], a topografia da superfície foi reconstruída utilizando-se os sinais de força de corte medidos por um dinamômetro; tais forças foram utilizadas em um modelo dinâmico, proporcionando uma reconstrução, com exatidão, da topografia da superfície em situações de corte moderadas.

Uma vasta aplicação de funções de monitoramento que dependem da abertura de controladores de máquinas pode ser desenvolvida e utilizada na indústria. No entanto, considerando o nível de abertura do controlador, sistemas de monitoramento do CNC precisam ser desenvolvidos e otimizados [34].

2.3 Simulação do Sistema CNC

A simulação é uma importante ferramenta para otimização de processos, e sua utilização está presente em diversos níveis da fábrica digital.

Harrel *et al.* [65] definem simulação como "um processo de experimentação com um modelo de um sistema real para determinar como o sistema responderá a mudanças em sua estrutura, ambiente ou condições de contorno".

Como já abordado na definição de simulação, a mesma tem a finalidade de representar características de um sistema real, pois, dessa forma, cenários podem ser testados por meio de experimentação em modelos.

Pressman [66], define um sistema baseado em computador como, "um conjunto ou arranjo de elementos organizados para atingir alguma meta predefinida por meio do processamento da informação".

Assim, para que seja possível realizar a simulação de um sistema, é necessário a elaboração de modelos que representem o sistema. Essa representação deve atender ao objetivo da simulação.

Segundo Bertrand e Fransoo [67], um modelo é sempre uma abstração da realidade e, nesse sentido, a realidade não é completamente considerada na modelagem. Ainda segundo os autores, um modelo científico é aquele que pode ser utilizado para prever o comportamento ou o desempenho de um processo e que pode ser validado empiricamente de forma objetiva.

A simulação do sistema CNC inclui o modelamento da cinemática da máquina-ferramenta e da dinâmica dos acionamentos, onde a movimentação dos eixos com a respectiva remoção de material determina a geometria final da peça de forma virtual. Basicamente, o movimento dos corpos rígidos da máquina e as funções do CNC devem ser previstas para a realização de um sistema CNC virtual [14].

Nos próximos tópicos são abordadas as tecnologias de simulação aplicadas na manufatura CNC, assim como a forma de validação de modelos e a estrutura do controle em cascata.

2.3.1 Simulação

Nos sistemas de simulação tradicional, as mudanças que ocorrem no chão de fábrica, assim como variáveis que, na realidade, diferem do ambiente simulado, contribuem para a dificuldade em obter um resultado exato da simulação. Assim, para obtenção de melhores resultados de simulação, é necessário conhecer a condição real do processo de usinagem [68].

Segundo Pothen *et al.* [69], atualmente falta uma solução de *software* para identificar e corrigir possíveis erros de geometria que são gerados na cadeia CAD/CAM/CNC. Os erros de interpolação são as principais causas de uma não suavização da trajetória da ferramenta e os mesmos autores desenvolveram o *software* NcProfiller[®], Fraunhofer IPT, Alemanha, que permite aumentar a qualidade e reduzir o tempo de usinagem por meio de uma geração de *set-points* otimizada distribuídos.

Na Figura 2.9, é apresentada a arquitetura do sistema de um CNC virtual [15].

Conforme apresentado na Figura 2.9, a arquitetura do CNC virtual é constituída de módulos que executam a leitura do arquivo CL (*Cutter Location*) resultante da programação da usinagem no sistema CAM. Para geração da trajetória, o sistema inclui diferentes perfis de aceleração que resultam nos *set-points* de posição dos eixos. O resultado das posições dos eixos que foram simuladas é comparado com as posições de *set-points* para determinação do erro de contorno [15].

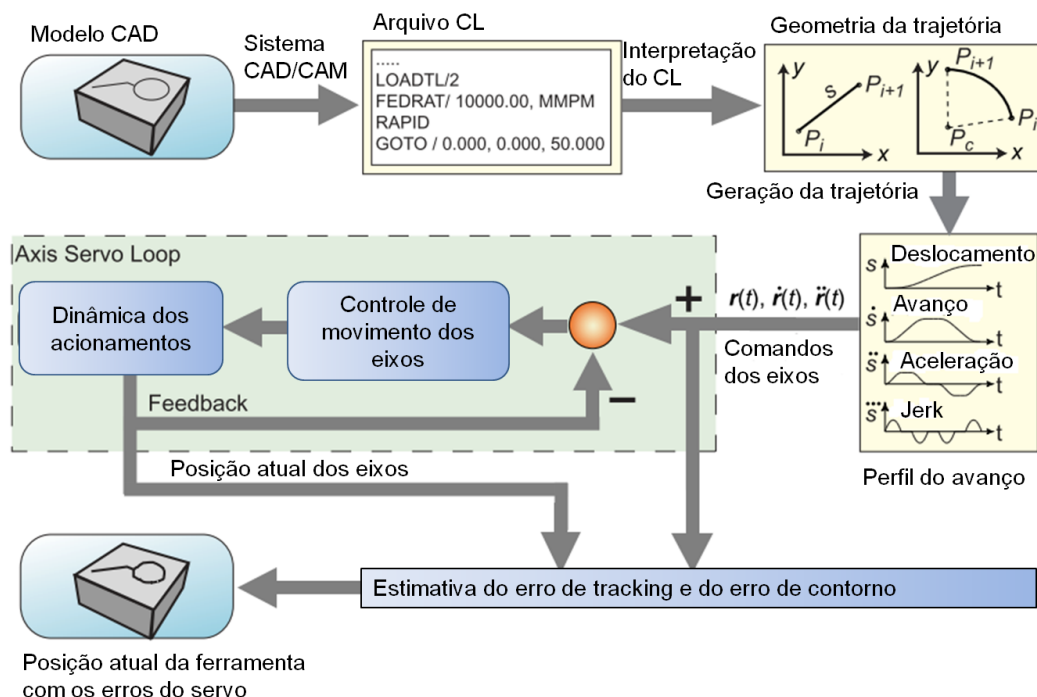


Figura 2.9: Arquitetura do sistema de um CNC virtual (traduzido de [15])

O desafio de integrar sistemas diferentes para a simulação da interação da estrutura da máquina-ferramenta, do sistema de controle e do processo de corte é investigado no trabalho de Broos *et al.* [70]. Segundo os autores, os sistemas de simulação podem ser classificados em níveis de simulação do processo (formação do cavaco, desgaste da ferramenta), simulação da máquina e equipamentos (comportamento dinâmico, térmico, *lay out* dos equipamentos) e simulação da fábrica (*lay out* da fábrica, fluxo de material, logística).

Dentre os níveis de simulação apresentados, existe a interação entre os mesmos; por exemplo, a força que é gerada pelo processo de corte do material influencia o comportamento dinâmico da estrutura da máquina. Este, por sua vez, pode influenciar na qualidade das peças que são produzidas, que pode afetar a produtividade do processo de fabricação.

Devido às interações que ocorrem no processo real, o ponto ótimo de simulação de funcionamento de um sistema poderá ser atingido se o mesmo for capaz de representar essas interações [70]. Porém, esse ponto ótimo também pode ser obtido com a experiência do pesquisador em investigar os níveis apresentados de forma individual e, por meio de evidências científicas, integrar os mesmos.

No projeto SimCAT, é proposta a construção de um modelo integrado de simulação com a capacidade de otimizar o comportamento estático e dinâmico de uma máquina-ferramenta. A integração proposta envolve tecnologias de projeto auxiliado por computador, modelo da máquina integrado ao modelo do controlador e conexão com o CNC real [25].

A conexão entre o modelo e o CNC real do projeto SimCAT tem a finalidade de executar testes de funcionamento do CNC durante a fase de projeto da máquina. A proposta não aborda o comportamento do erro de contorno aplicado na manufatura de superfícies complexas.

O *software* ISG-virtuos é uma solução para simular máquinas e plantas conectadas ao sistema de controle em tempo real, auxiliando no desenvolvimento, teste e configuração de aplicações controladas por computador [71]. O nível de simulação, nesse caso, está direcionado para o comissionamento dos equipamentos e a conexão destes com a simulação da fábrica. Questões de desempenho das máquinas como, por exemplo, desvios de trajetória não são simulados.

Com o *software* RealNC a análise detalhada da programação NC em *off-line* pode ser realizada visando à otimização dos tempos de *set-up*, tempo de usinagem em vazio e identificação de colisões. Com o carregamento de parâmetros do

controlador da máquina-ferramenta, o *software* faz a previsão do tempo de usinagem e permite um teste completo do programa NC antes de aplicar o mesmo no chão de fábrica [17].

Geralmente a simulação de uma máquina virtual é executada por módulos, para prever a cinemática, geração de trajetórias, sistema de controle, erros geométricos, forças de corte, comportamento dinâmico e de temperatura da máquina [72].

Nos trabalhos apresentados, pode ser constatado que, para simulação do desempenho do processo, como por exemplo do erro de contorno, o modelo geralmente é complexo, tanto no desenvolvimento, como no dimensionamento dos parâmetros do modelo. Os trabalhos que utilizam a simulação do CNC para comissionamento e testes nos equipamentos são direcionados para a fase de projeto de máquinas-ferramentas e não investigam questões de nível de processo, com exceção do Real NC, que simula o tempo de usinagem, mas não simula o erro de contorno.

2.3.2 Casos de aplicação da simulação

O avanço computacional obtido na última década permitiu a realização de simulações complexas do conjunto máquina-ferramenta, sistema de controle e processo de corte. Com isso, a manufatura virtual tem ganhado cada vez mais importância, tanto em pesquisas, como no ambiente industrial [73].

As investigações sobre simulação do processo de usinagem visam a um entendimento aprofundado na interação entre máquina, sistema de controle, peça de trabalho e processo. Assim, Segundo Hoffmann [3], uma combinação entre simulação da trajetória e simulação do processo foi proposta, permitindo uma representação realística dos movimentos dos eixos e da tolerância do processo a ser atingida para a fabricação de uma peça teste.

Aplicações da simulação integrada ao *hardware* indicam que os modelos matemáticos utilizados nessa abordagem devem ser simplificados para que requisitos de tempo real sejam atingidos. Tal abordagem sugere um maior potencial de aplicação no ambiente industrial [23].

Em diversas aplicações, a simulação de regiões críticas do contorno da peça é suficiente para identificar o comportamento dinâmico da trajetória da ferramenta. Regiões críticas são caracterizadas pela alta variação da aceleração no tempo, especialmente fases de aceleração e desaceleração [74].

Mecanismos de acoplamento entre a estrutura mecânica e o sistema de controle são definidos pela retroalimentação das variáveis de deslocamento dos sistemas de medição e pelo efeito das variáveis de força dos acionamentos nos componentes da máquina [74].

A aplicação da simulação de *hardware in the loop* (retroalimentação de variáveis do *hardware* para o sistema de simulação) permitiu a obtenção dos comandos de referência de posição do CNC, que, em combinação com o *software* Vericut[®], CGTech, USA, possibilitou a identificação de erros de trajetória causados pela dinâmica da máquina-ferramenta. No mesmo trabalho, um modelo da máquina-ferramenta foi desenvolvido e conectado ao CNC real para execução da simulação [10]. Tal trabalho não contempla o desenvolvimento de um sistema para monitorar os dados do CNC aberto e não compara quantitativamente os erros de trajetória simulada pelos erros reais. Observa-se, também, uma falta de informações sobre o dimensionamento do modelo da máquina-ferramenta.

O trabalho de Svensson *et al.* [6], aponta que nas pesquisas sobre métodos de otimização baseados em simulação e mesmo nos *softwares* de comissionamento virtual, existe uma falta da abordagem de funções críticas de tempo real, como o controle de movimentos. No trabalho, o conceito *hardware in the loop* é utilizado para determinação dos parâmetros ótimos do controlador, considerando a sincronização de tempo com o *hardware*.

Modelos de simulação podem ser implementados graficamente em *softwares* como o Simulink[®], Mathworks[™], USA, por meio de blocos que desempenham as funções dos componentes de um sistema de controle. Geralmente, os blocos possuem um vetor de entrada de dados, um de saída e um vetor de estado com os parâmetros iniciais do bloco [9].

Os resultados da simulação com *software* VCNK[®], Siemens, Alemanha, permitem uma estimativa precisa do tempo de usinagem, assim como aumento da qualidade superficial pela identificação de problemas de interpolação e de estratégias de corte [75].

Ferramentas computacionais como o FEM (*Finite Element Method*) auxiliam no dimensionamento das peças e na análise do comportamento dinâmico da estrutura. A partir desse ponto, a estrutura mecânica deve ser simulada em conexão com o sistema de controle dos acionamentos. Para a simulação do controlador, são utilizados os sistemas CACE (*Computer Aided Control Engineering*) [3].

Um método para prever a exatidão de uma peça a ser fabricada em máquinas ferramentas com utilização da usinagem virtual foi desenvolvido e patenteado por Frey *et al.* [76]. Nesse método, o erro de forma é calculado por meio da distribuição estatística da dimensão da peça, da forma e perfil de erros que ocorrem numa população de peças. Os erros são combinados com a simulação de Monte Carlo e o resultado é a localização das coordenadas com os devidos desvios. A aplicação desse método pressupõe a usinagem de uma população de peças, além de critérios nos dados como média zero, variância constante, distribuição normal e independência. Se algumas dessas condições forem violadas, o resultado da simulação perde sua exatidão [76].

A simulação do processo de fresamento considerando a rotação do eixo-árvore, profundidade de corte, velocidade de avanço e diagramas de estabilidade com limites de rotação do *spindle* foi desenvolvida por Altintas e Merdol [51]. Segundo os autores, a otimização da velocidade de avanço e da rotação da ferramenta é feita de forma automática, seguindo as mudanças de condições de corte durante o caminho da ferramenta.

Os recursos de simulação estão ganhando espaço no ambiente industrial, e para viabilizar a aplicação prática dos modelos utilizados nos sistemas de simulação, a validação dos modelos é requerida.

2.3.3 Validação

A validação de um modelo de simulação consiste em determinar se o modelo representa com exatidão o sistema real, pois se o modelo não for válido, então as conclusões obtidas por meio do mesmo terão valor duvidoso [77].

O teste de validação deve envolver o modelista, potenciais usuários e outras pessoas que tenham familiaridade com a operação real do sistema. Uma abordagem de validação do sistema propõe que especialistas no sistema sejam consultados para identificar a diferença entre cópias dos resultados reais e simulados, sem que estes resultados sejam previamente identificados [65].

A proposta de consulta aos especialistas visa a identificação de diferenças significativas entre os resultados reais e simulados.

O modelo não necessariamente precisa representar todos os elementos do sistema, mas precisa ser capaz de simular a condição ou objetivo para o qual foi proposto [77].

De maneira geral o modelo deve incluir somente os elementos necessários para atingir o objetivo proposto, contribuindo assim, para que o modelo não se torne demasiadamente complexo.

Em muitos casos, a validação dos modelos demanda complexos métodos experimentais que podem conter incertezas de medições. Tais experimentos também são utilizados para a construção de modelos e alguns mecanismos que ocorrem na máquina-ferramenta são, em algumas situações, muito difíceis de ser virtualmente reproduzidos, o que afeta a validação do sistema e sua capacidade de aplicação [5].

Dentre vários trabalhos sobre o desenvolvimento e implementação de modelos, a validação do modelo é desempenhada pela comparação dos resultados simulados pelos resultados reais, obtidos por instrumentos de medição [12, 23, 78, 79].

Assim, o sistema pode ser validado com a comparação dos resultados reais pelos resultados simulados com o modelo, conforme apresenta a técnica de validação denominada de inspeção, apresentada na Figura 2.10.

Conforme apresenta a Figura 2.10 a técnica de inspeção consiste em utilizar os dados de entrada, que já fazem parte do histórico de entradas do sistema real, para aplicação tanto no sistema real como no modelo de simulação. Assim, as respostas real e simulada podem ser comparadas para fins de validação do modelo.

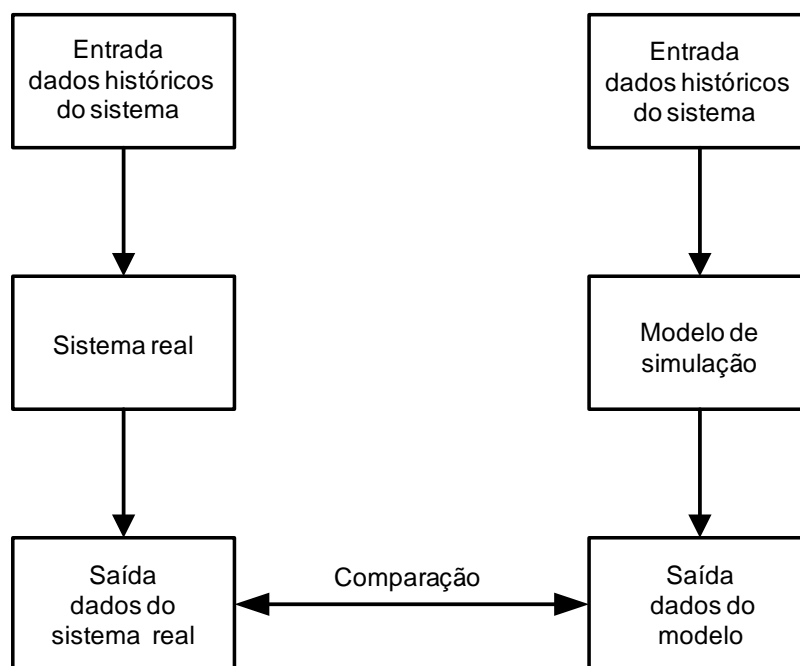


Figura 2.10: Técnica de inspeção (traduzido de [77])

2.3.4 Controle em cascata

O controle de posição em máquinas-ferramentas e robôs pode ser considerado um dos mais importantes componentes para garantir a exatidão do posicionamento dentro de valores pré-estabelecidos. Esse controle é atualmente implementado na maioria dos equipamentos pela estrutura de controle em cascata [7], apresentada na Figura 2.11.

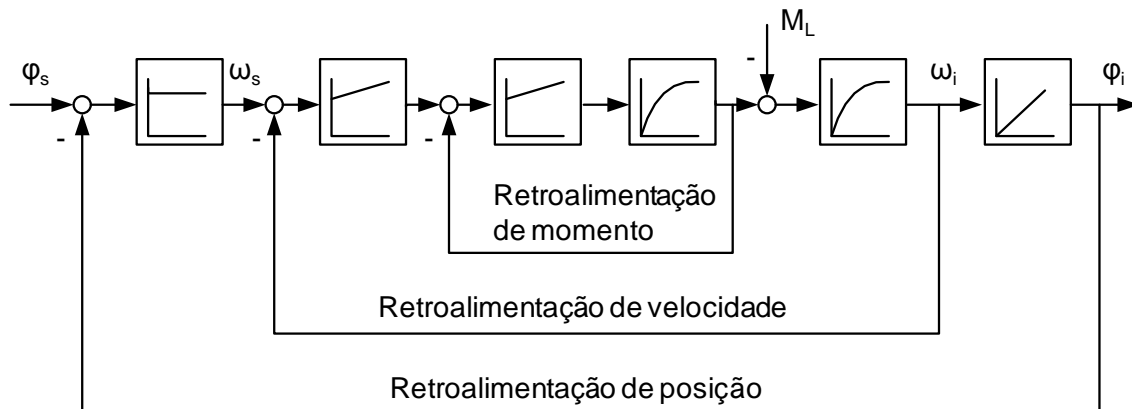


Figura 2.11: Estrutura de controle de posição em cascata [9]

A estrutura apresentada na Figura 2.11 ilustra que, no controle em cascata, vários *loops* de controle são interligados, como: controle de posição, de velocidade e de momento do acionamento. Nesse esquema, a variável de controle do *loop* anterior é a variável de entrada para o próximo *loop* [9].

As vantagens dessa estrutura são [9]:

- Distúrbios são controlados nos *loops* de controle posteriores, antes de influenciar no *loop* anterior;
- O valor máximo da variável do *loop* posterior pode ser limitada para proteger o sistema de acionamento;
- A composição do controle é iniciada pelo *loop* interno.

É um pré-requisito que o *loop* de controle posterior seja mais rápido que o *loop* anterior para o bom funcionamento dessa estrutura.

O modelo em cascata proposto nesse trabalho não contempla o *loop* de controle de momento (ou corrente), pois dessa forma é utilizado um controlador a menos no modelo, evitando assim a necessidade de parametrizar o mesmo, o que contribui para a simplificação do modelo.

No projeto de pesquisa SimCAT, um protótipo do controlador em cascata foi integrado a um modelo multi-corpos dos componentes da máquina-ferramenta, para a simulação de movimentação dos eixos [80].

A integração de modelos de sistemas de controle e modelos multi-corpos é possível com a utilização do *software* Adams[®], MSC Software, USA, que possui interface para o *software* de simulação Simulink[®].

Segundo Zirn [81], o controle de velocidade é o responsável por determinar o amortecimento e eliminar as cargas estáticas. O procedimento típico para comissionar este controlador é de, primeiramente, ajustar o ganho proporcional e depois reduzir a constante de tempo do integrador até que um bom desempenho de amortecimento do controle seja obtido.

A proposta apresentada para o ajuste do controlador de velocidade foi utilizada durante o desenvolvimento desse trabalho, para ajuste dos parâmetros do controlador de velocidade do modelo.

A simulação do sistema de controle geralmente é empregada no projeto de controladores. No entanto, esse recurso também pode ser utilizado para avaliar o comportamento de determinadas variáveis de processo de forma prévia e virtual.

No próximo tópico é apresentada a fundamentação teórica sobre os controladores automáticos e a modelagem matemática.

2.4 Fundamentação sobre controladores automáticos e modelagem matemática

Neste tópico, são apresentados os temas de controladores automáticos e de modelagem matemática, necessários para o desenvolvimento de modelos de simulação do processo e projeto de controladores.

2.4.1 Controladores automáticos

A principal tarefa dos controladores automáticos é a geração de um sinal de controle que reduz ou elimina o erro da variável controlada. Este erro é determinado pela comparação entre o valor de referência e o valor real de saída do processo. A forma utilizada para geração do sinal de controle é chamada de ação de controle. A Figura 2.12 apresenta o diagrama de blocos de um sistema de controle com seus componentes [82].

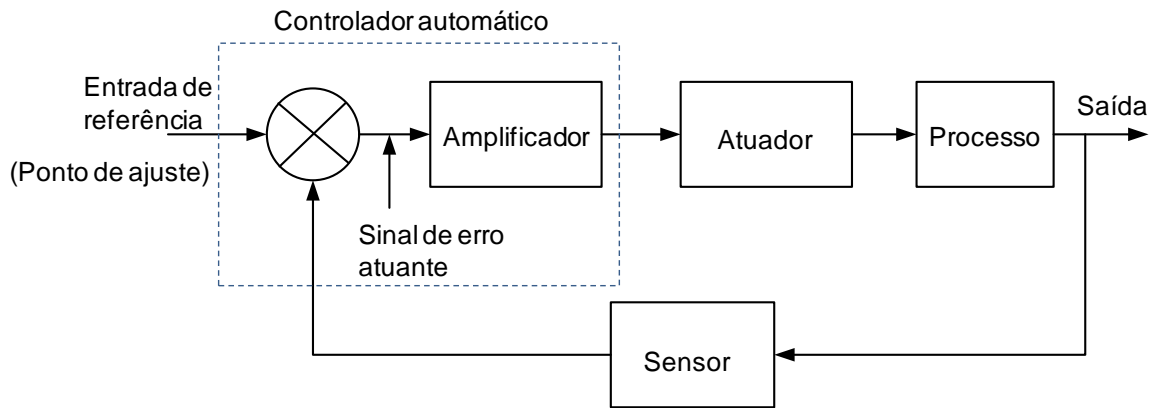


Figura 2.12: Diagrama de blocos de um sistema de controle industrial [82]

Os componentes ilustrados na Figura 2.12 são: o controlador, o atuador, o processo e o sensor para medição. O sinal de erro é detectado pelo controlador e é amplificado para acionar um motor elétrico, hidráulico, pneumático ou uma válvula, que são exemplos de atuadores. O sensor converte a variável de saída para uma variável de interesse como deslocamento, tensão, pressão, e esta é utilizada para comparação com o sinal de referência. O sensor está localizado no ramo de realimentação do sistema de malha fechada [82].

A classificação dos controladores industriais segue as suas ações de controle e pode ser: liga desliga, proporcional, integral, proporcional-integral, proporcional-derivativo e proporcional-integral-derivativo. As principais ações de controle são detalhadas a seguir [82]:

- **Ação de controle liga desliga:** é caracterizada pela existência de somente duas posições fixas do elemento atuante; em muitos casos simplesmente liga e desliga conforme o nível do sinal do erro.
- **Ação de controle proporcional:** é caracterizada pela ação de uma constante K_p que é proporcional ao erro; a relação entre saída do controlador $u(t)$ e sinal de erro $e(t)$ é:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (2.5)$$

A transformada de Laplace fica:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.6)$$

- **Ação de controle integral:** o valor de saída $u(t)$ do controlador é modificado conforme a taxa de variação proporcional ao sinal de erro $e(t)$:

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i \cdot e(t) \text{ ou } u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.7)$$

onde K_i é uma constante ajustável e a função de transferência fica:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.8)$$

- **Ação de controle proporcional-integral:** é uma combinação das ações proporcional e integral e é definida por:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.9)$$

cuja função de transferência é:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2.10)$$

onde T_i é denominado tempo integrativo.

- **Ação de controle proporcional-derivativo:** é resultado da combinação entre as ações proporcional e derivativa, sendo definida por:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_p \cdot T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.11)$$

a função de transferência é:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad (2.12)$$

onde T_d é denominado tempo derivativo.

- **Ação de controle proporcional-integral-derivativo:** é a combinação das três ações de controle, proporcional, integral e derivativo, combinando as vantagens de cada uma. A equação do controlador fica:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p \cdot T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.13)$$

a função de transferência fica:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.14)$$

onde K_p é o ganho proporcional, T_i é o tempo integrativo e T_d é o tempo derivativo.

Um procedimento para auto ajuste do ganho do controlador proporcional baseado no algoritmo de procura ótimo foi desenvolvido por Kim *et al.* [83] . Segundo os autores, a técnica de ajuste do ganho proporcionou considerada redução do erro

de contorno para acionamentos de uma máquina-ferramenta, mesmo utilizando um controlador considerado simples como o proporcional.

Além do controle PID e de suas combinações, outras estratégias de controle, como a CCC (*Cross Coupled Control*), *Feed Forward* e lógica *fuzzy*, indicam uma considerável redução no erro de contorno em sistemas CNC [84, 85].

Com a proposta de obter uma elevada exatidão geométrica na manufatura de superfícies complexas, Cheng *et al.* [29] implementaram um regulador da velocidade de avanço combinado com um estimador do erro de contorno em tempo real. Essa estratégia foi implementada no esquema de controle de movimento denominado CCC.

Diversas estratégias de controle podem ser aplicadas para redução ou eliminação do erro de contorno. Dentre as estratégias mais utilizadas, podem-se citar o controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo), o ZPTEC (*Zero Phase Error Tracking Controller*), CCC (*Cross-Coupling Controller*) e FLC (*Fuzzy Logic Control*). No trabalho de Koren [86], foi demonstrado que a estratégia de controle FLC proporciona uma melhor "habilidade" de atenuar distúrbios como o de atrito, proporcionando, assim, uma redução no erro de contorno.

Estratégias de controle consideradas avançadas foram desenvolvidas e implementadas em laboratórios, porém existe uma limitação na aplicação dessas técnicas no ambiente industrial, pois muitas vezes não é possível a modificação do *hardware* e *software* do sistema de controle.

O controlador PID é o mais utilizado no ambiente industrial devido à facilidade de ajuste dos parâmetros do controlador e de sua elevada robustez [87].

No projeto de sistemas de controle, o processo é simulado por meio de modelos matemáticos. Assim, o desempenho do controlador pode ser avaliado num ambiente de simulação que inclui a estratégia de controle e o modelo do processo [82]. O modelo do processo pode ser obtido pela modelagem matemática, apresentada no próximo tópico.

2.4.2 Modelagem matemática

Os métodos para obtenção de modelos matemáticos são divididos em analíticos ou teóricos, assim como experimentais ou empíricos. Modelos analíticos são construídos por meio de leis da física; já os modelos experimentais são obtidos por meio de medições no processo. Os modelos podem ser paramétricos, quando representados em forma de equações diferenciais ou funções de transferência e

não paramétricos, quando representados por curvas, tabela de dados ou funções de resposta do processo [9].

A construção de modelos confiáveis depende da exatidão do conhecimento sobre o comportamento dos materiais, características da máquina-ferramenta, interação entre os componentes, sistema CNC e acionamentos. Mudanças em uma das variáveis torna necessário a execução de novos experimentos [5].

Um modelo pode ser considerado simplificado quando o mesmo representa as características básicas de um processo. No caso de modelo de um acionamento, geralmente não são incluídos comportamentos não lineares como atrito, *backlash* (folga na inversão do movimento), entre outros, que tornam complexa a parametrização do modelo [24].

Sato [88] utilizou a técnica de transformações homogêneas para desenvolver o modelo cinemático de uma máquina-ferramenta. A calibração dos erros paramétricos do modelo foi realizada considerando-se as influências térmicas. Assim, a previsão do erro em diferentes estados de temperatura e posições foi obtida, o que torna possível uma redução do erro sintetizado na direção X superior a 80% nos erros dimensionais da peça usinada.

O tipo de motor mais utilizado nos acionamentos de máquinas-ferramentas e robôs é o de corrente contínua (cc), cujo diagrama elétrico é apresentado na Figura 2.13 [39].

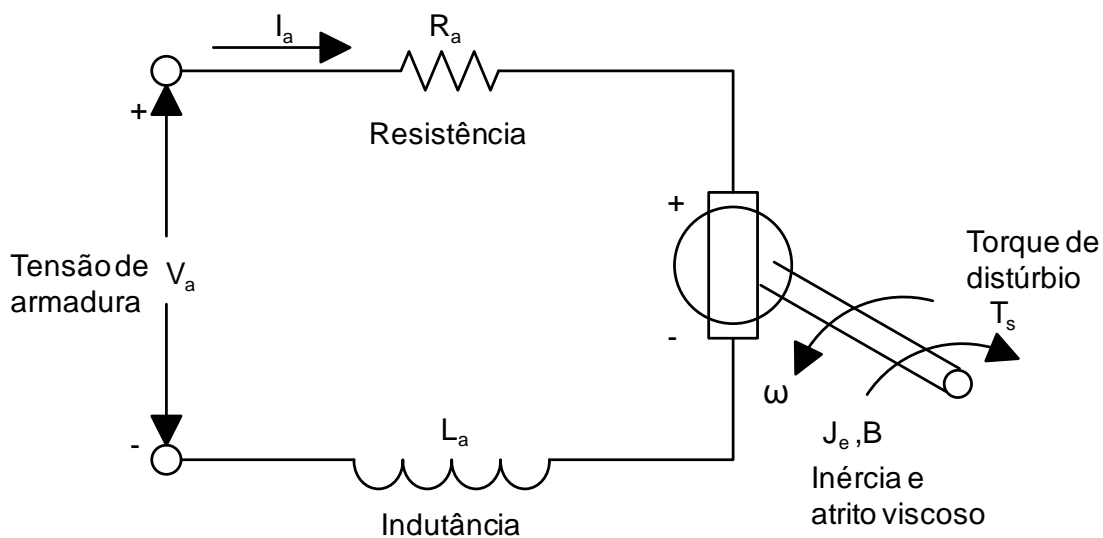


Figura 2.13: Diagrama elétrico de um motor cc [39]

O controle da velocidade é feito por meio da aplicação da tensão de alimentação V_a na armadura do motor. Essa tensão gera uma corrente variável I_a na armadura, criando um campo magnético entre o rotor e o estator, que é responsável pela

geração do torque ou força. Correntes de pico ocorrem por um pequeno período nos momentos de aceleração e desaceleração do motor. As seguintes equações fundamentais governam o movimento no motor cc. A tensão de armadura V_a é obtida pela aplicação da Lei de Kirchoff no circuito da Figura 2.13 [39]:

$$V_a(t) = R_a \cdot I_a + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + K_b \omega(t) \quad (2.15)$$

onde:

$\omega = \text{velocidade angular [rad/s]}$

$I_a = \text{corrente de armadura [A]}$

$R_a = \text{resistência da armadura } [\Omega]$

$L_a = \text{indutância da armadura [H]}$

$K_b = \text{constante de tensão do motor [V/(rad/s)]}$

$t = \text{tempo [s]}$

O torque T_m gerado pelo campo magnético é proporcional à corrente de armadura I_a :

$$T_m(t) = K_t \cdot I_a \quad (2.16)$$

onde:

$K_t = \text{constante de torque do motor [Nm/A]}$

Com o torque desenvolvido pelo motor, é possível acelerar e vencer o momento de inércia no respectivo eixo, superar as forças de atrito e resistir as forças de corte e as cargas de atrito que atuam como distúrbios no eixo, e a equação fica [39] :

$$T_m(t) = J_e \frac{d\omega(t)}{dt} + B \cdot \omega(t) + T_s(t) \quad (2.17)$$

onde:

$J_e = \text{momento de inércia [kg.m}^2\text{]}$

$B = \text{atrito viscoso [Nm/(rad/s)]}$

$T_s = \text{distúrbio de torque estático [Nm]}$

Aplicando a transformada de Laplace nas Equações 2.15, 2.16 e 2.17 tem-se:

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - K_b \cdot \omega(s)}{L_a s + R_a} \quad (2.18)$$

$$T_m(s) = K_t \cdot I_a(s) \quad (2.19)$$

$$\omega(s) = \frac{T_m(s) - T_s(s)}{J_e s + B} \quad (2.20)$$

Dois importantes parâmetros de projeto são obtidos de [39]:

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a}, \tau_m = \frac{J_e}{B} \quad (2.21)$$

onde:

$$\tau_e = \text{constante de tempo elétrica [s]}$$

$$\tau_m = \text{constante de tempo mecânica [s]}$$

Ambas as constantes de tempo são especificadas pelo fabricante do motor, porém a constante de tempo mecânica aumenta ao considerar a inércia dos demais componentes da máquina [39].

A utilização de dados experimentais durante o processo de modelagem geralmente ocorre em algum momento do processo. Os dados experimentais mostram como o sistema funciona e, em muitos casos, são a única forma de se obter determinados parâmetros do modelo. A técnica utilizada para construção e complementação de modelos a partir de dados medidos é chamada de identificação de sistemas [89].

Uma estratégia de identificação rápida da dinâmica dos acionamentos foi desenvolvida para a construção de modelos virtuais. Nessa estratégia, os códigos de programação NC randomizados são executados e as posições de *set-point* e atual são medidas. Devido a limitações de excitação geradas pelo interpolador, o modelo obtido não garante a convergência dos parâmetros reais do sistema de controle; porém, os modelos obtidos capturam as propriedades dinâmicas mais relevantes, permitindo simular, com exatidão, os erros de *tracking* e de contorno [90].

As formas de utilização da identificação de sistemas para fins de modelagem podem ser, apresentadas de 3 maneiras [89]:

- Executar experimentos para analisar o comportamento de variáveis que influenciam no problema;

- Construir modelos para descrever a dependência das saídas em relação às entradas, onde não há nenhum conhecimento físico do que está acontecendo no sistema;
- Utilizar os dados experimentais para determinação dos parâmetros não conhecidos de um modelo obtido por modelagem física;

A aplicação da identificação de sistemas para a construção de modelos para prever o comportamento dinâmico em processos de usinagem é utilizada para prever a ocorrência de trepidação. No trabalho de Catania [91], a combinação de um modelo analítico-experimental foi desenvolvida, onde os parâmetros do modelo foram identificados pela análise modal da estrutura da máquina e os resultados foram satisfatórios, com exceção na faixa de frequência entre 1.000 a 2.000 Hz.

A técnica de identificação foi também utilizada para extrair modelos virtuais dos acionamentos de uma máquina-ferramenta. Os autores utilizaram técnicas de algoritmo genético para obter os parâmetros do modelo que proporcionaram melhor ajuste entre posição comandada pelo interpolador e posição atual monitorada pelo CNC aberto. Códigos G foram utilizados para produzir a excitação dinâmica dos acionamentos, porém condições de limites tiveram que ser impostas em determinados parâmetros para garantir a estabilidade dos modelos [79].

3 Proposta do Trabalho

Neste capítulo, são apresentados os objetivos e o método utilizado no desenvolvimento desse trabalho.

3.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo central desenvolver um sistema híbrido de monitoramento do CNC e simulação do sistema de controle e de acionamentos. Por sistema híbrido, entende-se o sistema que combina o monitoramento dos *set-points* de posição do CNC aberto que são utilizados como entrada no modelo de simulação do sistema de controle e acionamentos. Os objetivos específicos são:

- Desenvolver uma nova estratégia de aquisição de dados do CNC aberto;
- Analisar o comportamento dinâmico da trajetória da ferramenta;
- Implementar um modelo do sistema de controle e acionamentos de uma máquina-ferramenta;
- Aplicar o sistema híbrido na manufatura de superfícies complexas.

A proposta do sistema híbrido inclui a geração de trajetórias como um “*Black Box*”, ou seja, os *set-points* de posição são obtidos diretamente do CNC aberto para a respectiva trajetória da ferramenta. Com essa abordagem, a atividade de planejamento da trajetória não precisa ser simulada, pois é realizada pelo CNC aberto. O planejamento da trajetória inclui algoritmos específicos do fabricante do CNC que não são documentados.

Os *set-points* monitorados são utilizados como entrada do modelo do sistema de controle e acionamentos para previsão do erro de contorno. Os dados simulados são comparados com os dados reais. O erro de contorno real é calculado por meio dos *set-points* e dos valores reais de posição dos eixos monitorados pelo CNC aberto. A trajetória da ferramenta aqui estudada, não inclui o processo de corte, mas somente a movimentação dos eixos em vazio.

A abordagem acima difere dos trabalhos já desenvolvidos na área de Virtual CNC, pois é híbrida, envolvendo monitoramento e a simulação com o objetivo de simplificar sua implementação.

3.2 Método de Pesquisa

Durante o desenvolvimento deste trabalho, os métodos de pesquisa experimental, de modelagem e de simulação foram utilizados para a construção do sistema

híbrido. As etapas de desenvolvimento do sistema são apresentadas na Figura 3.1.

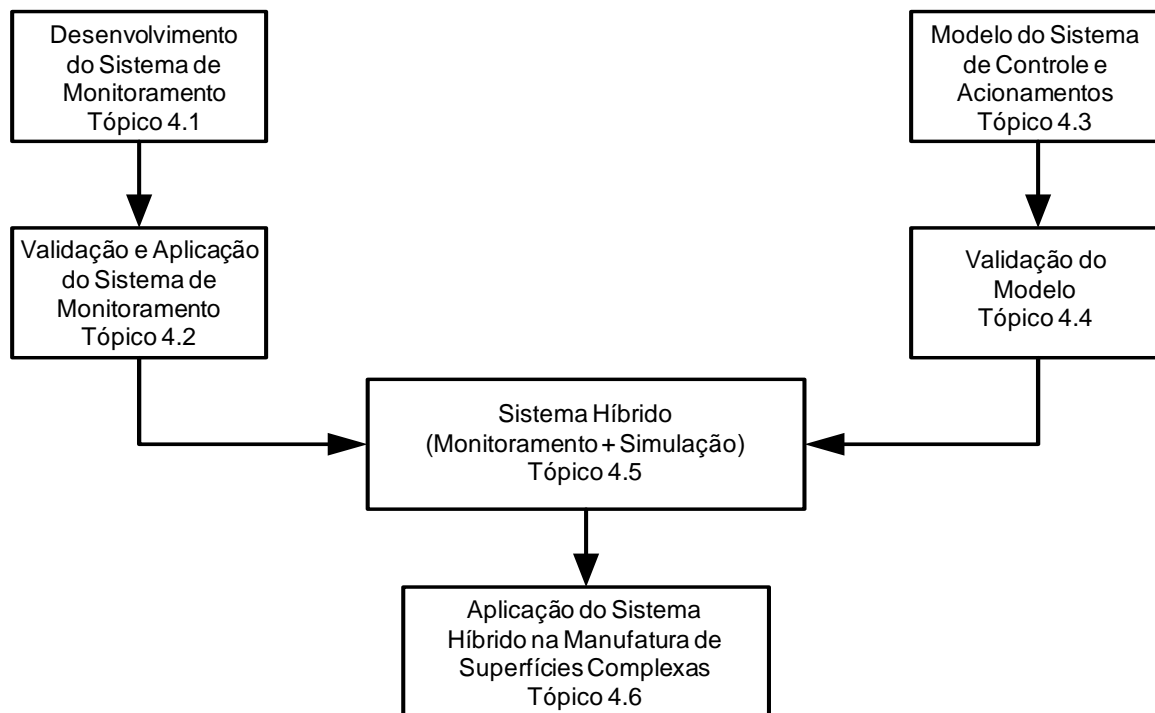


Figura 3.1: Etapas de desenvolvimento do sistema

A proposta apresentada na Figura 3.1 é caracterizada pelas etapas descritas a seguir:

Desenvolvimento do Sistema de Monitoramento: esta etapa consiste no desenvolvimento da programação do *buffer* de dados dinâmico no CNC aberto. Esse *buffer* tem a característica de armazenamento contínuo de dados. Para a retirada dos dados do *buffer* de forma cíclica foi desenvolvida a programação do módulo de transmissão de dados no programa LabVIEW® 8.0, National Instruments Corporation, USA.

Validação e Aplicação do Sistema de Monitoramento: esta etapa é caracterizada pela execução de experimentos que envolvem a validação do sistema de monitoramento do CNC aberto, considerando a resolução da variável monitorada, a especificação do tamanho do bloco de dados a ser transmitido e a comparação dos dados monitorados pelo CNC aberto com dados medidos usando um interferômetro laser Hewlet Packard® 5528A, USA.

Também constituem esta etapa os experimentos de aplicação do sistema de monitoramento para investigações sobre o desvio circular em altas velocidades, a influência dos *set-points* gerados no interpolador e a análise do impacto de diferentes velocidades e interpolações no erro de contorno.

As premissas abaixo foram elaboradas para essa etapa:

Premissa 1: o sistema coleta dados com resolução adequada para análises de desempenho do processo.

Premissa 2: o tamanho do bloco de dados influencia na taxa de amostragem do sistema.

Premissa 3: os dados de velocidade monitorados pelo sistema desenvolvido são muito próximos da velocidade medida usando o interferômetro laser.

Premissa 4: com o aumento da velocidade, o desvio circular tende a aumentar.

Premissa 5: os *set-points* de posição gerados pelos métodos de interpolação excitam a estrutura da máquina-ferramenta.

Premissa 6: os *set-points* de posição gerados com diferentes velocidade de avanço, tolerância CAM e métodos de interpolação influenciam no erro de contorno.

Modelo do Sistema de Controle e Acionamentos: esta etapa consiste na pesquisa teórica sobre construção de modelos e simulação. Com base nessa pesquisa, foram estudados modelos matemáticos de controladores e de servo acionamentos aplicados na área de máquinas-ferramentas controladas numericamente.

Com a utilização de modelos já desenvolvidos na literatura, foi implementado no *software* Matlab[®], Mathworks[™], USA, o modelo do sistema de controle e acionamentos para uma máquina-ferramenta considerando-se os eixos x, y e z.

O comportamento da resposta em degrau fornece parâmetros que foram utilizados no ajuste inicial das variáveis do modelo do controlador. Também são fonte de dados do modelo, variáveis do servo acionamento pré-configuradas no CNC aberto.

Validação do modelo: a técnica de análise da resposta transitória foi utilizada para validação do modelo. Assim, ao aplicar uma entrada degrau no sistema físico e no modelo, os parâmetros reais e simulados da resposta foram utilizados para a validação do modelo.

A premissa abaixo foi elaborada para essa etapa:

Premissa: a resposta à entrada degrau do modelo deve ficar muito próxima da resposta real.

Sistema Híbrido: a proposta de um modelo híbrido inclui a consideração da geração de trajetórias como um “*Black Box*”, onde se aplica o sistema de monitoramento desenvolvido para monitorar os *set-points* e se utiliza desses dados para a simulação do erro de contorno no modelo simplificado do controlador.

A proposta de simplificação da implementação do sistema é obtida por meio do monitoramento dos *set-points* de posição dos eixos, pois, dessa forma, não é necessário desenvolver algoritmos para executar as seguintes etapas, que são desempenhadas pelo CNC real:

- Interpretação do código NC;
- Transformação do sistema de coordenadas considerando a correção do raio e da altura da ferramenta;
- Ajuste de velocidade (*Look ahead*);
- Planejamento da trajetória no interpolador (interpolações linear/circular/*spline*, aceleração/desaceleração, *set-points* de posição dos eixos).

A abordagem acima difere dos trabalhos já desenvolvidos na área de CNC virtual, pois o monitoramento dos *set-points* de posição, processados pelo CNC real, é integrado no modelo de simulação.

Aplicação do Sistema Híbrido na Manufatura de Superfícies Complexas: esta etapa consiste na aplicação do sistema no monitoramento dos *set-points* de posição dos eixos para uma trajetória conhecida e na utilização do modelo para simulação das posições, caracterizando-se a abordagem híbrida apresentada no item 3.1. Os dados de *set-point*, assim como os de posição real dos eixos, são utilizados para determinar o erro de contorno real, permitindo a comparação dos resultados reais e simulados, além do respectivo ajuste fino dos parâmetros do controlador para que se obtenha o resultado do erro de contorno simulado próximo do erro de contorno real.

A premissa abaixo foi elaborada para essa etapa:

Premissa: o erro de contorno máximo simulado nas regiões curvas, pode ficar próximo do erro de contorno máximo real nas mesmas regiões.

4 Desenvolvimento do Sistema Híbrido

Neste capítulo, é apresentado o desenvolvimento do sistema de monitoramento com sua respectiva validação e aplicação, assim como, a implementação do modelo do sistema de controle e acionamentos e validação do modelo. No final do capítulo é apresentado o sistema híbrido e sua aplicação na manufatura de superfícies complexas.

4.1 Sistema de Monitoramento

O conceito da estratégia de aquisição de dados do CNC aberto desenvolvido em trabalhos anteriores [92, 93, 94] foi utilizada e otimizada neste trabalho. A estratégia de aquisição aqui discutida foi aplicada num CNC aberto comercial, diferindo dos trabalhos anteriores por reduzir o atraso da transmissão de dados, aumentar a frequência de coleta para 250 Hz (máquina LPZ 500) e proporcionar melhor resolução da variável monitorada.

Essa estratégia utiliza um procedimento interno do CNC aberto chamado de ação síncrona, que pode ser programada diretamente no programa NC. As ações síncronas gravam continuamente os dados monitorados num *buffer* e os dados são transmitidos ciclicamente para um computador pessoal onde são armazenados.

O sistema de transmissão de dados do CNC aberto para o computador pessoal foi desenvolvido com o *software* LabVIEW[®] 8.0, *National Instruments Corporation*, USA. A comunicação do PC com o CNC foi desempenhada pela placa CP5511 e pelo servidor NCDDE (*NC dynamic data exchange*), Siemens AG [95].

Nos próximos tópicos, são apresentados o diagrama de fluxo de dados do sistema, e o desenvolvimento dos módulos de aquisição e de transmissão de dados. Ambos os módulos foram desenvolvidos para realizar a aquisição de dados continuamente.

4.1.1 Diagrama de Fluxo de Dados (DFD)

A Figura 4.1 ilustra o diagrama de fluxo de dados previamente desenvolvido [92] e utilizado neste trabalho.

O diagrama de fluxo de dados apresentado na Figura 4.1 é constituído dos seguintes componentes:

- Entidades externas: CNC aberto e usuário;

- Processos: aquisição, transmissão e análise dos dados;
- Depósito de dados: *buffer* e armazenamento de dados.

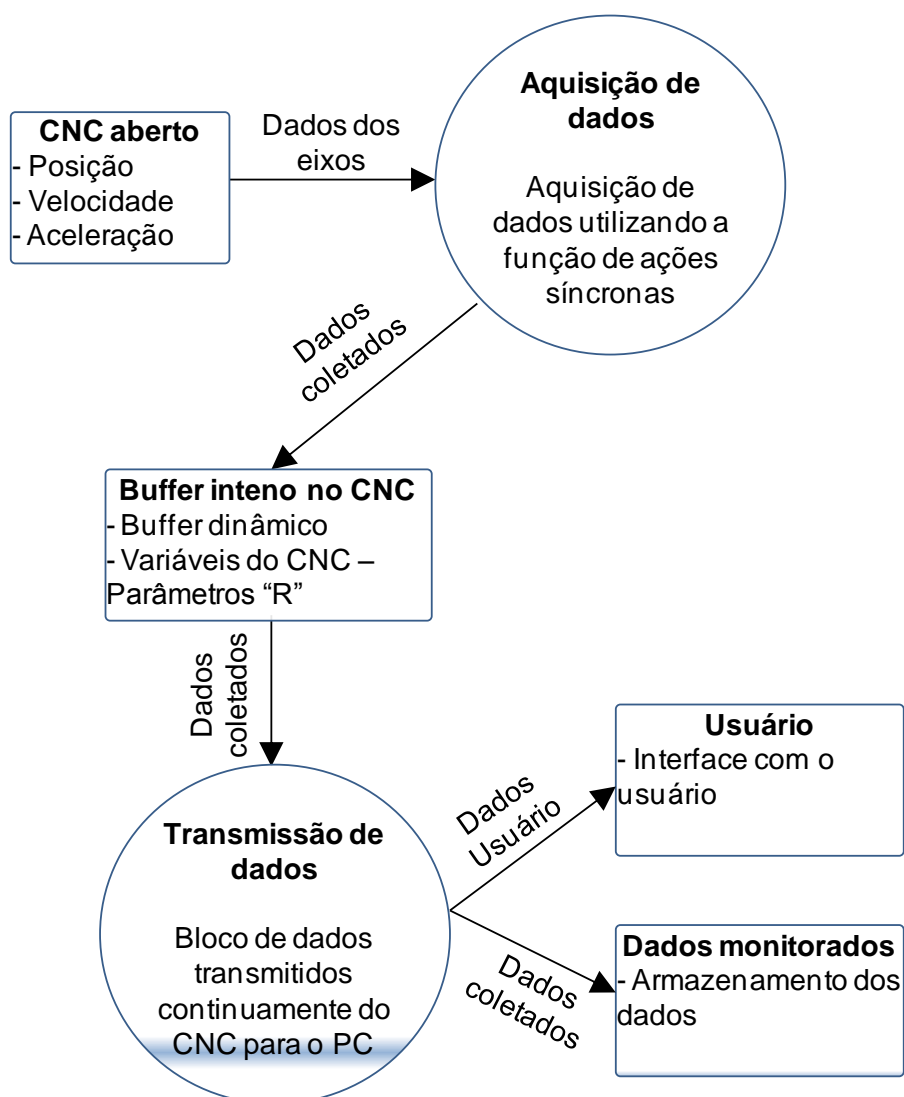


Figura 4.1: Diagrama de fluxo de dados do monitoramento

O processo de aquisição de dados faz a coleta de dados do CNC aberto e os armazena num *buffer*. O processo de transmissão e análise dos dados executa a coleta e o processamento dos dados, sendo os valores de variáveis monitoradas armazenados num arquivo texto [92]. Neste trabalho, o *buffer* é dinâmico, ou seja, os dados são temporariamente armazenados e retirados pelo módulo de transmissão de dados de forma cíclica.

Nos itens 4.1.2 e 4.1.3 são apresentados, respectivamente, o funcionamento detalhado dos módulos de aquisição e de transmissão dos dados.

4.1.2 Módulo de aquisição de dados

A proposta do módulo de aquisição de dados é a criação de um *buffer* diretamente no CNC para armazenamento dos dados do nível de controle do servo. Dessa forma, pretende-se evitar os atrasos de comunicação presentes na aquisição de dados via rede e aumentar a taxa de aquisição de dados [92].

Como definido no manual do fabricante, “As ações síncronas são instruções programadas pelo usuário que são avaliadas no ciclo de interpolação em sincronismo com a execução do programa NC. Se a condição programada nas ações síncronas é satisfeita, ou caso não seja especificada nenhuma condição, então as ações determinadas pela instrução são ativadas em sincronismo com o programa NC que está em execução” [96].

Para a construção do *buffer*, foram utilizadas as variáveis do CNC chamadas de parâmetros R. Nos parâmetros R são armazenados os dados das variáveis de velocidade de avanço e tempo de usinagem. São 100 parâmetros R que podem ser expandidos até a quantidade de 1.000, porém não foi necessária essa expansão para os experimentos desse trabalho [92].

No Anexo 1 é apresentada a programação da ação síncrona desenvolvida para o módulo de aquisição de dados contínua. A ação síncrona é incluída no início do programa NC e ativada automaticamente durante a execução do programa.

A lógica de funcionamento da ação síncrona desenvolvida é apresentada abaixo:

- Toda vez que a o valor da variável contador (ver Anexo 1 variável \$AC_MARKER) for menor ou igual a 10 é executada a ação que armazena o valor da variável desejada no parâmetro R correspondente. Os valores dos parâmetros condicionais são inicializados e incrementados durante a execução do programa. O índice dos parâmetros R é incrementado até 100 e reinicializado ciclicamente para o armazenamento contínuo dos dados. A quantidade máxima de dados simultaneamente gravados é de 10. Essa lógica é executada no tempo de ciclo do interpolador, que, para o CNC da máquina LPZ 500, é de 0,004 s.

4.1.3 Módulo de transmissão de dados

O módulo de transmissão de dados foi desenvolvido com o *software* Labview® 8.5. A lógica de programação do Labview® é baseada no fluxo de dados programáveis.

O módulo de transmissão de dados desenvolvido executa a comunicação entre o CNC e o PC conforme descrito no item 4.2. O programa faz a leitura cíclica dos 100 parâmetros R.

O Anexo 2 ilustra o diagrama de blocos desenvolvido no Labview[®] para o módulo de transmissão dos dados.

O diagrama de blocos apresentado no Anexo 2 funciona com a seguinte lógica:

- Inicialmente o programa monitora a condição da tecla *NC start* e habilita a execução do restante do programa se a condição for satisfeita. Com a execução habilitada, o programa faz a leitura de bloco de dados de tamanho 50, alternando entre os blocos de 0 a 49 e 50 a 99 continuamente. Os dados são armazenados num arquivo texto.

As informações transmitidas para o PC são utilizadas pelo módulo de simulação do sistema de controle e acionamentos.

4.2 Validação e Aplicação do Sistema de Monitoramento

Conforme anunciado na proposta do trabalho, as investigações experimentais são apresentadas nesse tópico. Tais investigações são constituídas de ensaios preliminares para desenvolvimento e validação do sistema de monitoramento e de investigações que contemplam a aplicação do sistema.

4.2.1 Validação do Sistema de Monitoramento

Para a validação da estratégia de aquisição de dados do CNC aberto, foram feitas investigações sobre o comportamento da resolução da variável monitorada, especificação do tamanho de bloco de dados e comparação da resposta a entrada degrau dos dados monitorados pela estratégia desenvolvida e pelo interferômetro laser, conforme apresentado nos tópicos seguintes.

4.2.1.1 Análise da resolução da variável monitorada no CNC aberto

Este experimento foi executado no comando SIEMENS 810D do centro de usinagem Discovery 760 Romi[®], apresentado na Figura 4.2.

A seguinte premissa foi elaborada para a execução do experimento:

Premissa: o sistema coleta dados com resolução adequada para análises de desempenho do processo.

Para analisar o comportamento da resolução obtida no monitoramento *online*, foram utilizadas as seguintes velocidades de avanço: 600, 1.000, 6.000 e 12.000 mm/min [97].



Figura 4.2: Centro de Usinagem Discovery 760 Romi®

O experimento foi executado em um centro de usinagem de três eixos. Os dados de posição e velocidade do eixo X foram simultaneamente coletados através de um *trigger* que congela os dados do sistema de controle no início da movimentação e os coloca num *buffer* indexado para posterior recuperação. As variáveis do CNC que foram monitoradas são \$VA_IM1[X1] e \$VA_VACTM [X1], que correspondem respectivamente à posição e à velocidade do eixo X. Apesar do centro de usinagem possuir três eixos, foi escolhido somente o eixo X para monitoramento, pois se assume que a análise para o eixo X pode ser estendida para os demais eixos, devido à taxa de amostragem ser a mesma [97].

Além disso, para a coleta dos dados foi elaborado o seguinte programa NC [93]:

```
G54
G1 X0 Y0 F1000
F (Programado com 4 níveis diferentes 600, 1000, 6000, 12000 mm/min)
$AC_MARKER[1]=0
$AC_MARKER[2]=1
ID=1 DO $R[$AC_MARKER[1]]=$VA_IM1[X1] $R[$AC_MARKER[2]]=
$VA_VACTM[X1] $AC_MARKER[1]=$AC_MARKER[1]+2 $AC_MARKER[2]=
$AC_MARKER[2]+2
X80
M30
```

O programa NC executa um movimento linear no eixo X entre as coordenadas 0 e 80 mm, sendo este comprimento suficiente para o eixo acelerar e atingir a velocidade programada. Isso é feito no programa pela linha de programação ID=1. Os valores de posição e velocidade do eixo X são assim armazenados ciclicamente no *buffer* do CNC a cada 10 ms e transmitidos para um arquivo com o sistema de monitoramento desenvolvido [92].

4.2.1.2 Dimensionamento do tamanho do bloco de aquisição de dados

Este experimento tem o objetivo de identificar o tamanho do bloco de dados que proporcione maior taxa de amostragem, assim como melhor sincronização na transmissão de dados entre o CNC e o computador pessoal. A seguinte premissa foi elaborada para este experimento:

Premissa: o tamanho do bloco de dados influencia na taxa de amostragem do sistema.

Os equipamentos que foram utilizados para realização deste experimento são o centro de usinagem de alta velocidade LPZ 500 (ver Figura 4.3) e a placa de aquisição de dados CP5511 (ver Figura 4.4). A LPZ 500 é uma máquina para a usinagem em cinco eixos simultâneos, porém, para os experimentos, foi operada utilizando-se os 3 eixos cartesianos X, Y e Z.



Figura 4.3: Centro de usinagem LPZ 500

A placa CP5511 (ver tópico 4.2) que faz comunicação entre o computador pessoal e o CNC da máquina-ferramenta por meio do protocolo OPI (*Operator Panel Interface*) com velocidade de 1,5 Mbps, protocolo proprietário da SIEMENS, é apresentada na Figura 4.4.

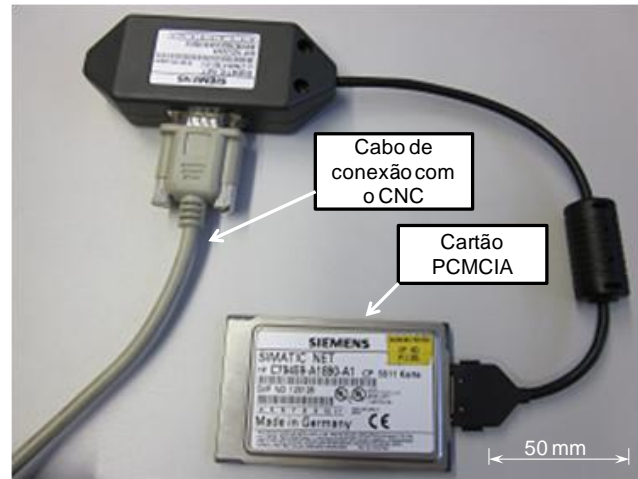


Figura 4.4: Placa de aquisição de dados CP5511

Os experimentos foram repetidos 3 vezes. A coleta de dados foi realizada com o sistema de monitoramento desenvolvido, conforme foi apresentado no Capítulo 4.2.

4.2.1.3 Resposta à entrada degrau

Neste experimento, os dados de velocidade do eixo Y da máquina-ferramenta LPZ 500 foram medidos simultaneamente pelo interferômetro *laser* e pelo sistema de monitoramento de dados do CNC. A premissa para este experimento foi:

Premissa: Os dados de velocidade monitorados pelo sistema desenvolvido são muito próximos da velocidade medida pelo interferômetro laser.

A distância percorrida foi linear de 350 mm, com velocidade de avanço programada de 5.000 mm/min.

Para a montagem do instrumento foi utilizada a estação de compensação de temperatura (do ar e do material), umidade e pressão para correção automática da medição do laser. As Figuras 4.5 e 4.6 mostram a montagem do interferômetro laser na máquina LPZ 500 para a medição.

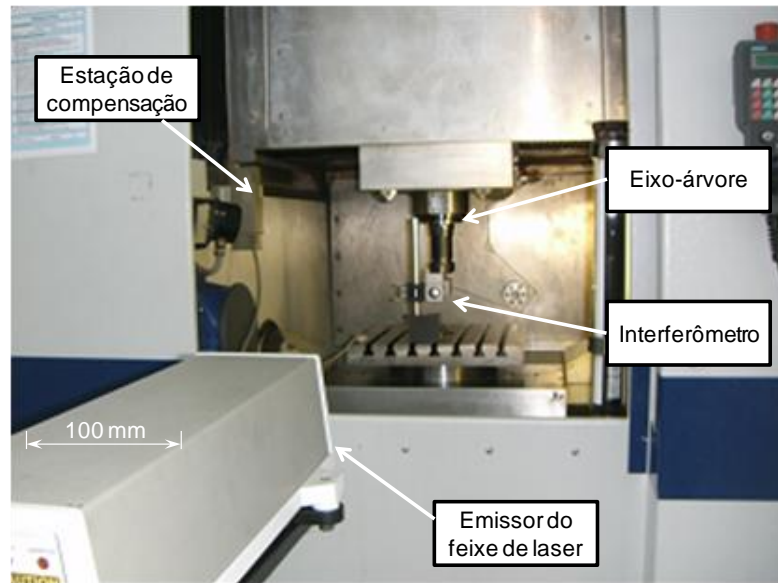


Figura 4.5: Montagem do interferômetro laser para o experimento

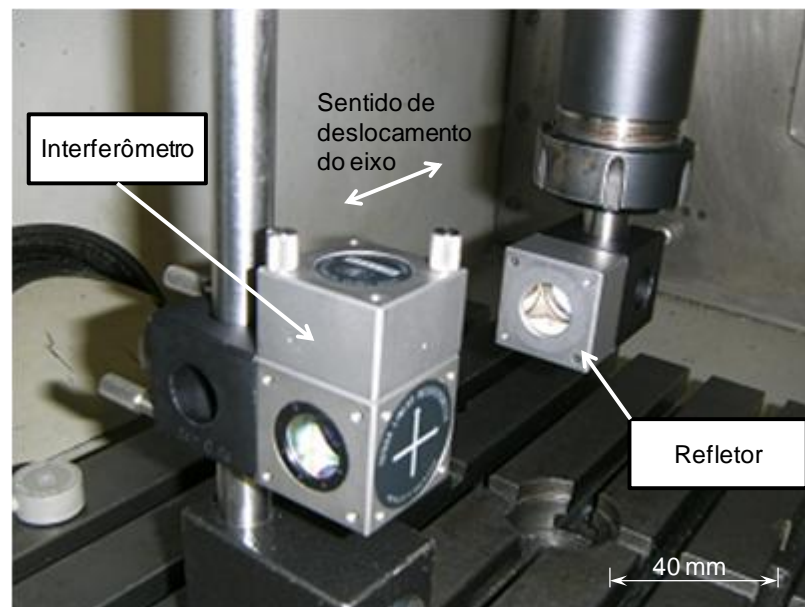


Figura 4.6: Detalhe da montagem do interferômetro

4.2.2 Aplicação do Sistema de Monitoramento

Nesse tópico, a análise do desvio circular sob altas velocidades, a influência dos *set-points* gerados no interpolador e a análise do impacto de diferentes velocidades e interpolações no erro de contorno foram realizadas, conforme apresentado a seguir.

4.2.2.1 Análise do desvio circular sob altas velocidades

Este experimento investiga a influência do aumento da velocidade no desvio circular, comparando-se os dados do CNC aberto com os dados medidos pelo *ballbar*[®]. A seguinte premissa foi elaborada:

Premissa: com o aumento da velocidade, o desvio circular tende a aumentar.

O experimento foi conduzido num centro de usinagem de altas velocidades da marca Hermle AG, modelo C800 U (ver Figura 4.7), com acionamentos de fuso se esferas, escalas de medição óptica e controle CNC Sinumerik[®] 840D.

O valor do raio programado para o movimento circular foi de 150 mm. Este movimento é executado por interpolação circular dos eixos X e Y com a localização do centro do círculo no meio da mesa da máquina, conforme apresentado na Figura 4.8.

Na primeira etapa, as medições do instrumento QC10 *ballbar*[®], Renishaw, UK, e do *Open* CNC foram executadas de forma simultânea, com o valor de velocidade de 6.000 mm/min. Na segunda etapa, somente os dados do *Open* CNC foram medidos com velocidades de 15.000 e 25.000 mm/min, pois o instrumento *ballbar*[®] não poderia ser aplicado nessas condições [98].

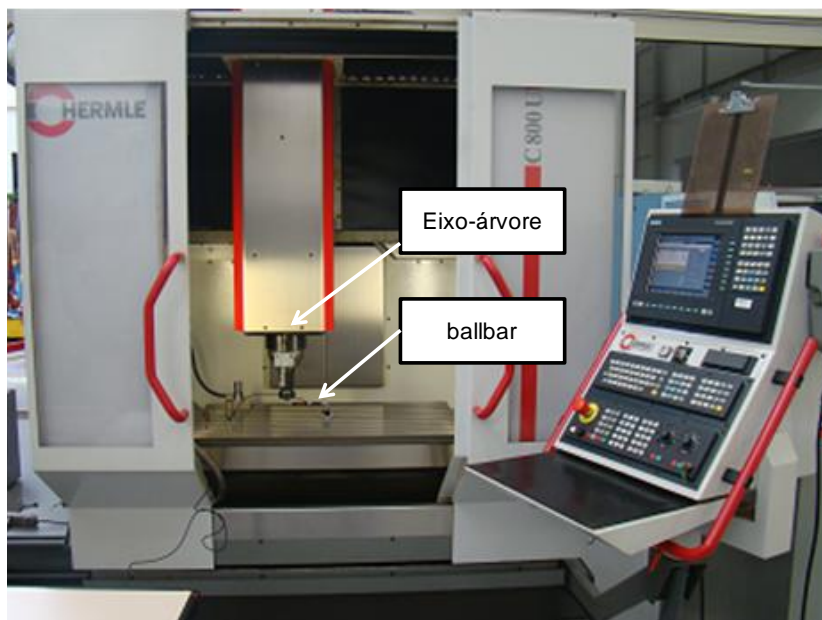


Figura 4.7: Máquina Hermle C800 U com o sistema ballbar

O processo de medição com o *ballbar*[®] é feito em cinco estágios: início do movimento, aceleração, medição, desaceleração e fim do movimento. Para evitar a influência da aceleração e desaceleração, o movimento programado executa duas voltas e o *software* faz a medição depois do ângulo de 180° e termina a

medição antes dos últimos 180° do movimento circular. Isso permite que a máquina-ferramenta atinja a velocidade programada durante o movimento [99].

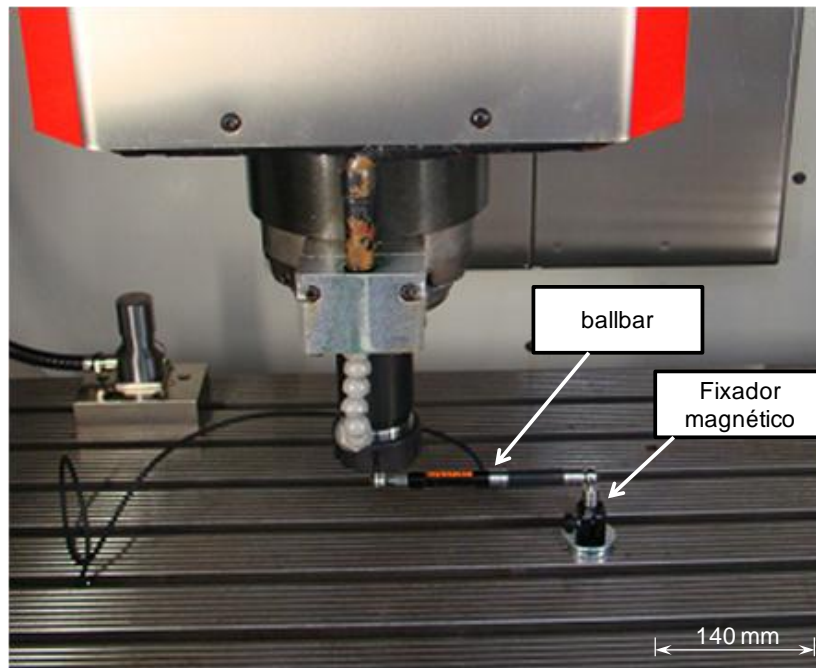


Figura 4.8: Montagem do ballbar

Para os dados do *Open CNC*, também foi evitada a influência da aceleração e desaceleração, conforme descrito no procedimento acima. Os dados de posição e velocidade atuais dos eixos X e Y do *Open CNC* foram coletados com o *software Sinucom NC*[®], Siemens AG, Alemanha.

O *Sinucom NC*[®] faz a comunicação com o CNC por meio da placa CP 5611, que é o modelo com conexão PCI e tem a mesma funcionalidade da placa CP5511 apresentada na Figura 4.4. A taxa de amostragem obtida foi de 333 Hz.

4.2.2.2 Influência dos *set-points* gerados no interpolador

Para esta investigação, a premissa elaborada foi:

Premissa: os *set-points* de posição gerados pelos métodos de interpolação excitam a estrutura da máquina-ferramenta.

Para a investigação da influência de dois tipos de interpolação no comportamento dinâmico da trajetória da ferramenta, o sinal de um acelerômetro *tri-axial* fixado no ponto central da ferramenta (TCP - *Tool Center Point*) da máquina LPZ500 e os sinais dos acionamentos foram simultaneamente monitorados [100]. O sistema de monitoramento desenvolvido nesse trabalho foi utilizado para aquisição dos *set-points* de posição dos eixos.

Os experimentos foram feitos com a aplicação das velocidades e interpolações apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Parâmetros utilizados

Fresamento 3 eixos - Operação de acabamento		
Séries	1	2
Velocidade de avanço [m/min]	2.500	2.500
Método de interpolação	NURBS (tol. 50 µm)	Linear (tol. 50 µm)

Os programas NC dos Anexos 3 e 4, que correspondem à operação de acabamento da superfície complexa apresentada na Figura 4.9, foram utilizados [101].

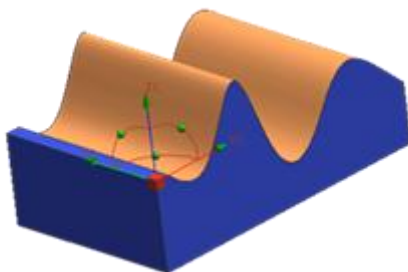


Figura 4.9: Modelo CAD da Superfície complexa [101]

O eixo-árvore foi travado pelo código NC, assim os desvios e as acelerações medidas são resultantes dos eixos lineares e o impacto do processo de usinagem foi desconsiderado, pois somente a movimentação dos eixos foi realizada [100]

A Figura 4.10 mostra o acelerômetro *tri-axial* Kistler® 8692C10M1 com faixa de medição de +/- 10 g e faixa de frequência de 20 Hz a 20.000 Hz.

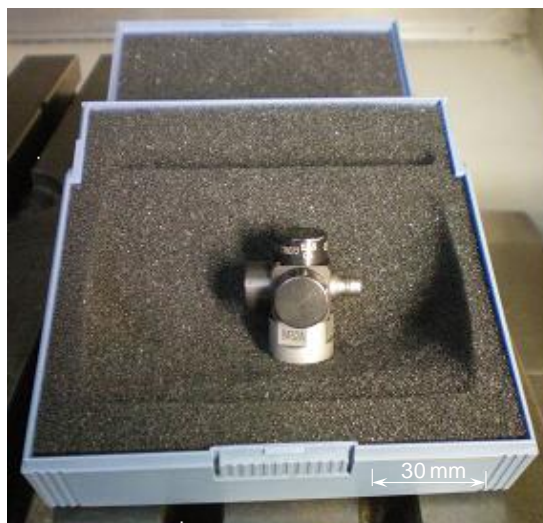


Figura 4.10: Acelerômetro tri-axial Kistler® 8692C10M1

A interpretação dos resultados da medição foi limitada a direção do eixo z, considerando que a dinâmica deste eixo é dominante para o modelo 3D em questão devido ao elevado grau de curvatura e de mudança de sentido de movimentos nessa direção. A Figura 4.11 mostra a montagem do sensor no ponto central da ferramenta [100].

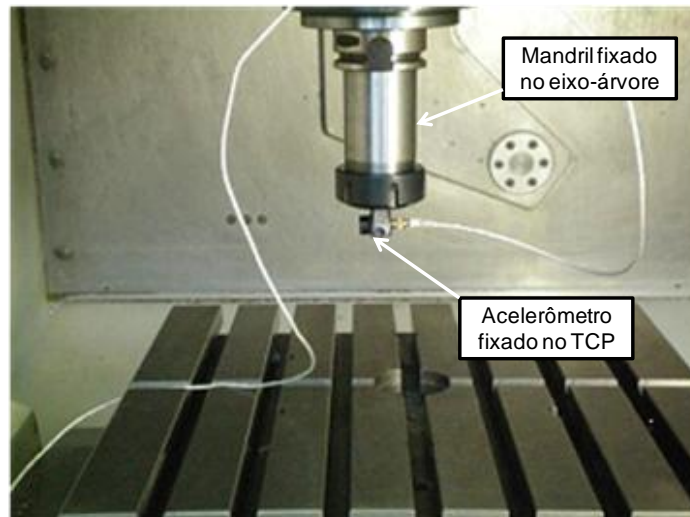


Figura 4.11: Montagem do acelerômetro no ponto central da ferramenta [100].

A análise do impacto de diferentes velocidades e interpolações no erro de contorno é apresentada no próximo tópico.

4.2.2.3 Análise do impacto de diferentes velocidades e interpolações no erro de contorno

Utilizando o mesmo modelo CAD da investigação do tópico anterior, esse experimento foi elaborado para analisar o impacto de diferentes velocidades de avanço, tolerância CAM e métodos de interpolação no erro de contorno. Assim, a premissa elaborada foi:

Premissa: Os *set-points* de posição gerados com diferentes velocidade de avanço, tolerância CAM e métodos de interpolação influenciam no erro de contorno.

O objetivo deste experimento é analisar o impacto do movimento dos eixos na exatidão da trajetória, considerando o desvio da posição atual com a posição de *set-point* do respectivo eixo, medidas pela régua óptica da máquina e coletados com o sistema de monitoramento desenvolvido neste trabalho. O experimento foi realizado com a configuração de parâmetros apresentada na Tabela 4.2.

Os erros de contorno foram obtidos por um algoritmo que calcula a distância mínima entre as coordenadas de posição reais e uma curva, construída pelos set-points de posição [102].

Tabela 4.2: Parâmetros utilizados no experimento

Fresamento 3 eixos - Operação de acabamento						
Séries	1a	1b	2a	2b	3a	3b
Velocidade de avanço [m/min]	2.500	6.000	2.500	6.000	2.500	6.000
Método de interpolação	NURBS (tol. 5 μm)		NURBS (tol. 50 μm)		Linear (tol. 5 μm)	

4.3 Modelo do Sistema de Controle e Acionamentos

A implementação do modelo do sistema de controle e acionamentos foi realizada com o *software* de simulação de sistemas Simulink[®]. O Simulink[®] é integrado ao *software* Matlab[®]. A seguir, a implementação do modelo e da integração de monitoramento e simulação para a máquina LPZ 500 são apresentados.

4.3.1 Modelo dos acionamentos

No Capítulo 3.3.1, foi discutido como a modelagem matemática pode ser aplicada para obtenção do modelo do servo acionamento. Segundo Lutz e Wendet [9], uma simplificação para este modelo pode ser obtida utilizando-se a função de transferência para dois elementos de primeira ordem com atraso, sendo um deles para representar a parte elétrica e o outro a parte mecânica do sistema controlado. O diagrama de blocos para esse sistema é:

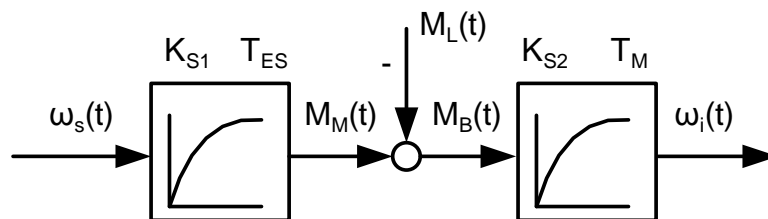


Figura 4.12: Diagrama de blocos para dois elementos de primeira ordem com atraso [9]

onde:

ω_s = velocidade de referência [rad/s]

K_{S1} = ganho da parte elétrica [Nm/s^{-1}]

T_{ES} = constante de tempo do loop de controle [s]

$M_M = \text{momento do motor [kg.m}^2\text{]}$

$M_B = \text{momento de aceleração [kg.m}^2\text{]}$

$M_L = \text{momento de carga [kg.m}^2\text{]}$

$K_{S2} = \text{ganho da parte mecânica [s}^{-1}\text{/Nm]}$

$T_M = \text{constante de tempo mecânica [s]}$

$\omega_i = \text{velocidade atual [rad/s]}$

A função de transferência para o diagrama de blocos da Figura 4.12 fica:

$$G_S(s) = \frac{\omega_i(s)}{\omega_s(s)} = \frac{K_{S1} \cdot K_{S2}}{(1+T_{Es} \cdot s) \cdot (1+T_M \cdot s)} = \frac{K_S}{1+(T_{Es}+T_M) \cdot s+T_{Es} \cdot T_M \cdot s^2} \quad (4.1)$$

A localização dos pólos e zeros fica:

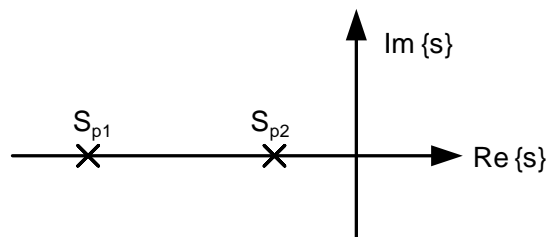


Figura 4.13: Localização dos pólos e zeros [9]

Conforme apresentado na Figura 4.13, a localização dos pólos no semi-plano esquerdo do diagrama indica que o sistema é estável, cuja localização é determinada principalmente pelas constantes de tempo do *loop* de controle e constante de tempo mecânica.

4.3.2 Controlador de posição digital

O controle de posição de máquinas-ferramentas geralmente é implementado por meio da estrutura em cascata com os controladores de posição, velocidade e de corrente. No controle de posição, é utilizado controlador digital proporcional (P) e, no controle de velocidade e de corrente, o controlador digital proporcional-integral (PI) [9].

Nos modelos de simulação, o *loop* de controle de corrente ou de momento é reproduzido por meio do elemento de primeira ordem com atraso [9].

Segundo Lutz [9], o controlador de velocidade PI pode ser interpretado pelo critério de controle ótimo, com um algoritmo integral tipo II, da forma:

$$y_{v,k} = y_{v,k-1} + K_R \cdot \left[\left(1 + \frac{T_d}{T_N} \right) \cdot x_{dv,k} - x_{dv,k-1} \right] \quad (4.2)$$

$$K_R = \frac{T_N}{2 \cdot K_S \cdot T_{EM}} \quad (4.3)$$

onde:

K_R = *ganho proporcional PI* [Nm/s⁻¹]

T_N = *tempo de integração* [s]

T_{EM} = *constante de tempo do loop de controle de corrente* [s]

A transformada z fica:

$$G_{R,v}(z) = \frac{y_v(z)}{x_{dv}(z)} = \frac{K_R \cdot \left[\left(1 + \frac{T_d}{T_N} \right) \cdot z^{-1} \right]}{z-1} \quad (4.4)$$

onde:

T_d = *Tempo de amostragem* [s]

Para o controlador proporcional P o ganho K_V pode ser aproximado pela equação [9]:

$$K_V = \frac{1}{8 \cdot T_{EM}} \quad (4.5)$$

onde:

K_V = *ganho proporcional P* [s⁻¹]

A implementação dos controladores de posição e velocidade no modelo em cascata é apresentada no próximo tópico.

4.3.3 Modelo em cascata do sistema de controle e acionamentos

O modelo do controlador e acionamentos desenvolvido por Lutz e Wendet [9] apresentado foi implementado no ambiente Simulink[®] para simular os 3 eixos da máquina-ferramenta. A Figura 4.14 apresenta o modelo.

O modelo apresentado na Figura 4.14 é constituído de blocos que representam o controlador de posição proporcional (P), o controlador de velocidade proporcional integral (PI), e o servo acionamento. O modelo é chamado em cascata pois o sinal de saída do bloco anterior é o sinal de entrada do bloco subsequente, cuja malha de controle tem uma velocidade maior do que a anterior.

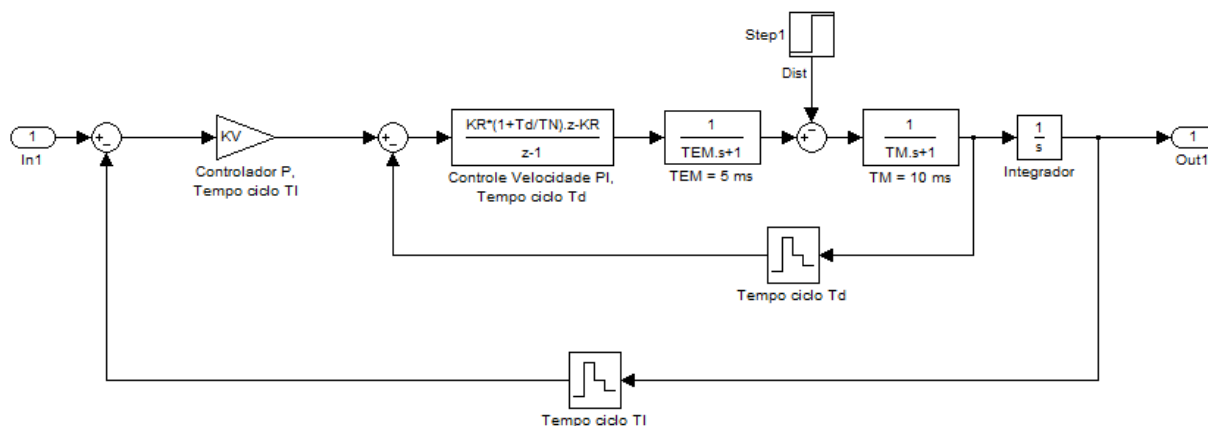


Figura 4.14: Modelo em cascata para controle e simulação de um eixo linear [9]

Os blocos que representam o controle de posição e velocidade são discretos (domínio z), enquanto que os blocos que representam o servo-acionamento são contínuos (domínio s).

A planta ou servo-acionamento elétrico, nesse caso, é representada por duas funções de transferência de um sistema de primeira ordem com atraso.

Os parâmetros de ganho dos controladores, assim como da constante elétrica e mecânica, foram primeiramente obtidos da leitura dos mesmos diretamente no CNC da máquina-ferramenta. Com a comparação dos resultados monitorados para a entrada degrau, os parâmetros dos controladores foram ajustados para que a resposta simulada seja próxima da resposta real.

4.4 Validação do modelo

A técnica de análise da resposta transitória da função de análise linear do *software* Simulink[®], foi utilizada para obter os parâmetros da resposta transitória do modelo.

Foi aplicada uma entrada degrau no eixo Y da máquina LPZ 500 com valor de 5.000 mm/min, e os dados foram monitorados com o sistema desenvolvido.

Os parâmetros da resposta obtidos do modelo foram comparados com os parâmetros reais, e os ganhos dos controladores de posição e velocidade foram ajustados para aproximar o comportamento da resposta simulada com a resposta real.

Os resultados da validação do modelo estão apresentados no Capítulo 5.3.

A integração de monitoramento e simulação, caracterizando o sistema híbrido e sua aplicação na manufatura de superfícies complexas é apresentada no próximo tópico.

4.5 Sistema Híbrido

Para a simulação do erro de contorno na manufatura de superfícies complexas, os *set-points* monitorados pelo *Open CNC* foram os dados de entrada do modelo. Os dados de saída foram as posições individuais dos eixos resultantes da simulação, que foram utilizadas para o cálculo do erro de contorno.

A simulação foi feita no ambiente Matlab[®] e Simulink[®] utilizando o modelo em cascata, apresentado no Capítulo 4.3.3. Foi desenvolvido um fluxograma que executa a rotina apresentada no algoritmo da Figura 4.15.

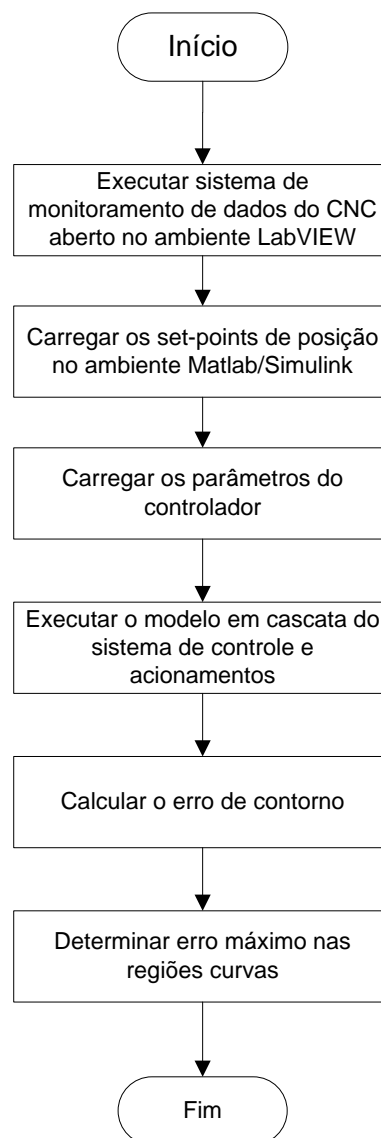


Figura 4.15: Fluxograma de execução do sistema

A validação do sistema foi feita pela comparação do erro de contorno nas regiões curvas da trajetória, considerando o valor máximo nessas regiões para o erro de contorno real e simulado.

4.6 Aplicação do Sistema Híbrido na Manufatura de Superfícies Complexas

A aplicação do sistema híbrido na manufatura de superfícies complexas envolveu o monitoramento dos set-points de posição e a utilização destes no modelo do sistema de controle e acionamentos.

Como já comentado, os dados monitorados e simulados foram utilizados para cálculo dos erros de contorno real e simulado. As posições reais dos eixos foram monitoradas durante a execução do programa NC de uma superfície complexa, ver programa NC no Anexo 3.

As velocidades de avanço foram de 2.500 mm/min e de 8.000 mm/min com tolerância CAM de 0,050 mm para ambas as condições de velocidade.

O refinamento dos parâmetros dos controladores do modelo de simulação foi necessária para cada velocidade de avanço. Com a comparação do erro de contorno real e simulado, os ganhos dos controladores de posição (P) e velocidade (PI), foram ajustados para melhor aproximar o erro de contorno simulado, do erro de contorno real.

5 Análise dos Resultados

Neste capítulo, é apresentada a análise dos resultados dos ensaios para validação do sistema de monitoramento e do modelo de simulação, assim como dos ensaios referentes à aplicação de ambos na manufatura de superfícies complexas.

5.1 Validação do Sistema de Monitoramento

Os resultados dos experimentos apresentados nos três próximos sub-tópicos estão relacionados com o desenvolvimento do sistema de monitoramento de dados do CNC aberto e sua validação.

5.1.1 Análise da resolução da variável monitorada

Esta análise pode ser estendida para outros modelos de CNC, devendo-se observar que, quanto mais rápido for o tempo de ciclo do interpolador do CNC, menor será a resolução da variável para uma mesma velocidade de avanço.

Para verificar se o processo de aquisição de dados está controlado, a resolução da variável monitorada foi analisada por meio do gráfico de limites de controle. Assim, caso haja variação de causas especiais (por exemplo, instrumento de medição fora de calibração) essas serão apresentadas no gráfico. Os limites de controle superior e inferior são calculados pela variação de +/- 3 desvios padrões em relação da média dos dados de resolução [102]

A Figura 5.1 apresenta o monitoramento do comportamento da resolução e a respectiva influência do valor da velocidade de avanço na resolução dos dados coletados.

Conforme ilustra a Figura 5.1, para as velocidades de 600 mm/min, 1.000 mm/min, 6.000 mm/min e 12.000 mm/min, os resultados mostraram que, apesar das velocidades maiores apresentarem maior variabilidade, os valores estão dentro dos limites de controle, demonstrando que não existem causas especiais influenciando no processo. Tais limites são dados pelas médias e desvios padrão das resoluções.

Nos resultados numéricos apresentados no gráfico, nota-se que os desvios padrão da posição para cada uma das velocidades são baixos em relação à exatidão de trabalho comumente obtida num centro de usinagem convencional [97].

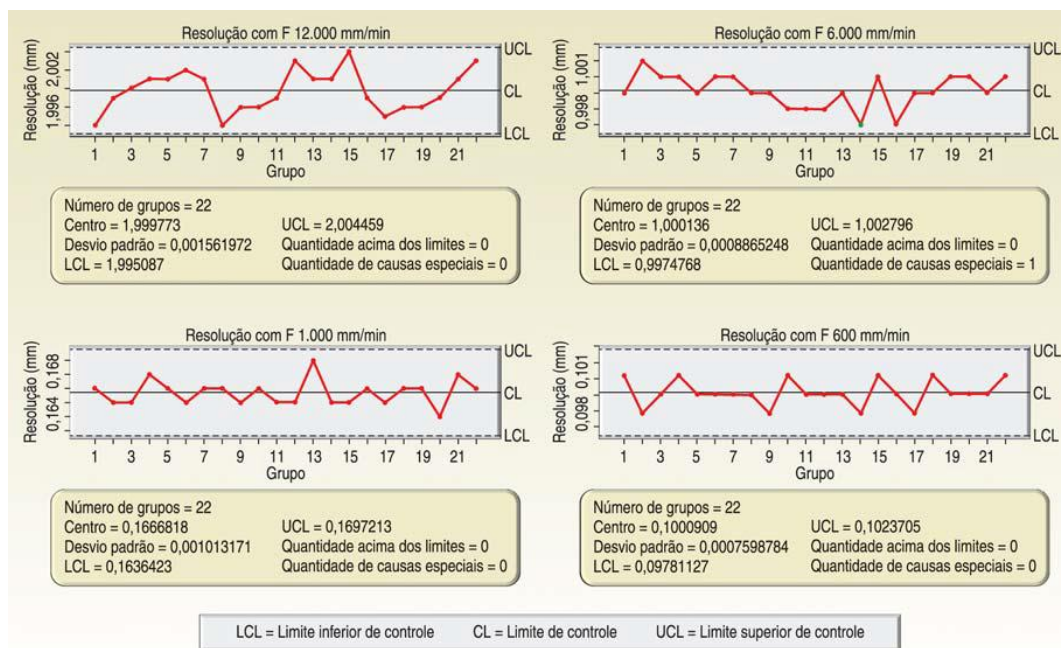


Figura 5.1: Gráfico de controle da resolução para cada valor de velocidade [97]

Assim, verifica-se que, entre os valores observados para a resolução dos dados, ocorre apenas a variabilidade inerente ao processo de monitoramento de dados de um CNC de arquitetura aberta, indicando a inexistência de alguma influência que poderia resultar em valores de resolução discrepantes [97].

Deste resultado observa-se, do ponto de vista prático, que o sistema de monitoramento de dados aqui avaliado possui repetitividade aceitável, com variação máxima em torno de 0,009 mm (valor obtido pela diferença entre o limite superior (2,004) e limite inferior (1,995) para a velocidade com maior variabilidade, que foi a de 12.000 mm/min, (Figura 5.1) resolução com F 12.000 mm/min) [97].

Outra causa que pode influenciar na variação da resolução é o próprio sistema de medição da máquina-ferramenta, que, no caso da Discovery 760, é um *encoder* rotativo. Para as máquinas com *encoders* ópticos lineares, espera-se uma menor variação do dado medido.

5.1.2 Análise para o dimensionamento do tamanho de bloco de aquisição de dados

Para uma otimização na transferência de dados do comando da máquina para o computador pessoal, foi realizado um teste para verificação do tamanho ideal do bloco para o sistema de aquisição na máquina LPZ 500.

Preliminarmente, foram escolhidos blocos de dados com os tamanhos de 25, 50 e 75, com objetivo principal de identificar o bloco com tempo ótimo e com a menor

variabilidade de amostra, permitindo uma rápida aquisição com maior repetitividade.

Foram realizadas 10 repetições para cada tamanho de bloco. No *software* Labview[®] foi utilizada uma ferramenta que registra o tempo em que cada bloco foi armazenado. Através da diferença entre esses tempos, foi elaborada a Tabela 5.1 com a média dos tempos entre leituras e a média final.

Tabela 5.1: Tempos médios de aquisição para cada bloco

	Bloco - 25 dados	Bloco - 50 dados	Bloco- 75 dados
Repetição	Tempo Médio [ms]	Tempo Médio [ms]	Tempo Médio [ms]
Valor 1	11,84	18,91	25,95
Valor 2	11,83	18,82	25,83
Valor 3	11,84	18,85	25,86
Valor 4	11,85	18,90	25,92
Valor 5	11,82	18,91	25,91
Valor 6	11,82	18,80	25,96
Valor 7	11,87	18,84	25,85
Valor 8	11,84	18,96	25,87
Valor 9	11,84	18,87	25,89
Valor 10	11,80	18,90	25,86
Média	11,84	18,88	25,89

A Tabela 5.1 mostra que o tempo de aquisição aumenta com o acréscimo de dados ao bloco de transferência. O bloco de 50 dados possui o dobro de dados que o de 25, mas com um tempo 1,594 vezes maior. Com o bloco de 75, com três vezes mais dados, o tempo aumenta 2,186 vezes.

Foi calculado também o desvio padrão de cada repetição para cada tamanho de bloco (Tabela 5.2), e a taxa de transferência (quantidade de dados pelo tempo) (Tabela 5.3).

Conforme visto na Tabela 5.2, pode-se observar que o desvio padrão também aumenta com o acréscimo de dados ao bloco de transferência, porém com diferença pouco significativa.

Na Tabela 5.3, observa-se uma tendência entre a quantidade de dados e o tempo decorrido. Entretanto, as taxas obtidas para os três tamanhos de bloco são próximas, caracterizando que o tamanho do bloco a ser transferido não influencia significativamente na taxa de transmissão.

Tabela 5.2: Desvio Padrão calculado para cada bloco

	Bloco - 25 dados	Bloco - 50 dados	Bloco- 75 dados
Repetição	Desvio Padrão [ms]	Desvio Padrão [ms]	Desvio Padrão [ms]
Valor 1	1,29	1,77	1,95
Valor 2	1,35	1,80	1,91
Valor 3	1,26	1,70	1,92
Valor 4	1,34	1,68	2,02
Valor 5	1,23	1,87	1,92
Valor 6	1,31	1,69	1,90
Valor 7	1,28	1,75	2,00
Valor 8	1,26	1,79	2,00
Valor 9	1,26	1,93	2,08
Valor 10	1,31	1,86	1,91
Média	1,29	1,78	1,96

Tabela 5.3: Taxa de transferência de dados

Tamanho do Bloco	Taxa de Dados [dados/ms]
25 dados	2,11
50 dados	2,65
75 dados	2,90

Além dos cálculos dos tempos, foi realizada uma análise com o uso de uma ferramenta estatística chamada de *boxplot* (diagrama de caixas), que analisa a distribuição dos dados em uma amostra. Na Figura 5.2, estão representados os gráficos tipo *boxplot* dos três tamanhos de bloco para a primeira repetição do teste.

O *boxplot* ilustra as características de um conjunto de dados, onde as linhas horizontais representam três quartis. Na Figura 5.2, a linha vermelha representa o segundo quartil (percentil 50 ou a mediana), as duas linhas horizontais azuis representam respectivamente o primeiro e o terceiro quartis. Os pontos em forma de cruz são os pontos fora das amplitudes interquartis de 1,5 (*outliers*).

Conforme visto na Figura 5.2, observa-se que, para o bloco de 50 dados houve menos *outliers* e melhor simetria. Para o bloco de 75 dados ocorre uma distribuição similar a de 50 dados, porém com mais *outliers* e menor simetria. Para o bloco de 25 dados, os mesmos estão todos abaixo da mediana e possui *outliers* também. Esse comportamento foi observado nas demais repetições.

Conforme a análise apresentada, o bloco de dados de tamanho 50 possui menor número de *outliers* e melhor simetria. Devido a isso, foi o tamanho escolhido para a transferência e sincronização dos dados entre o CNC e o computador.

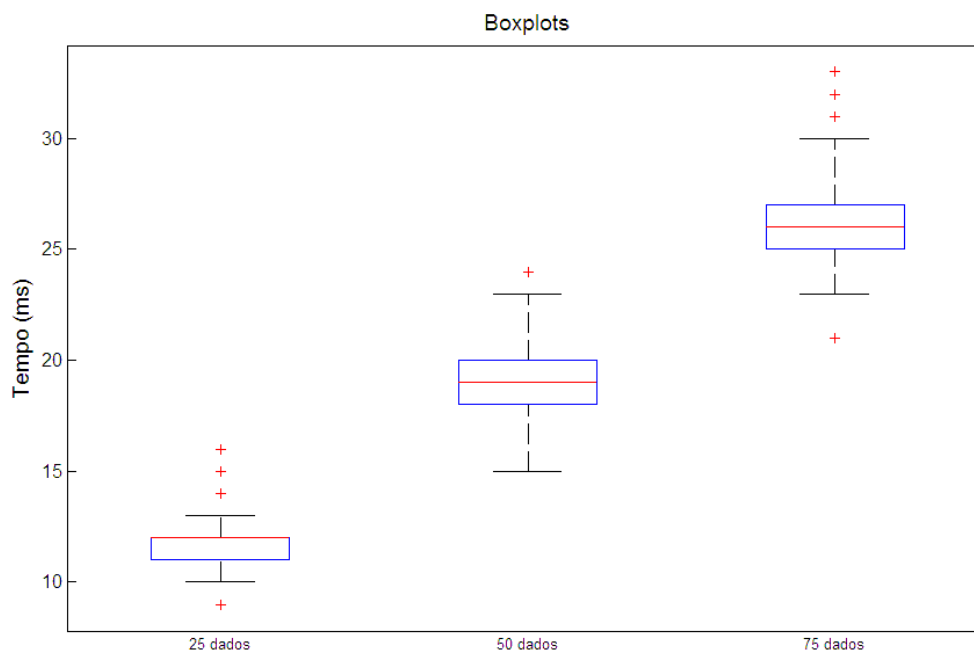


Figura 5.2: Boxplot dos três tamanhos de bloco

5.1.3 Resposta à entrada degrau

Para avaliar a capacidade do sistema de coletar dados das régua óptica e esses dados representarem o comportamento ocorrido no ponto central da ferramenta, o experimento comparando as medições da estratégia de aquisição de dados desenvolvida com a medição de velocidade feita por um interferômetro laser foi realizado.

Os experimentos foram realizados na máquina LPZ 500 com CNC Siemens 840D. A Figura 5.3 ilustra ambos os comportamentos da velocidade real de deslocamento do eixo Y, cujo valor programado foi uma entrada degrau de 5.000 mm/min.

Conforme apresentado na Figura 5.3, os valores para regime permanente são praticamente os mesmos para ambos os sistemas de medição. Observa-se uma pequena diferença devido à sincronização dos dados durante a rampa de subida; já no valor de pico, observa-se uma variação menor que 0.5 %.

Com os resultados apresentados, pode-se afirmar que o sistema de aquisição de dados desenvolvido mede com exatidão o comportamento da variável de interesse.

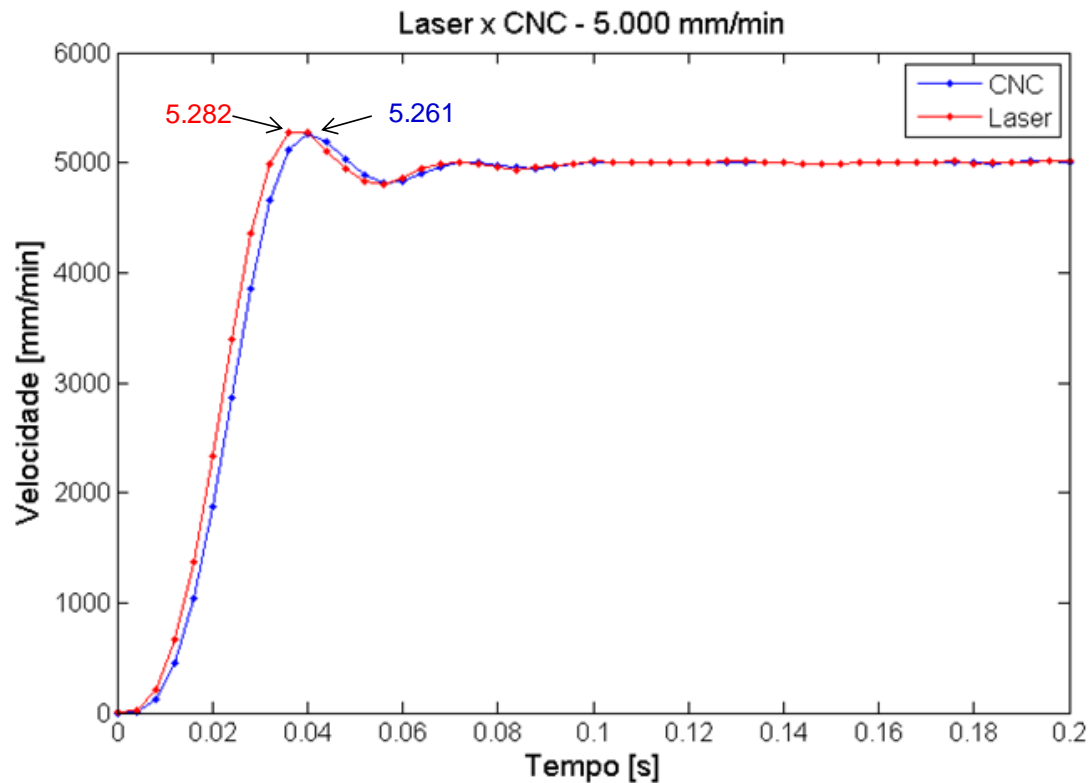


Figura 5.3: Resposta para entrada degrau de 5.000 mm/min - dados do Laser e do CNC

No Capítulo 5.3, a mesma resposta à entrada degrau foi utilizada para referência no dimensionamento do modelo do sistema de controle e acionamentos.

5.2 Aplicação do Sistema de Monitoramento

A seguir, são apresentados os resultados da aplicação do sistema de monitoramento nas investigações sobre desvio circular sob altas velocidades, a influência dos *set-points* no comportamento dinâmico e a análise do erro de contorno para diferentes interpolações e velocidades

5.2.1 Análise do desvio circular sob altas velocidades

Conforme a norma ISO 230-4 [103], os testes circulares podem ser executados tanto pelo sistema de medição ballbar[®] como pelo sinal de retroalimentação do sistema de controle. Esse experimento foi realizado na máquina Hermle[®] C800 U.

A aquisição do sinal atual de posição medido pelas réguas ópticas da máquina-ferramenta foi feita de forma simultânea com medição pelo instrumento ballbar[®]. Foi programado um movimento circular com raio de 150 mm e velocidade de

avanço de 6.000 mm/min. Esta velocidade foi monitorada e a mesma atingiu o valor programado para o movimento [98].

A Figura 5.4 apresenta os gráficos do desvio circular obtidos pelo ballbar® e pelo CNC aberto para a velocidade de 6.000 mm/min.

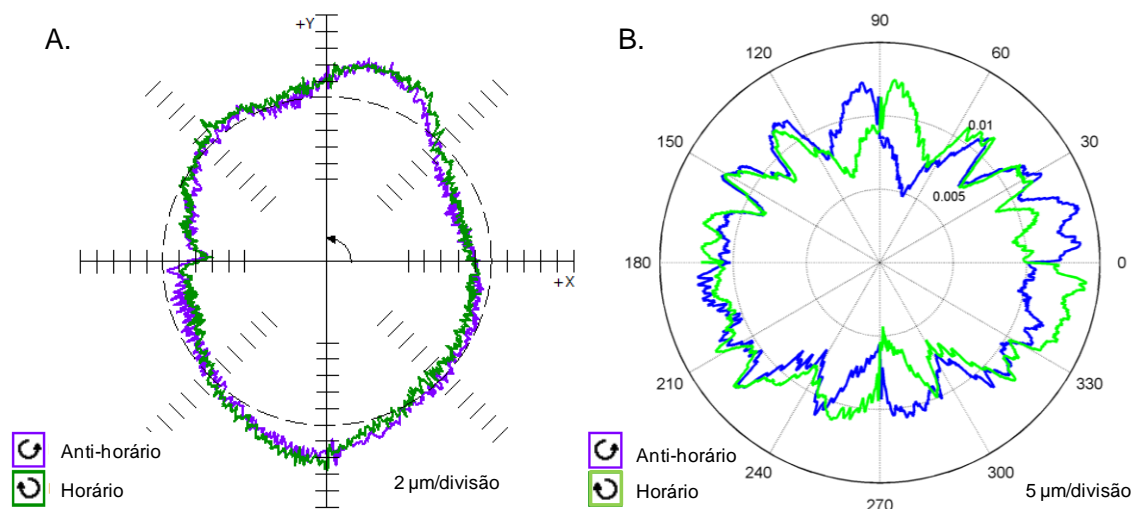


Figura 5.4: Desvio circular: Ballbar® (A), CNC aberto (B)

O desvio circular foi calculado pela distância radial mínima entre dois círculos concêntricos ajustados na trajetória (zona mínima entre círculos), conforme recomenda a norma ISO 230-4 (2005) [103]. A Tabela 5.4 apresenta os valores obtidos no experimento.

Tabela 5.4: Desvios circulares para o ballbar® e CNC aberto com 6.000 mm/min [98]

Método	Horário	Anti-Horário
Ballbar® [µm]	10.9	10.9
Open CNC [µm]	9.7	9.1

Na Tabela 5.4, é observado que a maior diferença entre o desvio circular medido pelo ballbar® e pelo CNC aberto é 1,8 µm. Essa diferença corresponde a 16,5% do desvio circular da máquina que foi medido com o instrumento ballbar®. Ela ocorre porque os dados monitorados pelo CNC aberto são obtidos das réguas ópticas, já os dados do ballbar® são medidos na ponta do eixo-árvore.

Para avaliação do desvio circular sob altas velocidades foi considerado somente os sinais do CNC aberto, pois o ballbar® não pode ser aplicado. O mesmo movimento circular foi executado em ambos os sentidos com as velocidades de avanço de 15.000 e 25.000 mm/min, e replicado três vezes. A Figura 5.5 apresenta os respectivos desvios circulares.

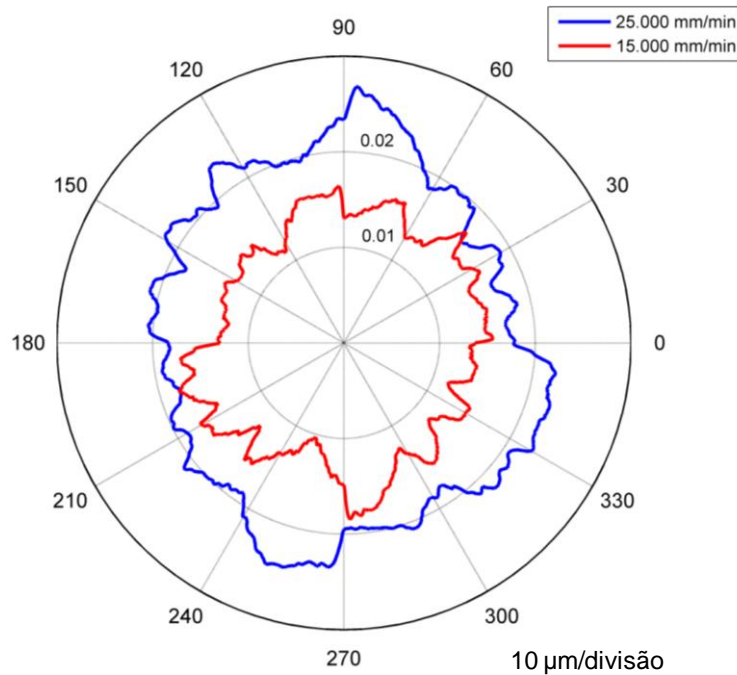


Figura 5.5: Desvio circular sentido horário para velocidades de 25.000 e 15.000 mm/min

Na Figura 5.5 é ilustrado que, com o aumento da velocidade o erro radial também aumenta. Picos de erro ocorrem nas regiões dos ângulo de 90° e 270° para as respectivas velocidades de 15.000 e 25.000 mm/min. Uma possível causa para essa situação é a inversão do movimento do eixo Y da máquina para a realização da trajetória circular.

A norma ISO 240-4 [103] define que o erro radial é a diferença entre a trajetória atual menos a trajetória nominal ou de *set-point*. Para o cálculo do desvio radial, foi localizado matematicamente o centro da trajetória atual, subtraindo-se a distância do centro até a coordenada medida do raio teórico de 150 mm.

Na Tabela 5.5, são apresentados os desvios circulares e o erro mediano radial para as diferentes velocidades e sentidos de movimentação. O termo G_f é utilizado para denominar o desvio circular calculado pelos sinais do *Open CNC*. Esses resultados são utilizados como indicadores comparativos dentre as velocidades utilizadas [98].

Tabela 5.5: Desvio circular e erro radial medidos pelo *Open CNC* [98]

Valores	15.000 mm/min		25.000 mm/min		
	Sentidos	Horário	Anti-horário	Horário	Anti-horário
G_f [μm]		8,2	8,7	10,1	9,8
Erro mediano radial [μm]		14,1	14,1	19,9	20,4

Os resultados apresentados na Tabela 5.5 mostram que o desvio circular é menos afetado do que o erro radial com o aumento da velocidade. O desvio circular para a velocidade de 15.000 mm/min é 1,9 μm menor do que a velocidade de 25.000 mm/min, provavelmente pela influência do aumento da velocidade.

O erro mediano radial aumentou com o aumento da velocidade, chegando a 20 μm para a velocidade de 25.000 mm/min. Esse comportamento demonstra a influência do *servo-lag* ou *following error* e, conseqüentemente, o aumento no erro de contorno [98].

O aumento do *following error* em altas velocidades é abordado na norma ISO 230-4 (2005). No entanto, não há recomendações na norma para análise da influência do aumento da velocidade de avanço no desvio da trajetória.

5.2.2 Influência dos *set-points* gerados no interpolador

Este experimento verifica a influência dos *set-points* gerados no interpolador no comportamento dinâmico da trajetória para as interpolações linear e *spline* com tolerância CAM de 0,050 mm e velocidade de avanço de 2.500 mm/min.

Na Tabela 5.6, as frequências dominantes, medidas pelo acelerômetro no ponto central da ferramenta, são apresentadas. Para ambas interpolações as frequências dominantes ocorrem praticamente no mesmo valor. Nas Figuras 5.6 e 5.7, o espectro de frequência ilustra que, nas frequências de 781 e 770 Hz o valor da aceleração é o mais elevado, provavelmente por um modo de vibração da estrutura da máquina ocorrer nessas frequências [100].

Tabela 5.6: Resultados para interpolação linear e *spline* com 2.500 mm/min [100]

Variáveis de resposta	Linear	Spline
Frequência dominante f_1 [Hz]	20	19
Frequência dominante f_2 [Hz]	781	770
Frequência dominante f_3 [Hz]	1925	1925
Velocidade de avanço média v_f [mm/min]	2213	2368
Tempo da trajetória t [s]	4,192	3,876

Nas Figuras 5.6 e 5.7, os respectivos espectros de frequência, obtidos pela transformada rápida de Fourier (algoritmo para calcular a transformada discreta de Fourier em computadores), são apresentados.

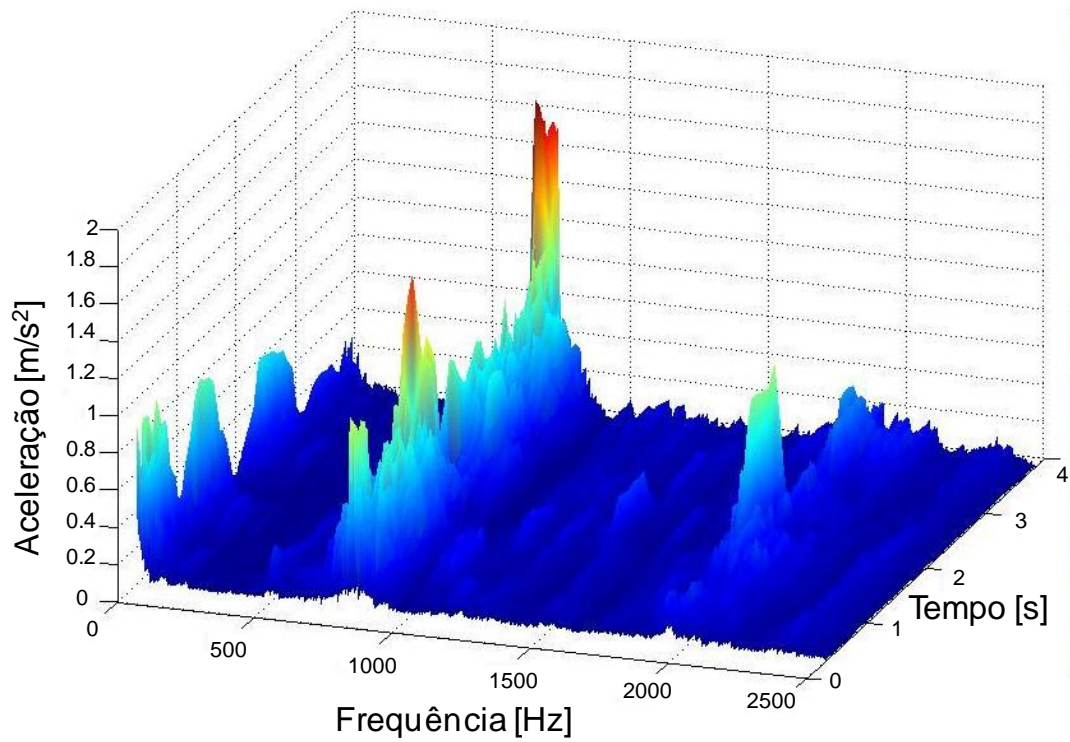


Figura 5.6: Espectro de frequência do eixo z com interpolação linear [100]

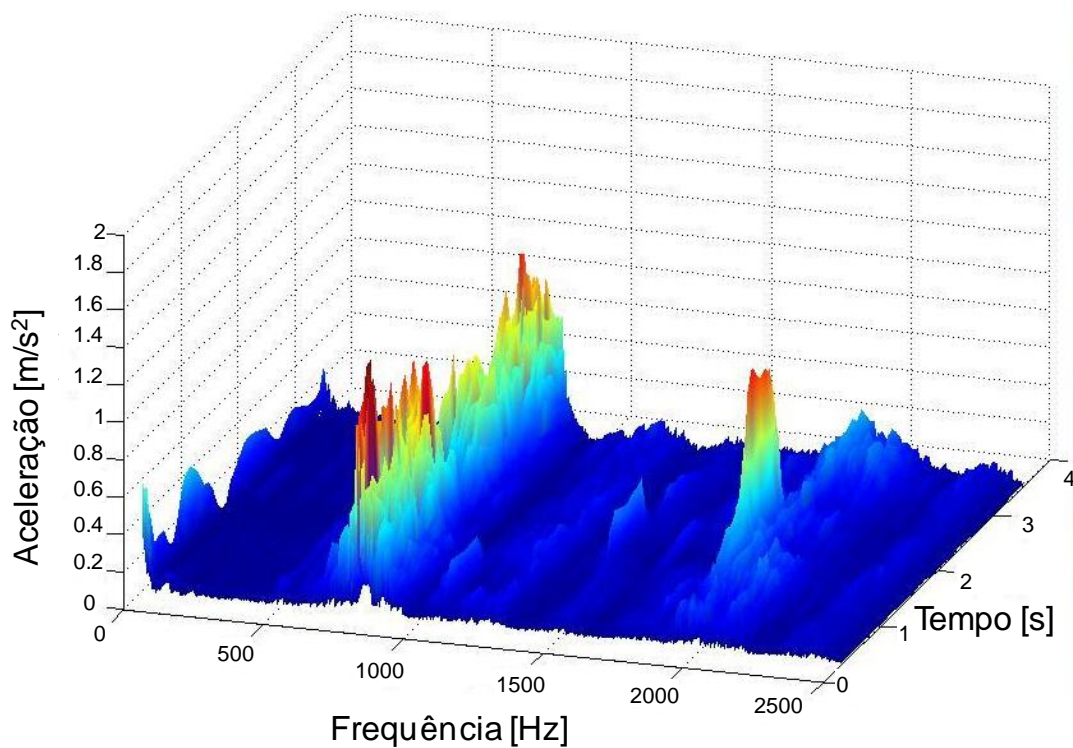


Figura 5.7: Espectro de frequência do eixo z com interpolação spline [100]

Nos espectros de frequência das Figuras 5.6 e 5.7 verifica-se que a amplitude do sinal de aceleração varia de forma diferente ao longo da trajetória. O tempo de

percurso da trajetória é menor para a interpolação *spline* devido a condição estável da velocidade de avanço, que pode ser observado na Figura 5.8.

Observa-se que há uma diferença no comportamento da aceleração para ambas as interpolações, porém não há diferenças significativas na amplitude da aceleração, exceto o pico de aceleração de $1,6 \text{ m/s}^2$ que ocorre no final do movimento para a interpolação linear (Figura 5.6). Essa condição pode ser causada pela alta variação da velocidade de avanço, apresentado no final do movimento na Figura 5.8.

Conforme observado na Figura 5.8, a velocidade de avanço para a interpolação *spline* pode ser considerada mais estável do que para a interpolação linear. Essa situação pode ser verificada na amplitude do pico de aceleração que ocorre na Figura 5.6 na região de 781 Hz e tempo de aproximadamente 2 s. Comparando-se a Figura 5.7 na mesma região de frequência e tempo, o pico de aceleração não ocorre.

Na Figura 5.9, a ilustração da região entre 1,5 e 4,5 mm é ampliada para facilitar a visualização da diferença no comportamento dos *set-points* para ambos os tipos de interpolação.

Coforme ilustrado na Figura 5.9, é constatado que os *set-points* de posição são mais uniformemente distribuídos para a interpolação *spline*, justificando o melhor comportamento do sinal de aceleração apresentado para a interpolação *spline* na Figura 5.7. Nota-se também que a distância entre as coordenadas é maior para a interpolação *spline*, principalmente na região de maior curvatura. Isso contribui para que a máquina tenha um espaço maior a ser percorrido no tempo, atingindo assim, maiores valores de velocidade, como apresentado na comparação entre velocidades para as duas interpolações na Figura 5.8. A influência das mudanças de velocidade devido ao ângulo entre os segmentos de reta podem ser desconsideradas para a trajetória estudada, pois com a tolerância CAM de 0,050 mm, não ocorrem inversões acentuadas de movimento entre os segmentos.

Com já comentado, a interpolação linear utiliza o perfil de velocidade trapezoidal para a geração de *set-points*. Assim, elevados valores de *jerk* podem ocorrer, além da descontinuidade apresentada na Figura 5.9 causar a redução da velocidade de avanço real (ver Figura 5.8).

A comparação dos *set-points* de posição monitorados com as coordenadas do programa NC para a interpolação linear é apresentada na Figura 5.10

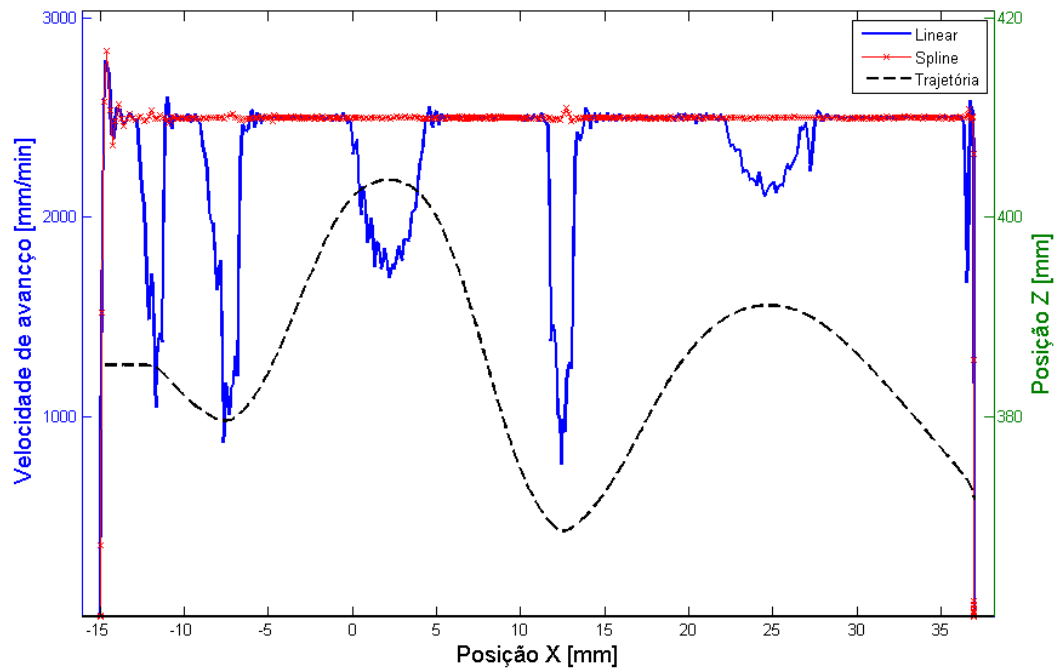


Figura 5.8: Velocidade de avanço atual para as interpolações linear e spline
[100]

Na comparação, observa-se que os dados de *set-point* monitorados exibem uma variação ao longo da curva, esta variação é causada pela tolerância CAM, que neste experimento foi de 0,050 mm. Nota-se também a influência do interpolador ao gerar as coordenadas de *set-point* de posição, "quebrando" a distância a ser percorrida, informada pelo CNC, em pequenos segmentos de reta.

Esse mesmo mecanismo ocorre para a interpolação *spline*, porém, como os *set-points* gerados para a interpolação *spline* são mais uniformemente distribuídos, devido ao emprego da limitação no *jerk* (ver tópico 2.1.1.2), o movimento resultante é suavizado.

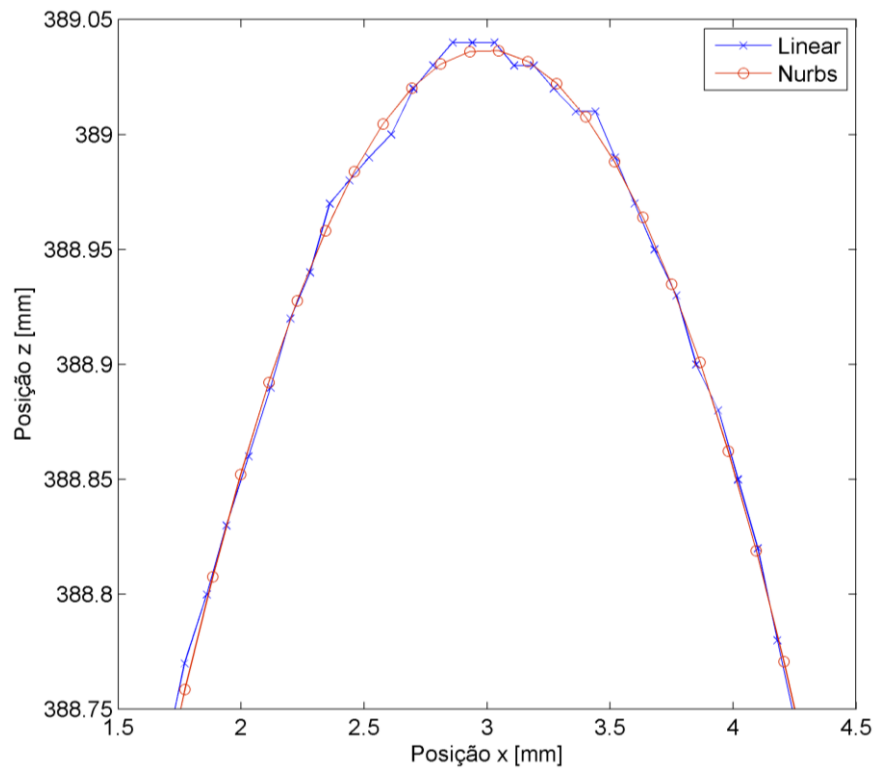


Figura 5.9: Região de curvatura para os set-points monitorados

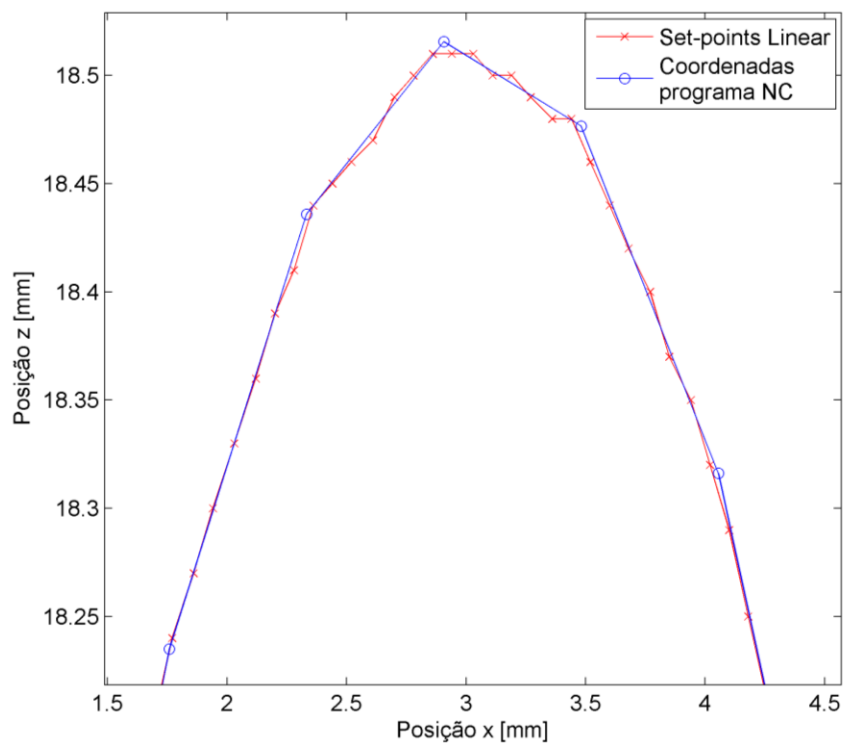


Figura 5.10: Comparação dos set-points monitorados com as coordenadas do programa NC - interpolação linear

5.2.3 Análise do erro de contorno para diferentes interpolações e velocidades

Com a utilização da mesma superfície da investigação anterior, a análise do erro de contorno para diferentes interpolações e velocidades foi realizada.

A Figura 5.11 apresenta o diagrama de Pareto do valor do erro de contorno mediano para as respectivas velocidades e interpolações, identificadas no gráfico da seguinte forma:

- Med6000N: interpolação Nurbs com 6.000 mm/min e tolerância CAM de 0,005 mm;
- Med6000N5C: interpolação Nurbs com 6.000 mm/min e tolerância CAM de 0,050 mm;
- Med6000L: interpolação linear com 6.000 mm/min e tolerância CAM de 0,005 mm;
- Med2500N5C: interpolação Nurbs com 2.500 mm/min e tolerância CAM de 0,050 mm;
- Med2500L: interpolação linear com 2.500 mm/min e tolerância CAM de 0,005 mm;
- Med2500N: interpolação Nurbs com 2500 mm/min e tolerância CAM de 0,005 mm.

Ao se comparar os valores de velocidade de avanço, é observado que o valor do erro de contorno mediano aumenta para as velocidades de 6.000 mm/min. Porém, ao se comparar somente os métodos de interpolação linear e NURBS com a mesma velocidade de avanço, observa-se que, aparentemente, somente há diferença significativa nas diferenças do erro de contorno mediano para a velocidade de 6.000 mm/min, com interpolação linear. Devido às variações que ocorrem nos valores de velocidade de avanço reais (ver Figura 5.8) o valor de velocidade programado difere do valor real, principalmente para altas velocidades com a interpolação linear. Essa condição inviabiliza a comparação dos valores de erro de contorno mediano entre os métodos de interpolação.

Na Figura 5.11, é constatada a influência da velocidade de avanço no erro de contorno, pois observa-se uma separação dos grupos de acordo com a velocidade de avanço de 6.000 e de 2.500 mm/min. Assim, a ANOVA não paramétrica de Kruskal-Wallis foi utilizada para verificar se existe diferença com significância estatística para os grupos com a mesma velocidade de avanço.

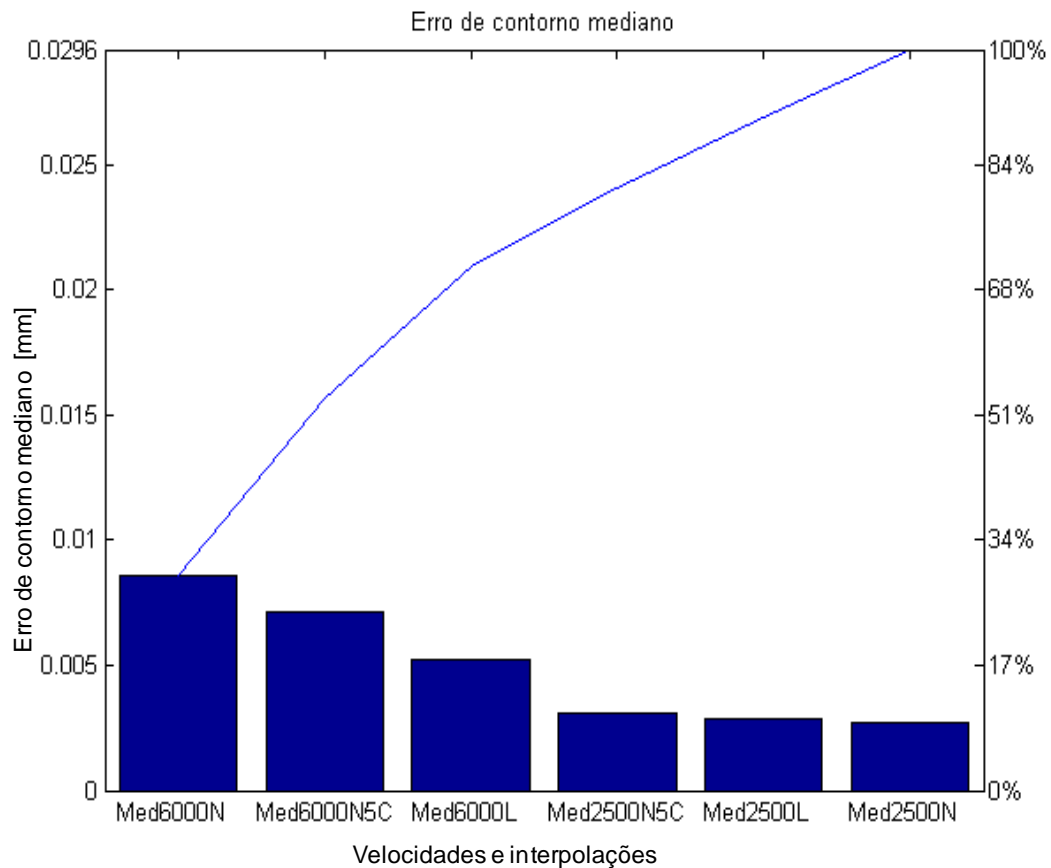


Figura 5.11: Erro mediano para diferentes velocidades e interpolações

O resultado do teste para a velocidade de avanço de 2.500 mm/min é apresentado na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Resultado do teste de Kruskal-Wallis para a velocidade de 2.500 mm/min

Resultados da ANOVA de Kruskal-Wallis					
Fonte	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Colunas	2,01E+07	2	1,00E+07	25,24	3,31E-06
Erro	2,44E+09	3090	7,90E+05		
Total	2,46E+09	3092			

Conforme o p-valor (Prob>Chi-sq) do teste apresentado, ao menos uma das amostras tem mediana diferente das outras com significância estatística, com um intervalo de confiança de 95%. Para verificar qual das amostras é diferente, o teste de comparação múltipla foi utilizado e seu resultado apresentado é na Figura 5.12.

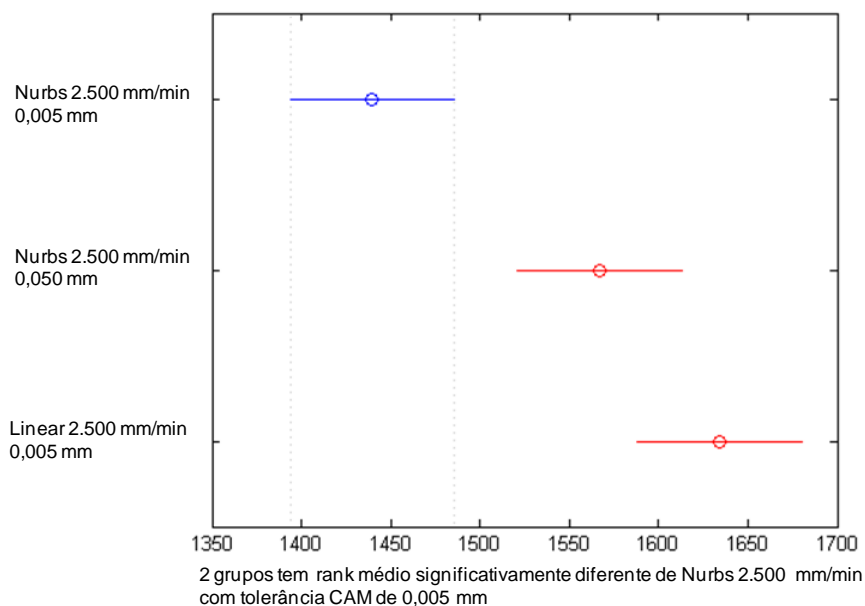


Figura 5.12: Resultado do teste de comparação múltipla para a velocidade de 2.500 mm/min

Na Figura 5.12, é verificado que somente o erro de contorno referente à interpolação Nurbs 2.500 é significativamente diferente dos outros dois. Assim, pode-se afirmar que o erro de contorno para a interpolação Nurbs com tolerância CAM de 0,050 mm não é significativamente diferente da interpolação linear com tolerância CAM de 0,005 mm.

O mesmo teste estatístico foi aplicado ao erro de contorno monitorado para a velocidade de 6.000 mm/min. A Tabela 5.8 mostra o resultado do teste de Kruskal-Wallis.

Tabela 5.8: Resultado do teste de Kruskal-Wallis para a velocidade de 6.000 mm/min

Resultados da ANOVA de Kruskal-Wallis					
Fonte	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Colunas	1,81E+07	2	9,04E+06	19,91	4,76E-05
Erro	3,27E+09	3615	9,03E+05		
Total	3,28E+09	3617			

Conforme o p-valor (Prob>Chi-sq) do teste apresentado, ao menos uma das amostras tem mediana diferente das outras com significância estatística, com um intervalo de confiança de 95%. Para verificar qual das amostras é diferente, o teste de comparação múltipla foi utilizado e seu resultado é apresentado na Figura 5.13.

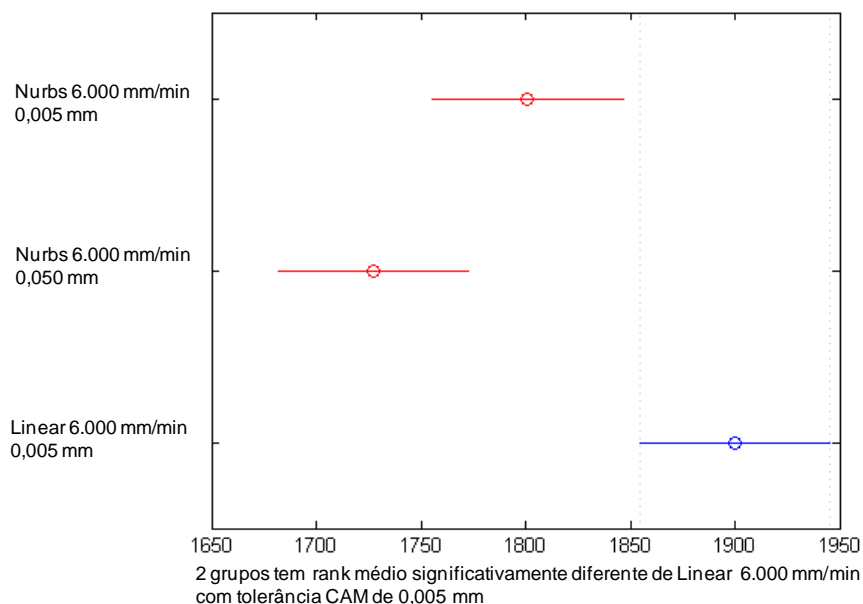


Figura 5.13: Resultado do teste de comparação múltipla para a velocidade de 6.000 mm/min

A Figura 5.13 mostra que, para a velocidades de avanço de 6.000 mm/min, o erro de contorno para o método de interpolação linear tem diferença significativa em relação à interpolação Nurbs. Também é observado que não existe diferença significativa ao modificar a tolerância CAM de 0,005 mm para 0,050 mm para a interpolação Nurbs nessa velocidade.

5.3 Validação do modelo

Para realização do ajuste inicial dos parâmetros do controlador de posição (P) e de velocidade (PI), utilizou-se como referência a resposta a entrada degrau aplicada na máquina LPZ 500.

Na Figura 5.14, é apresentado o comportamento da velocidade de avanço real e simulado, quando aplicada uma entrada degrau no eixo Y com valor de 5.000 mm/min. Os dados extraídos dessa resposta são apresentados na Tabela 5.9.

Na Figura 5.14, é observado um sobressinal na resposta à entrada degrau no sinal de velocidade. Isso provavelmente ocorre devido o eixo partir da velocidade zero para a velocidade programada. A Tabela 5.9 apresenta os parâmetros da resposta.

Utilizando-se os parâmetros da resposta real da Tabela 5.9 como referência, os ganhos dos controladores foram ajustados e a resposta simulada para a entrada degrau ficou próxima da resposta real, conforme apresenta a Figura 5.14 e a Tabela 5.9.

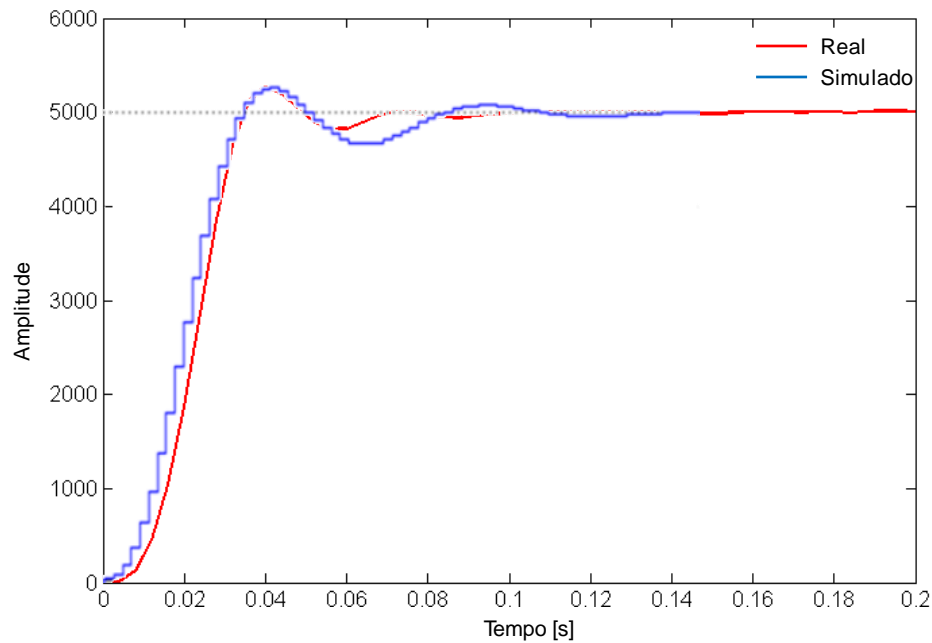


Figura 5.14: Resposta a entrada degrau no eixo Y

Tabela 5.9: Parâmetros da resposta a entrada degrau no eixo Y

Condição	Tempo de subida [s]	Tempo de acomodação [s]	Sobressinal [%]	Tempo de Pico [s]
Real	0,019	0,078	5,220	0,040
Simulada	0,019	0,074	5,310	0,040

A análise da resposta do modelo foi feita com o uso da ferramenta de análise linear do Simulink[®]. Esta ferramenta utiliza o diagrama de blocos do modelo em malha fechada para análise da resposta.

A Tabela 5.10 apresenta os valores dos parâmetros do modelo após o ajuste.

Tabela 5.10: Parâmetros do modelo após ajuste

Parâmetros do modelo	
KV [s ⁻¹]	49
KR [Nm/s ⁻¹]	1,9
TN [s]	0,012
TEM [s]	0,007
TM [s]	0,012
Ti [s]	0,002
Td [s]	3,125 x 10 ⁻⁵

KV = ganho do controlador de posição, KR = ganho do controlador de velocidade, TN = tempo de integração, TEM = constante de tempo elétrica, TM = constante de tempo mecânica, Ti = tempo de ciclo do controle de posição, Td = tempo de ciclo do controle de velocidade

Os parâmetros da Tabela 5.10 foram utilizados como condição inicial para simulação do erro de contorno, apresentada no próximo tópico.

5.4 Aplicação do Sistema Híbrido na Manufatura de Superfícies Complexas

O modelo híbrido de monitoramento e simulação do sistema de controle e acionamentos foi utilizado para simular o erro de contorno na manufatura de superfícies complexas. O resultado da simulação foi comparado com o comportamento real do erro de contorno, que foi obtido pela aplicação do sistema de monitoramento de dados na mesma superfície investigada nos tópicos 4.2.2.2 e 4.2.2.3.

Os dados de entrada do modelo de simulação são os *set-points* de posição dos eixos, que foram monitorados pelo sistema desenvolvido, caracterizando a abordagem de simulação híbrida, combinando monitoramento e simulação.

O ajuste fino dos parâmetros dos controladores dos eixos foi realizado por meio da observação do erro de contorno simulado e comparação deste com o erro de contorno real.

A Figura 5.15 ilustra as regiões que foram utilizadas para comparação do erro máximo simulado com o erro máximo real. Tais regiões foram escolhidas pois são regiões de curvatura mais acentuada, onde maiores valores de erro de contorno são esperados. A delimitação da largura da região parte da coordenada X onde ocorre o erro máximo na curva, e considera-se 3 mm para a esquerda e 3 mm para a direita da respectiva coordenada X.

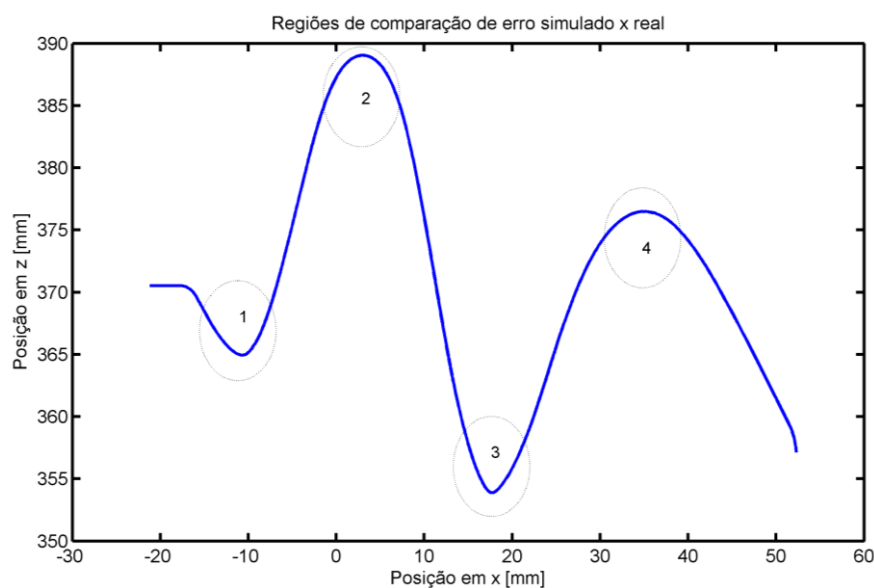


Figura 5.15: Regiões analisadas

A Figura 5.16, apresenta os valores de erro de contorno real e simulado, para a velocidade de 2.500 mm/min.

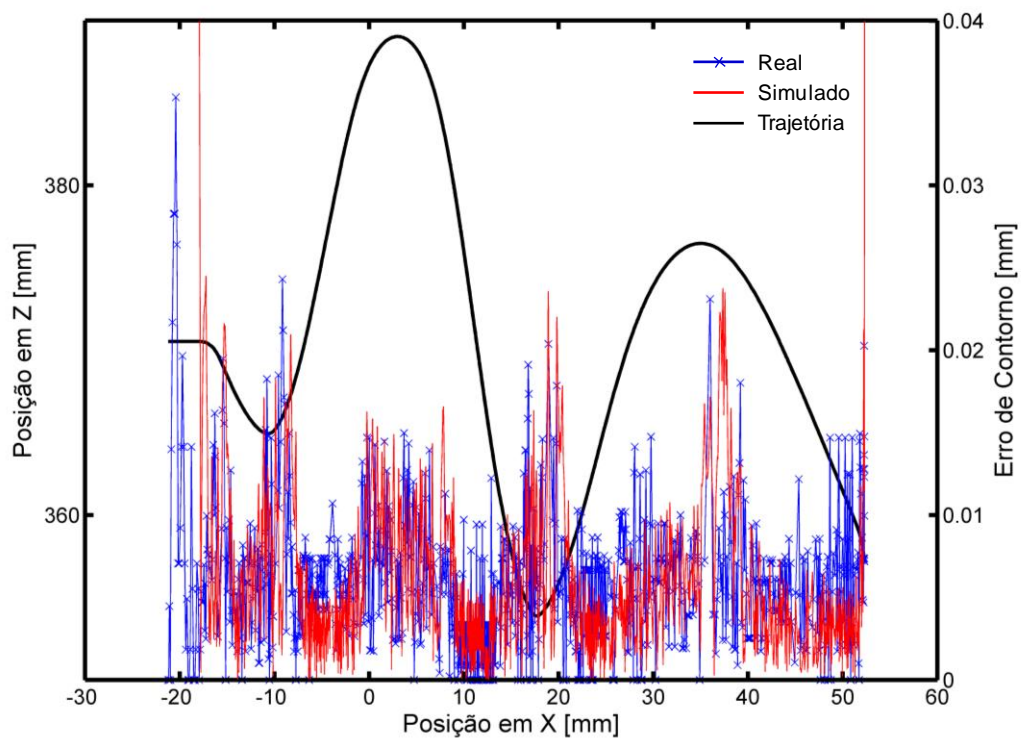


Figura 5.16: Comparação erro de contorno interpolação linear 2.500 mm/min

Conforme ilustrado na Figura 5.16, os valores simulados seguem a tendência de valores reais. A comparação da diferença em milímetros do erro máximo nas regiões analisadas, entre os valores simulados e reais pode ser observada na Tabela 5.11.

Tabela 5.11: Comparação erro de contorno máximo e mediano interpolação linear 2.500 mm/min

Região	Simulado [mm]	Real [mm]	Diferença [mm]
1	0,021	0,024	0,003
2	0,016	0,015	0,001
3	0,023	0,020	0,003
4	0,024	0,023	0,001

Conforme apresentado na Tabela 5.11, a maior diferença entre erro de contorno real e simulado para as regiões analisadas é de 3 μm . Essa diferença está abaixo da repetitividade de posicionamento do eixo da máquina LPZ 500, que segundo dados do fabricante é de 5 μm [104].

A Figura 5.17 apresenta a comparação do erro de contorno real e simulado para a velocidade de 8.000 mm/min.

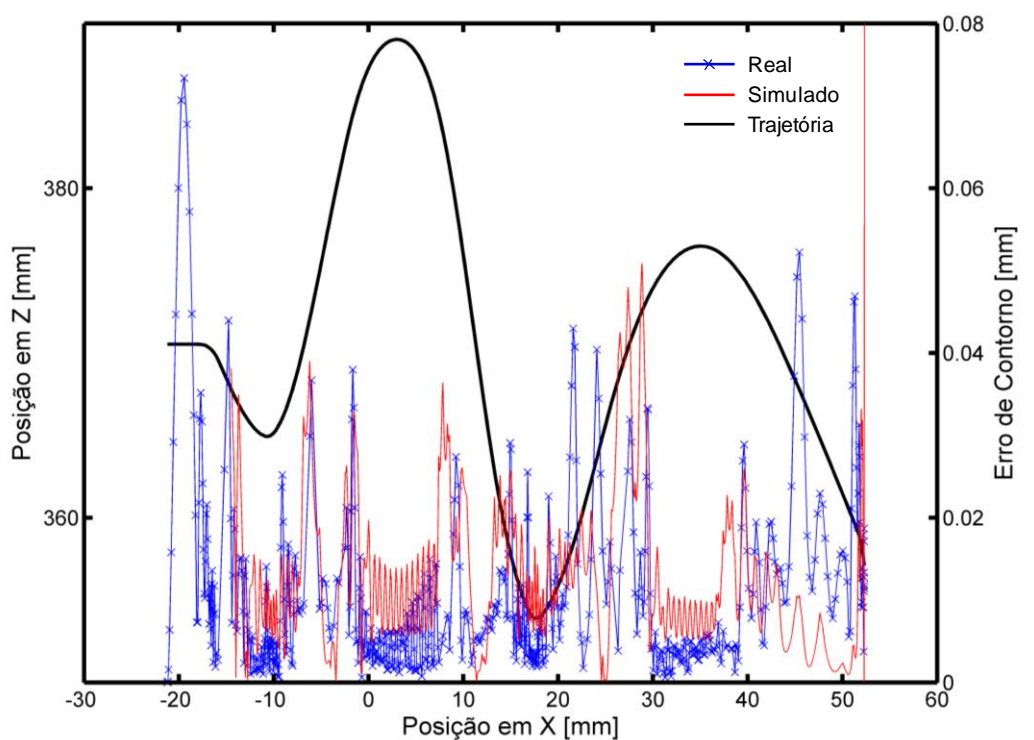


Figura 5.17: Comparação erro de contorno interpolação linear 8.000 mm/min

Conforme apresenta a Figura 5.17, o resultado da simulação do erro de contorno segue a tendência de valores reais. A comparação da diferença do erro máximo nas regiões analisadas pode ser observada na Tabela 5.12.

Tabela 5.12: Comparação erro de contorno interpolação linear 8.000 mm/min

Região	Simulado [mm]	Real [mm]	Diferença [mm]
1	0,038	0,043	0,005
2	0,013	0,016	0,003
3	0,020	0,025	0,005
4	0,023	0,028	0,005

Conforme apresentado na Tabela 5.12, a maior diferença entre erro de contorno real e simulado para as regiões analisadas é de 5 μm . Essa diferença corresponde a repetitividade de posicionamento do eixo da máquina LPZ 500, que segundo dados do fabricante é de 5 μm [104].

As diferenças para o erro máximo tanto para a velocidade de 2.500 como para 8.000 mm/min e sua comparação com a repetitividade de posicionamento do eixo

da máquina fornecido pelo fabricante, demonstram que, o sistema híbrido é válido para previsão do erro de contorno na manufatura de superfícies complexas.

6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi apresentada uma nova proposta para monitorar e simular a manufatura CNC, considerando um sistema híbrido.

Para realização do sistema proposto foi desenvolvida uma nova estratégia de aquisição de dados do CNC aberto, assim como investigações sobre o comportamento dinâmico da trajetória da ferramenta e a implementação de um modelo do sistema de controle e acionamentos foram concretizados.

A resolução da variável monitorada apresentou valores dentro dos limites de controle e o maior desvio padrão da posição foi de 0,002 mm. Isso mostra que o sistema coleta dados com resolução adequada para análise de desempenho do processo.

A transmissão de dados com tamanho de bloco 50 causou menos *outliers* e melhor simetria na distribuição dos dados, evidenciando que o tamanho do bloco influencia na taxa de amostragem do sistema.

A diferença no valor de pico máximo do sinal de velocidade medido pelo sistema de monitoramento e pelo interferômetro laser ficou menor que 0,5%, demonstrando que a velocidade monitorada pelo sistema é muito próxima da velocidade medida pelo interferômetro laser.

A comparação entre o desvio circular medido pelo ballbar[®] e pelo CNC aberto para a velocidade de 6.000 mm/min apresentou diferença de 1,8 µm. Essa diferença corresponde a 16,5% do desvio circular da máquina que foi medido com o instrumento ballbar[®], e a mesma ocorre porque os dados monitorados pelo CNC aberto são obtidos das réguas ópticas, já os dados do ballbar[®] são medidos na ponta do eixo-árvore.

Com o aumento da velocidade de avanço de 15.000 para 25.000 mm/min, o erro radial aumentou em 6,3 µm. Esse comportamento mostra que o aumento da velocidade causa aumento no erro de contorno.

Os *set-points* gerados no interpolador excitam a estrutura da máquina tanto para a interpolação linear como para a *spline*, porém constatou-se que a aceleração no ponto central da ferramenta possui picos com menor amplitude para a interpolação *spline*. Tal comportamento foi evidenciado pela distribuição mais uniforme dos *set-points* de posição dos eixos para essa interpolação.

Para a velocidade de avanço de 2.500 mm/min, foi evidenciado que, alterar o método de interpolação não causa diferença com significância estatística no erro de contorno. Com a mesma velocidade, ao modificar a tolerância CAM da interpolação NURBS de 0,005 mm para 0,050 mm, ocorre diferença significativa no erro de contorno.

Para a velocidade de avanço de 6.000 mm/min, foi constatado que o método de interpolação linear é a causa para a diferença com significância estatística no erro de contorno. Também é evidenciado que não existe diferença significativa ao modificar a tolerância CAM de 0,005 mm para 0,050 mm para a interpolação NURBS nessa velocidade.

A validação do modelo do sistema de controle e de acionamentos apresentou tempos de subida, de acomodação e de pico muito próximos da resposta real. A diferença no valor do sobressinal real e simulado ficou menor que 2%.

Na aplicação do sistema híbrido na manufatura de superfícies complexas, a maior diferença para o erro de contorno máximo real e simulado foi de 5 μm , esse valor é correspondente a repetitividade de posicionamento do eixo da máquina fornecido pelo fabricante. Assim, o sistema híbrido faz a previsão dos erros de contorno máximos nas regiões curvas próximos aos erros reais, viabilizando a aplicação prática na manufatura CNC.

Para trabalhos futuros são sugeridos os seguintes tópicos:

- Testar a aplicação e validação do sistema em outras superfícies complexas.
- Implementar um módulo no sistema para a previsão da rugosidade superficial da peça.
- Aplicar o sistema de monitoramento do CNC aberto no auxílio do controle da qualidade do processo de fabricação.

7 Referências

- [1] M. Weck and C. Brecher, *Werkzeugmaschinen 5 - Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität*. Berlin: Springer, 2006.
- [2] M. Weck and C. Brecher, *Werkzeugmaschinen 4 - Automatisierung Von Maschinen und Anlagen*. Berlin: Springer, 2006.
- [3] F. Hoffmann, "Optimierung der dynamischen Bahngenauigkeit von Werkzeugmaschinen mit der Mehrkörpersimulation," Tese (Doutorado) - RWTH Aachen, 2008.
- [4] F. Hoffmann and C. Brecher, "Simulation von Verfahrenoperationen," *Werkstattstechnik*, vol. 95, pp. 506-512, 2005.
- [5] A. Abdul Kadir, X. Xu, and E. Hämmerle, "Virtual machine tools and virtual machining - A technological review," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 27, no. 3, pp. 494-508, Jun. 2011.
- [6] B. Svensson, F. Danielsson, and B. Lennartson, "Time-synchronised hardware-in-the-loop simulation — Applied to sheet-metal press line optimisation," *Control Engineering Practice*, vol. 20, no. 8, pp. 792-804, Aug. 2012.
- [7] Y. Altintas, A. Verl, C. Brecher, L. Uriarte, and G. Pritschow, "Machine tool feed drives," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 60, no. 2, pp. 779-796, Jan. 2011.
- [8] W. S. Harrison, D. M. Tilbury, and C. Yuan, "From Hardware-in-the-Loop to Hybrid Process Simulation: An Ontology for the Implementation Phase of a Manufacturing System," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 96-109, 2012.
- [9] H. Lutz and W. Wendet, *Taschenbuch der Regelungstechnik: mit MATLAB und Simulink*. Verlag Harri Deutsch, 2010.
- [10] G. Pritschow and S. Röck, "'Hardware in the Loop' Simulation of Machine Tools," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 53, no. 1, pp. 295-298, 2004.
- [11] L. Wang, J. F. Cao, and Y. Q. Li, "Speed optimization control method of smooth motion for high-speed CNC machine tools," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 49, no. 1-4, pp. 313-325, Oct. 2009.
- [12] C.-ho Yeung, Y. Altintas, and K. Erkorkmaz, "Virtual CNC system. Part I. System architecture," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 10, pp. 1107-1123, Aug. 2006.

- [13] K. Erkorkmaz, C.-H. Yeung, and Y. Altintas, "Virtual CNC system. Part II. High speed contouring application," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 10, pp. 1124-1138, Aug. 2006.
- [14] Y. Altintas, C. Brecher, M. Weck, and S. Witt, "Virtual Machine Tool," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 54, no. 2, pp. 115-138, Jan. 2005.
- [15] K. Erkorkmaz, Y. Altintas, and C.-H. Yeung, "Virtual Computer Numerical Control System," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 55, no. 1, pp. 399-402, Jan. 2006.
- [16] Siemens AG, "NX CAM – Siemens Sinumerik Virtual NC Controller Kernel," 2012. [Online]. Available: http://www.plm.automation.siemens.com/zh_cn/Images/14541_tcm78-67384.pdf. [Accessed: 12-Jul-2012].
- [17] Siemens AG, "RealNC," 2012. [Online]. Available: http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/tecnomatix/plan_validate/real_nc.shtml. [Accessed: 12-Jul-2012].
- [18] G. Pritschow et al., "Open Controller Architecture – Past, Present and Future," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 50, no. 2, pp. 463-470, Jan. 2001.
- [19] W. Yun, B. Min, and Z. J. Pasek, "Open Architecture Controller Interface Implementation for Machine Tools," in *IPROMS 2007 Innovative Production Machines and Systems*, 2007.
- [20] J. F. G. Oliveira, F. Ferraz Júnior, R. T. Coelho, and E. J. Silva, "Architecture for machining process and production monitoring based in open computer numerical control," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 222, no. 12, pp. 1605-1612, Dec. 2008.
- [21] D. Yu, Y. Hu, X. W. Xu, Y. Huang, and S. Du, "An Open CNC System Based on Component Technology," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 302-310, Apr. 2009.
- [22] R. Teti, K. Jemielniak, G. O'Donnell, and D. Dornfeld, "Advanced monitoring of machining operations," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 59, no. 2, pp. 717-739, Jan. 2010.
- [23] S. Röck, "Hardware in the loop simulation of production systems dynamics," *Production Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 329-337, Feb. 2011.
- [24] O. Zirn and S. Weikert, *Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme*. Berlin: Springer, 2006.
- [25] E.-U. Schmitz and E. Steinebrunner, "SimCAT - Integration von CA-Techniken zur ganzheitlichen Simulation und Optimierung von

- Fertigungseinrichtungen vom CAD bis hin zur 'Hardware in the Loop'-Simulation," 2007. [Online]. Available: http://www.produktionsforschung.de/PFT/verbundprojekte/vp/index.htm?VP_ID=1357. [Accessed: 19-Jun-2012].
- [26] M. Weck and C. Brecher, *Werkzeugmaschinen 3 - Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose*. Berlin: Springer, 2006.
- [27] W.-sheng Huang, C.-wei Liu, P.-lo Hsu, and S.-shih Yeh, "Precision Control and Compensation of Servomotors and Machine Tools via the Disturbance Observer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 1, pp. 420-429, Jan. 2010.
- [28] Y. Altintas and M. R. Khoshdarregi, "Contour error control of CNC machine tools with vibration avoidance," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 61, no. 1, pp. 335-338, Jan. 2012.
- [29] M.-Y. Cheng, K.-H. Su, and S.-F. Wang, "Contour error reduction for free-form contour following tasks of biaxial motion control systems," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 25, no. 2, pp. 323-333, Apr. 2009.
- [30] E. M. ElBeheiry, "Contouring Error Control of Machine Tool Drives with Backlash Compensation," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 220, no. 5, pp. 395-410, Aug. 2006.
- [31] D. Sun, S. Member, and M. C. Tong, "A Synchronization Approach for the Minimization of Contouring Errors of CNC Machine Tools," *October*, vol. 6, no. 4, pp. 720-729, 2009.
- [32] A. El Khalick M. and N. Uchiyama, "Contouring controller design based on iterative contour error estimation for three-dimensional machining," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 27, no. 4, pp. 802-807, Aug. 2011.
- [33] R. Ramesh, M. A. Mannan, and A. N. Poo, "Tracking and contour error control in CNC servo systems," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, no. 3, pp. 301-326, Mar. 2005.
- [34] K. Schützer, E. Uhlmann, E. Del Conte, and J. Mewis, "Improvement of Surface Accuracy and Shop Floor Feed Rate Smoothing Through Open CNC Monitoring System and Cutting Simulation," *Procedia CIRP*, vol. 1, pp. 90-95, Jan. 2012.
- [35] R. M. LARSE, "The SERCOS Interface for Digital Motion Control," in *Fieldbus Technology: Industrial Network Standards for Real-Time Distributed Control*, Berlin: Springer, 2003.
- [36] M. Arnone, *High Performance Machining*. Cincinnati: Hanser Gardner Publications, 1998.

- [37] A. G. Ulsoy, "Monitoring and control of machining," in *Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing*, Berlin: Springer, 2006, pp. 1 - 27.
- [38] M. Weck and G. Ye, "Sharp Corner Tracking Using the IKF Control Strategy," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 39, no. 1, pp. 437-441, Jan. 1990.
- [39] Y. Altintas, *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. New York: Cambridge University Press, 2000.
- [40] S. D. Merdol and Y. Altintas, "Virtual Simulation and Optimization of Milling Applications - Part II: Optimization and Feedrate Scheduling," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 130, no. 5, 2008.
- [41] X. Beudaert, S. Lavernhe, and C. Tournier, "Feedrate interpolation with axis jerk constraints on 5-axis NURBS and G1 tool path," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 57, pp. 73-82, Jun. 2012.
- [42] K.-Y. Lin, W.-D. Ueng, and J.-Y. Lai, "CNC codes conversion from linear and circular paths to NURBS curves," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 39, no. 7-8, pp. 760-773, Nov. 2007.
- [43] M. Heng and K. Erkorkmaz, "Design of a NURBS interpolator with minimal feed fluctuation and continuous feed modulation capability," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 50, no. 3, pp. 281-293, Mar. 2010.
- [44] K. Erkorkmaz and Y. Altintas, "High speed CNC system design. Part I: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, no. 9, pp. 1323-1345, Jul. 2001.
- [45] J. R. Rivera-Guillen, R. J. Romero-troncoso, R. A. Osornio-Rios, A. Garcia-Perez, and I. Torres-Pacheco, "Extending tool-life through jerk-limited motion dynamics in machining processes : An experimental study," *Journal of Scientific & Industrial Research*, vol. 69, pp. 919-925, 2010.
- [46] R. Z. Xu, L. Xie, C. X. Li, and D. S. Du, "Adaptive parametric interpolation scheme with limited acceleration and jerk values for NC machining," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 36, no. 3-4, pp. 343-354, Nov. 2006.
- [47] A. L. Helleno, K. Schützer, and R. L. G. Monaro, "Contribution for the Sculptured Surfaces Manufacturing with High-Speeds based on Methods of Tool Path Interpolation," in *9th International Conference on High Speed Machining*, 2012.
- [48] A. F. Souza, "Contribuições ao Fresamento de Geometrias Complexas aplicando a Tecnologia de Usinagem com Altas Velocidades," Tese

- (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2004.
- [49] C. Lartigue, C. Tournier, M. Ritou, and D. Dumur, "High-Performance NC for HSM by means of Polynomial Trajectories," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 53, no. 1, pp. 317-320, Jan. 2004.
- [50] K. Schützer, C. Stroh, and H. Schulz, "C-Space based approach for the calculation of toolpaths for freeform surfaces in B-Spline description," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 59, no. 1, pp. 421-424, Jan. 2010.
- [51] Y. Altintas and S. D. Merdol, "Virtual High Performance Milling," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 56, no. 1, pp. 81-84, 2007.
- [52] T. L. Schmitz, J. C. Ziegert, J. S. Canning, and R. Zapata, "Case study : A comparison of error sources in high-speed milling," *Precision Engineering*, vol. 32, pp. 126-133, 2008.
- [53] S. H. H. Zargarbashi and J. R. R. Mayer, "Single setup estimation of a five-axis machine tool eight link errors by programmed end point constraint and on the fly measurement with Capball sensor," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, no. 10, pp. 759-766, Aug. 2009.
- [54] L. Andolfatto, S. Lavernhe, and J. R. R. Mayer, "Evaluation of servo, geometric and dynamic error sources on five-axis high-speed machine tool," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 51, no. 10-11, pp. 787-796, Oct. 2011.
- [55] L. N. López de Lacalle, A. Lamikiz, J. A. Sánchez, and M. A. Salgado, "Toolpath selection based on the minimum deflection cutting forces in the programming of complex surfaces milling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 2, pp. 388-400, Feb. 2007.
- [56] X. F. Zhang, J. Xie, H. F. Xie, and L. H. Li, "Experimental investigation on various tool path strategies influencing surface quality and form accuracy of CNC milled complex freeform surface," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 59, no. 5-8, pp. 647-654, Jul. 2011.
- [57] C. E. Miralles, "Análise de Estratégias de Corte no Fresamento com 5 eixos," Dissertação (Mestrado) - Universidade Metodista de Piracicaba, 2009.
- [58] G. Pritschow and C. Kramer, "Open System Architecture for Drives," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 54, no. 1, pp. 375-378, Jan. 2005.
- [59] G. Quintana, T. Rudolf, J. Ciurana, and C. Brecher, "Using kernel data in machine tools for the indirect evaluation of surface roughness in vertical milling operations," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 27, no. 6, pp. 1011-1018, Dec. 2011.

- [60] L. Morales-Velazquez, R. de Jesus Romero-Troncoso, R. Alfredo Osornio-Rios, and E. Cabal-Yepez, "Sensorless jerk monitoring using an adaptive antisymmetric high-order FIR filter," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, no. 7, pp. 2383-2394, Oct. 2009.
- [61] F. J. Ferraz, "Arquitetura para Monitoramento e Supervisão de Processos de Usinagem em Máquinas com Controle Numérico Aberto," Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.
- [62] Brinkhaus GmbH, "Brinkhaus Systems for working solutions," 2012. [Online]. Available: <http://www.brinkhaus-gmbh.eu/en/produkte>. [Accessed: 18-Jun-2012].
- [63] J. D. J. Rangel-magdaleno, S. Member, R. D. J. Romero-troncoso, R. A. Osornio-rios, E. Cabal-yepez, and A. Dominguez-gonzalez, "FPGA-Based Vibration Analyzer for Continuous CNC Machinery Monitoring With Fused FFT-DWT Signal Processing," *Instrumentation*, vol. 59, no. 12, pp. 3184-3194, 2010.
- [64] B. Denkena, M. Krüger, D. Bachrathy, and G. Stepan, "Model based reconstruction of milled surface topography from measured cutting forces," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 54-55, pp. 25-33, Mar. 2012.
- [65] C. R. Harrel, J. R. A. Mott, R. E. Bateman, R. G. Bowden, and T. J. Gogg, *Simulação Otimizando Sistemas*, 2nd ed. São Paulo: Instituto IMAM, 2002.
- [66] R. S. Pressman, *Engenharia de Software*, 6th ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.
- [67] J. W. M. Bertrand and J. C. Fransoo, "Operations management research methodologies using quantitative modeling," *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 22, no. 2, pp. 241-264, 2002.
- [68] A. A. Kadir and X. Xu, "Towards High-Fidelity Machining Simulation," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 175-186, Aug. 2011.
- [69] M. Pothen, M. Minoufekar, T. Huwer, and L. Glasmacher, "NC-Datenanalyse und -optimierung," *Werkstattstechnik*, vol. 101, pp. 724-729, 2011.
- [70] A. Broos, T. Schermann, and E.-U. Schmitz, "Neue Prozessketten für die Simulation," *Werkstattstechnik*, vol. 96, no. 1, pp. 24-29, 2006.
- [71] ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, "ISG-virtuos – a powerful tool for simulation and visualisation," 2012. [Online]. Available: www.isg-stuttgart.de. [Accessed: 04-Jun-2012].
- [72] R. S. Lee and M. K. Ren, "Development of Virtual Machine Tool for Simulation and Evaluation," *Computer-Aided Design*, vol. 8, no. 6, pp. 849-858, 2011.

- [73] K. Ehmann et al., "A framework for a virtual machine tool (VMT)," *Transactions of the NAMRI/SME*, vol. 21, 1997.
- [74] J. Berkemer, "Gekoppelte Simulation von Maschinendynamik und Antriebsregelung unter Verwendung linearer Finite Elemente Modelle," Tese (Doutorado) - Universidade Stuttgart, 2003.
- [75] S. Dolansky and T. Menzel, "Productivity in motion - Beiträge durch Simulation," in *Einsatz vom Simulationswerkzeug*, 2005.
- [76] D. D. Frey, T. W. Hykes, and K. N. Otto, "Method of virtual machining to predict the accuracy of part to be made with machine tools," U.S. Patent 5691909/1997.
- [77] A. M. Law and W. D. Kelton, *Simulation Modeling and Analysis*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1991.
- [78] S. Lavernhe, Y. Quinsat, and C. Lartigue, "Model for the prediction of 3D surface topography in 5-axis milling," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 51, no. 9-12, pp. 915-924, May 2010.
- [79] W. W.-S. Wong and K. Erkorkmaz, "Constrained identification of virtual CNC drives using a genetic algorithm," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 50, no. 1-4, pp. 275-288, Feb. 2010.
- [80] Index-Werke GmbH et al., "Integration of CA-Technologies Towards a Holistic Simulation and Optimization Approach for Machine Tools," 2007. [Online]. Available: <http://www.simcat.org>. [Accessed: 19-Jun-2012].
- [81] O. Zirn, "Machine Tool Analysis – Modelling, Simulation and Control of Machine Tool Manipulators," A Habilitation Thesis, ETH Zürich, 2008.
- [82] K. Ogata, *Engenharia de Controle Moderno*. São Paulo: Prentice Hall, 2003.
- [83] D. Kim, D. H. Son, and D. Jeon, "Feed-system autotuning of a CNC machining center: Rapid system identification and fine gain tuning based on optimal search," *Precision Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 339-348, Apr. 2012.
- [84] Y. Koren and C. C. Lo, "Advanced Controllers for Feed Drives," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 41, no. 2, pp. 689-698, Jan. 1992.
- [85] H. B. Lacerda and E. M. Belo, "Application of a Pid+fuzzy controller on the motion control system in machine tools," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, vol. 21, no. 3, Sep. 1999.
- [86] Y. Koren, "Control of Machine Tools," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 119, 1997.

- [87] R. L. Hecker, G. M. Flores, Q. Xie, and R. Haran, "Servocontrol of machine-tools: a review," *Latin American Applied Research*, vol. 94, pp. 85-94, 2008.
- [88] D. P. V. Sato, "Uma Contribuição ao Modelo de Sintetização de Erros em Máquinas Ferramentas," Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 1998.
- [89] L. Ljung and T. Glad, *Modeling of Dynamic Systems*. New Jersey: Prentice Hall, 1994.
- [90] K. Erkorkmaz and W. Wong, "Rapid identification technique for virtual CNC drives," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 9, pp. 1381-1392, Jul. 2007.
- [91] G. Catania and N. Mancinelli, "Theoretical-experimental modeling of milling machines for the prediction of chatter vibration," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 51, no. 4, pp. 339-348, Apr. 2011.
- [92] E. G. Del Conte, "Desenvolvimento de um Sistema para Monitoramento de Dados em HSM (High Speed Machining)," Dissertação (Mestrado) - Universidade Metodista de Piracicaba, 2008.
- [93] E. G. Del Conte and K. Schützer, "Data Acquisition Strategy for Open CNC Monitoring in HSM Process," in *19th International Congress of Mechanical Engineering*, 2007.
- [94] E. G. Del Conte, K. Schützer, and E. Hohwieler, "Development of a System for HSM (High Speed Machining) Performance Monitoring," in *20th International Congress of Mechanical Engineering*, 2009.
- [95] Siemens AG, *OEM package MMC Release 4 System installation*. 1997.
- [96] Siemens AG, *Sinumerik 840D/840Di/810D Synchronized Actions*, 8th ed. 2005.
- [97] E. G. Del Conte, M. C. O. Papa, C. E. R. Rodrigues, K. Schützer, and A. J. Abackerli, "Monitoramento do Processo: Análise de Resolução da Variável Monitorada no CNC Aberto," in *XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 2010.
- [98] E. G. Del Conte, K. Schützer, A. J. Abackerli, and C. E. R. Rodrigues, "Open CNC Motion Accuracy Analysis under High Feedrate values," in *XVI International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2010.
- [99] S. H. H. Zargarbashi and J. R. R. Mayer, "A model based method for centering double ball bar test results preventing fictitious ovalization effects," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, no. 10, pp. 1132-1139, Aug. 2005.

- [100] K. Schützer, E. G. Del Conte, A. J. Abackerli, E. Uhlmann, and J. Mewis, "Holistic Optimization of Sculptured Surfaces Manufacturing (HoliMan)," in *21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering*, 2011.
- [101] A. L. Helleno, "Contribuição para a manufatura de superfícies complexas com altas velocidades baseada em novos métodos de interpolação da trajetória da ferramenta," Tese (Doutorado) - Universidade Metodista de Piracicaba, 2008.
- [102] H. Kume, *Métodos Estatísticos para Melhoria da Qualidade*. São Paulo: Gente, 1993.
- [103] ISO 230-4, "Acceptance code for machine tools. Part 4, Circular tests for numerically controlled machine-tools." 2005.
- [104] MWA GmbH, "LPZ Braureihe: Kompetenz in Dynamik," 2012. [Online]. Available: <http://www.mwa-wzm.de/produkte/lpz/>. [Accessed: 26-Nov-2012].

Anexo 1 – Programação da ação síncrona

O código da programação descrito neste Anexo é constituído da seguinte forma:

- ID=1: é o parâmetro de identificação da ação síncrona;
- WHENEVER (condição) DO: estabelece a condição para que a ação síncrona seja executada. Nesse caso, toda vez que a condição especificada entre parênteses for atingida a ação após a instrução DO é executada;
- DO ação: descreve qual será a ação a ser executada.

Segue abaixo o código da programação do módulo de *buffer*.

```
ID=1 WHENEVER ($AC_MARKER[11]<=10) DO
$R[$AC_MARKER[1]]=$AA_IM[X] $R[$AC_MARKER[2]]=$VA_IM[X]
$AC_MARKER[1]=$AC_MARKER[1]+10 $AC_MARKER[2]=$AC_MARKER[2]+10
$AC_MARKER[11]=$AC_MARKER[11]+1
```

```
ID=2 WHENEVER ($AC_MARKER[11]<=10) DO
$R[$AC_MARKER[3]]=$VA_VACTM[X] $R[$AC_MARKER[4]]=$AA_IM[Y]
$AC_MARKER[3]=$AC_MARKER[3]+10 $AC_MARKER[4]=$AC_MARKER[4]+10
```

```
ID=3 WHENEVER ($AC_MARKER[11]<=10) DO
$R[$AC_MARKER[5]]=$VA_IM[Y] $R[$AC_MARKER[6]]=$VA_VACTM[Y]
$AC_MARKER[5]=$AC_MARKER[5]+10 $AC_MARKER[6]=$AC_MARKER[6]+10
```

```
ID=4 WHENEVER ($AC_MARKER[11]<=10) DO
$R[$AC_MARKER[7]]=$AA_IM[Z] $R[$AC_MARKER[8]]=$VA_IM[Z]
$AC_MARKER[7]=$AC_MARKER[7]+10 $AC_MARKER[8]=$AC_MARKER[8]+10
```

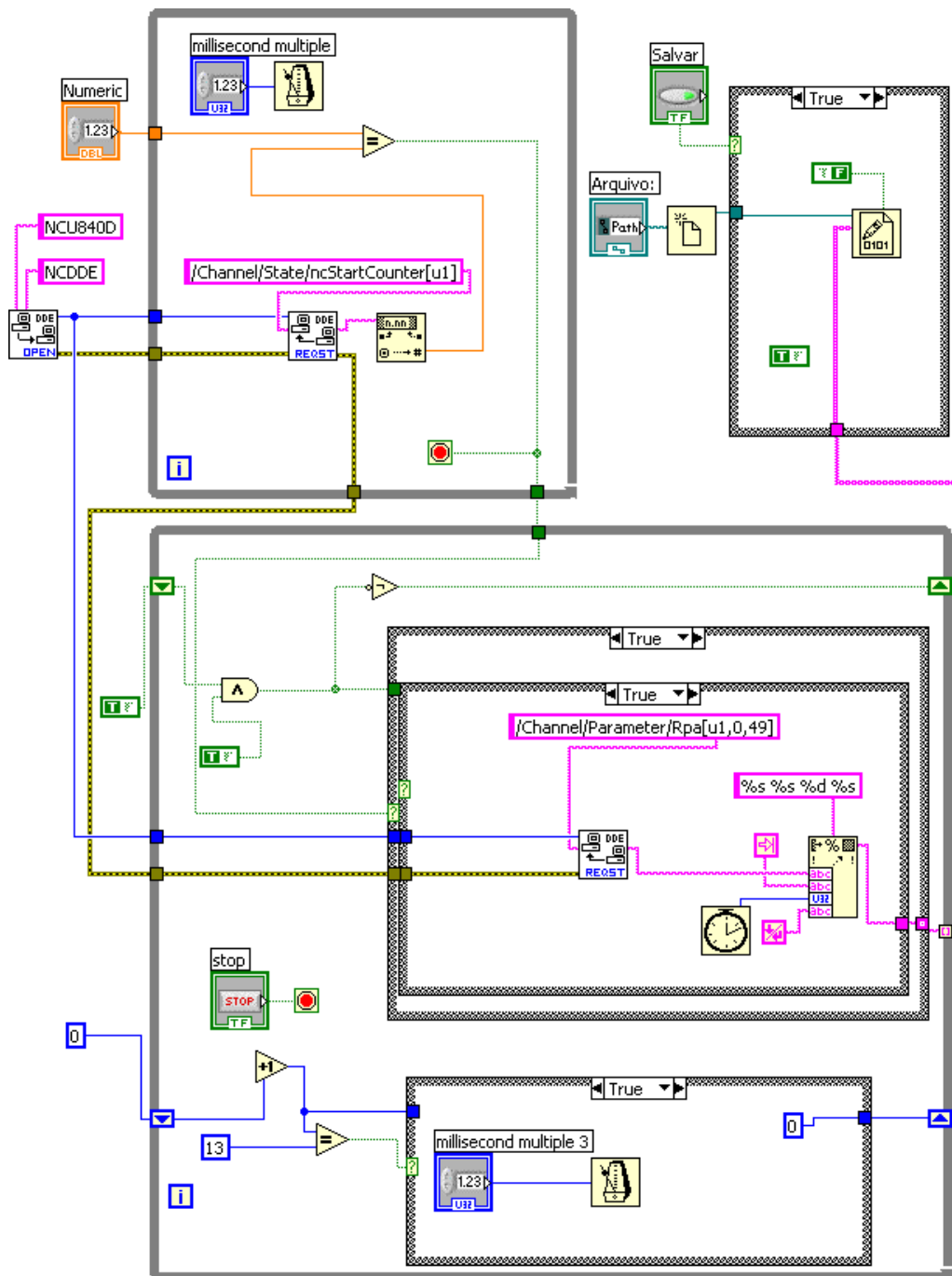
```
ID=5 WHENEVER ($AC_MARKER[11]<=10) DO
$R[$AC_MARKER[9]]=$VA_VACTM[Z] $R[$AC_MARKER[10]]=$AC_TIMER[1]
$AC_MARKER[9]=$AC_MARKER[9]+10
$AC_MARKER[10]=$AC_MARKER[10]+10
```

```
ID=6 WHENEVER ($AC_MARKER[11]==10) DO $AC_MARKER[1]=0
$AC_MARKER[2]=1 $AC_MARKER[3]=2 $AC_MARKER[4]=3
$AC_MARKER[5]=4 $AC_MARKER[6]=5 $AC_MARKER[7]=6
$AC_MARKER[8]=7 $AC_MARKER[9]=8 $AC_MARKER[10]=9
$AC_MARKER[11]=0
```

```
ID=7 WHENEVER ($AC_MARKER[11]==10) DO
$R[$AC_MARKER[1]]=$AC_TIMER[1] $R[$AC_MARKER[2]]=$AC_TIMER[1]
$R[$AC_MARKER[3]]=$AC_TIMER[1] $R[$AC_MARKER[4]]=$AC_TIMER[1]
$R[$AC_MARKER[5]]=$AC_TIMER[1] $R[$AC_MARKER[6]]=$AC_TIMER[1]
$R[$AC_MARKER[7]]=$AC_TIMER[1] $R[$AC_MARKER[8]]=$AC_TIMER[1]
$R[$AC_MARKER[9]]=$AC_TIMER[1] $R[$AC_MARKER[10]]=$AC_TIMER[1]
```

```
ID=8 WHENEVER ($AC_MARKER[11]==10) DO $AC_MARKER[1]=10
$AC_MARKER[2]=11 $AC_MARKER[3]=12 $AC_MARKER[4]=13
$AC_MARKER[5]=14 $AC_MARKER[6]=15 $AC_MARKER[7]=16
$AC_MARKER[8]=17 $AC_MARKER[9]=18 $AC_MARKER[10]=19
$AC_MARKER[11]=2
```

Anexo 2 - Diagrama de blocos do módulo de transmissão de dados



Anexo 3 - Programa NC com interpolação linear

```

N0001 G40
N0002 G54
N0003 G90
N0004 G71
N0005 G97
N0006 G94
N0010 L6
N0011 G1 F2500 G642 Z20
N1200 X-21.2132 Y21.2132
N1210 Z3.
N1220 G1 Z0.0
M00
$AC_MARKER[1]=0
$AC_MARKER[2]=1
$AC_MARKER[3]=2
$AC_MARKER[4]=3
$AC_MARKER[5]=4
$AC_MARKER[6]=5
$AC_MARKER[7]=6
$AC_MARKER[8]=7
$AC_MARKER[9]=8
$AC_MARKER[10]=9
$AC_MARKER[11]=0
$AC_TIMER[1]=0
G4 F0.010
ID=1 WHENEVER ($AC_MARKER[11]<=10) DO $R[$AC_MARKER[1]]=$AA_IM[X]
$R[$AC_MARKER[2]]=$VA_IM[X] $AC_MARKER[1]=$AC_MARKER[1]+10
$AC_MARKER[2]=$AC_MARKER[2]+10 $AC_MARKER[11]=$AC_MARKER[11]+1
ID=2 WHENEVER ($AC_MARKER[11]<=10) DO $R[$AC_MARKER[3]]=$VA_VACTM[X]
$R[$AC_MARKER[4]]=$AA_IM[Y] $AC_MARKER[3]=$AC_MARKER[3]+10
$AC_MARKER[4]=$AC_MARKER[4]+10
ID=3 WHENEVER ($AC_MARKER[11]<=10) DO $R[$AC_MARKER[5]]=$VA_IM[Y]
$R[$AC_MARKER[6]]=$VA_VACTM[Y] $AC_MARKER[5]=$AC_MARKER[5]+10
$AC_MARKER[6]=$AC_MARKER[6]+10
ID=4 WHENEVER ($AC_MARKER[11]<=10) DO $R[$AC_MARKER[7]]=$AA_IM[Z]
$R[$AC_MARKER[8]]=$VA_IM[Z] $AC_MARKER[7]=$AC_MARKER[7]+10
$AC_MARKER[8]=$AC_MARKER[8]+10
ID=5 WHENEVER ($AC_MARKER[11]<=10) DO $R[$AC_MARKER[9]]=$VA_VACTM[Z]
$R[$AC_MARKER[10]]=$AC_TIMER[1] $AC_MARKER[9]=$AC_MARKER[9]+10
$AC_MARKER[10]=$AC_MARKER[10]+10
ID=6 WHENEVER ($AC_MARKER[11]==10) DO $AC_MARKER[1]=0
$AC_MARKER[2]=1 $AC_MARKER[3]=2 $AC_MARKER[4]=3 $AC_MARKER[5]=4

```

```

$AC_MARKER[6]=5 $AC_MARKER[7]=6 $AC_MARKER[8]=7 $AC_MARKER[9]=8
$AC_MARKER[10]=9 $AC_MARKER[11]=0
ID=7 WHENEVER ($AC_MARKER[11]==10) DO $R[$AC_MARKER[1]]=$AC_TIMER[1]
$R[$AC_MARKER[2]]=$AC_TIMER[1] $R[$AC_MARKER[3]]=$AC_TIMER[1]
$R[$AC_MARKER[4]]=$AC_TIMER[1] $R[$AC_MARKER[5]]=$AC_TIMER[1]
$R[$AC_MARKER[6]]=$AC_TIMER[1] $R[$AC_MARKER[7]]=$AC_TIMER[1]
$R[$AC_MARKER[8]]=$AC_TIMER[1] $R[$AC_MARKER[9]]=$AC_TIMER[1]
$R[$AC_MARKER[10]]=$AC_TIMER[1]
ID=8 WHENEVER ($AC_MARKER[11]==10) DO $AC_MARKER[1]=10
$AC_MARKER[2]=11 $AC_MARKER[3]=12 $AC_MARKER[4]=13 $AC_MARKER[5]=14
$AC_MARKER[6]=15 $AC_MARKER[7]=16 $AC_MARKER[8]=17 $AC_MARKER[9]=18
$AC_MARKER[10]=19 $AC_MARKER[11]=2
N1230 X-17.7675 Y24.6589
N1240 X-17.1932 Y25.2332 Z-.0591
N1250 X-16.6189 Y25.8075 Z-.2908
N1260 X-16.3318 Y26.0946 Z-.4819
N1270 X-16.0446 Y26.3818 Z-.7341
N1280 X-15.7575 Y26.6689 Z-1.063
N1290 X-15.4703 Y26.9561 Z-1.4612
N1300 X-14.3218 Y28.1046 Z-2.9438
N1310 X-13.7475 Y28.6789 Z-3.5978
N1320 X-13.1732 Y29.2532 Z-4.1843
N1330 X-12.5989 Y29.8275 Z-4.6941
N1340 X-12.0246 Y30.4018 Z-5.1144
N1350 X-11.4503 Y30.9761 Z-5.4248
N1360 X-10.876 Y31.5504 Z-5.5885
N1370 X-10.5889 Y31.8375 Z-5.5948
N1380 X-10.3018 Y32.1247 Z-5.5343
N1390 X-10.0146 Y32.4118 Z-5.3992
N1400 X-9.7275 Y32.6989 Z-5.1922
N1410 X-9.1532 Y33.2732 Z-4.5862
N1420 X-8.5789 Y33.8475 Z-3.7604
N1430 X-8.0046 Y34.4218 Z-2.7406
N1440 X-7.4303 Y34.9961 Z-1.5468
N1450 X-6.856 Y35.5704 Z-.2044
N1460 X-6.2817 Y36.1447 Z1.2634
N1470 X-5.1332 Y37.2932 Z4.455
N1480 X-3.9846 Y38.4418 Z7.8022
N1490 X-2.836 Y39.5904 Z11.0344
N1500 X-2.2617 Y40.1647 Z12.5131
N1510 X-1.6875 Y40.739 Z13.8512
N1520 X-1.1132 Y41.3132 Z15.0213
N1530 X-.5389 Y41.8875 Z16.0081
N1540 X.0354 Y42.4618 Z16.8086
N1550 X.6097 Y43.0361 Z17.436
N1560 X1.184 Y43.6104 Z17.9062

```

N1570 X1.7583 Y44.1847 Z18.2349
N1580 X2.3326 Y44.759 Z18.4359
N1590 X2.9068 Y45.3333 Z18.5156
N1600 X3.4811 Y45.9075 Z18.4767
N1610 X4.0554 Y46.4818 Z18.3162
N1620 X4.6297 Y47.0561 Z18.0251
N1630 X5.204 Y47.6304 Z17.586
N1640 X5.7783 Y48.2047 Z16.9763
N1650 X6.3526 Y48.779 Z16.163
N1660 X6.9269 Y49.3533 Z15.117
N1670 X7.5011 Y49.9275 Z13.8155
N1680 X8.0754 Y50.5018 Z12.2565
N1690 X8.6497 Y51.0761 Z10.454
N1700 X9.224 Y51.6504 Z8.4428
N1710 X9.7983 Y52.2247 Z6.2621
N1720 X10.3726 Y52.799 Z3.962
N1730 X10.9469 Y53.3733 Z1.5879
N1740 X11.5211 Y53.9476 Z-.8037
N1750 X12.0954 Y54.5218 Z-3.1617
N1760 X12.6697 Y55.0961 Z-5.4306
N1770 X13.244 Y55.6704 Z-7.5539
N1780 X13.8183 Y56.2447 Z-9.4748
N1790 X14.3926 Y56.819 Z-11.1874
N1800 X14.9669 Y57.3933 Z-12.6924
N1810 X15.5412 Y57.9676 Z-13.9882
N1820 X16.1154 Y58.5418 Z-15.0695
N1830 X16.6897 Y59.1161 Z-15.9216
N1840 X16.9769 Y59.4033 Z-16.2507
N1850 X17.264 Y59.6904 Z-16.5025
N1860 X17.5512 Y59.9776 Z-16.6494
N1870 X17.8383 Y60.2647 Z-16.6445
N1880 X18.1254 Y60.5519 Z-16.5313
N1890 X18.4126 Y60.839 Z-16.3548
N1900 X18.9869 Y61.4133 Z-15.8675
N1910 X19.5612 Y61.9876 Z-15.2391
N1920 X20.1355 Y62.5619 Z-14.4951
N1930 X20.7097 Y63.1361 Z-13.6472
N1940 X21.284 Y63.7104 Z-12.7052
N1950 X21.8583 Y64.2847 Z-11.6716
N1960 X22.4326 Y64.859 Z-10.5516
N1970 X23.5812 Y66.0076 Z-8.0898
N1980 X24.7297 Y67.1562 Z-5.5032
N1990 X25.8783 Y68.3047 Z-3.039
N2000 X27.0269 Y69.4533 Z-.8352
N2010 X27.6012 Y70.0276 Z.1553
N2020 X28.1755 Y70.6019 Z1.063

N2030 X28.7498 Y71.1762 Z1.8903
N2040 X29.324 Y71.7504 Z2.6335
N2050 X29.8983 Y72.3247 Z3.2958
N2060 X30.4726 Y72.899 Z3.8785
N2070 X31.0469 Y73.4733 Z4.3841
N2080 X31.6212 Y74.0476 Z4.8157
N2090 X32.1955 Y74.6219 Z5.1752
N2100 X32.7698 Y75.1962 Z5.4648
N2110 X33.344 Y75.7705 Z5.6871
N2120 X33.9183 Y76.3447 Z5.8434
N2130 X34.4926 Y76.919 Z5.9345
N2140 X35.0669 Y77.4933 Z5.9621
N2150 X35.6412 Y78.0676 Z5.9271
N2160 X36.2155 Y78.6419 Z5.8276
N2170 X36.7898 Y79.2162 Z5.6647
N2180 X37.3641 Y79.7905 Z5.4389
N2190 X37.9383 Y80.3647 Z5.1499
N2200 X38.5126 Y80.939 Z4.8007
N2210 X39.6612 Y82.0876 Z3.9334
N2220 X40.8098 Y83.2362 Z2.8658
N2230 X41.9584 Y84.3848 Z1.6349
N2240 X43.1069 Y85.5333 Z.2779
N2250 X45.4041 Y87.8305 Z-2.6832
N2260 X47.7012 Y90.1276 Z-5.8287
N2270 X49.9984 Y92.4248 Z-9.0533
N2280 X51.1469 Y93.5733 Z-10.6761
N2290 X51.7212 Y94.1476 Z-11.5282
N2300 X52.0084 Y94.4348 Z-12.1586
N2310 X52.1519 Y94.5783 Z-12.6188
N2320 X52.2955 Y94.7219 Z-13.4152
M00
N2330 G0 Z7.1059
N2340 Z22.1667
M30

Anexo 4 – Programa NC com interpolação *spline*

```

N0001 G40
N0002 G54
N0003 G90
N0004 G71
N0005 G97
N0006 G94
N0010 L6
N0011 G1 F2500 G642 Z20
N0680 G00 X-21.213 Y21.213 Z22.167
N0690 G00 X-21.213 Y21.213 Z3.000
N0700 G01 X-21.213 Y21.213 Z.000
M00
$AC_MARKER[1]=0
$AC_MARKER[2]=1
$AC_MARKER[3]=2
$AC_MARKER[4]=3
$AC_MARKER[5]=4
$AC_MARKER[6]=5
$AC_MARKER[7]=6
$AC_MARKER[8]=7
$AC_MARKER[9]=8
$AC_MARKER[10]=9
$AC_MARKER[11]=0
$AC_TIMER[1]=0
G4 F0.010
ID=1 WHENEVER ($AC_MARKER[11]<=10) DO $R[$AC_MARKER[1]]=$AA_IM[X]
$R[$AC_MARKER[2]]=$VA_IM[X] $AC_MARKER[1]=$AC_MARKER[1]+10
$AC_MARKER[2]=$AC_MARKER[2]+10 $AC_MARKER[11]=$AC_MARKER[11]+1
ID=2 WHENEVER ($AC_MARKER[11]<=10) DO $R[$AC_MARKER[3]]=$VA_VACTM[X]
$R[$AC_MARKER[4]]=$AA_IM[Y] $AC_MARKER[3]=$AC_MARKER[3]+10
$AC_MARKER[4]=$AC_MARKER[4]+10
ID=3 WHENEVER ($AC_MARKER[11]<=10) DO $R[$AC_MARKER[5]]=$VA_IM[Y]
$R[$AC_MARKER[6]]=$VA_VACTM[Y] $AC_MARKER[5]=$AC_MARKER[5]+10
$AC_MARKER[6]=$AC_MARKER[6]+10
ID=4 WHENEVER ($AC_MARKER[11]<=10) DO $R[$AC_MARKER[7]]=$AA_IM[Z]
$R[$AC_MARKER[8]]=$VA_IM[Z] $AC_MARKER[7]=$AC_MARKER[7]+10
$AC_MARKER[8]=$AC_MARKER[8]+10
ID=5 WHENEVER ($AC_MARKER[11]<=10) DO $R[$AC_MARKER[9]]=$VA_VACTM[Z]
$R[$AC_MARKER[10]]=$AC_TIMER[1] $AC_MARKER[9]=$AC_MARKER[9]+10
$AC_MARKER[10]=$AC_MARKER[10]+10
ID=6 WHENEVER ($AC_MARKER[11]==10) DO $AC_MARKER[1]=0
$AC_MARKER[2]=1 $AC_MARKER[3]=2 $AC_MARKER[4]=3 $AC_MARKER[5]=4

```

```

$AC_MARKER[6]=5 $AC_MARKER[7]=6 $AC_MARKER[8]=7 $AC_MARKER[9]=8
$AC_MARKER[10]=9 $AC_MARKER[11]=0
ID=7 WHENEVER ($AC_MARKER[11]==10) DO $R[$AC_MARKER[1]]=$AC_TIMER[1]
$R[$AC_MARKER[2]]=$AC_TIMER[1] $R[$AC_MARKER[3]]=$AC_TIMER[1]
$R[$AC_MARKER[4]]=$AC_TIMER[1] $R[$AC_MARKER[5]]=$AC_TIMER[1]
$R[$AC_MARKER[6]]=$AC_TIMER[1] $R[$AC_MARKER[7]]=$AC_TIMER[1]
$R[$AC_MARKER[8]]=$AC_TIMER[1] $R[$AC_MARKER[9]]=$AC_TIMER[1]
$R[$AC_MARKER[10]]=$AC_TIMER[1]
ID=8 WHENEVER ($AC_MARKER[11]==10) DO $AC_MARKER[1]=10
$AC_MARKER[2]=11 $AC_MARKER[3]=12 $AC_MARKER[4]=13 $AC_MARKER[5]=14
$AC_MARKER[6]=15 $AC_MARKER[7]=16 $AC_MARKER[8]=17 $AC_MARKER[9]=18
$AC_MARKER[10]=19 $AC_MARKER[11]=2
N0710 G01 X-17.768 Y24.659 Z.000
N0720 BSPLINE X-17.672 Y24.754 Z-.013 PL=0. SD=3
N0730 X-17.378 Y25.048 Z-.017 PL=.003
N0740 X-16.945 Y25.482 Z-.137 PL=.0062
N0750 X-16.398 Y26.029 Z-.401 PL=.0048
N0760 X-15.964 Y26.462 Z-.789 PL=.0072
N0770 X-15.474 Y26.953 Z-1.459 PL=.0041
N0780 X-14.855 Y27.572 Z-2.256 PL=.0103
N0790 X-14.155 Y28.271 Z-3.164 PL=.0121
N0800 X-13.128 Y29.298 Z-4.255 PL=.0076
N0810 X-12.188 Y30.239 Z-5.093 PL=.0209
N0820 X-11.220 Y31.206 Z-5.515 PL=.0063
N0830 X-10.578 Y31.848 Z-5.659 PL=.0046
N0840 X-9.966 Y32.461 Z-5.424 PL=.0095
N0850 X-9.119 Y33.307 Z-4.609 PL=.0055
N0860 X-8.168 Y34.258 Z-3.147 PL=.0173
N0870 X-6.938 Y35.488 Z-.514 PL=.0215
N0880 X-5.355 Y37.071 Z3.754 PL=.0317
N0890 X-3.752 Y38.674 Z8.526 PL=.0545
N0900 X-2.193 Y40.234 Z12.808 PL=.0319
N0910 X-1.095 Y41.331 Z15.121 PL=.0212
N0920 X-.132 Y42.295 Z16.642 PL=.009
N0930 X.952 Y43.378 Z17.876 PL=.0154
N0940 X2.578 Y45.005 Z18.675 PL=.0193
N0950 X4.008 Y46.435 Z18.416 PL=.0185
N0960 X5.177 Y47.603 Z17.672 PL=.0067
N0970 X6.225 Y48.652 Z16.500 PL=.0153
N0980 X7.116 Y49.542 Z14.779 PL=.0199
N0990 X8.066 Y50.492 Z12.377 PL=.0123
N1000 X9.258 Y51.684 Z8.492 PL=.0294
N1010 X10.701 Y53.127 Z2.662 PL=.0529
N1020 X12.407 Y54.834 Z-4.577 PL=.0557
N1030 X14.117 Y56.543 Z-10.845 PL=.0619
N1040 X15.874 Y58.300 Z-14.826 PL=.0322

```

N1050 X16.996 Y59.423 Z-16.347 PL=.0101
N1060 X17.583 Y60.009 Z-16.710 PL=.0065
N1070 X18.152 Y60.579 Z-16.555 PL=.0031
N1080 X19.145 Y61.571 Z-15.811 PL=.0084
N1090 X20.581 Y63.007 Z-13.981 PL=.0238
N1100 X22.374 Y64.801 Z-10.796 PL=.0286
N1110 X23.885 Y66.311 Z-7.408 PL=.0385
N1120 X25.266 Y67.692 Z-4.299 PL=.0224
N1130 X26.492 Y68.918 Z-1.807 PL=.0212
N1140 X27.866 Y70.293 Z.695 PL=.0243
N1150 X29.488 Y71.914 Z2.939 PL=.0253
N1160 X31.234 Y73.660 Z4.643 PL=.0219
N1170 X33.180 Y75.606 Z5.763 PL=.0196
N1180 X35.577 Y78.003 Z6.161 PL=.0245
N1190 X37.637 Y80.064 Z5.423 PL=.0313
N1200 X39.205 Y81.632 Z4.306 PL=.0102
N1210 X40.903 Y83.330 Z2.874 PL=.0141
N1220 X42.187 Y84.613 Z1.380 PL=.0382
N1230 X43.107 Y85.533 Z.278 PL=0.
N1240 BSPLINE X44.691 Y87.118 Z-1.677 PL=0. SD=3
N1250 X47.809 Y90.235 Z-5.941 PL=.4712
N1260 X51.273 Y93.699 Z-10.841 PL=.5288
N1270 X51.721 Y94.148 Z-11.528 PL=0.
N1280 BSPLINE X52.030 Y94.457 Z-12.090 PL=0. SD=3
N1290 X52.217 Y94.643 Z-12.712 PL=1.
N1300 X52.296 Y94.722 Z-13.415 PL=0.
N1310 G00 X52.296 Y94.722 Z7.106
N1320 G00 X52.296 Y94.722 Z22.167
M30