

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS GRADUÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

**Módulo Computacional, Baseado em Redes
Neurais, para a Força de Corte e para a
Rugosidade, em Torneamento**

Autor: Sérgio Luis Rabelo de Almeida
Orientador: Prof. Dr. Olívio Novaski

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

Módulo Computacional, Baseado em Redes Neurais, para a Força de Corte e para a Rugosidade, em Torneamento

Autor: Sérgio Luis Rabelo de Almeida
Orientador: Prof. Dr. Olívio Novaski

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Tese de Doutorado apresentada a comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção de título de Doutor em Engenharia Mecânica

Campinas, 2006
São Paulo – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

CIDADE BC
CHAMADA T/UNICAMP
AL64m
EX
MBO BC/ 71154
OC. 16.145.07
D X
EQO 11.00
A 17.01.07
ID 396679

Almeida, Sérgio Luis Rabelo de
AL64m Módulo computacional, baseado em redes neurais, para a
força de corte e para a rugosidade, em torneamento / Sérgio
Luis Rabelo de Almeida.--Campinas, SP: [s.n.], 2006.

Orientador: Olívio Novaski.
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Redes neurais (Computação). 2. Controle numérico. 3.
Torneamento. 4. Força (Mecânica). 5. Simulação
(Computadores). 6. Computadores digitais – Programação. I.
Novaski, Olívio. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Titulo em Inglês: Computational module, based on neural networks for cutting force and
roughness in turning.

Palavras-chave em Inglês: Artificial neural networks, CNC, Turning, Simulation, Software,
Force and Roughness.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Anselmo Eduardo Diniz, Nivaldo Lemos Coppini, Marco Stipkovic
Filho, Eduardo Carlos Bianchi

Data da defesa: 14/06/2006

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS GRADUÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

TESE DE DOUTORADO

Módulo Computacional, Baseado em Redes Neurais, para a Força de Corte e para a Rugosidade, em Torneamento

Autor: Sérgio Luis Rabelo de Almeida

Orientador: Prof. Dr. Olívio Novaski

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

**Prof. Dr. Olívio Novaski , Presidente
UNICAMP**

**Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz
UNICAMP**

**Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini
UNICAMP**

**Prof. Dr. Marco Stipkovic Filho
USP**

**Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi
UNESP**

Campinas, 14 junho de 2006

Dedicatória:

Dedico este trabalho aos meus filhos Allan e Gabriel, e à minha esposa Marinês (mozinha).

Agradecimentos:

Ao meu orientador, Prof. Dr. Olívio Novaski pela paciência e apoio na condução desta orientação;

Aos meus pais Hugo de Almeida e Maria Aires Rabelo de Almeida, pelo incentivo e exemplo de vida;

Ao meu irmão Paulo Fernando Rabelo de Almeida, pelo suporte técnico na área de programação;

Ao Prof. Dr. Marco Stipkovic Filho, pela confiança e apoio profissional;

À FAPESP e Diante Informática, pelo suporte financeiro ao desenvolvimento do projeto.

A todos os colegas de trabalho, que direta ou indiretamente, contribuíram para conclusão deste trabalho.

Resumo

ALMEIDA, Sérgio L. R., *Módulo Computacional, Baseado em Redes Neurais, para a Força de Corte e para a Rugosidade, em Torneamento*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006, 136 p. Tese (Doutorado)

Os softwares CAM existentes hoje no mercado permitem facilmente automatizar a geração de programas em linguagem CNC a partir de um modelo CAD. As trajetórias da ferramenta são calculadas respeitando-se a geometria final da peça. No entanto, estes programas, em geral, não disponibilizam recursos para corretamente estimar os parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço, profundidade de usinagem), bem como sua influência em grandezas relevantes ao processo, como a força de corte e a rugosidade. Cria-se, assim, um descompasso com a realidade física do processo.

Adicionalmente, tais programas não foram desenvolvidos com abordagem didática, possuindo pré-requisitos (interface CAD, domínio de idioma estrangeiro etc.) que dificultam ao estudante o fácil aprendizado de processos de usinagem a CNC.

Este trabalho busca então abordar estes problemas vivenciados por escolas técnicas, desenvolvendo um módulo computacional, acoplado a um software CNC didático comercial para torneamento, que permita a predição de esforços de usinagem e rugosidade em tempo de programação CNC. Optou-se pela técnica da rede neural como núcleo, uma vez que permite aproximações bastante satisfatórias do processo de torneamento.

Os resultados indicam que os modelos de rede neurais adotados (perceptron multi-camadas e função de base radial) aproximam de forma satisfatória o comportamento da força de corte e rugosidade, em função dos parâmetros de usinagem escolhidos (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) em uma série de casos de uso, utilizando-se o módulo computacional desenvolvido.

Palavras Chave:

- Processo de torneamento, comando numérico, rede neural, software didático, simulação de usinagem

Abstract

ALMEIDA, Sérgio L. R., Computacional Module, Based on Neural Networks for Cutting Force and Roughness in Turning, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006, 136 p. Thesis (PhD)

The majority of CAM software in the market allows the user to easily create the CNC program through CAD models. The tool paths are calculated in respect to the final piece geometry. However, these software do not permit, as part of their functionality, to estimate the cutting parameters (cutting speed, feed and depth of cut), as well as their influence in process variables such as cutting force and roughness. There is, in that sense, a gap between the geometrical and physical scenario of the machining process.

Additionally, such software were not developed with didactical requirements, which makes difficult to the students the learning of the machining concepts using the CNC technology. The CAD and the foreign language interface are examples of such fact.

This work targets to approach these remarks which are particularly common among the Technical Schools, developing a computational module, embedded in a commercial CNC didactic software, capable of predicting cutting forces (in roughing) and surface roughness (in finishing) at programming time. It was used a neural network technique as the base core, since it allows good estimative of turning process.

The results indicate that the ANN topologies (Multilayer Perceptron and Radial Basis function) correlate satisfactorily with the experimental behavior of the cutting force and roughness regarding the input parameters chosen (cutting speed, feed and depth of cut) for different cases using the software prototype.

Keywords:

- Turning process, numerical control, neural networks, didactic software, machining simulation.

ÍNDICE

LISTA DE GRÁFICOS	V
LISTA DE TABELAS	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
NOMENCLATURA	IX
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	3
1.3 A METODOLOGIA	4
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	5
2 MODELOS TEÓRICOS DE FORÇA DE USINAGEM E RUGOSIDADE	6
2.1 MODELOS TEÓRICOS PARA FORÇA DE USINAGEM	6
2.1.1 FORÇAS DURANTE A USINAGEM.....	6
2.1.2 POTÊNCIAS DE USINAGEM.....	7
2.2 MODELOS TEÓRICOS PARA RUGOSIDADE	13
2.2.1 INTRODUÇÃO	13
2.2.2 FORMULAÇÕES TEÓRICAS	15
3 A TECNOLOGIA CNC APLICADA À USINAGEM E SEUS SISTEMAS DE PROGRAMAÇÃO	18
3.1 HISTÓRICO DO CNC	18
3.2 DEFINIÇÕES	21
3.3 VANTAGENS	23

3.4	DESVANTAGENS.....	24
3.5	ARQUITETURA DE MÁQUINAS CNC	24
3.6	PROGRAMAÇÃO.....	25
3.7	SISTEMAS COMPUTACIONAIS DE PROGRAMAÇÃO.....	28
3.7.1	DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DA PEÇA.....	29
3.7.2	DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA	30
3.7.3	ESTABELECIMENTO DA SEQÜÊNCIA DE OPERAÇÃO	30
3.7.4	CÁLCULO DAS COORDENADAS DOS PONTOS DA TRAJETÓRIA	30
3.7.5	VERIFICAÇÃO GRÁFICA	31
3.7.6	GERAÇÃO DO ARQUIVO DE LOCALIZAÇÃO DA FERRAMENTA E PÓS-PROCESSAMENTO	31
3.7.7	COMPARATIVO ENTRE OS SOFTWARES CAM [REVISTA CADALYST, 2005]	32
4	O ESTADO DA ARTE DA APLICAÇÃO DAS REDES NEURAIS EM USINAGEM.....	33
4.1	DEFINIÇÕES	33
4.1.1	SISTEMAS ESPECIALISTAS.....	34
4.1.2	LÓGICA NEBULOSA.....	34
4.1.3	ALGORITMOS GENÉTICOS.....	35
4.2	AS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	36
4.2.1	GENERALIDADES.....	36
4.2.2	HISTÓRICO	37
4.2.3	O MODELO DE UM NEURÔNIO.....	38
4.2.4	FUNÇÕES DE ATIVAÇÃO	39
4.2.5	TOPOLOGIA DE REDES	43
4.2.6	REGRAS DE APRENDIZADO	45
4.3	AS APLICAÇÕES DAS RNA EM USINAGEM.....	48
4.3.1	SIMULAÇÃO DE TRAJETÓRIAS DE FERRAMENTA EM FRESAMENTO.....	48
4.3.2	ESTIMATIVA DA RUGOSIDADE E DESGASTE EM FERRAMENTAS DURANTE O FRESAMENTO ..	48
4.3.3	ESTIMATIVA DA RUGOSIDADE EM TORNEAMENTO [40, 67, 68].....	49
4.3.4	PREDIÇÃO DE DESGASTE POR CRATERAMENTO EM TORNEAMENTO.....	49
4.3.5	ESTIMATIVA DOS ERROS DE ORIGEM TÉRMICA EM MÁQUINAS CNC.....	49
4.3.6	ESTIMATIVA DE FORÇAS DE USINAGEM.....	49
4.3.7	ESTIMATIVAS DE CUSTOS DE USINAGEM	50

5	AS TECNOLOGIAS COMPUTACIONAIS DE SUPORTE	51
5.1	INTRODUÇÃO	51
5.2	TECNOLOGIAS DE MODELAMENTO GEOMÉTRICO	51
5.2.1	ANÁLISE DOS PRODUTOS	53
5.3	FERRAMENTAS DE ANÁLISE PREDITIVA - RNA	56
5.3.1	ANÁLISE DE PRODUTOS.....	56
5.4	FERRAMENTAS DE PROGRAMAÇÃO CNC.....	58
5.4.1	DIAGRAMA BÁSICO DO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO.....	59
5.4.2	EXPLICAÇÃO DO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO	60
6	A METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA.....	64
6.1.1	GERAÇÃO DOS MODELOS DE REDE NEURAL	64
6.1.2	TREINAMENTO E TESTE DA REDE NEURAL	65
6.1.3	GERAÇÃO DA BIBLIOTECA DINÂMICA.....	69
6.1.4	INCORPORAÇÃO DA BIBLIOTECA AO SOFTWARE COMERCIAL DE SIMULAÇÃO	69
6.1.5	CÁLCULO DOS TEMPOS DE CORTE [NIDERAUER, 2004]	70
6.1.6	ESTABELECIMENTO DOS CASOS DE USO	73
6.1.7	DESIGN DAS INTERFACES E PROGRAMAÇÃO DAS CLASSES DE OBJETOS E COMPONENTES .	76
6.1.8	DEFINIÇÃO DAS INTERFACES DO MÓDULO.....	79
6.1.9	CONFIGURAÇÃO DA REDE	80
6.1.10	CADASTRO DE MATERIAL	80
6.1.11	PLOTAGEM DO GRÁFICO	80
7	RESULTADOS OBTIDOS.....	81
7.1	INTRODUÇÃO	81
7.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS DE FORÇA DE CORTE E ACABAMENTO SUPERFICIAL A PARTIR DOS MODELOS DE RN	81
7.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS DE FORÇA DE CORTE E ACABAMENTO SUPERFICIAL A PARTIR DO PROTÓTIPO.....	90
7.3.1	CASO 1: TORNEAMENTO CILÍNDRICO COM PROFUNDIDADES DE CORTE CONSTANTES POR TRECHO	90

7.3.2	CASO 2: TORNEAMENTO CÔNICO COM VARIAÇÃO CONTÍNUA DE PROFUNDIDADES DE CORTE	92
7.3.3	CASO 3: ACABAMENTO DE UM PERFIL	94
8	CONCLUSÕES.....	98
	BIBLIOGRAFIA.....	101
9	ANEXOS.....	109
9.1	PROGRAMAS CNC.....	109
9.1.1	CASO 1	109
9.1.2	CASO 2	110
9.1.3	CASO 3	111
9.2	ARQUIVOS DE RESULTADOS – ESTUDOS DE CASO.....	111
9.2.1	CASO 1	111

Lista de Gráficos

Gráfico 7.1 – Resultados do treinamento para os dados experimentais – topologia MLP (força vs número da amostra).....	82
Gráfico 7.2 – Resultados do erro para os dados experimentais – topologia MLP (erro vs iterações)	82
Gráfico 7.3 – Resultados do treinamento para os dados experimentais – topologia RBF (força vs número da amostra).....	83
Gráfico 7.4 – Gráfico do treinamento para os dados experimentais – topologia MLP (rugosidade vs número da amostra)	84
Gráfico 7.5 – Resultados do treinamento para os dados experimentais – topologia RBF (rugosidade vs número da amostra)	85
Gráfico 7.6 – Resultados do teste – topologia MLP (Força vs exemplares).....	86
Gráfico 7.7 – Resultados do teste – topologia RBF (Força vs exemplares).....	87
Gráfico 7.8 – Resultados do teste – topologia MLP (Ra vs exemplares).....	88
Gráfico 7.9 – Resultados do teste – topologia RBF (Ra vs exemplares)	89
Gráfico 7.10 – Gráfico da força de usinagem – caso 1	92
Gráfico 7.11 – Gráfico da força de usinagem – caso 2	94
Gráfico 7.12 – Gráfico da força de usinagem – caso 3	96
Gráfico 7.13 – Gráfico da rugosidade– caso 3	97

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Número/idade de máquinas [Revista Máquinas e Metais, 2001].....	2
Tabela 3.1 – Dados estatísticos da evolução do parque de máquinas CNC no Brasil [Revista Máquinas e Metais, 2001]	22
Tabela 3.2 – Fluxograma da estrutura típica de um programa CNC [Apostila SENAI, 2003].....	26
Tabela 6.1 – Dados experimentais para força de usinagem – treinamento [Lin, 2001].....	66
Tabela 6.2 – Dados experimentais para força de usinagem – validação [Lin, 2001].....	67
Tabela 6.3 – Dados experimentais para força de usinagem – teste [Lin, 2001].....	67
Tabela 6.4 – Dados experimentais para rugosidade– treinamento [Lin, 2001].....	68
Tabela 6.5 – Dados experimentais para rugosidade– validação [Lin, 2001]	68
Tabela 6.6 – Dados experimentais para rugosidade– teste [Lin, 2001]	69
Tabela 7.1 – Resultados obtidos para teste do modelo MLP – Força de Usinagem	85
Tabela 7.2 – Resultados obtidos para teste do modelo RBF – Força de Usinagem.....	86
Tabela 7.3 – Resultados obtidos para teste do modelo MLP – Rugosidade Superficial.....	88
Tabela 7.4 – Resultados obtidos para teste do modelo RBF – Rugosidade	89

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Distribuição das componentes da força de usinagem em torneamento [Coppini, 2000].....	7
Figura 2.2 – Relação entre a espessura de corte e o avanço para uma operação de torneamento [Ferraresi – 1977].....	9
Figura 2.3 – Modelo de corte ortogonal [Meng, 2000].....	10
Figura 2.4 – Modelo de determinação de esforços de corte com o efeito, do desgaste [adaptado de Smithey, 2000]	12
Figura 2.5 – Distribuição das tensões ao longo da superfície de desgaste [Smithey, 2000].....	13
Figura 2.6 – Perfis de rugosidade [Novaski, 1994].....	14
Figura 2.7 – Rugosidade teórica para o torneamento [Sandvik, 2003]	16
Figura 3.1 – Fluxograma de fluxo de informações numa máquina CNC [Groover, 2000]	24
Figura 3.2 – Desenho de fabricação de uma peça torneada	26
Figura 3.3 – Exemplo da interface um software editor CNC [Adiante Informática, 2005].....	28
Figura 3.4 – Exemplo da interface de um software CAM [MasterCAM, 2005].....	29
Figura 3.5 – Exemplo da geometria necessária para operações em torneamento [Lee, 1999]	30
Figura 4.1 – Modelo de um neurônio artificial genérico.....	38
Figura 4.2 – Representação de uma função de ativação linear.	40
Figura 4.3 – Representação de uma função de ativação sigmoidal.....	41
Figura 4.4 – Representação da função de ativação tangente hiperbólica.....	42
Figura 4.5 – Representação da função de ativação gaussiana.....	42
Figura 4.6 – Exemplo de modelo de uma RNA. [Timoscuzuk, 2004].....	43
Figura 4.7 – Representação de uma rede neural MLP típica. (Haykin, 1999).....	44

Figura 4.8 – Representação de uma rede neural RBF típica. [Neurosolutions, 2003]	45
Figura 5.1 – Exemplo de aplicação gerada usando o núcleo OC [Open Cascade, 2003]	55
Figura 5.2 – Estrutura de interfaceamento de um núcleo de modelagem terceiro [C4W, 2003] ...	56
Figura 5.3 – Software para predição com uso de redes neurais – Neuroshell Predictor [Wardsystems, 2003].....	57
Figura 5.4 – Software para predição com uso de redes neurais – Neurosolutions [Neurosolutions Inc, 2003]	58
Figura 5.5– Diagrama de Fluxo de Dados – Software de Edição e Simulação (Adiante Informática, 2004).....	59
Figura 5.6 – Interface de simulação CNC 2D [Adiante Informática, 2004]	62
Figura 5.7 – Interface de edição textual do código - CNC 2D [Adiante Informática, 2004].....	62
Figura 5.8– Interface de seleção geométrica de ferramentas - CNC 2D [Adiante Informática, 2004].....	63
Figura 6.1 – Estrutura dos modelos de rede neural utilizados	65
Figura 6.2 – Porta-ferramenta e inserto utilizados no ensaio [Sandvik, 2003]	66
Figura 6.3 - Percurso de uma ferramenta	70
Figura 6.4 - Casos especiais de trajetórias de torneamento.....	71
Figura 6.5 – Janela para cadastramento de dados para treino	79
Figura 6.6 – Janela para configuração da rede	80
Figura 6.7 – Janela para configuração da rede	80
Figura 7.1 – Resultado da simulação – caso 1	91
Figura 7.2 – Resultado da simulação – caso 2	93
Figura 7.3 – Resultado da simulação – caso 3	95
Figura 7.4 – Detalhe do arredondamento – caso 3	95

Nomenclatura

Letras Latinas

F_u - força de usinagem	[N]
F_c - força de corte	[N]
F_f - força de avanço	[N]
F_t - força ativa	[N]
F_p - força passiva	[N]
v_c - velocidade de corte	[m/min]
v_f - velocidade de avanço	[mm/min]
v_e - velocidade efetiva	[m/min]
P_c - potência de corte	[kW]
P_f - potência de avanço	[kW]
k_c - força específica de corte	[MPa]
A_c - área de cavaco	[mm ²]
$k_{c1,1}$ - força específica de corte para 1 mm ² de área de cavaco	[MPa]
h - espessura do cavaco	[mm]
c_c - constante da formulação de Kienzle	
f - avanço	[mm]
a_p - profundidade de corte	[mm]
$F_{x,y,z}$ - força na direção de x, y ou z	[N]
$D_{x,y,z}$ - coeficiente para a formulação de Axinte	
$g_{x,y,z}$ - expoente da profundidade de corte para a formulação de Axinte	
$h_{x,y,z}$ - expoente do avanço para a formulação de Axinte	
F_T - força normal	[N]
F_{TF} - força normal incremental	[N]
F_{CF} - força de corte incremental	[N]
K - Coeficiente para a formulação de Choudhury	
a, a' - expoentes da velocidade de corte para a formulação de Choudhury	
b, b' - expoentes do avanço para a formulação de Choudhury	
c, c' - expoentes do desgaste de flanco para a formulação de Choudhury	
σ_w - tensão normal	[MPa]
τ_w - tensão de cisalhamento	[MPa]
F_{cw} - força normal	[N]

F_{tw} - força de cisalhamento	[N]
w - espessura de corte segundo Smithey	[mm]
VB_p – desgaste de flanco no regime plástico	[mm]

.....

Letras Gregas

χ_n – ângulo de posição de aresta principal	[graus]
γ_0 - ângulo da superfície de saída	[graus]
ϕ - ângulo de cisalhamento	[graus]
λ - ângulo entre a componente normal e resultante	[graus]

.....

Abreviações

- EP – Elemento de processamento
- MLP – Topologia Perceptron de Multicamadas
- RBF – Topologia Função de Base Radial
- CL – Localização da ferramenta
- MCD – Dados em código de máquina
- UML – Unified Modelling Language – Linguagem unificada de modelagem
- DLL – Dynamic Link Library – Biblioteca de execução dinâmica
- VB – Visual Basic

1 Introdução

Instituições de ensino e indústrias de pequeno porte deparam-se hoje com o advento da tecnologia chegando às suas portas. O aprimoramento de suas linhas de produção e os laboratórios de ensino tem deixado de ser uma opção e se tornaram uma tendência de mercado.

Neste cenário, observa-se uma busca incessante das indústrias por estas novas máquinas programáveis, que agilizam e diminuem as perdas no processo de produção. Este fato é constatado no aumento da demanda destes equipamentos no Brasil. Em entrevistas com fabricantes e importadores de máquinas, foi estimado um número em torno de 4000 máquinas-ferramenta CNC comercializadas no Brasil anualmente. A estimativa é que haja, atualmente, por volta de 28.000 máquinas CNC no Brasil. Em dois anos, a variação foi de 29,4% a mais no total de máquinas-ferramenta CNC comercializadas no Brasil [Revista Máquinas e Metais, 2001].

No ano de 2001 houve um aumento de 47% no número de fresadoras CNC e 20% no número de tornos CNC [Revista Máquinas e Metais, 2001]. A tabela 1.1 mostra a quantidade de máquinas ferramentas estimadas no parque brasileiro bem como sua idade média.

Tipo de máquina	Quantidade Total de Máquinas			Idade Média das Máquinas			
	Geral	Convencional	CNC	0 a 4	5 a 9	10 a 19	mais de 20
Centro de Usinagem	9.775	-	9.775	5.156	3.290	1.006	323
Fresadora	24.110	22.085	2.025	4.174	6.794	9.141	4.000
Torno	57.340	47.204	10.136	9.057	16.175	20.589	11.523

Tabela 1.1 - Número/idade de máquinas [Revista Máquinas e Metais, 2001]

Paralelamente, esta busca acaba por gerar uma demanda na disponibilização de vagas de trabalho para profissionais que tem, em seu currículo, uma formação técnica em processos de fabricação automatizados. Esta relação justifica o aumento do número de profissionais que procuram se reciclar aprendendo esta nova linguagem, e estudantes que incluem em seus planos de formação tecnológica o aprendizado destas novas tecnologias. No último ano (2005), foram registrados mais de 2,4 milhões de matrículas no ensino profissionalizante básico, médio e tecnológico (SENAI-DN, 2005)

Observa-se que a inclusão das modernas tecnologias de automação da manufatura, nos processos de ensino e aprendizagem se torna crucial para o posterior aproveitamento desta mão de obra dentro do setor produtivo. Uma destas tecnologias é o CNC – Comando Numérico Computadorizado, o qual consiste numa forma flexível de automação, aplicável a máquinas ferramenta, baseada na interpretação de programas codificados.

A programação destes equipamentos pode ser realizada diretamente no comando da máquina ou por softwares especializados, seja por programação textual (editores CNC) ou programação gráfica (CAM). A utilização de softwares CAM na atividade de programação vem se tornando comum, ou mesmo essencial, em certas áreas produtivas como, por exemplo, a matrizaria e estampos. No entanto, para usinagem de peças de geometria simplificada ou em ambientes semi-automáticos, o uso de editores CNC se torna mais adequado, pois exigem mão de obra menos qualificada.

Os programas dedicados à programação CNC não disponibilizam módulos que calculem as grandezas físicas e geométricas relevantes ao processo de usinagem [Gibbs, 1998], dificultando assim ao programador corretamente estabelecer os parâmetros de processo que atendam às especificações do componente em questão. As forças de usinagem, por um lado, e a rugosidade superficial do outro são exemplos comuns.

Este trabalho pretende então endereçar esta deficiência no âmbito da formação de mão de obra, desenvolvendo um módulo de predição para força de usinagem (ou sua componente de corte) e rugosidade, acoplado a um programa comercial didático de programação CNC. Utilizou-se a rede neural, como técnica computacional de aproximação dos dados experimentais.

Objetivos

- Desenvolver um módulo computacional para determinação dos esforços de usinagem em desbaste e rugosidade em acabamento, para operações de torneamento a partir das condições de processo, baseada na técnica de redes neurais;
- Incorporar este módulo num software CNC didático comercial de forma que as suas saídas permitam uma melhor compreensão, por parte dos estudantes, das grandezas envolvidas no processo de usinagem.

Justificativa do trabalho

Os softwares CAM existentes hoje no mercado permitem facilmente automatizar a geração de programas em linguagem CNC a partir de um modelo CAD. As trajetórias de ferramenta são calculadas respeitando-se a geometria final da peça. No entanto, estes programas, em geral, não disponibilizam recursos para corretamente estimar os parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço, profundidades de usinagem), bem como sua influência em grandezas relevantes ao processo, como a força de corte e a rugosidade, ficando a critério do programador o uso adequado destas grandezas com base em experiências anteriores, dados de usinagem ou catálogos de fabricantes. Cria-se, assim, um descompasso com a realidade física do processo [Gibbs, 1998].

Adicionalmente, tais programas não foram desenvolvidos com abordagem didática, possuindo pré-requisitos (interface CAD, domínio de idioma estrangeiro etc.) que dificultam ao estudante o fácil aprendizado de processos de usinagem a CNC.

Este trabalho busca então abordar estes problemas vivenciados por escolas técnicas, desenvolvendo um módulo computacional, acoplado a um software CNC didático comercial para

torneamento, que permita a predição de esforços de usinagem e rugosidade em tempo de programação CNC. Optou-se pela técnica de rede neural como núcleo facilitador do processo, uma vez que permite aproximações bastante satisfatórias das grandezas referentes ao processo de torneamento.

A Metodologia

O desenvolvimento do projeto previu as seguintes etapas:

1. Estabelecimento dos pré-requisitos do sistema
2. Análise e projeto do sistema
3. Implementação ou codificação
4. Testes de uso

Os pré-requisitos do sistema estabelecem que o protótipo deva ser capaz de realizar a determinação em tempo real dos esforços de usinagem ou rugosidade, caso a operação seja de desbaste, ou acabamento, respectivamente, para torneamento. Adicionalmente, o módulo deve se adaptar aos diferentes tipos de materiais para a peça e a ferramenta. Por último, a interface deve ser amigável e os resultados devem ser mostrados graficamente para uma perfeita visualização dos resultados.

O projeto foi modelado utilizando a linguagem UML e codificado em VB e C++. A programação adotada foi orientada a objetos.

O modelo de rede neural foi previamente treinado num software específico, sendo disponibilizado em forma de biblioteca dinâmica (DLL) para uso do módulo de predição.

Os testes foram realizados a partir da análise de programas CNC cujo comportamento das grandezas envolvidas era conhecido a partir de dados experimentais da bibliografia [Sandvik, 2003] e [Lin, 2001].

Organização do Trabalho

Esta tese foi organizada em oito capítulos, sendo o primeiro destinado aos objetivos, justificativa e organização do trabalho.

O segundo capítulo, “Modelos Teóricos de Força de Usinagem e Rugosidade”, apresenta um resumo dos modelos para cálculo teórico da força e da rugosidade.

O terceiro capítulo “A Tecnologia CNC aplicada a Usinagem e seus Sistemas de Programação” versa sobre a tecnologia CNC, suas vantagens e aplicações. Incorpora os métodos de programação, como também os sistemas computacionais associados.

O quarto capítulo “O Estado da Arte da Aplicação das Redes Neurais em Usinagem” faz uma abordagem sobre os conceitos da área, contextualizando as redes neurais artificiais no âmbito dos processos de usinagem.

O quinto capítulo, “As Tecnologias Computacionais de Suporte”, apresenta as ferramentas computacionais utilizadas para o desenvolvimento, incluindo as respectivas justificativas de uso.

O sexto capítulo, “A Metodologia para o Desenvolvimento do Sistema”, apresenta em detalhes o projeto do módulo de simulação e de predição, incluído seus requisitos, metodologia, fluxogramas e casos de uso.

O sétimo capítulo, “Resultados Obtidos” ilustra e discute os principais resultados obtidos com base na análise de programas CNC exemplo.

O oitavo capítulo, “Conclusões”, contempla as conclusões obtidas no decorrer do trabalho, bem como as dificuldades não superadas e possíveis abordagens para continuidade.

2 Modelos Teóricos de Força de Usinagem e Rugosidade

Modelos Teóricos para Força de Usinagem

Um aspecto importante no escopo deste projeto é determinar ordem de grandeza dos esforços de usinagem nas operações de usinagem. Isto porque eles afetam a potência e torques disponibilizados pela máquina ferramenta, bem como na capacidade de se obter tolerâncias dimensionais estreitas ou rugosidade, devido a sua influência no desgaste da ferramenta.

Existem duas abordagens comuns: uma **teórica**, onde são formulados modelos matemáticos partindo-se do estudo da formação do cavaco; e outras **empíricas**, baseadas em análises experimentais, de onde são obtidos coeficientes utilizados no equacionamento dos esforços.

2.1.1 Forças durante a usinagem

A força de usinagem (F_u) é considerada como uma ação da peça sobre a ferramenta, cuja direção e sentido não é previamente conhecido nem sua intensidade passível de medição. Prefere-se, portanto, trabalhar com as componentes da força de usinagem, segundo as diversas direções conhecidas, associadas aos movimentos comuns na usinagem [Coppini, 2000].

Desta forma, tem-se a decomposição da força de usinagem numa força ativa (F_t) disposta no plano de trabalho e outra força passiva (F_p), ortogonal ao mesmo. Adicionalmente, a força

ativa pode ser decomposta nas direções de corte e avanço, gerando as componentes F_c e F_f , respectivamente. A figura 2.1 a seguir mostra a disposição espacial destas componentes para melhor entendimento [Coppini, 2000]:

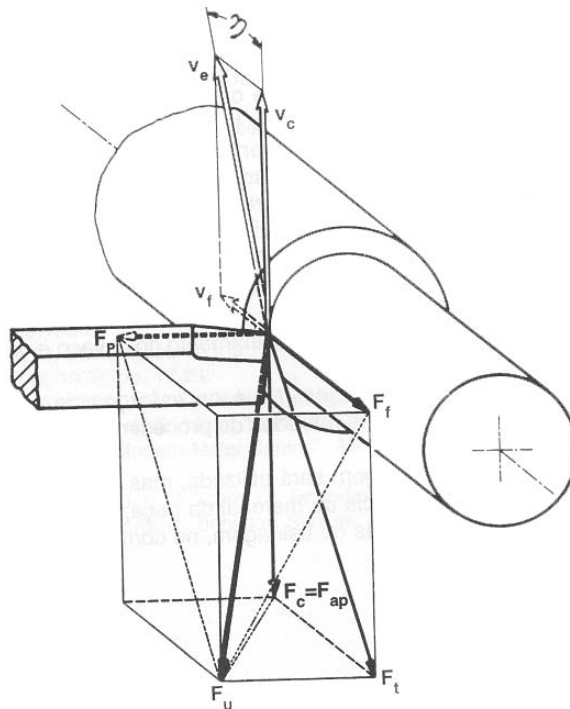


Figura 2.1 – Distribuição das componentes da força de usinagem em torneamento [Coppini, 2000]

2.1.2 Potências de usinagem

Torna-se necessário que máquina-ferramenta gere a potência necessária para executar os movimentos de corte e avanço, e podem-se estabelecer as seguintes relações [Coppini, 2000 e Ferraresi, 1977]:

$$\text{Potência de corte (P}_c\text{): } P_c = \frac{F_c v_c}{60 \cdot 10^3} \text{ (kW)} \quad (2.1)$$

Onde: F_c é dada em N e V_c em m/min

$$P_c = \frac{F_c v_c}{75.60} \text{ (CV)} \quad (2.2)$$

Onde: F_c é dada em Kgf e V_c em m/min

$$\text{Potência de avanço (P}_f\text{): } P_f = \frac{F_f v_f}{60.10^6} \text{ (kW)} \quad (2.3)$$

Onde: F_f é dada em N e V_f em mm/min

A potência de corte é a maior componente devido à ordem de grandeza da velocidade de corte e, portanto preponderante no dimensionamento que aciona o eixo árvore. Por outro lado, a potência, devido a força passiva, pode ser considerada nula, pois esta força não realiza trabalho.

A seguir, serão analisados alguns modelos para determinação dos esforços de usinagem desenvolvidos ou adaptados por diversos autores [Ferraresi, 1997], [Axinte, 2001], [Sandvik, 2003] e [Meng, 2000], e específicos para torneamento:

A força de corte (F_c) pode ser expressa de diversas formas, sendo que a mais simplificada, estabelece:

$$F_c = k_c \cdot A_c \text{ (N)} \quad (2.4)$$

Onde: k_c é a força específica de corte em MPa e A_c a área do cavaco em mm^2 , que no torneamento é dada pela multiplicação do avanço pela profundidade de usinagem.

Diversos fatores influenciam diretamente na força específica de corte, tais como o material da peça e da ferramenta, a geometria da ferramenta, as condições de usinagem, a lubri-refrigeração e o desgaste da ferramenta.

Para cálculo de k_c , Kienzle [Coppini, 2000] apresentou uma formulação empírica bastante simples e precisa. Ele partiu de experimentos, de medição de k_c em função da espessura de corte, e constatou a seguinte correlação:

$$k_c = k_{c1,1} \cdot h^{-c_c} \text{ (MPa)} \quad (2.5)$$

Onde: $k_{c1,1}$ e c_c são fatores levantados experimentalmente para uma dada situação de usinagem.

A obtenção da espessura de corte pode ser feita através do avanço e do ângulo de posição da aresta principal de corte (χ_n) pela fórmula:

$$h = f \cdot \text{sen} \chi_n \text{ (mm)} \quad (2.6)$$

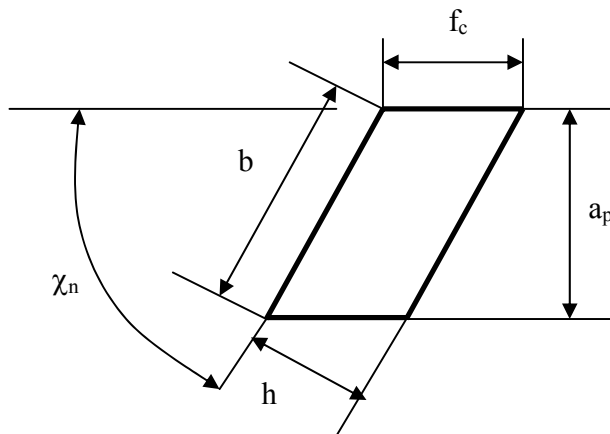


Figura 2.2 – Relação entre a espessura de corte e o avanço para uma operação de torneamento [Ferraresi – 1977]

Também Axinte et al (2001), ao analisar as incertezas associadas à determinação dos esforços de usinagem, propôs a seguinte relação:

$$F_{x,y,z} = D_{x,y,z} a_p^{g_{x,y,z}} f^{h_{x,y,z}} \text{ (N)} \quad (1.7)$$

Onde: D, g e h são constantes empíricas.

Observe que não existe a presença da variável v_c no equacionamento, pois este foi concluído não ser significativo.

Outra forma para determinação destes esforços é a aplicação da teoria de usinagem ortogonal a qual é baseada num modelo de formação de cavaco suposto de deformação plana e em regime permanente. A figura 2.3 ilustra o modelo de corte ortogonal, segundo Oxley [Meng, 2000]

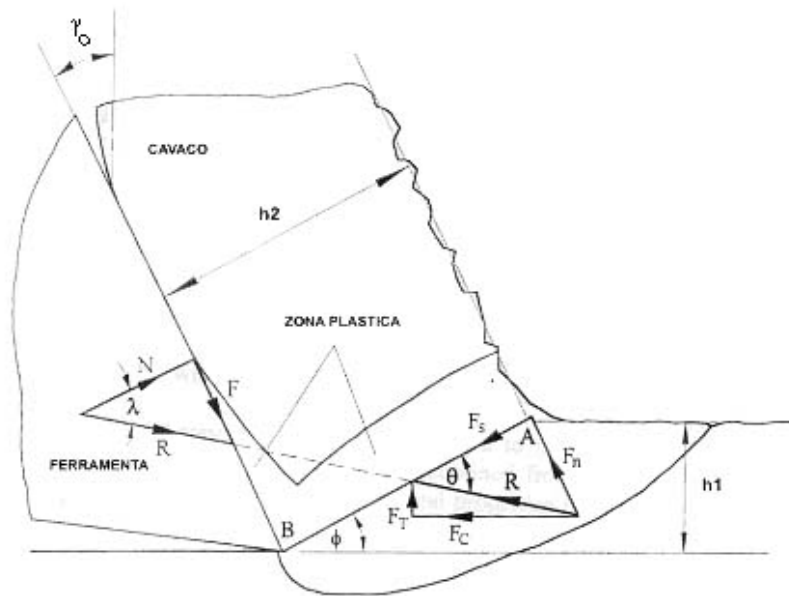


Figura 2.3 – Modelo de corte ortogonal [Meng, 2000]

De forma simplificada, o plano AB é admitido como o plano de máxima tensão cisalhante e máxima taxa de deformação no processo. Este plano faz com a superfície usinada um ângulo ϕ , dito ângulo de cisalhamento, que pode ser determinado a partir da espessura do cavaco h e pelo ângulo de saída ferramenta γ_0 . Por outro lado, a resultante R , que representa a força que a ferramenta exerce sobre o cavaco, age numa direção θ com o plano de cisalhamento.

Uma aproximação para este ângulo de cisalhamento pode ser dada por:

$$\text{sen}\phi = \frac{h_1}{h_2} \quad (2.8)$$

A resultante R , pode ser calculada por:

$$R = \frac{K_{AB} h_1 b}{\text{sen}\phi \cos\theta} \quad (\text{N}) \quad (2.9)$$

Onde: K_{AB} é a tensão de cisalhamento atuante no plano AB, em MPa, h_1 é a espessura do cavaco indeformada, em mm, b a largura do cavaco, em mm, e θ é o ângulo entre R e o plano de cisalhamento.

Por último, podemos estimar as forças que agem nas direções de corte (F_C) e normal (F_T), por:

$$F_C = R \cos(\lambda - \gamma_0) \text{ (N)} \quad (2.10)$$

$$F_T = R \sin(\lambda - \gamma_0) \text{ (N)} \quad (2.11)$$

Onde: λ é ângulo entre a componente normal N e R, que corresponde ao coeficiente de atrito na interface cavaco-ferramenta.

Este modelo não leva em conta o desgaste que a ferramenta sofre durante o processo de usinagem. Assim, alguns modelos foram aperfeiçoados para incluir este fenômeno.

Choudhury (1999), propôs que devido a formação da superfície de desgaste, duas forças adicionais, conhecidas por força normal incremental (F_{TF}) e força de corte incremental (F_{CF}), agem na cunha cortante da ferramenta, como resultado do contato entre a superfície de folga de ferramenta e a superfície acabada da peça. Então, a força de corte e a normal total seriam a somatória de duas componentes, uma capaz de deformar o material (sem desgaste) e outra exclusiva devido ao desgaste.

A formulação para cálculo é dada empiricamente por:

$$F_{CF} = K v_c^{a'} f^{b'} VB^{c'} \text{ (N)} \quad (2.12)$$

$$F_{TF} = K_1 v_c^a f^b VB^c \text{ (N)} \quad (2.13)$$

Onde: v_c é a velocidade de corte, f o avanço e VB a largura do desgaste de flanco; as demais letras são constantes experimentais.

Smithey (2000), também propôs um modelo de esforços prevendo apenas o efeito de desgaste. Neste modelo as forças de corte (F_{cw}) e normal (F_{tw}) podem ser calculadas, integrando-

se as tensões de cisalhamento e normais τ_w e σ_w , respectivamente ao longo da espessura da superfície de desgaste. Analiticamente, pode-se escrever:

$$F_{cw} = w \int_0^{VB} \sigma_w(x) dx \quad (\text{N}) \quad (2.14)$$

$$F_{tw} = w \int_0^{VB} \tau_w(x) dx \quad (\text{N}) \quad (2.15)$$

Onde: w é a espessura de corte, VB a espessura da superfície de desgaste e x a distância até a ponta da ferramenta.

O esquema a seguir (figura 2.4) ilustra as grandezas envolvidas:

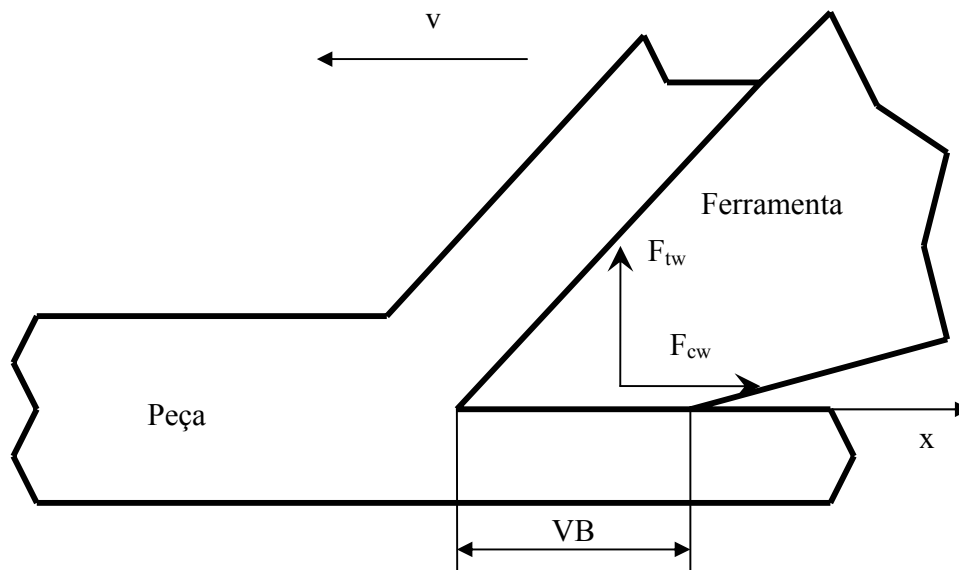


Figura 2.4 – Modelo de determinação de esforços de corte com o efeito, do desgaste
[adaptado de Smithey, 2000]

Os valores das tensões na ponta da ferramenta são calculados usando modelos de contato. Primeiramente, a máxima tensão normal efetiva deve ser igual à resistência ao escoamento do material da peça e, para cálculo das tensões de cisalhamento, é admitido que o atrito na interface

ferramenta-peça é de origem adesiva. O comportamento admitido destas tensões pode ser observado na figura 2.5. Observe que durante o contato no regime plástico as tensões são supostas constantes e iguais ao limite de escoamento do material, até um desgaste VB_p , sendo decrescentes exponencialmente até chegar a zero em VB . Este valor máximo de VB representa o ponto onde a superfície de folga se afasta da peça.

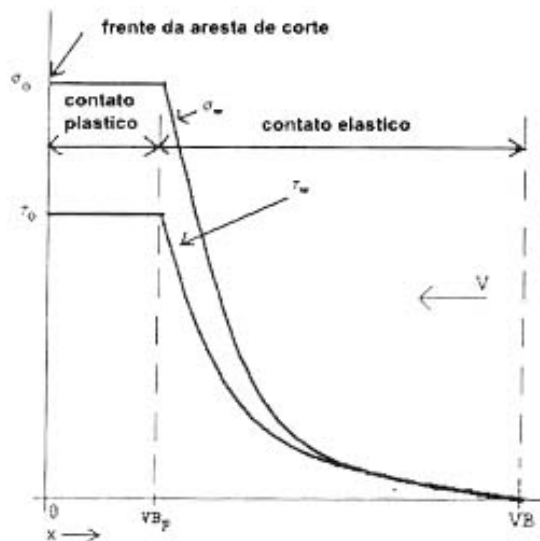


Figura 2.5 – Distribuição das tensões ao longo da superfície de desgaste [Smithey, 2000]

Modelos Teóricos para Rugosidade

2.1.3 Introdução

A rugosidade ou textura primária pode ser entendida como a geometria gerada na superfície, a partir dos sulcos ou marcas deixados pela ferramenta [Novaski, 1994], e representa um desvio micro-geométrico de grande influência na funcionalidade dos componentes acabados. A figura 2.6 mostra um perfil de rugosidade, diferenciando-o da ondulação (desvio macro-geométrico) advindo das imprecisões de movimento da máquina ferramenta.

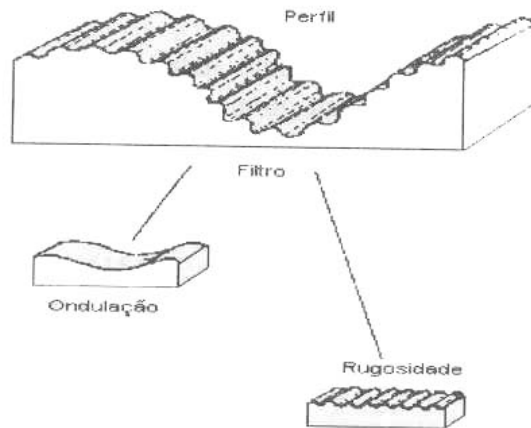


Figura 2.6 – Perfis de rugosidade [Novaski, 1994]

Existem diversos parâmetros de avaliação de rugosidade normalizados. Para efeito deste trabalho, citaremos:

Rugosidade média (R_a): é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos afastamentos dos pontos do perfil de rugosidade, em relação a linha média, dentro o percurso de medição. Analiticamente é dada por [Novaski, 2000]:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (\text{mm}) \quad (2.16)$$

Rugosidade média (R_z): é a média aritmética dos 5 valores da rugosidade parcial Z_i , definida como a soma dos valores absolutos das ordens dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes num comprimento de amostragem. Analiticamente é dada por:

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Z_i \quad (\text{mm}) \quad (2.17)$$

Rugosidade média quadrática (RMS) (R_q): é o desvio médio quadrático e vale cerca de 1,25 vezes o valor de R_a . É dada por;

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2(x) dx} \quad (\text{mm}) \quad (2.18)$$

Onde L é o percurso de medição

A rugosidade tem sido um foco de pesquisa bastante relevante por muito anos, devido a sua influência em aspectos de projeto e qualidade dos produtos. Alguns exemplos são peças submetidas a carregamentos de fadiga, ajustes de precisão, vedações e questões estéticas [Chang, 2001].

O foco das pesquisas tem duas frentes distintas:

- *Estudo das tolerâncias* [Feng, 2001], onde se analisa a influência da rugosidade na tolerância dimensional
- *Desenvolvimento de modelos empíricos*, usando dados experimentais [Feng e Wang, 2002], com o objetivo de ajudar na seleção de parâmetros de processo que melhorem a rugosidade.

A seguir serão discutidas algumas formulações teóricas.

2.1.4 Formulações Teóricas

A bibliografia apresenta um número grande de estudos que foram realizados para investigar os efeitos da velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, raio de ponta e outros parâmetros na rugosidade.

Uma equação muito usada pode ser encontrada em Novaski (1994) e Sandvik (2003).

$$R_{\max} = \frac{f^2}{8r_\epsilon} \cdot 1000 \quad (\mu\text{m}) \quad (2.19)$$

Onde f é o avanço em mm/v e r_ϵ é o raio de ponta ferramenta (ver figura 2.7)

Não há uma correlação analítica entre R_a e R_{\max} , sendo necessário a utilização de tabelas para associação de valores numérico entre ambas.

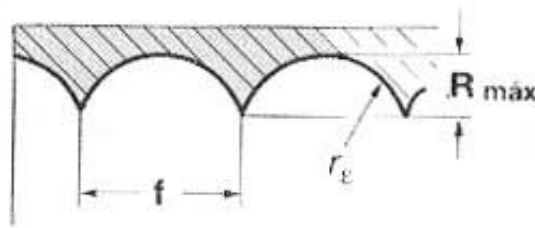


Figura 2.7 – Rugosidade teórica para o torneamento [Sandvik, 2003]

Outro modelo popular é aquele estabelecido por Boothroyd e Knight, 1989 ou por Groover, 1996:

$$R_i = \frac{f^2}{32r_\epsilon} \text{ (mm)} \quad (2.20)$$

onde: f é o avanço em mm/v e r_ϵ é o raio de ponta ferramenta, e R_i é a rugosidade média aritmética ideal.

Este modelo, para atingir bons resultados, assume que o raio de ponta seja razoavelmente grande e o avanço seja baixo.

Para avanços maiores e raio de ponta zero, o modelo a seguir é recomendado [Boothroyd e Knight, 1989]:

$$R_i = \frac{f}{4(\cot \alpha + \cot \beta)} \text{ (mm)} \quad (2.21)$$

onde: α e β são os ângulos de posição principal e secundário, respectivamente.

Shaw (1984) também apresentou o caso onde o avanço está entre os dois extremos relacionado anteriormente, utilizando o mesmo parâmetro $R_{máx}$.

$$\frac{f}{r_\epsilon} = \sqrt{\frac{2R_{máx}}{r_\epsilon} - \left(\frac{R_{máx}}{r_\epsilon}\right)^2} + \text{sen} \beta + \left(\frac{R_{máx}}{r_\epsilon} - 1 + \cos \beta\right) \cot \beta \text{ (mm)} \quad (2.22)$$

Também a General Electric desenvolveu diagramas capazes de estimar a rugosidade R_q (RMS) correspondente ao desvio médio quadrático para torneamento. Adicionalmente aos avanços e raio de ponta, o diagrama apresenta um modificador r_{ai} que representa um coeficiente

de ajuste “ideal – real”, baseado no tipo de material (dútil, ferro fundido ou usinagem livre) e na velocidade de corte. Assim a rugosidade real (R_a) seria dada por:

$$R_a = R_i r_{ai} \text{ (mm)} \quad (2.23)$$

É interessante citar também comentar que certos modelos consideraram apenas efeito do avanço e do raio de ponta da ferramenta e concluíram que o efeito da velocidade de corte é insignificante [Lambert, 1979]. Outros, no entanto, [Shaw, 1966] e [Feng e Wang, 2002] demonstraram que o efeito da velocidade de corte tem impacto significativo na rugosidade. Em determinado intervalo, a rugosidade melhora com o aumento da velocidade de corte, a menos onde há formação da aresta postiça de corte.

3 A Tecnologia CNC aplicada À Usinagem e seus Sistemas de Programação

A tecnologia CNC (Comando Numérico Computadorizado) pode ser entendida como uma forma de automação flexível, que se dá através de um conjunto ordenado de símbolos, letras e números [Groover, 2000].

Histórico do CNC

Desde os tempos mais remotos, nas mais antigas civilizações, o homem busca racionalizar e automatizar o seu trabalho, por meio de novas técnicas. A automação simplifica todo tipo de trabalho, seja ele físico ou mental. O exemplo mais comum da automação do trabalho mental é o uso da calculadora eletrônica. No cotidiano observa-se cada vez mais a automação e a racionalização dos trabalhos físicos em geral, por exemplo: Na agricultura vêm-se novos e sofisticados tratores que substituem a enxada, e outros meios de produção. A cada nova geração de novos produtos, observa-se em cada modelo uma evolução que faz com que os esforços físicos e mentais sejam reduzidos. No processo de pesquisa para melhoria dos produtos, aliado ao desenvolvimento dos computadores, foi possível chegar às primeiras máquinas controladas numericamente. [Relatório Técnico ESPM, 2002]

O principal fator que forçou os meios industriais a essa busca foi a segunda guerra mundial. Durante a guerra, as necessidades de evolução foram de papel decisivo, necessitava-se de muitos aviões, tanques, barcos, navios, armas, caminhões etc. A produção era feita em alta escala e com grande precisão, pois a guerra estava consumindo tudo, inclusive a mão de obra. Grande parte da mão de obra masculina utilizada pelas fábricas como especializada, foi substituída pela feminina, o que na época implicava na necessidade de treinamento, com reflexos na produtividade e na qualidade. Era o momento certo para se desenvolver máquinas automáticas de grande produção, para peças de precisão e que não dependessem da qualidade da mão de obra aplicada. [Relatório Técnico ESPM, 2002]

Diante deste desafio, iniciou-se o processo de pesquisa onde surgiu a máquina comandada numericamente. A primeira ação neste sentido surgiu em 1949 no laboratório de Servomecanismo do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), com a união da Força Aérea Norte-americana (*U.S. Air Force*) e a empresa *Parsons Corporation of Traverse City, Michigan*. Foi adotada uma fresadora de três eixos, a Hydrotel, da *Cincinnati Milling Machine Company*, como alvo das novas experiências. Os controles e comandos convencionais foram retirados e substituídos pelo comando numérico, dotado de leitora de fita de papel perfurado, unidade de processamento de dados e servomecanismo nos eixos. [Relatório Técnico ESPM, 2002]

Após testes e ajustes, a demonstração prática da máquina ocorreu em março de 1952, e o relatório final do novo sistema somente foi publicado em maio de 1953. Após este período, a Força Aérea Norte-americana teve um desenvolvimento extraordinário, pois as peças complexas e de grande precisão empregadas na fabricação das aeronaves, principalmente os aviões a jato de uso militar, passaram a ser produzidas de forma simples e rápida, reduzindo-se os prazos de entrega do produto, desde o projeto até o acabamento final.

A cada ano, foi incrementada a aplicação do Comando Numérico (CN), principalmente na indústria aeronáutica. Em 1956 surgiu o trocador automático de ferramentas, e mais tarde, em 1958, os equipamentos com controle de posicionamento ponto a ponto e a geração contínua de contornos, que foram melhorados por este sistema em desenvolvimento. A partir de 1957, houve

nos Estados Unidos uma grande corrida na fabricação de máquinas comandadas por Comando Numérico Computadorizado (CNC), pois os industriais investiam até então em adaptações do CNC em máquinas convencionais.

Este novo processo foi cada vez mais usado na rotina de manufatura, que a partir deste ano, com todos os benefícios que haviam obtido deste sistema, fez com que surgissem novos fabricantes, que inclusive já fabricavam seus próprios comandos. Devido ao grande número de fabricantes, começaram a surgir os primeiros problemas, sendo que o principal foi a falta de uma linguagem única e padronizada. A falta de padronização era bastante sentida em empresas que tivessem mais de uma máquina de comandos, fabricados por diferentes fornecedores, pois cada um deles tinha uma linguagem própria, com a necessidade de uma equipe técnica especializada para cada tipo de comando, o que elevava os custos de fabricação.

Em 1958, por intermédio da EIA (*Electronic Industries Association*), organizou-se estudos no sentido de padronizar os tipos de linguagem. Houve então a padronização de entrada conforme padrão RS-244 que depois passou a EIA244A ou ASC II. Atualmente, o meio mais usado de entrada de dados para o CNC é via computador, embora durante muitos anos a fita perfurada foi o meio mais usado, assim como outros com menor destaque. A linguagem destinada à programação de máquinas era a APT (*Automatically Programmed Tools*), desenvolvida pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts em 1956. Daí para frente foram desenvolvidas outras linguagens para a geração contínua de contornos, como AutoPrompt (*Automatic Programming of Machine Tools*), ADAPT, *Compact II*, *Action*, e outros que surgiram e continuam surgindo para novas aplicações. Com o aparecimento do circuito integrado, houve grande redução no tamanho físico dos comandos, embora sua capacidade de armazenamento tenha aumentado, comparando-se com os controles transistorizados.

Em 1967 surgiam no Brasil as primeiras máquinas controladas numericamente, vinda dos Estados Unidos. No início da década de 70, surgem as primeiras máquinas CNC (Controle Numérico Computadorizado), e no Brasil surgem as primeiras máquinas CNC de fabricação nacional. A partir daí, observa-se uma evolução contínua e notável concomitantemente com os computadores em geral, fazendo com que os comandos (CNC) mais modernos empreguem em

seu conceito físico (*hardware*) tecnologia de última geração. Com isso, a confiabilidade nos componentes eletrônicos aumentou, elevando a confiança em todo sistema.

Definições

O Controle Numérico (CN), e sua definição mais simples, é que todas as informações geométricas e dimensionais contidas em uma peça, conhecida por meio de desenhos e cotas (números), são entendidas e processadas pela máquina CNC, possibilitando a automação da operação. Atualmente, a utilização do Controle Numérico Computadorizado (CNC), é a saída mais apropriada para a solução dos mais complexos problemas de usinagem. Onde anteriormente se exigia uma máquina ou uma ferramenta especial, atualmente é feito com o CNC de uma forma muito simples. [Relatório Técnico ESPM, 2002]

O Comando Numérico Computadorizado (CNC) é um equipamento eletrônico que recebe informações da forma em que a máquina vai realizar uma operação, por meio de linguagem própria, denominado programa CNC, processa essas informações, e devolve-as ao sistema através de impulsos elétricos. Os sinais elétricos são responsáveis pelo acionamento dos motores, que darão à máquina os movimentos desejados com todas as características da usinagem, realizando a operação na seqüência programada sem a intervenção do operador. [Relatório Técnico ESPM, 2002]

O CNC não é apenas um sistema que atua diretamente no equipamento, ele deve ser encarado como um processo que deve ser responsável por mudanças na cultura da empresa. Isto quer dizer que, para que se tenha um melhor aproveitamento de um equipamento CNC, é interessante que se tenha uma boa organização, principalmente no que se refere ao processo de fabricação, controle de ferramentas (fixação, corte e medição) e administração dos tempos padrões e métodos de trabalho.

No entanto só a partir da década de 70, a tecnologia se tornou viável para aplicação industrial em massa, e no Brasil, propriamente a partir da década de 80, como se pode observar na tabela 3.1 sobre a evolução do parque de máquinas CNC. [Revista Máquinas e Metais, 2001]

Ano	Produção nacional	Importadas	Acumulado	Fonte	Fatores que podem ter reduzido a produção nacional e influenciado o comércio de máquinas-ferramenta no país
1973		33	33	[1]	
1974	11	24	68	[1]	
1975	2	39	109	[1]	
1976	8	45	162	[1]	
1977	17	46	225	[1]	
1978	32	53	310	[1]	
1979	40	34	384	[1]	
1980	62	32	478	[1][2]	
1981	69	55	602	[1]	
1982	120	30	752	[1]	
1983	150	30	932	[1]	
1984	253	53	1.238	[1]	
1985	413	60	1.711	[1][3]	
1986	833	70	2.614	[1][3][4]	Plano Cruzado
1987	1.138	150	3.902	[6]	Plano Bresser
1988	1.135	200	5.237	[5]	
1989	1.200	300	6.737		
1990	700	100	7.537		Plano Collor
1991	871	200	8.608	[7]	Abertura das importações
1992	800	200	9.608		
1993	1.000	300	10.908		Plano Real
1994	1.000	400	12.308		
1995	900	500	13.708		
1996	800	600	15.108		[8]
1997	1.196	586	18.290		
1998	1.079	400	19.769		Crise asiática
1999	771	285	20.825		Desvalorização cambial (janeiro)
2000	2.285	648	23.758		[9]
2001	2.363	822	26.943	[10]	Crise de energia, atentado terrorista nos EUA e crise argentina

1) Os rumos da automatização industrial no Brasil, Prof. Gaspar Erich Stemmer, coordenador do Grupo de Pesquisa e Treinamento em Comando Numérico da UFSC, em *Máquinas e Metais*, Agosto de 1985, pg. 28.

2) As novas tecnologias em destaque, *Máquinas e Metais*, julho de 1987, pg. 24.

3) Idem, pg. 26.

4) Mercado pode mudar no próximo ano, *Máquinas e Metais*, agosto de 1987, pg. 44.

5) Muito interesse mas poucos negócios para o setor, *Máquinas e Metais*, junho de 1988, pg. 18.

6) A oferta nacional de comandos numéricos, *Máquinas e Metais*, julho de 1988, pg. 19.

7) Sobracon divulga perfil do usuário de automatização industrial, em *Máquinas e Metais*, março de 1992, pg. 6.

8) A partir deste ano, três fabricantes de máquinas-ferramenta deixaram de produzir.

9) Fabricantes que haviam paralisado suas atividades por volta de 1996 voltam a fabricar máquinas CNC.

10) Estimativa feita pela equipe de *MM* com números fornecidos por fabricantes e importadores até meados de novembro de 2001.

Obs: Os números em vermelho representam estimativas feitas pela equipe de *Máquinas e Metais*.

Tabela 3.1 – Dados estatísticos da evolução do parque de máquinas CNC no Brasil [Revista Máquinas e Metais, 2001]

Vantagens

Pode-se citar as seguintes vantagens da utilização de um equipamento CNC em relação à um similar convencional [Relatório Técnico ESPM, 2002]:

- Redução nos tempos de fabricação;
- Maior repetibilidade na seqüência das operações, fazendo com que os tempos padrões previstos sejam mais seguros; Com os tempos padrões mais seguros, tem-se uma maior precisão nos cálculos de custos, nos controles de carga máquina, nos controles de carga homem (“*man power*”); Maior repetibilidade no consumo de ferramentas.
- Por se tratar de uma usinagem com esforços repetitivos, velocidades constantes e uniformes, faz com que os desgastes estejam sob controle. Isto facilita o controle do estoque, um melhor desenvolvimento e teste de fornecedores, um melhor controle por desgaste ao processo das ferramentas, evitando retrabalhos e refugos.
- Redução nos tempos de preparação (“*set-up*”) tornando viável a produção de pequenos lotes.
- Diminuição de itens acabados no estoque, por se possibilitar produção de pequenos lotes, redução nos tempos e na freqüência, com que as inspeções de qualidade são efetuadas.
- Diminuição nos índices de refugos e retrabalhos.
- Repetibilidade na qualidade produzida, gerando peças mais uniformes. Redução nos investimentos em dispositivos de furar, traçar, modelos, gabaritos, cames, máscaras, chapelonas, etc.
- Maior precisão dimensional e geométrica na operação. A usinagem de peças complexas independe da habilidade do operador.
- Dependendo do tipo de serviço, um operador poderá operar mais de uma única máquina.
- Redução no consumo de ferramentas por trabalhar nas condições de corte mais adequadas e constantes.
- Diminuição da variedade e dos custos de ferramentas especiais em uso.
- Redução na fadiga do operador, acarretando uma produção constante e aumento na eficiência, com menor esforço.
- Menores despesas de depreciação de área, devido a substituição de várias máquinas convencionais;

Desvantagens

Obviamente, os custos de aquisição e manutenção destas máquinas, bem como a atuação em lotes muito pequenos ainda torna a opção convencional muito vantajosa para certas empresas. É importante notar que estas desvantagens tendem a diminuir a medida que se disponibilizam opções de retrofitting modulares e a baixo custo [Stipkovic, 2006]

Arquitetura de máquinas CNC

As máquinas ferramenta CNC tem uma arquitetura muito próxima das máquinas convencionais, porém auferem grande exatidão de posicionamento, devido a utilização intensiva de componentes de máquina de precisão. Assim, as guias e parafusos de deslizamento par acionamento dos carros, são normalmente substituídos por similares rolamentados. Adicionalmente, a máquina é dotada de sensores que retro-alimentam o posicionamento dos eixos comandados e monitoram o status de diversas funções da máquina [Groover, 2000].

Um fluxograma básico de uma máquina CNC pode ser acompanhado a seguir:

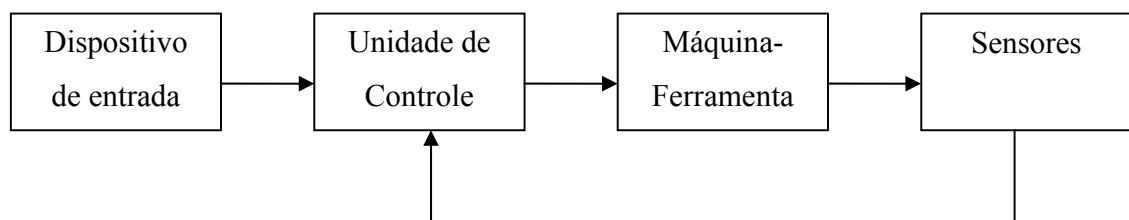


Figura 3.1 – Fluxograma de fluxo de informações numa máquina CNC [Groover, 2000]

Programação

A programação de máquinas de comando numérico está em parte normalizada pela ISO 4342 – 1985 ou norma DIN 66025 e se utiliza basicamente de sentenças de programa, composta de palavras reservadas, que informam sobre uma ação a ser realizada.

Por exemplo:

A sentença “**G00 X75 Z2**” é composta por três palavras, sendo:

G00 – instrução “deslocar em avanço rápido”

X75 Z2 – condições adicionais, que identificam as coordenadas cartesianas do ponto de chegada da ferramenta $X=75$ e $Z=2$

As instruções (ou funções) de programação variam de acordo com a implementação de cada fabricante, e podem ser classificadas em:

- *Preparatórias*. Normalmente indicadas pelo código G, estas informam a máquina sobre uma ação de movimentação simples ou complexas (ciclos fixos); modo de operação ou ajuste necessário;
- *Posicionamento*. Identificam as coordenadas dos pontos de deslocamento da ferramenta, bem como centros de arco para realização de interpolações circulares;
- *Auxiliares*. Estabelecem condições de usinagem (avanço e rotação), chamadas de ferramentas e corretores;
- *Miscelâneas*. Normalmente designadas pelo código M, estas funções ativam instruções liga-desliga da máquina, tais como fuso, fluido refrigerante, indexação da torre porta-ferramenta etc.

A tabela 3.2 mostra um diagrama típico de um programa CNC.

1	Rótulo de identificação do programa	
2	Ajuste do modo de operação	
3	Chamada de ferramenta e respectivo corretor	
4	Estabelecer origem do sistema de coordenadas	
5	Definir condições de usinagem (avanço, velocidade de corte ou rotação)	
6	Posicionar a ferramenta	
7	Usinar	
8	Retroceder a ferramenta	
9	Movimentar para o ponto de troca	
10	É a última ferramenta ?	
11	Sim	Não
12	Fim de programa	Retorne ao passo 3

Tabela 3.2 – Fluxograma da estrutura típica de um programa CNC [Apostila SENAI, 2003]

A figura 3.2 mostra a título de ilustração, um programa CNC comentado para torneamento de uma peça ilustrada na figura a seguir, utilizando um comando Mach 9.

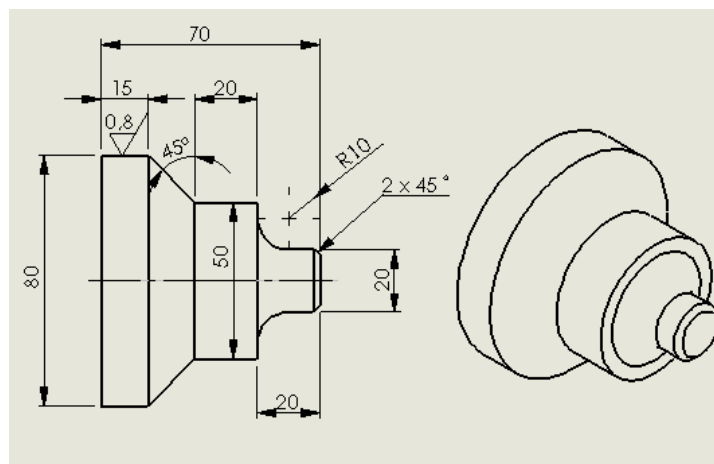


Figura 3.2 – Desenho de fabricação de uma peça torneada

Programa	Descrição
; PECA EXEMPLO	Identificação da peça
G99	Cancela zeros temporários e e reestabelece zero máquina
T0101	Chamada da ferramenta N. 01, como corretor N.01
G54	Ajusta a origem do sistema de coordenadas (zero peça)
M13	Estabelece a gama de rotações
G96 S180	Estabelece a velocidade de corte constante = 180 m/min
G92 S1500 M03	Limita a rotação do fuso a 1500 rpm, e liga o fuso
G00 X85 Z70	Aproxima a ferramenta do tarugo, em movimento rápido
G01 X-1. F.1	Interpolação linear com avanço de 0,1 mm/r, de forma a facear a peça
G66 X84. Z72. I1. K.3 U1 W4. P10 F.25	Ciclo de desbaste longitudinal automático
G00 X16. Z72.	Aproxima a ferramenta do tarugo, em movimento rápido, para acabamento.
G42	Aciona a compensação do raio da ferramenta à direita do perfil
P10	Chamada de subrotina
G40	Cancela a compensação do raio da ferramenta
G01 X84. Z25.	Recuo da ferramenta
G00 X150. Z150.	Desloca até o ponto de troca
M30	Fim de programa

Neste programa existe uma sub-rotina que descreve o perfil acabado da peça, em termos das funções de interpolação elementares:

;EIXO-SB (SUBPROGRAMA)

G01 X16. Z70. F.15

X20. Z68.

Z60.

G02 X40. Z50. R10.

G01 X50.
Z30.
X80. Z15.
M02

Sistemas Computacionais de Programação

Os sistemas computacionais de programação de máquinas CNC podem ser classificados hoje em dois tipos diferentes [Lee, 1999]:

Os editores CNC (*programação CNC assistida por computador*), que permitem gerar o programa diretamente em código de máquina. Estes programas são normalmente aplicados onde a complexidade das peças é menor, e conseqüentemente é possível estabelecer as trajetórias de ferramenta manualmente. Alguns destes softwares disponibilizam simulações para verificar se o programa gerado atende as especificações da peça em termos geométricos. Normalmente os fabricantes de comando numérico e máquinas ferramenta, também desenvolvem este tipo de software. Podem-se citar a Siemens, Emco, Intelitek, Denford etc.

A figura 3.3 mostra a interface básica de um editor CNC.

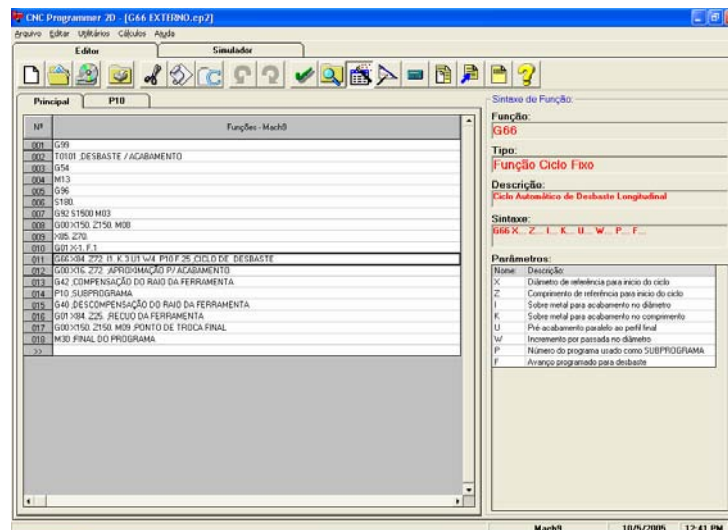


Figura 3.3 – Exemplo da interface um software editor CNC [Adiante Informática, 2005]

Nos *softwares CAM* (“Computer Aided Machining or Manufacturing”), a programação é feita sobre o modelo CAD da peça, e este se encarrega de converter os caminhos de ferramentas em um código CNC válido. Neste caso, a complexidade da peça é normalmente maior, e se torna inviável a programação manual. Os softwares CAM são mais caros que os similares editores, e requerem mão de obra mais qualificada para seu manuseio. Em anexo, está disposto um quadro comparativo entre os principais desenvolvedores de produtos CAM.

A figura 3.4 mostra a interface básica de um software CAM.

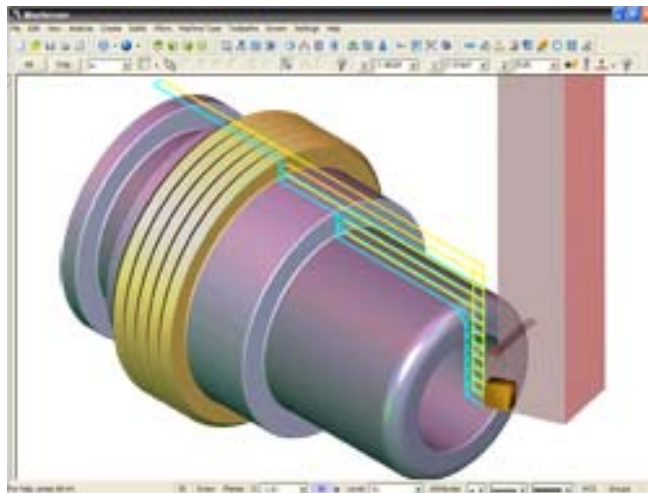


Figura 3.4 – Exemplo da interface de um software CAM [MasterCAM, 2005]

O tratamento utilizado para este tipo de programação segue os seguintes passos [Lee, 1999]

3.1.1 Definição da geometria da peça

Nesta etapa é necessário que a geometria da peça importante para aspectos de usinagem seja identificada e talvez separada numa camada específica. Esta por sua vez também pode ser editada para claramente definir as fronteiras de movimentação da ferramenta. Por exemplo, caso seja necessária uma operação de desbaste longitudinal num peça, é importante definir o perfil 2D que define o contorno final a ser atingido. A figura 3.5 ilustra tal procedimento.

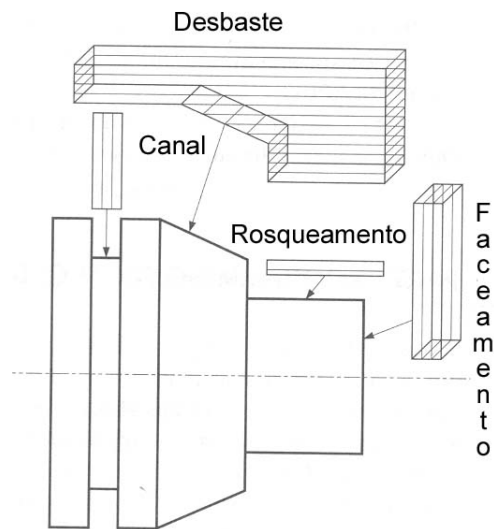


Figura 3.5 – Exemplo da geometria necessária para operações em torneamento [Lee, 1999]

3.1.2 Definição da geometria da ferramenta

Neste caso o software em geral disponibiliza um banco de dados com diferentes ferramentas normalizadas.

3.1.3 Estabelecimento da seqüência de operação

O usuário identifica a seqüência de operações e graficamente planeja os caminhos de ferramenta com os parâmetros de corte adequados. O caminho de ferramenta é o caminho que a mesma deve seguir desde do ponto de troca até a peça e de volta ao ponto de troca. Esta trajetória pode ser feita automaticamente para algumas operações simples como desbaste, furações etc.

3.1.4 Cálculo das Coordenadas dos Pontos da Trajetória

Uma vez que o planejamento é definido, o software calcula das coordenadas x , y , e z dos pontos do caminho bem como o tipo de trajetória (linear, rápida ou circular), utilizando os dados da ferramenta e da peça.

3.1.5 Verificação Gráfica

Quando o caminho da ferramenta é gerado, este pode ser verificado graficamente através de uma animação mostrando a ferramenta se deslocando através do caminho gerado, aonde em geral também é superposta a geometria da peça. Caso haja alguma interferência ou colisão, o caminho deve ser editado.

3.1.6 Geração do Arquivo de Localização da Ferramenta e Pós-processamento

Um arquivo é então gerado contendo as informações sobre a localização da ferramenta (“CL data” ou “Cutter Location data”) a partir dos caminhos de ferramenta editados. Por último, o arquivo CL é pós-processado para um código de máquina (linguagem G) específico do comando da máquina. Este arquivo, dito MCD, pode ser transmitido para a máquina.

A seguir é mostrado um quadro comparativo entre os diversos softwares CAM existentes no mercado.

3.1.7 Comparativo entre os softwares CAM [Revista Cadalyst, 2005]

Vendor guide CAM programs						
Product	Vendor	Contact information	Price range	Types	Geometry kernel	Key benefits
AUTO-CODE	AUTO-CODE	www.autocode.com 81.4.192.3900	\$2,500	Mill, lathe, punch, wire EDM, laser	AutocAD	Runs inside AutocAD Release 14-2004 and Mechanical Desktop. Postprocessors are customized for your machine tools.
BobCAD-CAM	BobCAD-CAM	www.bobcadcam.com 888.666.6362	\$595-\$1,295	Mill, turn, laser, plasma, waterjet	N/A	Low price, company develops its own code (no royalties to pay), downloadable, direct sales chain, 11-hour complete CD-ROM training
CHMSKIL	Technology Answers	www.chmskil.com 408.486.0970	\$37,000-\$60,000	Milling	Proprietary	Significantly reduced programming and machining times, automatic feature recognition, supplied with manufacturing knowledge base, offers a best-practice knowledge capture feature
Esprit	DP Technology	www.dptechnology.com 805.388.8000	\$5,500-\$19,900	Mill, turn	Parasolid	ESPRIT's kernel reads and machines native CATIA, ProENGINEER, and Unigraphics models, contains Parasolid and ACIS solid modeling kernels, solid simulation and verification
FeatureCAM	EGS	www.featurecam.com 888.353.6455	\$1,500-\$10,000	Mill, turn, wire EDM	Parasolid	Feature based tool paths, automatic feature recognition, ease of use, knowledge-based machining, free postprocessors
GibbsCAM	Gibbs and Associates	www.gibbscam.com 800.654.5398	\$4,500 and up	Mill, turn, wire EDM, MTM	Parasolid	Excellent data translation options, multitask machining, knowledge-based machining, automatic feature recognition
MasterCAM	CNC Software	www.mastercam.com 860.875.5008	\$2,500-\$12,900	Mill, turn, wire EDM, laser, plasma, routers, Swiss turn	Parasolid	Full toolpath and model associativity, automated feedrate optimization, easy upgrade path, powerful new 5-axis and high-speed machining tools
PowerMill	Delcam	www.delcam.com 800.654.3506	\$9,750-\$35,000	Milling	Proprietary	Can purchase CAD, CAM, or both from same vendor. Mold, tool, and die specialists
Pro/NC	PTC	www.ptc.com 888.182.3778	\$5,000-\$15,000	Mill, turn, wire EDM, mold, progressive die	Granite	Integrated CAOD/CAM, patented high-speed machining capability, compatible with all major CAD files
SolidCAM 2003	SolidCAM	www.solidcam.com info@solidcam.com	\$5,000-\$15,000	Mill, turn, wire EDM,	Parasolid, ACIS	Versions integrate with SolidWorks, AutocAD, and Mechanical Desktop. CAD editors based on either Parasolid or ACIS
TurboCAD/CAM	IMS	www.turboaidcam.com	\$1,995	Mill	ACIS	Accepts 25 file formats as well as G-code for existing designs
Unigraphics NX	EDS	www.unigraphics.com 800.498.6351	\$5,995-\$25,000	Mill, turn, wire EDM, mold, sheet metal	Parasolid	Integrated CAOD/CAM, in-process geometry simulation (reduces machine time by not "cutting air"), numerous customizable options, long time CAD vendor, works with data from multiple CAD systems
VisualMILL	McSoft Corp.	www.mcsoft.com 949.654.3163	\$500-\$4,000	Milling	Parasolid	Capable package for low cost, can mill large STL files that others can't
VX	VX Corp.	www.vx.com 800.683.9222	\$3,995-\$9,995	Mill, turn, wire EDM, flame, mold, sheet metal	VX	Integrated CAOD/CAM, geometry nesting capabilities, Class A surfacing and machining, reusable machining routines

4 O Estado da Arte da Aplicação das Redes Neurais em Usinagem

Definições

A inteligência artificial pode ser definida como uma disciplina da ciência da computação, dedicada a solução de problemas que, normalmente requeria o raciocínio humano. Desde 1950, quando surgiram às primeiras técnicas, muitas ferramentas poderosas foram desenvolvidas com aplicações bem definidas em diversos campos do conhecimento humano, inclusive o de engenharia, e especificamente manufatura.

As principais ferramentas de IA são [Pham, 1999]:

- Sistemas baseados em Conhecimento ou Especialistas
- Lógica Nebulosa ou “Fuzzy”
- Algoritmos Genéticos
- As Redes Neurais

A seguir, será feita uma breve explanação destas ferramentas e alguns desenvolvimentos na área de usinagem.

4.1.1 Sistemas Especialistas

Sistemas baseados no conhecimento ou Sistemas Especialistas são programas de computador que carregam um núcleo de conhecimento sobre um domínio restrito e, portanto, se tornam aptos a resolver problemas dentro deste domínio. Um sistema especialista normalmente é composto de uma base de conhecimento e um mecanismo de inferência. A base contém o conhecimento do domínio o qual pode ser representado através de regras “se então”, fatos, objetos e procedimentos. Já o mecanismo de inferência manipula o conhecimento armazenado na base para gerar soluções aceitáveis para os problemas. A manipulação do conhecimento varia de acordo com o tipo de sistema especialista e normalmente pode ser:

- Baseado em objetos, com aplicação de herança e restrições;
- Baseado em casos, com recuperação e adaptação de exemplos;
- Baseado em regras, com uso de regras de inferência.

Cada qual pode ainda ter estratégias de busca diferenciadas bem como procedimentos de controle particulares.

Pode-se se considerar esta ferramenta, dentre as citadas na introdução, como aquela mais amadurecida devido ao volume de aplicações comerciais conhecidas como “shells”, porém nada impede que sistemas proprietários sejam desenvolvidos com linguagens de programação convencionais. Alguns exemplos de implementações podem ser encontrados na bibliografia em [Pham, 1999]

4.1.2 Lógica Nebulosa

Uma grande desvantagem dos sistemas especialistas é incapacidade de lidar com situações novas, ou seja, tratar situações externas aquelas cobertas por sua base de conhecimento e conseqüentemente gerar conclusões ainda aceitáveis.

O uso da lógica fuzzy, que reflete a natureza inexata do raciocínio humano, pode vir a ser uma resposta a esta deficiência. Na lógica fuzzy o valor exato de uma variável é substituído por uma descrição lingüística, o qual representa um conjunto fuzzy. Assim, por exemplo, “250” pode

ser substituído pelo termo “alta” como uma descrição lingüística da variável “velocidade de corte”.

Um conjunto fuzzy que define a velocidade de corte pode ser:

0 – abaixo de 100 m/min

0,3 – de 100 a 150 m/min

0,7 - de 150 a 230 m/min

1,0 – de 230 a 270 m/min

Os valores adotados de 0, 0,3, 0,7 e 1 são chamados graus de pertinência de cada uma das faixas discutidas para o dado conjunto fuzzy. Um grau 1 indica pertinência total enquanto o grau 0, indica exclusão total.

O conhecimento num sistema computacional utilizando lógica fuzzy pode ser expresso em forma de regras qualitativas, como: “Se a velocidade de corte é alta, então ajuste o avanço para baixo para manter a potência consumida”. A vantagem neste caso é que o sistema pode realizar inferência sobre que ação tomar, se, por exemplo, a velocidade de corte é levemente menor que alta.

A lógica Fuzzy tem inúmeras aplicações em engenharia, inclusive manufatura como, por exemplo, controle de máquinas CNC, determinação de formações ótimas de células de manufatura, classificação de pulsos em eletroerosão etc.

4.1.3 Algoritmos Genéticos

Um algoritmo genético é um processo de otimização estocástico inspirado na evolução natural. Este procedimento pode obter uma solução ótima global espaço de pesquisa multi-modal complexo, sem possuir um conhecimento específico sobre o mesmo. No entanto, para que um algoritmo genético possa ser aplicado, soluções potenciais de problemas devem ser representados na forma de cadeias de números (normalmente em sistema binário), conhecidos na nomenclatura como cromossomos. O algoritmo opera em um grupo ou população de cromossomos fim de produzir populações mais ajustadas, com cromossomos-solução melhores [Pham, 1999].

A aplicação de algoritmos genéticos na engenharia são normalmente encontrados em problemas de otimização multi-parâmetros e análise combinatória complexa.

As Redes Neurais Artificiais

4.1.4 Generalidades

A crescente necessidade de competitividade no segmento industrial vem introduzindo novos paradigmas na fabricação que inclui a possibilidade de modelar adequadamente os parâmetros que controlam os processos de manufatura, e conseqüente melhorar os índices de produtividade.

Inicialmente, os tratamentos para o desenvolvimento de técnicas de predição em processos de usinagem como, por exemplo, determinar as condições de usinagem para obter certa rugosidade de uma superfície usinada, ou, no desgaste, as forças de corte envolvidas, se baseiam se no estudo de modelos analíticos, os quais dependiam de uma grande quantidade de dados experimentais.

O grande número de variáveis envolvidas e a complexidade dos processos de usinagem geravam dificuldades que comprometiam a confiabilidade de tais modelos. Com o advento das técnicas de Inteligência Artificial, alguns pesquisadores [Briceno (2002), Balic (2002), Beloni (2001), Kohli (2005), Saini (2002)] vêm obtendo excelentes resultados com a sua utilização para a identificação, reconhecimento, classificação e modelamento de sistemas altamente não lineares, como é o caso dos processos de corte. Neste contexto, o emprego das redes neurais artificiais vem se destacando em diversas áreas de atuação, demonstrando eficiência na estimação de parâmetros e otimização de modelos.

Uma das características, talvez de maior vantagem do uso de redes neurais, é que elas não requerem, a priori, um entendimento do comportamento físico do processo. Elas utilizam um

procedimento sistemático para transformar dados de entrada e de saída, substituindo modelos exigentes em termos computacionais [Beloni, 2001].

Existem duas diferenças básicas entre o procedimento neurocomputacional, empregado pelas redes neurais e o utilizado por algoritmos convencionais seqüenciais. A primeira é que as redes neurais empregam um procedimento paralelo, podendo, portanto realizar operações e solucionar problemas de uma maneira mais rápida. A segunda e a mais importante é que as redes neurais tem a capacidade de aprender, podendo ser treinadas para reconhecer dados de entrada e gerar respostas apropriadas na saída [Beloni, 2001].

4.1.5 Histórico

Os primeiros estudos da teoria relacionada às redes neurais foram realizadas por Ramon Y. Cajal and Charles S. Sherrington em seus estudos sobre o arranjo celular no cérebro, realizados no início do século passado. O desafio, que continua até hoje é entender como uma rede interconectada por elementos razoavelmente simples (os neurônios) pode produzir informações a um nível inteligente.

O trabalho destes pesquisadores, ditos “neuroautomistas”, criou um vasto catálogo sobre a interconectividade do cérebro e suas implicações na fisiologia e bioquímica [Eccles, Szentagothai], e função [Hebb]. O trabalho de McCulloch e Pitts na modelagem de um neurônio como uma unidade lógica baseada em estados, e Caia-niello na dinâmica dos neurônios tem um mérito particular pois levaram a análise de circuitos neurais como comparáveis a dispositivos de chaveamento e sistemas não lineares. Mais recentemente, os neurocientistas voltaram-se para a definição das funções do cérebro [Braitenberg, Marr, Pellionisz, Willshaw, Rumelhart, Freeman, Grossberg], e mesmo suas implicações na filosofia [Churchland].

4.1.6 O Modelo de Um Neurônio

Uma rede neural artificial pode ser entendida como uma técnica computacional distribuída realizada por uma série de elementos de processamento (EP), interconectados [Beloni, 2001].

Os elementos de processamento na camada de entradas não realizam qualquer procedimento, apenas se prestam para submeter as variáveis de entrada para a rede. A camada de saída fornece as respostas aos dados que são apresentados à rede, ou seja, os resultados desejados. Usualmente existem uma ou mais camadas escondidas entre a camada de saída e a de entrada.

Um elemento de processamento, também chamado de neurônio é uma simples soma de produtos, seguido de uma não linearidade (neurônio McCulloch-Pitts). Na figura 4.1 pode ser observada a estrutura de um EP típico, dotado de “i” entradas “x” advindas das saídas dos neurônios da camada prévia. Estas entradas são multiplicadas por pesos w_{ij} e posteriormente somadas, gerando a variável local net_i . [Neurosolutions, 2003]. Assim:

$$net_i = \sum_j w_{ij} x_j(t) \quad (4.1)$$

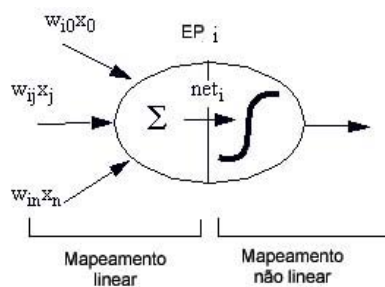


Figura 4.1 – Modelo de um neurônio artificial genérico

A variável net_i entra como argumento de uma função, chamada de função de ativação “ $f(net_i)$ ”, a qual define a saída do neurônio em termos do nível de atividade de sua entrada, de maneira produzir a saída do neurônio “y”, como é mostrado na Equação 4.2. Observe que a

função contempla uma entrada adicional chamada polarização ou “bias”, w_i , que tem a função de reduzir ou aumentar o efeito das entradas da função de ativação.

$$y_i(t) = f(\text{net}_i, w_i) \quad (4.2)$$

Observe que a variável t é discreta e representa um passo de interação.

4.1.7 Funções de Ativação

Podemos entender a função de ativação, como uma forma de descrever como o fluxo de informação se dá através da rede neural. Assim, um neurônio para atingir um certo grau de atividade ou estado de ativação, deve combinar todos os sinais recebidos, numa soma ponderada, como representado na equação 4.2. A ativação propriamente dita é resultado da aplicação de uma função chamada à soma ponderada do neurônio [Beloni, 2001].

O grau de ativação de um neurônio pode estar restrito a um conjunto discreto de valores ou variar continuamente, dependendo da função de ativação utilizada. No caso discreto são usuais valores de ativação binários (-1 ou +1). No caso contínuo, normalmente estes valores ficam restritos ao intervalo (0,+1).

As funções de ativação não lineares são as mais usadas para permitir a aprendizagem de estruturas complexas, cujo domínio deve ser, em geral a reta real, já que não há limites teóricos sobre o valor da entrada ponderada.

Embora a função de ativação propriamente dita $f(\text{net})$ também seja importante, na prática a operação do neurônio é geralmente pouca afetada pela natureza exata da função de ativação, desde que alguns requisitos básicos sejam satisfeitos. Em contrapartida, a velocidade de treinamento de uma rede pode ser grandemente alterada pela função de ativação utilizada.

Existe um número muito variado de funções de ativação $f(x)$, sendo que alguns dos tipos mais importantes, notadamente para problemas relacionados à modelagem de processos de fabricação, serão apresentados a seguir.

4.1.7.1 Função linear

A figura 4.2 mostra uma função de ativação do tipo linear, cuja expressão matemática é dada pela equação 4.3 abaixo. Nesta implementação, talvez a mais simples, os valores possíveis para ativação de um neurônio são todos os números reais [Beloni, 2001 e Neurosolutions, 2003].

$$f(x_i, w_i) = \beta \cdot x_i + w_i \quad (4.3)$$

Onde β representa uma constante de valor real que regula a ampliação do elemento de processamento ativo por x .

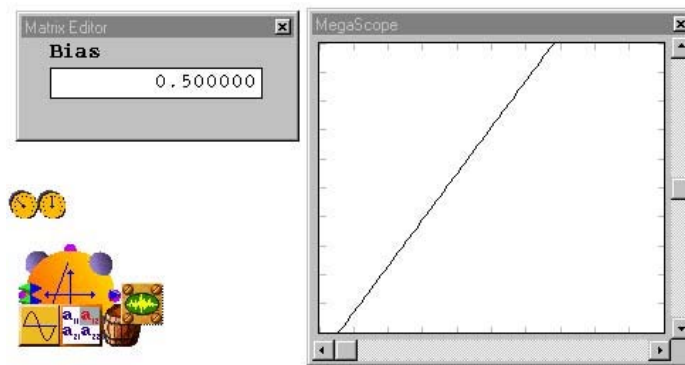


Figura 4.2 – Representação de uma função de ativação linear.

4.1.7.2 Função Sigmoidal

Este tipo de função de ativação é mais utilizada na maioria dos modelos de rede neural existentes. Ela é definida como uma função monotonamente crescente, que exhibe suavidade e propriedades assintóticas, contínua e diferenciável em todo o seu domínio, características que conferem uma grande capacidade de aprendizagem a rede. Um exemplo de função sigmoidal. é a

função logística, representada na figura 4.3. Sua equação experimenta uma variação contínua desde zero até 1, é definida pela equação 4.4:

$$f(x_i, w_i) = \frac{1}{1 + e^{-\beta x_i}} \quad (4.4)$$

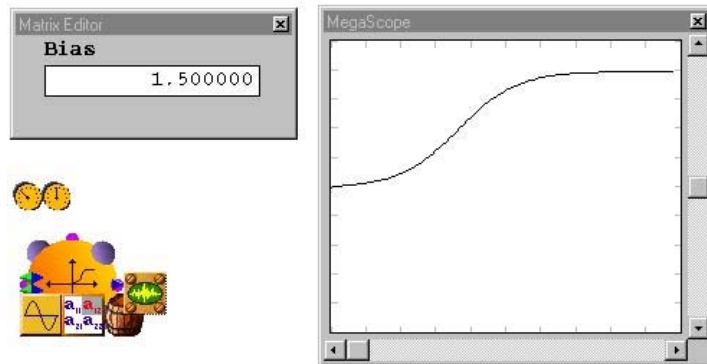


Figura 4.3 – Representação de uma função de ativação sigmoidal

4.1.7.3 Função Tangente Hiperbólica

Algumas vezes torna-se desejável ter uma faixa de ativação variando de -1 até 1. uma vez que permitir uma função de ativação assumir valores negativos pode trazer consideráveis vantagens analíticas ao processo de treinamento. A função tangente hiperbólica, definida pela equação 4.5, é representada graficamente na figura 4.4, é uma função sigmoidal que apresenta tais características.

$$f(x_i, w_i) = \tanh(\beta x_i) \quad (4.5)$$

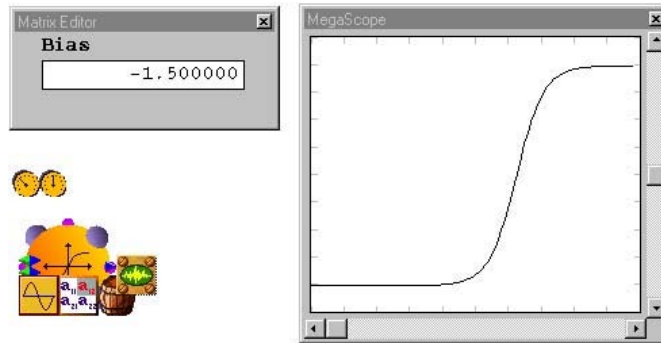


Figura 4.4 – Representação da função de ativação tangente hiperbólica.

4.1.7.4 Função Gaussiana

A função gaussiana implementa a base das arquiteturas de base radial, e apenas responde significativamente aos valores da entrada que estejam próximos ao pico da função, portanto pode ser considerada uma aproximadora de funções locais. O centro da função gaussiana é controlado pelo peso w_i e a largura da distribuição pelo parâmetro β .

$$f(x_i, w_i) = \exp[-\beta(x_i + w_i)^2] \quad (4.6)$$

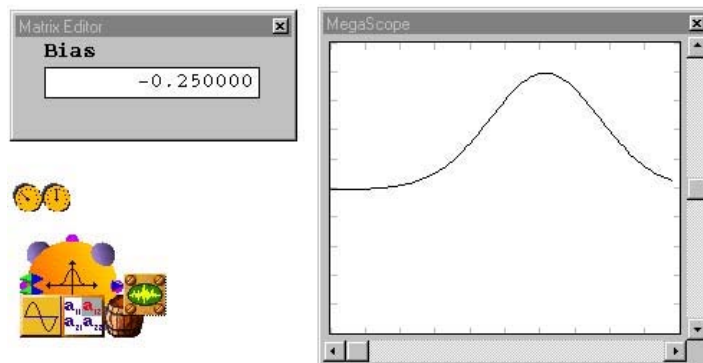


Figura 4.5 – Representação da função de ativação gaussiana.

4.1.8 Topologia de Redes

A topologia de uma rede neural artificial (RNA) contempla sua estrutura básica, composta pelo número de camadas, número de EP's por camada, tipo de função de ativação e algoritmo de aprendizagem.

Um exemplo de modelo de RNA é apresentado na figura 4.6 [Timoscuzuk, 2004]. Este modelo é baseado em camadas, embora existam redes que não apresentem este tipo de estrutura. Do ponto de vista de topologia, a forma mais comum da rede é aquela organizada em camadas, as quais incluem:

- a camada de entrada;
- a camada oculta (uma ou mais de uma);
- a camada de saída;

Com relação a conectividade as redes podem ser:

- propagação para adiante (“feedforward”): todas as conexões apontam em uma única direção, da entrada para a saída;
- recorrentes: quando existem conexões de realimentação.

Com relação ao tipo de conexão, podem ser do tipo simétrico ou assimétrico.

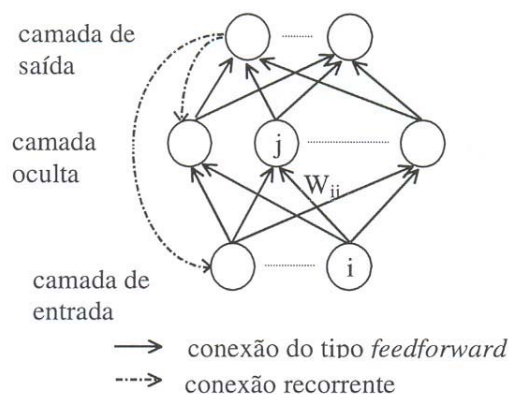


Figura 4.6 – Exemplo de modelo de uma RNA. [Timoscuzuk, 2004].

A ordem das conexões é determinada pelo número de saídas de neurônios, que são combinadas em uma única conexão; tipicamente todas as RNAs são de primeira ordem.

Com relação aos pesos, estes podem ser números reais ou inteiros, e podem ou não ser confirmados em uma determinada faixa. Após o treinamento os valores dos pesos não são, em geral, mais alterados.

A seguir citamos os tipos de rede neural que foram utilizados neste projeto:

4.1.8.1 Rede “Feedforward” Multicamadas (MLP – “Multi Layer Perceptrons”)

Em geral, uma rede neural MLP tem o aspecto mostrado na figura 4.7:

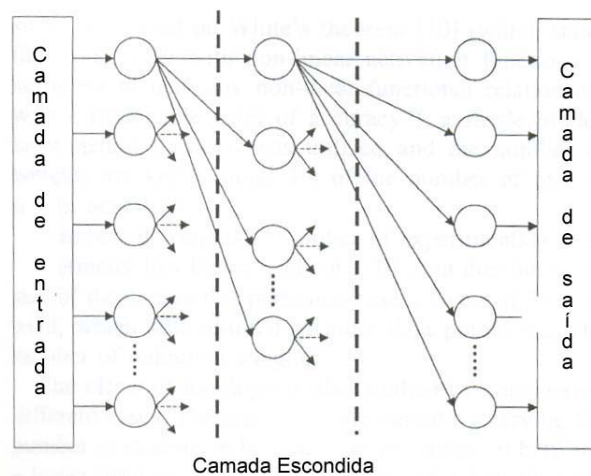


Figura 4.7 – Representação de uma rede neural MLP típica. (Haykin, 1999)

Neste tipo de rede, existem uma ou mais camadas ocultas que realizam os cálculos (processam as ativações recebidas a partir dos dados de entrada) entre as camadas de entrada e saída. O termo “feedforward” significa que estas redes são unidirecionalmente alimentadas, ou seja, que as informações processadas fluem somente em uma única direção através da rede camada por camada. As funções de ativação normalmente utilizadas são a logística e a tangente hiperbólica.

4.1.8.2 Rede de Função de Base Radial (RBF)

A rede de função de base radial são redes não lineares híbridas que contém uma única camada oculta de EP's. Esta camada se utiliza de funções de ativação gaussianas ao invés de funções sigmoidais convencionais. O centro (média) e a espessura (variância) da distribuição são calculados internamente por regras não supervisionadas e o aprendizado supervisionado é feito apenas na camada de saída. Em geral este tipo de rede tende a aprender muito mais rapidamente que seu similar. A figura 4.8 ilustra a estrutura deste tipo de rede:

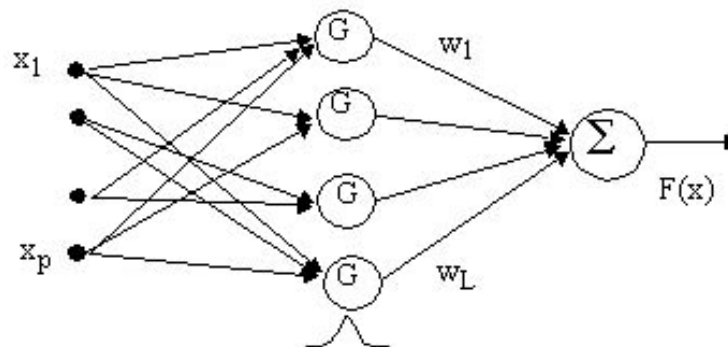


Figura 4.8 – Representação de uma rede neural RBF típica. [Neurosolutions, 2003]

4.1.9 Regras de Aprendizado

Antes de entrar em funcionamento, uma rede neural deve passar por um procedimento de aprendizado. Este procedimento consiste em um ajuste sistemático dos pesos “ w_i ”, de modo que o resultado na camada de saída seja o desejado face dos dados de entrada da rede, também chamado conjunto de treinamento. O processo de treinamento inicia atribuindo-se pequenos valores aleatórios não nulos aos pesos “ w_i ”.

Existem dois tipos básicos de algoritmos de aprendizado os que são os mais comumente utilizados hoje em dia: o algoritmo de aprendizado supervisionado e o não supervisionado.

4.1.9.1 Aprendizado Supervisionado

Neste algoritmo um conjunto de dados de treinamento e seus correspondentes valores de saída são apresentados á rede. O sistema utiliza os dados de entrada para gerar uma resposta que é então comparada com o vetor de saída desejado. Se não existir nenhuma diferença, nenhuma aprendizagem ocorreu. De outra forma, uma medida do erro incorrido é calculada e os pesos são então atualizados. O processo é repetido tanto quanto necessário, procurando-se com isso minimizar a influencia do ponto de partida nos resultados do treinamento, reduzindo o erro para valores aceitáveis.

4.1.9.2 Aprendizado não supervisionado

Este algoritmo de aprendizado utiliza apenas o conjunto de dados de entrada, sem os valores alvos como referência, para o treinamento da rede, a partir do qual deve definir a sua estrutura básica de funcionamento. A maioria dos algoritmos não supervisionados baseia-se no conceito de “aprendizado competitivo”, no qual as unidades de saída são binárias e apenas uma unidade pode ser “ligado”. Redes não supervisionadas são usadas na classificação de dados, onde dados de entrada semelhantes produzem uma mesma resposta como saída.

4.1.9.3 O Método de Retro-Propagação (“Backpropagation”)

O método para treinamento “propagation” foi desenvolvido a partir da generalização da regra de aprendizado de Widrow-Hoff, para redes multi-camadas e funções de transferência não lineares.

Rumelhart et al (1986), propuseram e descreveram pela primeira vez este algoritmo de treinamento no livro “Parallel Distributed Processing”, como forma de solucionar o fraco desempenho proporcionado pelas redes lineares, uma alternativa às situações onde a regressão linear era insuficiente para relacionar padrões de entrada aos padrões de saída.

A correção do erro segundo este algoritmo funciona da seguinte forma: Através da resposta do EP i na iteração n , $y_i(n)$, e a resposta desejada $d_i(n)$ para uma dada entrada, o erro é definido por [Beloni, 2001 e Neurosolutions 2003]:

$$e_i(n) = d_i(n) - y_i(n) \quad (4.7)$$

Usando a teoria do gradiente descendente (técnica matemática para determinação de mínimos locais), cada peso da rede pode então ser adaptado, corrigindo-se o seu valor atual com um termo que é proporcional a entrada atual e ao erro local observado, pela equação [18,63]:

$$w_{ij}(n+1) = w_{ij}(n) - \delta_i(n)x_j(n) \quad (4.8)$$

O erro local $\delta_i(n)$ pode ser computado diretamente de $e_i(n)$ no EP de saída ou como a soma de todos os erros ponderados em todos os elementos de processamento internos. Este procedimento corresponde ao algoritmo de retro-propagação [Beloni, 2001 e Neurosolutions 2003].

O fluxo de informação na retro-propagação pode ser resumido como a seguir: as ativações são implementadas no sentido da camada de entrada para a(s) camada(s) intermediária(s), e a partir da última camada escondida em direção à camada de saída, através das funções de transferência. O erro de cálculo é então propagado no sentido inverso, havendo o ajuste dos pesos, primeiro entre a camada de saída e a(s) camada(s) intermediária(s), e depois entre esta(s) e a camada anterior, até a convergência dos valores de saída desejados.

Outra medida de erro utilizada para convergência da rede é o erro quadrático médio (do inglês “mean square error” ou mais simplificada “cost”). Este é definido por:

$$E = \sum_t \sum_i (d_i - y_i)^2 \quad (4.9)$$

onde d_i é a resposta desejada (alvo) e y_i as saídas geradas da rede.

Resumindo, pode-se estabelecer que na prática uma rede neural é utilizada para aproximar uma função de n variáveis de entrada para m de saída, para os quais existem dados de relacionamento entre elas. Estes dados são submetidos à rede para que esta possa estabelecer os pesos em cada EP, de forma a minimizar o erro global.

Ao término da fase de treinamento são submetidos dados de teste, aos quais se conhece a resposta, de forma a validar se a rede está gerando resultados compatíveis.

As Aplicações das RNA em Usinagem

As aplicações em usinagem também são freqüentes, e diversificadas conforme pode se observar nas referências e citadas a seguir:

4.1.10 Simulação de trajetórias de ferramenta em fresamento

Balic e Korosec (2002) propuseram um método para estabelecimento de caminhos de ferramenta de forma a otimizar a qualidade de uma superfície de forma livre, com o uso de redes neurais. Neste caso foram elaboradas estratégias básicas de fresamento, as quais foram traduzidas em modelos CAD e posteriormente submetidas a rede neural para aprendizagem. O resultado da rede é a estratégia mais adequada para usinagem de uma característica da peça.

4.1.11 Estimativa da rugosidade e desgaste em ferramentas durante o fresamento

Beloni (2001) desenvolveu uma aplicação para monitoramento on-line do processo de fresamento frontal utilizando redes neurais tipo MLP. A partir dos valores experimentais gerados, foi possível estimar em tempo real o desgaste de flanco máximo das ferramentas de corte e a rugosidade da superfície usinada. Seu modelo de rede para predição de rugosidade incluía além dos parâmetros de processo usuais (v_c , a_p e f), dados de consumo de potência, comprimento da fresa em balanço, sinais de vibração, tempo de corte e o desgaste VB da ferramenta. Um aspecto interessante do trabalho é que foram realizados um número reduzido de ensaios, e mesmo assim o modelo RNA se mostrou confiável.

4.1.12 Estimativa da rugosidade em torneamento [40, 67, 68]

Kohli (2005) e Risbood (2003) desenvolveram metodologias similares para estimativa de rugosidade em torneamento. Estes mediram as vibrações que ocorrem na ferramenta e colocaram o sinal como entrada na rede MLP para predição da rugosidade, juntamente com as condições de processo. Suas conclusões são de que o modelo com redes neurais, embora em alguns caso divirjam dos valores experimentais, apresentam eficácia na estimativa da rugosidade.

Patrikar (2004) et al desenvolveram um trabalho revisional sobre os principais métodos para simulação da rugosidade, incluindo a transformada de Fourier, a qual define uma função $f(x,y)$ gerada a partir da densidade espectral do sinal e pelo método de “Mandelbrot – Weierstrass” baseado na teoria de fractais. Nesta caso pode-se modelar apenas o perfil da rugosidade, e não sua superfície. Os autores também citam como método regular de modelagem as redes neurais artificiais MLP.

4.1.13 Predição de desgaste por crateramento em torneamento

Chungchoo et al (2002), desenvolveram um sistema para estimativa de forças de usinagem e desgaste de cratera para operações de torneamento. O sistema baseia-se num modelo de rede neural juntamente com lógica nebulosa, utilizada em primeira instância para a classificação do tipo de desgaste. Os resultados experimentais do sistema demonstraram uma alta exatidão na estimativa no desgaste de cratera, com baixo esforço computacional.

4.1.14 Estimativa dos erros de origem térmica em máquinas CNC

Du et al (2003) utilizaram uma abordagem por redes neurais para estimar os erros origem térmica em centro de torneamento. Neste trabalho foi utilizada uma rede função de base radial para a modelagem, a qual se mostrou mais robusta do que similares MLP em termos de velocidade de convergência e existência de pontos de mínimo local.

4.1.15 Estimativa de forças de usinagem

Já Briceno (2002) comparou duas redes neurais supervisionadas pra estimar forças de usinagem em fresamento (MLP – “back-propagation” e RBF), chegando a conclusão em que

ambas podem ser usadas satisfatoriamente para este objetivo. Foram utilizadas técnicas de projeto de experimentos para estabelecer os diferentes conjuntos de dados que seriam submetidos a cada modelo de rede neural, o que contribuiu para a eficiência do sistema, reduzindo o número de dados experimentais para treinamento. Na rede MLP, o uso de uma camada oculta foi o suficiente para o processo em consideração, no entanto esta se mostrou menos eficaz na predição de forças de usinagem em fresamento que o modelo RBF.

Já Szecsi (1999) modelou as forças de usinagem em torneamento utilizando formulações teóricas e comparou com os resultados gerados pela rede neural. Concluiu que é mais fácil o uso de redes neurais, ao invés de calcular os coeficientes de relações analíticas. O modelo de rede utilizado foi o MLP.

4.1.16 Estimativas de custos de usinagem

Neste trabalho, Wang et al (2001), desenvolveram um método para estimativa de custos de processo. Baseado no método de Tagushi em sistemas de qualidade, foram desenvolvidos experimentos para selecionar a topologia de rede mais adequada ao processo de usinagem, as quais foram posteriormente submetidas à modelos de custo.

5 As Tecnologias Computacionais de Suporte

Introdução

O módulo de predição deve ser capaz de atender aos seguintes requisitos:

1. Calcular os tempos de usinagem;
2. Prever com razoável exatidão a força de usinagem (em desbaste) e a rugosidade (em acabamento) para operações de torneamento externo, em função dos parâmetros de processo (velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem)
3. Gerar saídas na forma de tabelas e gráficos;
4. Permitir a seleção do material e ferramenta bem como a inclusão dos dados para treinamento da rede;
5. Possuir interface amigável e intuitiva.

Para implementação destes requisitos se torna necessário a análise de diversas tecnologias computacionais, as quais serão detalhadas neste capítulo.

Tecnologias de Modelamento Geométrico

A obtenção de simulações realísticas de processos de usinagem, mesmo quando apenas uma vista plana é necessária (no caso do torneamento), só podem ser realizadas com o uso de técnicas de modelagem geométrica. Neste instante, os desenvolvedores precisam decidir se

elaboram uma biblioteca geométrica proprietária (“in house”) ou se compram uma existente de fonte externa. Esta decisão normalmente deve levar em conta certos critérios de projeto e o custo/benefício associado.

Quanto aos custos pode-se citar [Cadalyt, 2002]:

- A licença inicial
- As taxas de uso e distribuição do produto (“royalties”)
- Treinamento
- Desenvolvimento do software

Já do ponto de vista dos benefícios:

- Ciclo de desenvolvimento
- Confiabilidade
- Desempenho
- Funcionalidade disponível

A decisão de compra ou desenvolvimento pode ser bem difícil. Se uma empresa de software desenvolve sua própria biblioteca de geometria, isto proporciona um melhor controle sobre seus destinos. Caso haja erros ou melhorias a serem implementadas, estas podem ser feitas à medida da necessidade. O núcleo geométrico é entendido pela equipe de programadores como uma parcela compreensível do programa, e não como uma mera caixa preta que responde a certas entradas. Adicionalmente, caso o produto terceiro ou a empresa que o desenvolveu sejam descontinuados, por qualquer motivo, isto acarretará necessariamente em um novo desenvolvimento, e conseqüentemente custos adicionais.

Por outro lado, o desenvolvedor pode se beneficiar da compra de um componente gráfico pronto, visto que o desenvolvimento de softwares geométricos não é realmente o foco principal de seu negócio. Por exemplo, uma empresa focada em aplicações para manufatura ou análise por elementos finitos, não necessariamente precisaria desenvolver ferramentas geométricas proprietárias, e sim melhor utilizar seus recursos na elaboração de rotinas associadas a finalidade do software.

A empresa de software pode comprar um núcleo geométrico, que atenda às suas necessidades, por uma pequena parcela dos custos que estariam envolvidos num eventual desenvolvimento interno; e com a vantagem de reduzir drasticamente os tempos de desenvolvimento e conseqüente colocação no mercado. Mesmo que a necessidade se restrinja a um pequeno conjunto de funções disponibilizadas pelo núcleo, ainda assim pode ser vantajoso se comparado aos recursos que seriam aplicados na construção e manutenção do núcleo.

5.1.1 Análise dos produtos

Existem diversos produtos para modelamento tridimensional no mercado, e estes podem ser classificados em 3 categorias:

- Licenciados: Estes núcleos de modelamento são licenciados pelos seus desenvolvedores para uso em diferentes sistemas CAD. Exemplos comerciais são ACIS (Spatial Inc., subsidiária de Dassault Systems), Parasolid (Unigraphics Solutions Inc.), SMLib (Solid Modeling Solutions) e 3D Kernel (C4W).
- Aberto: São bibliotecas de modelamento abertas, onde não são cobradas taxas de royalties. Exemplo é a OpenCascade.
- Proprietário: Estes núcleos de modelamento são licenciados apenas para uma plataforma CAD específica. Exemplos comerciais são a Thinkkernel (Think3) e UPG2 (Varimetrix Corporation).

Em geral, não analisando a funcionalidade de cada produto, cada categoria possui vantagens distintas. As aplicações que licenciam o mesmo núcleo podem trocar modelos diretamente, sem a necessidade de tradutores de banco de dados. Por exemplo, um modelo SAT (ACIS) ou X_T/X_B (Parasolid) pode ser lido diretamente de uma aplicação que utiliza estes núcleos. Outra vantagem inerente aos sistemas licenciados é o contínuo esforço dos desenvolvedores para a atualização de recursos e funcionalidades, constatada pela periodicidade do lançamento de versões.

Já uma aplicação CAD, com núcleo proprietário permite uma melhor relação entre a interface do usuário e a função requerida, visto que o sistema incorpora integralmente o núcleo.

A seguir descreveremos as principais aplicações comerciais:

5.1.1.1 ACIS

Desenvolvido pela empresa Spatial Inc. (www.spatial.com), trata-se de uma biblioteca geométrica, orientada para objetos, em C++. Composta por 35 DLL's, esta integra todos os tipos de representação de objetos tridimensionais (estrutura de arame, superfície e sólido). Também permite aos desenvolvedores de aplicação, um conjunto bastante rico de operações geométricas e de manipulação de objetos, incluindo: operações “booleanas” (regulares e não), arredondamentos, cópias paralelas, seções etc. Também permite o cálculo de propriedade de massa e geométricas.

O núcleo gera arquivos com extensão SAT, que podem ser lidos em qualquer outra aplicação compatível ACIS.

Adicionalmente, ao núcleo básico de modelamento, é possível incorporar uma estrutura de visualização tridimensional chamada HOOPs 3D, desenvolvida pela empresa Techsoft (www.techsoft.com). Esta prove uma infra-estrutura e funcionalidade gráfica para aplicações 3D, incluindo CAD/CAM/CAE, engenharia, visualização e simulação.

Os principais produtos que se utilizam deste núcleo geométrico são: Autocad 2000, CADKey, Vellum, Inventor etc.

5.1.1.2 OpenCascade

Desenvolvido originalmente pela empresa Matra Datavision, tornou-se em um software de código aberto que pode ser baixado pela internet diretamente do site www.opencascade.org

O OpenCascade é um conjunto de bibliotecas de geometria C++ desenvolvidas especificamente para aplicações de domínio específico, como manufatura, análise e simulação. Está disponível em várias plataformas, incluindo Windows, Linux e Sun e também disponibiliza serviços e controles de visualização de modelos.

Os principais produtos que se utilizam deste núcleo geométrico são: Beicip Franlab, IMS, DBM Reflex.

A figura 5.1 ilustra uma aplicação deste núcleo para fins de geração de moldes de calçados.

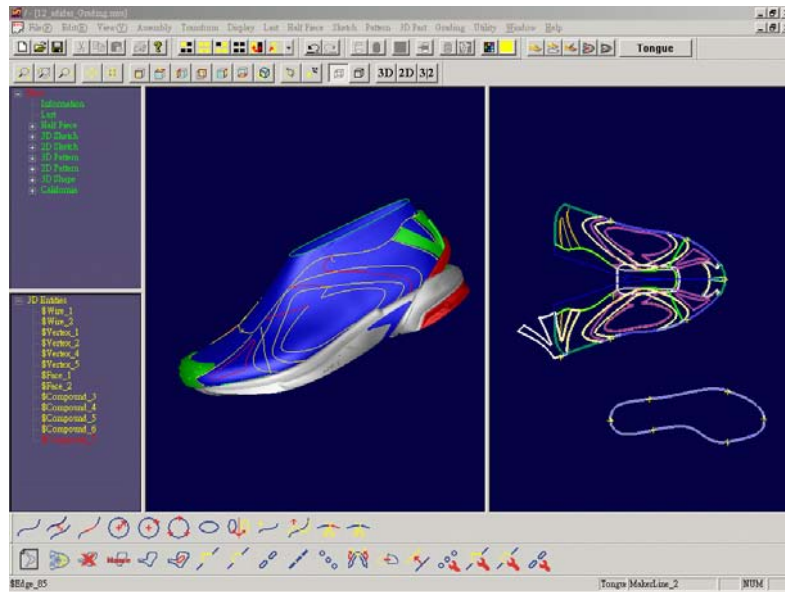


Figura 5.1 – Exemplo de aplicação gerada usando o núcleo OC [Open Cascade, 2003]

5.1.1.3 Parasolid

O Parasolid (www.parasolid.com) é o núcleo geométrico desenvolvido pela Unigraphics Solutions, subsidiária da EDS, divisão da GMC. Trata-se de um modelador de representação por fronteiras (Brep), que suporta representações sólidas, de superfície e chapas. Além das funcionalidades regulares, o Parasolid suporta multiprocessamento simétrico, o que melhora a performance em hardware mutiprocessado. É composto por mais de 600 funções orientadas a objeto para aplicações rodando em Windows, UNIX e Linux.

5.1.1.4 C4W

Trata-se de um núcleo de modelagem desenvolvido pela empresa francesa C4W, que pode ser acessado em www.c4w.com. Baseado na estrutura do Opencascade, o C4W possuem ferramentas de modelagem bi e tridimensionais bastante complexas, incluindo visualizador de janelas e manipulação de sólidos e superfícies. Um esquema do software pode ser acompanhado na figura 5.2. Ao contrário dos demais, este modelador permite interface direta com linguagens visuais “low end” como Delphi e VB.

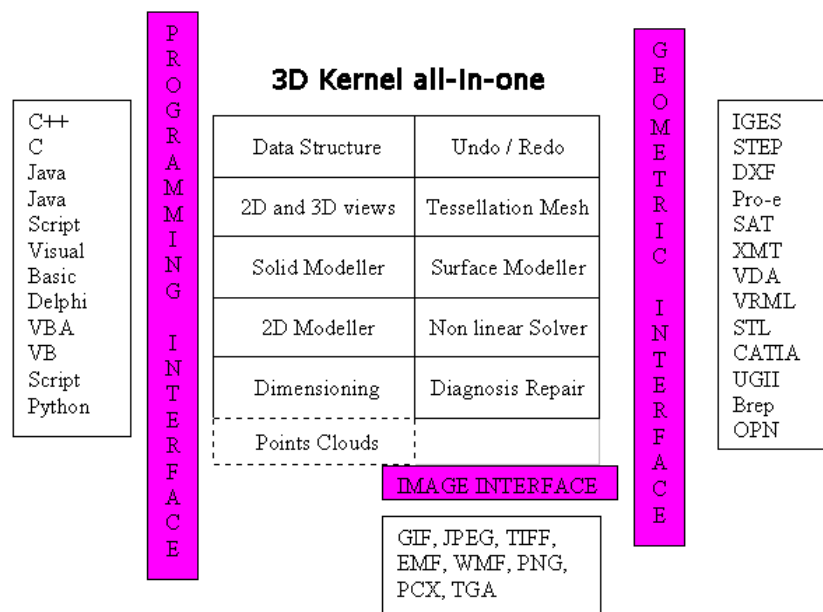


Figura 5.2 – Estrutura de interfaceamento de um núcleo de modelagem terceiro [C4W, 2003]

Ferramentas de Análise Preditiva - RNA

5.1.2 Análise de produtos

Das diversas tecnologias de inteligência artificial, citaremos duas aplicações comerciais no campo das redes neurais, com potencial de sucesso na implementação do projeto do módulo de predição:

5.1.2.1 Neuroshell Predictor

O Neuroshell Predictor é um produto desenvolvido pela empresa Wardsystems Inc (www.wardsystems.com), que se utiliza do modelo de redes neurais, para realizar previsões e estimativas de variáveis quaisquer. O software utiliza um modelo proprietário chamado TurboProp2, que segundo o fabricante é uma derivação da rede neural “perceptron” de multicamadas, com o algoritmo de treinamento baseado em algoritmos genéticos. Os modelos

são gerados e treinados de forma simples, inclusive com interfaceamento com planilhas eletrônicas.

Adicionalmente, os modelos de redes neurais treinados podem ser colocados em outros aplicativos, de forma a realizar previsões através de um servidor em tempo de execução opcional.

A figura 5.3 ilustra a interface do software Neuroshell Predictor.

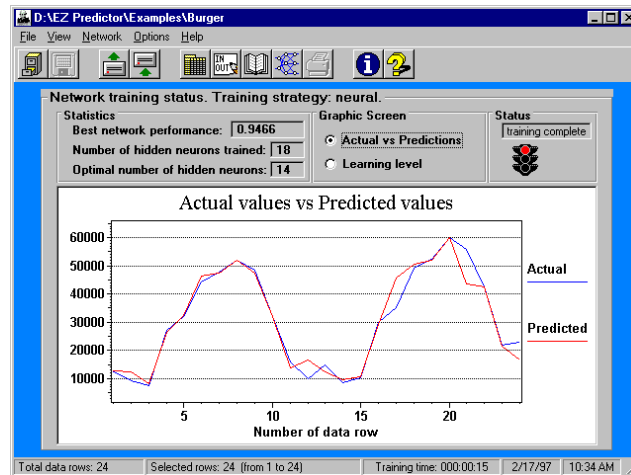


Figura 5.3 – Software para previsão com uso de redes neurais – Neuroshell Predictor
[Wardsystems, 2003]

5.1.2.2 Neurosolutions

O Neurosolutions é um produto desenvolvido pela empresa Neurosolutions Inc (www.nd.com). Ao contrário do anterior, o software utiliza modelos teóricos consagrados pela bibliografia [Haykin, 1999], tais como a rede MLP e a de função de base radial. Também permite uma série de ajustes no projeto da rede, tais como variáveis, número de neurônios, funções de transferência, métodos de treinamento etc.

Adicionalmente, os modelos de redes neurais treinados também podem ser colocados em outros aplicativos, de forma a realizar previsões através de um servidor em tempo de execução opcional.

A figura 5.4 ilustra a interface do software Neurosolutions.

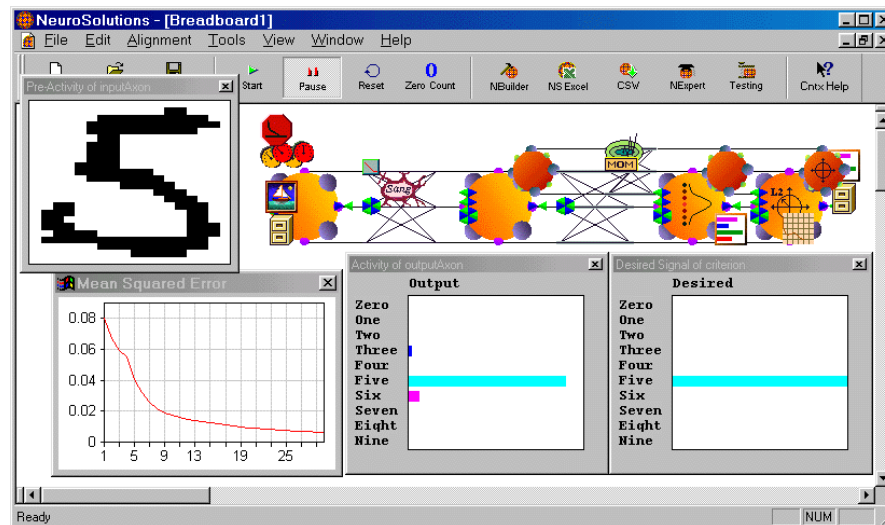


Figura 5.4 – Software para predição com uso de redes neurais – Neurosolutions
[Neurosolutions Inc, 2003]

Ferramentas de Programação CNC

Para efeito da implementação do módulo de predição objeto desta tese, selecionou-se uma aplicação didática comercial de edição e simulação de programas CNC. Optou-se pelo programa “CNC Programmer 2D” (www.adiante.com.br) , visto ter-se acesso ao código fonte e conseqüentemente a possibilidade de integração do módulo. A linguagem utilizada para desenvolvimento foi o Visual Basic e Visual C++.

Em essência, o software permite ao usuário a edição de um programa CNC em uma planilha especializada e sua posterior simulação.

O diagrama disposto na figura 5.5 ilustra a estrutura do programa. Procede-se então a uma rápida explanação de funcionamento interno do software.

5.1.3 Diagrama básico do software de simulação

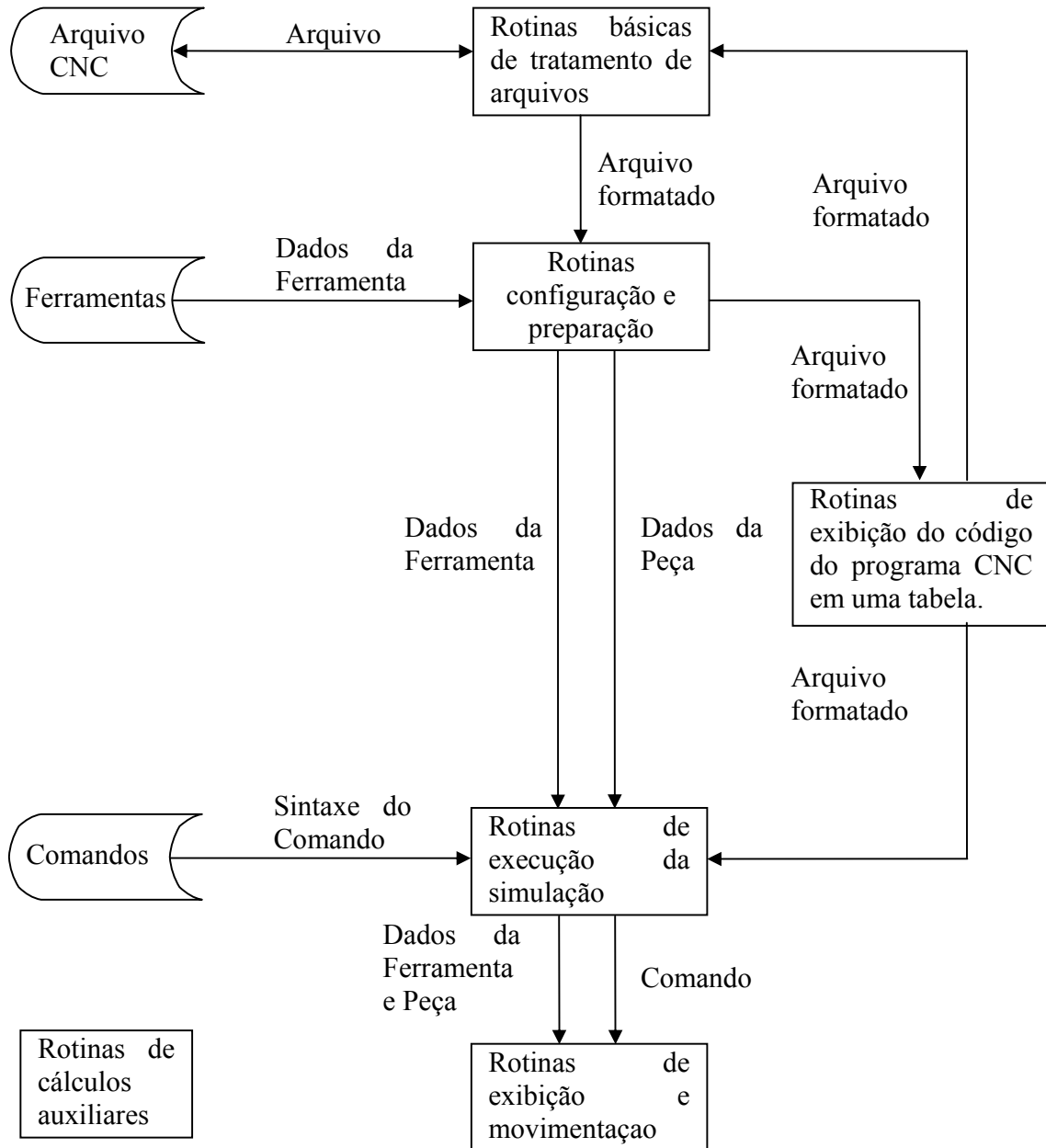


Figura 5.5– Diagrama de Fluxo de Dados – Software de Edição e Simulação (Adiante Informática, 2004)

5.1.4 Explicação do Software de Simulação

Rotinas básicas de tratamento de arquivos: responsáveis por ler, gravar e formatar o arquivo CNC original em um formato reconhecido pelo programa. Utilizou-se neste caso um arquivo texto formatado como fonte.

Rotinas de configuração e preparação: permitem ao usuário configurar a peça (dimensões, formato, etc) e a máquina (velocidade, processador, etc).

Rotinas de exibição do código do programa CNC em uma tabela: de posse do arquivo formatado, o programa tem condição de exibir para o usuário uma imagem do programa no formato de uma tabela. Nessa tabela o usuário pode ler e alterar o programa e posteriormente salvá-lo ou não.

Rotinas de execução da simulação: executa a simulação do programa que estiver ativo na tabela, permitindo que o usuário simule um programa antes que este seja salvo. Nesse ponto, são feitas as verificações de sintaxe, bem como os devidos cálculos matemáticos para a verificação de cada comando, antes que os mesmos sejam executados.

Rotinas de exibição e movimentação: caso a sintaxe do comando esteja correta, as rotinas desse módulo têm a função de exibir o resultado da simulação. No caso do **CNC 2D**, as ações de simulação são implementadas através do uso do núcleo geométrico “Open Cascade”. Assim são possíveis as simulações de interpolações lineares, circulares e compostas.

Rotinas de cálculos auxiliares: Essas rotinas não possuem ligação com outros módulos do sistema. Estas existem para que o usuário possa efetuar cálculos que o auxiliie a construir um programa CNC corretamente. Tais cálculos envolvem operações matemáticas básicas, bem como cálculos trigonométricos.

O programa possui ainda, duas fontes de dados externas. Uma delas é a base de dados que contém a sintaxe de todos os comandos de uma determinada máquina. Essa é a base denominada **Comandos** que é utilizada no processo de verificação e execução de um programa CNC. O comando utilizado como exemplo utiliza sintaxe ISO/GE Fanuc.

A outra base, denominada **Ferramenta**, é responsável por armazenar as dimensões e formatos de cada uma das ferramentas suportadas pelo programa.

A figura 5.6 ilustra a interface de simulação do software. Nela, o usuário poderá realizar a configuração das diversas variáveis que compõem o processo de usinagem. O programador poderá verificar a exatidão do seu programa, visualizando através de recursos gráficos, todas as etapas e caminhos percorridos pelas ferramentas e suas respectivas operações de usinagem.

Este módulo também permite:

- Dimensionamento de matéria-prima.
- Estabelecimento de placa e contra-ponto.
- Definição de referências geométricas (origem do programa).
- Localização de sub-rotinas.
- Mudança interativa de zero de programação.
- Acompanhamento do status de programação (Vc, avanço etc.)
- Calcular tempos de usinagem.

A figura 5.7 mostra a interface de programação do software. Nesta, o responsável pela edição do programa de Comando Numérico, utiliza-se de uma interface de processamento de código dedicada, onde pode-se digitar o programa utilizando-se dos recursos básicos de edição, típicos do ambiente Windows.

Este módulo possui ainda:

- Numeração automática de bloco
- Cálculos trigonométricos
- Verificação de erro de sintaxe no programa
- Assistente de Edição CNC

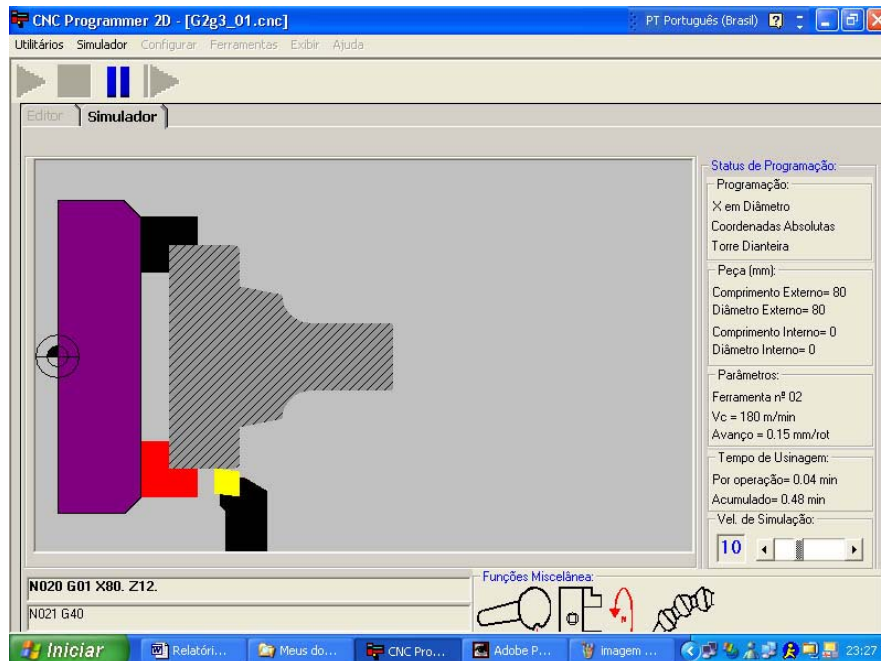


Figura 5.6 – Interface de simulação CNC 2D [Adiante Informática, 2004]

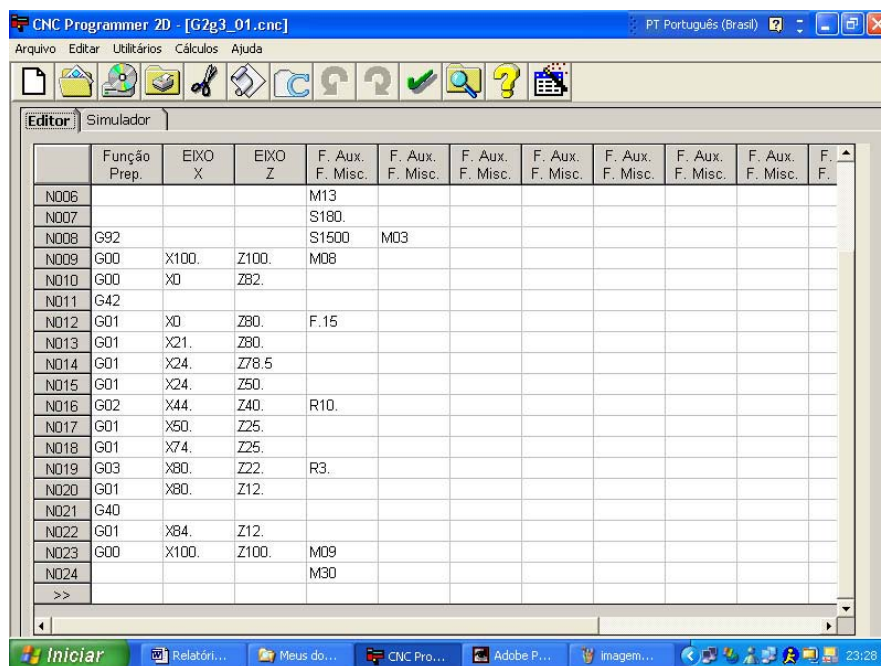


Figura 5.7 – Interface de edição textual do código - CNC 2D [Adiante Informática, 2004]

A figura 5.8 ilustra a interface para associação das ferramentas cadastradas na base de dados à torre da máquina.

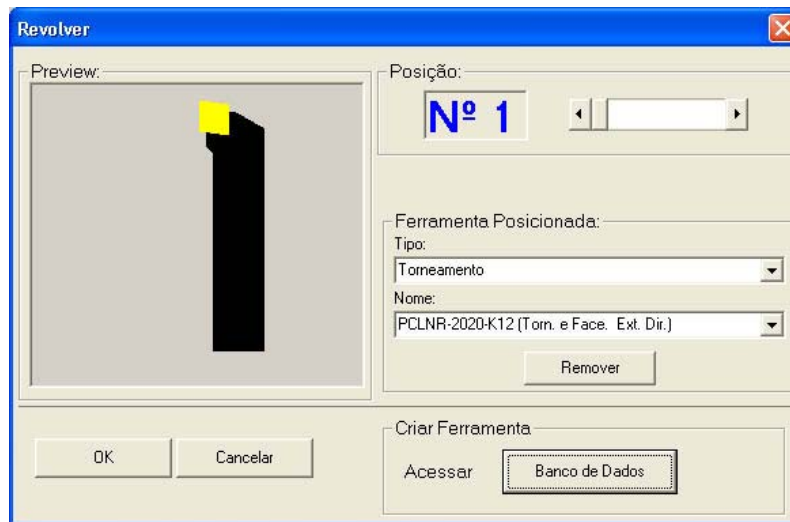


Figura 5.8– Interface de seleção geométrica de ferramentas - CNC 2D [Adiante Informática, 2004]

6 A Metodologia para Desenvolvimento do Sistema

A metodologia aplicada consistiu nas seguintes etapas:

1. Geração dos modelos de rede neural;
2. Treinamento e teste da rede neural;
3. Geração da biblioteca dinâmica;
4. Incorporação da biblioteca ao software comercial de simulação;
5. Cálculo de tempos de corte;
6. Estabelecimento dos casos de uso
7. Definição das interfaces
8. Plotagem do gráfico.

6.1.1 Geração dos modelos de rede neural

Para esta etapa foi selecionado o software NeuroSolutions, devido principalmente a suas funcionalidades quanto às topologias disponibilizadas, bem como a possibilidade de geração de uma biblioteca externa para utilização em outro programa.

Foram, então, geradas 2 configurações de rede, uma do tipo MLP (com função de ativação tipo tangente hiperbólica) e outra do tipo RBF (referir-se ao capítulo 4 para detalhes), ambas com

a mesma estrutura básica, ou seja, 3 elementos de processamento na camada de entrada, 1 camada escondida e apenas 1 elemento na camada de saída.

Os valores de entrada da rede eram as condições de usinagem estabelecidas (velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem) e para saída, a componente da força de usinagem ou componente da força de corte ou a rugosidade superficial, conforme esquema da figura 6.1:

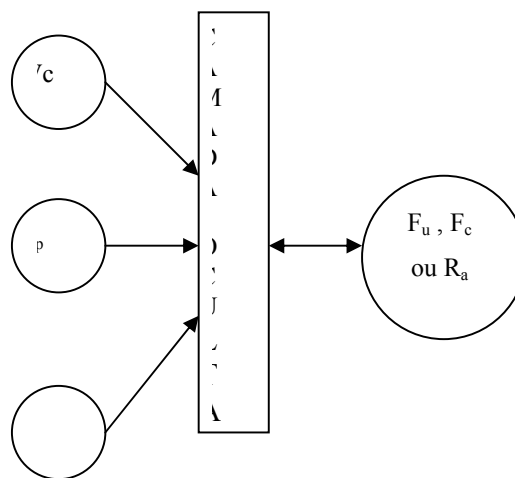


Figura 6.1 – Estrutura dos modelos de rede neural utilizados

6.1.2 Treinamento e teste da rede neural

Para treinamento da rede, foram utilizados dados experimentais de relacionamento entre as grandezas, colhidos a partir das referências bibliográficas [Sandvik, 2003 e Lin, 2001], num total de 27 exemplares. Destes 20% eram destinados para validação cruzada e outros 20% para teste.

As tabelas de 6.1 a 6.6 contêm os dados experimentais utilizados para treinamento e validação e teste. O material utilizado na usinagem foi aço de médio carbono ref. S55C (similar ao ABNT 1055 – 0,55% de carbono, sem elementos de liga). Já a ferramenta consistia num inserto de metal duro TNMG 160404 (classe e geometria de quebra-cavaco não citados),

montado sobre um porta-ferramenta MTJNL 2525M (vide figura 6.2). Os dados das tabelas foram utilizados para treinamento e teste da rede neural, configurações MLP e RBF.

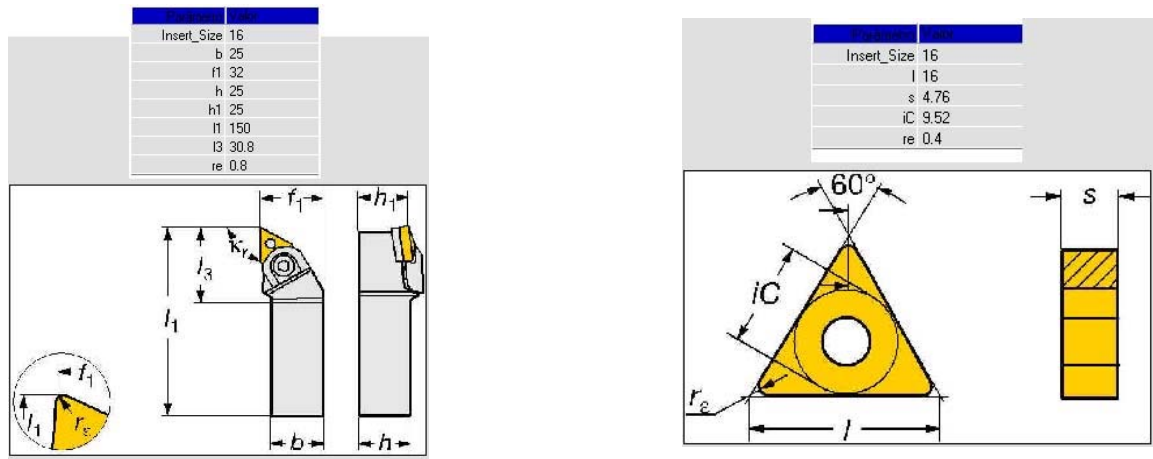


Figura 6.2 – Porta-ferramenta e inserto utilizados no ensaio [Sandvik, 2003]

Amostra	Vc (m/min)	f (mm/r)	ap (mm)	Fu (N)
1	202,63	0,08	1,25	452,20
2	202,63	0,08	0,80	316,80
3	202,63	0,20	0,80	529,70
4	202,63	0,08	0,35	192,40
5	202,63	0,20	0,35	283,80
6	121,58	0,08	1,25	490,00
7	121,58	0,32	1,25	1111,70
8	121,58	0,08	0,80	352,20
9	121,58	0,32	0,80	827,10
10	121,58	0,08	0,35	188,20
11	121,58	0,20	0,35	314,10
12	86,12	0,08	1,25	481,70
13	86,12	0,08	0,80	339,50
14	86,12	0,20	0,80	588,40
15	86,12	0,08	0,35	185,90
16	86,12	0,20	0,35	298,80
17	86,12	0,32	0,35	432,70

Tabela 6.1 – Dados experimentais para força de usinagem – treinamento [Lin, 2001]

V_c (m/min)	f (mm/r)	a_p (mm)	F_u (N)
202,63	0,32	1,25	1019,80
202,63	0,32	0,35	396,20
121,58	0,20	0,80	598,90
121,58	0,32	0,35	424,70
86,12	0,20	1,25	782,50

Tabela 6.2 – Dados experimentais para força de usinagem – validação [Lin, 2001]

V_c (m/min)	f (mm/r)	a_p (mm)	F_u (N)
202,63	0,20	1,25	737,90
202,63	0,32	0,80	762,20
121,58	0,20	1,25	825,60
86,12	0,32	1,25	1076,10
86,12	0,32	0,80	801,00

Tabela 6.3 – Dados experimentais para força de usinagem – teste [Lin, 2001]

Amostra	Vc (m/min)	f (mm/r)	ap (mm)	Ra (μm)
1	202,63	0,08	1,25	0,848
2	202,63	0,08	0,80	1,065
3	202,63	0,20	0,80	3,154
4	202,63	0,08	0,35	1,087
5	202,63	0,20	0,35	2,813
6	121,58	0,08	1,25	0,715
7	121,58	0,32	1,25	9,489
8	121,58	0,08	0,80	0,838
9	121,58	0,32	0,80	8,503
10	121,58	0,08	0,35	0,755
11	121,58	0,20	0,35	3,341
12	86,12	0,08	1,25	0,727
13	86,12	0,08	0,80	0,858
14	86,12	0,20	0,80	3,247
15	86,12	0,08	0,35	0,900
16	86,12	0,20	0,35	3,055
17	86,12	0,32	0,35	7,555

Tabela 6.4 – Dados experimentais para rugosidade– treinamento [Lin, 2001]

Vc (m/min)	f (mm/r)	ap (mm)	Ra (μm)
202,63	0,32	1,25	8,297
202,63	0,32	0,35	7,004
121,58	0,20	0,80	3,630
121,58	0,32	0,35	7,943
86,12	0,20	1,25	3,466

Tabela 6.5 – Dados experimentais para rugosidade– validação [Lin, 2001]

Vc (m/min)	f (mm/r)	ap (mm)	Ra (μm)
202,63	0,20	1,25	3,111
202,63	0,32	0,80	7,568
121,58	0,20	1,25	3,794
86,12	0,32	1,25	9,031
86,12	0,32	0,80	8,115

Tabela 6.6 – Dados experimentais para rugosidade– teste [Lin, 2001]

6.1.3 Geração da biblioteca dinâmica

O próximo passo foi a geração da biblioteca dinâmica (DLL) a partir o modelo da rede neural. Este procedimento é permitido pelo próprio software de redes neurais através de um módulo chamado CSW (“Custom Solution Wizard”). A biblioteca é gerada automaticamente, juntamente com os arquivos de pesos otimizados, os arquivos de entrada e saída desejados e um exemplo de projeto na linguagem escolhida.

6.1.4 Incorporação da biblioteca ao software comercial de simulação

A integração da biblioteca da rede neural ao software de simulação requereu o desenvolvimento dos seguintes algoritmos:

- Cálculo dos tempos de usinagem (vide formulação no anexo I)
- Determinação dos intervalos de amostragem dos parâmetros de usinagem necessários em função do avanço programado;
- Cálculo da profundidade de usinagem a partir do modelo geométrico da peça, a cada instante;
- Obtenção dos valores de avanço e velocidade de corte a partir do arquivo CNC, a cada instante;
- Submissão e armazenamento dos valores gerados pela rede a cada instante.

6.1.5 Cálculo dos tempos de corte [Niderauer, 2004]

A Figura 6.3 representa o processo onde uma ferramenta hipotética faz um trajeto do ponto P em movimento qualquer no plano x-z até o ponto Q. Podemos descrever matematicamente esta trajetória através de função $f(z)$. O avanço f e a velocidade de corte v_c desta ferramenta são constantes

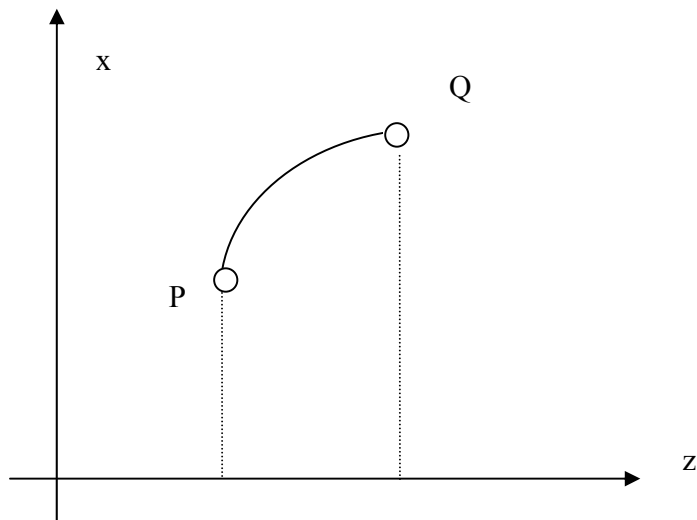


Figura 6.3 - Percurso de uma ferramenta

A ferramenta no eixo x-z tem velocidade de avanço v_f . Dada pela equação 6.1.

$$v_f = f \cdot n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot d} \cdot f \quad (6.1)$$

O tempo efetivo de corte é $t_c = l_f / v_f$ e l_f pode ser calculado pela equação 6.2.

$$l_f = \int \sqrt{1 + f'(z)^2} dz \quad (6.2)$$

Como d é $2 \cdot f(z)$ temos que o tempo t_c pode ser calculado pela Equação 6.3

$$t_c = K_0 * \int f(z) \cdot \sqrt{1 + f'(z)^2} dz \text{ com } K_0 = \frac{\pi}{v_c \cdot f \cdot 500} \quad (6.3)$$

Onde:

V_c é a velocidade de corte em m/min

f é o avanço em mm

t_c é o tempo de corte em minutos

A figura 6.4 ilustra alguns casos especiais de aplicação da Equação 6.3:

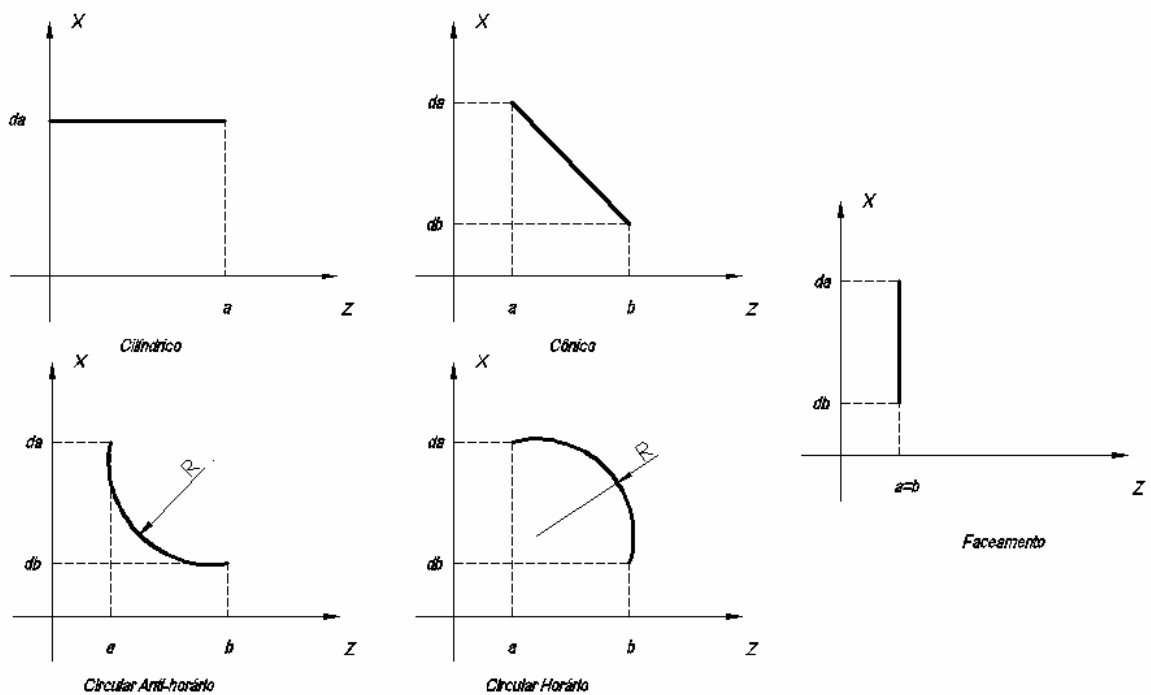


Figura 6.4 - Casos especiais de trajetórias de torneamento

6.1.5.1 Torneamento cilíndrico, de acordo com a Figura 6.2

$f(z) = da = d/2$, onde d é o diâmetro do cilindro e $f'(z) = 0$

logo:

$$t_c = k_0 \int_0^a d_a \cdot dz = \frac{\pi \cdot d \cdot a}{1000 \cdot f \cdot V_c} \quad (6.1.1)$$

6.1.5.2 Torneamento cônico, de acordo com a Figura 6.2

α e β são respectivamente o coeficiente angular e o linear da reta que representa o perfil cônico.

$$f(z) = \alpha \cdot z + \beta \quad \text{onde: } \alpha = \frac{da - db}{a - b} \text{ e } \beta = f(a) - \alpha \cdot a$$

$$f'(z) = \alpha$$

$$C = \sqrt{(1 + \alpha^2)}$$

$$t_c = K_0 \int_a^b (\alpha \cdot z + \beta) \cdot C \cdot dz = \frac{\pi}{v_c \cdot f \cdot 500} \left[\frac{\alpha C}{2} (b^2 - a^2) + \beta \cdot C (b - a) \right] \quad (6.2.1)$$

Dados o raio “R” e o ponto centro da circunstância “c” com as suas coordenadas “ c_z ” e “ c_x ” temos:

6.1.5.3 Torneamento Circular anti- Horário, de acordo com a Figura 6.2

$$f(z) = c_x - \sqrt{R^2 - (z - c_z)^2}$$

$$f'(z) = \frac{z - c_z}{\sqrt{R^2 - (z - c_z)^2}}$$

$$t_c = K_0 \cdot \left[\int_a^b c_x \cdot R \cdot \frac{1}{\sqrt{R^2 - (z - c_z)^2}} dz - \int_a^b R \cdot dz \right]$$

$$t_c = \frac{\pi}{V_c \cdot f \cdot 500} \left\{ c_x R \left[\arcsen\left(\frac{b - c_z}{R}\right) - \arcsen\left(\frac{a - c_z}{R}\right) \right] - R(b - a) \right\} \quad (6.3.1)$$

6.1.5.4 Torneamento Circular Horário, de acordo com a Figura 6.2

$$f(z) = c_x + \sqrt{R^2 - (z - C_z)^2}$$

$$f'(z) = \frac{c_z - z}{\sqrt{R^2 - (z - c_z)^2}}$$

$$t_c = \int_a^b c_z \cdot R \frac{1}{r^2 - (z - c_z)^2} dz + \int_a^b R dz$$

$$t_c = \frac{\pi}{V_c \cdot f \cdot 500} \left\{ c_x r \left[\arcsen\left(\frac{b - c_z}{r}\right) - \arcsen\left(\frac{a - c_z}{r}\right) \right] + R(b - a) \right\} \quad (6.4.1)$$

6.1.5.5 Torneamento de Faceamento, de acordo com a Figura 6.2

$$t_c = \frac{\pi}{V_c \cdot f \cdot 1000} (da^2 - db^2) \quad (6.5.1)$$

6.1.6 Estabelecimento dos casos de uso

Para a realização do cálculo de esforços de usinagem e rugosidade utilizando como base o software de simulação de torneamento CNC - CNC Programmer 2D 2003 foram utilizadas as seguintes ferramentas:

Código fonte do CNC Programmer 2D vAlfa 2006

Linguagem de Programação Microsoft Visual Basic v6.0

Linguagem de Programação Microsoft Visual C++ v6.0

Componente CAD/CAM OpenCascade v5.2.4

Componente de Gráficos TeeChart v4.0

Componente de Redes Neurais NeuroSolutions v4.0

O Software CNC Programmer 2D vAlfa 2006 foi escolhido pois utiliza o Componente OpenCascade para exibir a simulação de usinagem de torneamento CNC e esta tecnologia disponibiliza as ferramentas matemáticas e geométricas necessárias para a obtenção dos parâmetros para o cálculo da Força de Corte.

Abaixo segue a lista de requisitos (casos de uso) para a realização do Cálculo dos esforços de usinagem e rugosidade:

6.1.6.1 Caso de Uso: Transferir os parâmetros de usinagem do Programa CNC para o Componente OpenCascade

Objetivo:

Transferir do programa CNC os parâmetros: Velocidade de Corte(V_c), Avanço(f) e Rotação máxima assim como suas respectivas unidades.

6.1.6.2 Caso de Uso: Cálculo do parâmetro Profundidade de usinagem durante a simulação

Objetivo:

Desenvolver uma função em Visual C++ utilizando o componente OpenCascade para calcular a aresta de corte(A_p) a cada passo da ferramenta durante a simulação de G0/G1/G2/G3

6.1.6.3 Caso de Uso: Cálculo dos tempos da usinagem

Objetivo:

Desenvolver uma função em Visual C++ para calcular e armazenar o tempo de corte em G0/G1/G2 e G3 a cada passo da ferramenta durante a simulação

6.1.6.4 Caso de Uso: Calcular a Força de Corte utilizando o componente NeuroSolution

Objetivo:

Transferir para o componente NeuroSolution os parâmetros calculados de V_c , f e a_p e obter a força de corte a cada passo da ferramenta durante a simulação.

6.1.6.5 Caso de Uso: Calcular a rugosidade utilizando o componente NeuroSolution

Objetivo:

Transferir para o componente NeuroSolution os parâmetros calculados de V_c , f e a_p e obter a rugosidade média a cada passo da ferramenta durante a simulação.

6.1.6.6 Caso de Uso: Gravar os dados calculados em arquivo texto

Objetivo:

Gravar os seguintes dados abaixo que foram calculados em arquivo texto para posterior análise e geração do gráfico de esforços de usinagem

Função(G0/G1/G2/G3)

Tempo(min)

V_c (m/min)

Avanço(mm/rot)

A_p (mm)

Força de Corte (N)

Rugosidade (mícrons)

6.1.6.7 Caso de Uso: Gerar o gráfico de Força de corte X Tempo

Objetivo:

Gerar o gráfico de força de corte X tempo a partir dos dados do arquivo texto gerado no caso de uso de gravação dos dados.

6.1.6.8 Caso de Uso: Gerar o gráfico de Rugosidade X Tempo

Objetivo:

Gerar o gráfico de Rugosidade Média X tempo a partir dos dados do arquivo texto gerado no caso de uso de gravação dos dados.

6.1.7 Design das Interfaces e Programação das Classes de Objetos e componentes

Para cada um dos casos de uso foi necessário desenvolver uma ou mais interfaces e funções para que o usuário pude-se interagir com o software e obter o resultado desejado.

Segue abaixo as imagens das interfaces e funções para cada um dos casos de uso relativos:

6.1.7.1 Caso de Uso: Transferir os parâmetros de usinagem do Programa CNC para o Componente OpenCascade

Foram Criados as seguintes propriedades no Componente OpenCascade para receber os parâmetros de usinagem do programa CNC gerado no CNC 2D:

VcRot() : Propriedade do tipo double que recebe o valor da velocidade de corte/rotação

UnidVcRot() : Propriedade do tipo integer que recebe a unidade utilizada no valor da propriedade VcRot() sendo valor 1 para rotação em rpm ou valor 2 para velocidade de corte em m/min

Avanço(): Propriedade do tipo double que recebe o valor do avanço

UnidAvanco() : Propriedade do tipo integer que recebe a unidade utilizada no valor da propriedade Avanco() sendo valor 1 para mm/min ou valor 2 para mm/rot

RotMax() : Propriedade do tipo double que recebe o valor da rotação máxima permitida

Durante a compilação do programa CNC no CNC 2D estas propriedades são invocadas e os respectivos valores são transferidos ao componente.

6.1.7.2 Caso de Uso: Calculo do parâmetro a_p durante a usinagem

Para o calculo do parâmetro a_p foi necessário alterar o método UsiSimu() responsável pela apresentação da usinagem e linhas vivas a cada passo da ferramenta. No caso o a_p é a distância entre os pontos extremos da aresta de corte do inserto em contato com o tarugo e estes pontos são obtidos através de uma operação lógica de intersecção entre aresta e tarugo. Este valor é armazenado em um vetor que ao final da trajetória irá conter todos as profundidades calculadas.

Obs.: Na simulação a ferramenta se desloca a passos de 0.5 mm

6.1.7.3 Caso de Uso: Calculo dos tempos da usinagem

Para o calculo do tempo foi necessário criar o método CalculaTempo() este método calcula o tempo de usinagem em minutos baseado nos dados de Velocidade de Corte, Rotação e Avanço obtidos do programa CNC. Este valor é armazenado em um vetor que ao final da trajetória irá conter todos os tempos calculados a cada passo da ferramenta.

Obs.: Este método também armazena em Vetores os dados de Velocidade de Corte e Avanço a cada passo da ferramenta.

6.1.7.4 Caso de Uso: Calcular a Força de usinagem utilizando o componente NeuroSolutions

Ao final de cada trajetória da ferramenta (G0/G1/G2/G3) os dados de Velocidade de Corte, Avanço e A_p armazenados nos vetores são colocados em um laço de repetição e cada um deles é submetido a DLL NeuroSolutions que devolve a Força de usinagem. Note que se o a_p for igual a zero automaticamente a força será zero e nestes casos a DLL não será acionada.

6.1.7.5 Caso de Uso: Calcular a rugosidade utilizando o componente NeuroSolutions

O procedimento neste caso é o mesmo da obtenção da Força de Usinagem o que muda é que outra DLL é utilizada e o resultado obtido é a rugosidade média.

6.1.7.6 Caso de Uso: Gravar os dados calculados em arquivo texto

Durante o Loop de cálculo de Rugosidade e Força a instrução “Print” do Visual Basic é acionada e ela é responsável por gravar os valores de:

Função(G0/G1/G2/G3)

Tempo(min)

Vc (m/min)

Avanço(mm)

Profundidade de usinagem (mm)

Força de Corte ou Usinagem (N)

Rugosidade (μm)

Em um arquivo texto (rndados.txt) localizado na subpasta “RedeNeural” do CNC 2D.

6.1.7.7 Caso de Uso: Gerar o gráfico de Força de usinagem X Tempo

Para gerar o gráfico de Força x Tempo primeiramente o arquivo rndados.txt é importado para um “recordset DAO 3.6” que organiza o arquivo texto em um formato de tabela de banco de dados.

Em seguida para cada registro desta tabela são obtidos os valores de tempo e força os quais são passados para o componente TeeChart sendo a Força no eixo Y e o tempo no eixo X.

Ao final o componente TeeChart gera o gráfico em uma janela.


6.1.7.8 Caso de Uso: Gerar o gráfico de Rugosidade X Tempo

O procedimento neste caso é o mesmo da geração do gráfico da Força de Usinagem o que muda é que o valor da rugosidade é informado no eixo Y.

6.1.8 Definição das interfaces do módulo

6.1.8.1 Cadastramento de Dados para Treino da Rede

Nesta interface é feito o cadastramento dos parâmetros de usinagem (v_c , f e a_p), juntamente com os valores experimentais obtidos para R_a e F_u , a serem utilizado no treinamento da rede neural. Não há limitação para o número de exemplares cadastrados.



The screenshot shows a software window titled "Cadastro de Dados de Treino". It has two dropdown menus: "Material" set to "Aço ABNT 1055 - Desbaste" and "Ferramenta" set to "TNMG 160404 MTJNL 2525M". To the right, there is a field for "Nº de Registros" with the value "17". Below these is a table with the following data:

	Vc (mm/min)	f (mm)	ap (mm)	F (N)	Ra (micron)
▶	202.63	0.08	1.25	452.2	0.848
	202.63	0.08	0.8	316.8	8.279
	202.63	0.2	0.8	529.7	3.154
	202.63	0.08	0.35	192.4	1.087
	202.63	0.2	0.35	283.8	2.813
	121.58	0.08	1.25	490	0.715
	121.58	0.32	1.25	1111.7	9.489
	121.58	0.08	0.8	352.2	0.838
	121.58	0.32	0.8	827.1	8.503
	121.58	0.08	0.35	188.2	0.755
	121.58	0.2	0.35	314.1	3.341
	86.12	0.08	1.25	481.7	0.727
	86.12	0.08	0.8	339.5	0.858
	86.12	0.2	0.8	588.4	3.247
	86.12	0.08	0.35	185.9	0.9
	86.12	0.2	0.35	298.8	3.055
	86.12	0.32	0.35	432.7	7.555

Figura 6.5 – Janela para cadastramento de dados para treino

6.1.9 Configuração da rede

Nesta interface é possível ajustar o número de interações a serem realizadas para cálculo dos pesos internos da rede, bem como o tipo de topologia ser aplicada (MLP ou RBF).



Figura 6.6 – Janela para configuração da rede

6.1.10 Cadastro de material

Nesta interface é feito o cadastramento do tipo de material a ser usado.

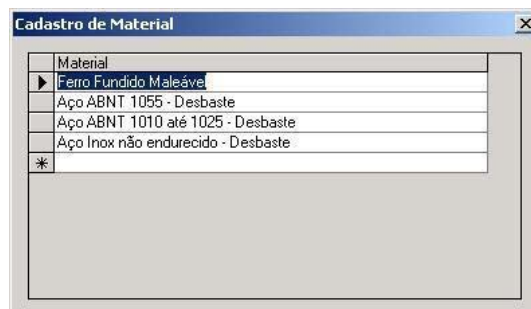


Figura 6.7 – Janela para configuração da rede

6.1.11 Plotagem do gráfico

Os resultados obtidos para cada seqüência de usinagem, e que foram previamente escritos em arquivo texto, são então plotados na forma de gráfico X –Y, utilizando-se um componente gráfico.

7 Resultados Obtidos

Introdução

Os resultados obtidos pelo módulo de predição foram analisados em duas frentes distintas. A primeira, gerada pelos modelos de rede neurais e a segunda pelo protótipo em testes de utilização.

Análise dos Resultados de Força de Corte e Acabamento Superficial a partir dos Modelos de RN

Os resultados foram colocados na forma de gráfico e podem ser acompanhados a seguir. O formato é *F est* (resultado da força estimada pela rede) e *Des F* (resultado de força desejado).

O gráfico 7.1 mostra o resultado do treinamento da rede neural, utilizando uma topologia “perceptron” multicamadas (MLP). No eixo das ordenadas, tem –se a força de usinagem (N) e nas abscissas, o número da amostra (conforme tabela 6.1). A linha em azul (tom mais escuro) ilustra o comportamento desejado e a linha vermelha (tom mais claro) ilustra os valores estimados pela rede neural.

Observa-se que as linhas praticamente coincidem, indicando que a aproximação é satisfatória.

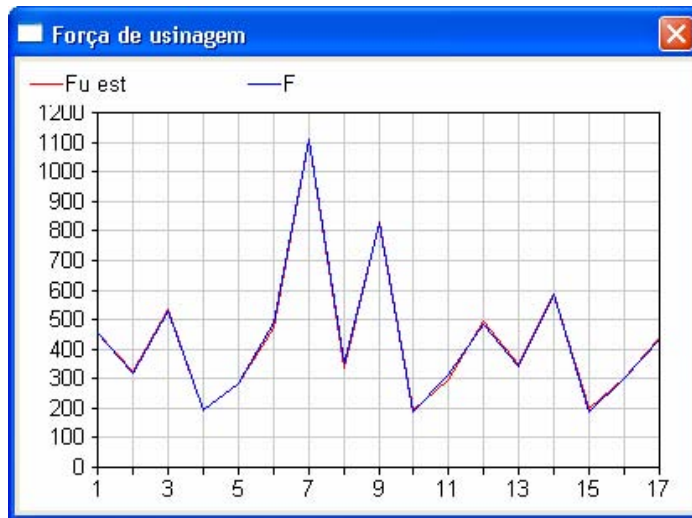


Gráfico 7.1 – Resultados do treinamento para os dados experimentais – topologia MLP (força vs número da amostra)

O gráfico 7.2 mostra o erro médio quadrático (ver equação 4.9) calculado tanto para o conjunto de dados de treinamento (T) como de validação cruzada (CV) em função do número de iterações realizadas para treinamento. Observa-se que este valor tende a valores abaixo de 0,05.

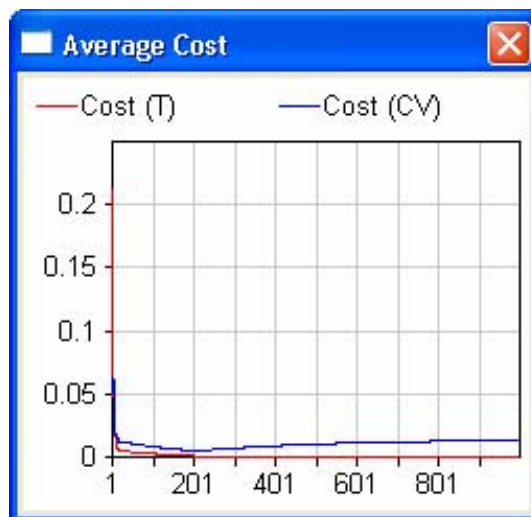


Gráfico 7.2 – Resultados do erro para os dados experimentais – topologia MLP (erro vs iterações)

O gráfico 7.3 mostra o resultado do treinamento da rede neural, utilizando uma topologia de função de base radial (RBF). No eixo das ordenadas, tem –se a força de usinagem (N) e nas abscissas, o número da amostra (conforme tabela 6.1). A linha em azul (tom mais escuro) ilustra o comportamento desejado (Des F) e a linha vermelha (tom mais claro) ilustra os valores estimados pela rede neural (F est). As linhas acham-se defasadas para melhor visualização.

Observa-se que as linhas têm comportamento semelhante, o que indica que a aproximação é satisfatória.

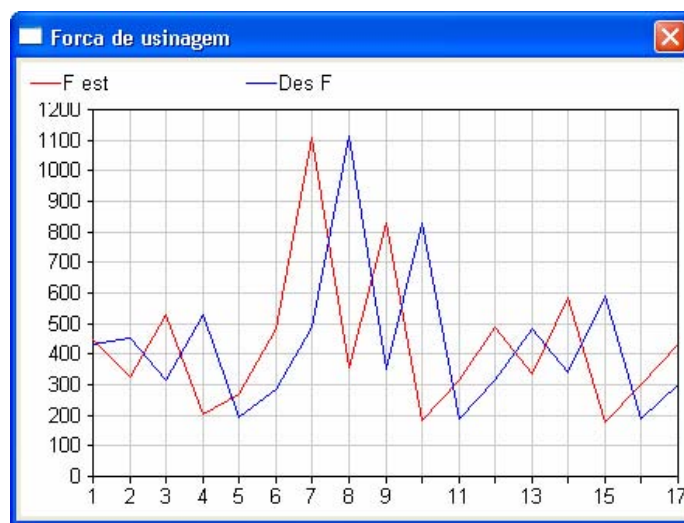


Gráfico 7.3 – Resultados do treinamento para os dados experimentais – topologia RBF (força vs número da amostra)

Já do ponto de vista da rugosidade, os resultados foram:

O gráfico 7.4 mostra o resultado do treinamento da rede neural, utilizando uma topologia “perceptron” multicamadas (MLP). No eixo das ordenadas, tem –se a rugosidade (em Ra) e nas abscissas, o número da amostra (conforme tabela 6.4). A linha em azul (tom mais escuro) ilustra o comportamento desejado (Des Ra) e a linha vermelha (tom mais claro) ilustra os valores estimados pela rede neural (Ra est). As linhas acham-se defasadas para melhor visualização.

Observa-se que as linhas praticamente coincidem, o que indica que a aproximação é satisfatória.

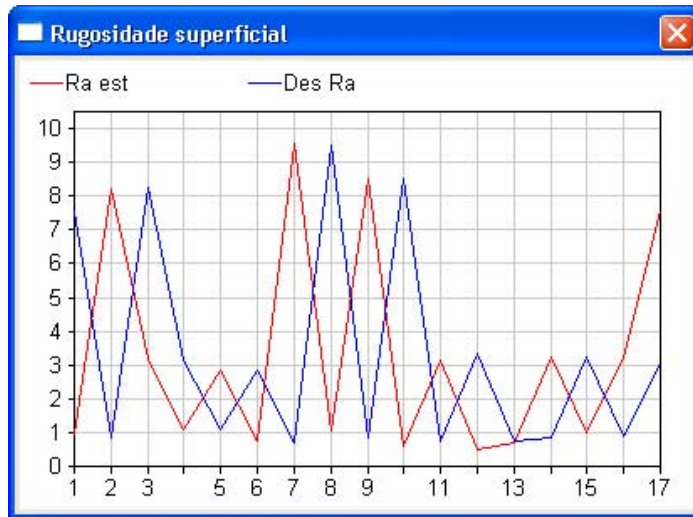


Gráfico 7.4 – Gráfico do treinamento para os dados experimentais – topologia MLP (rugosidade vs número da amostra)

O gráfico 7.5 mostra o resultado do treinamento da rede neural, utilizando uma topologia de função de base radial (RBF). No eixo das ordenadas, tem-se a rugosidade (em Ra) e nas abscissas, o número da amostra (conforme tabela 6.4). A linha em azul (tom mais escuro) ilustra o comportamento desejado (Des Ra) e a linha vermelha (tom mais claro) ilustra os valores estimados pela rede neural (Ra est). As linhas acham-se defasadas para melhor visualização.

Observa-se que as linhas têm comportamento semelhante, o que indica que a aproximação é satisfatória.

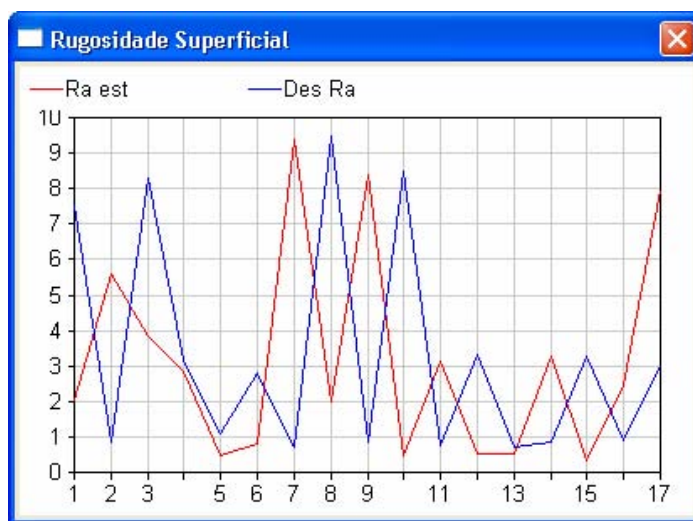


Gráfico 7.5 – Resultados do treinamento para os dados experimentais – topologia RBF (rugosidade vs número da amostra)

As tabelas a seguir mostram os resultados obtidos para estimativa da força, submetendo os dados de testes a rede:

A tabela 7.1 mostra o resultado do teste da rede neural, utilizando uma topologia “perceptron” multicamadas (MLP). A primeira coluna (Des F) indica o valor desejado para força de usinagem em (N), a segunda coluna (F est) ilustra os valores estimados pela rede neural e a terceira coluna mostra o erro percentual relativo ao valor desejado, em (%).

Des F (N)	F est (N)	E%
737,90	868,20	17,66%
762,20	890,37	16,82%
825,60	854,19	3,46%
1076,10	1100,41	2,26%
801,00	821,89	2,61%

Tabela 7.1 – Resultados obtidos para teste do modelo MLP – Força de Usinagem

O gráfico 7.6 mostra um comparativo entre as forças de usinagem desejada e a prevista em função do número de exemplares, conforme a legenda.

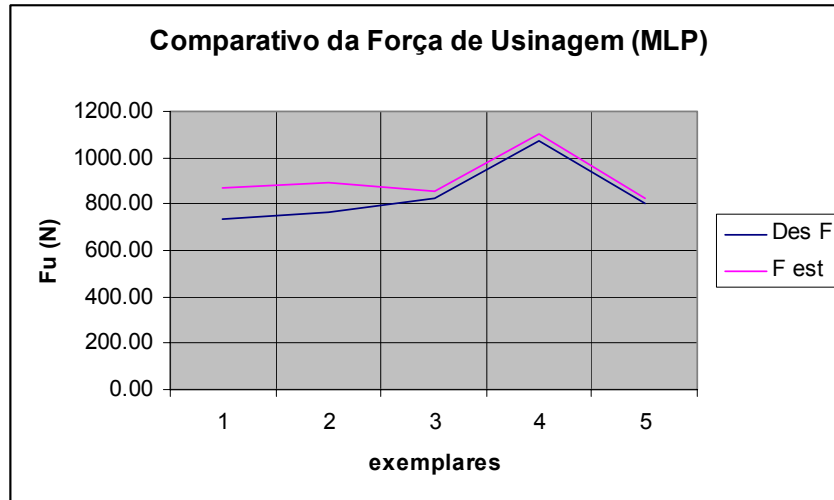


Gráfico 7.6 – Resultados do teste – topologia MLP (Força vs exemplares)

A tabela 7.2 mostra o resultado do teste da rede neural, utilizando uma topologia função de base radial (RBF). A primeira coluna (Des F) indica o valor desejado para força de usinagem em (N), a segunda coluna (F est) ilustra os valores estimados pela rede neural e a terceira coluna mostra o erro percentual relativo ao valor desejado, em (%).

Des F (N)	F est (N)	E%
737,90	679,57	7,91%
762,20	731,86	3,98%
825,60	853,31	3,36%
1076,10	1071,29	0,45%
801,00	828,10	3,38%

Tabela 7.2 – Resultados obtidos para teste do modelo RBF – Força de Usinagem

Analogamente ao caso anterior, o gráfico 7.7 mostra um comparativo entre as forças de usinagem desejada e a prevista em função do número de exemplares, conforme a legenda para a topologia RBF.

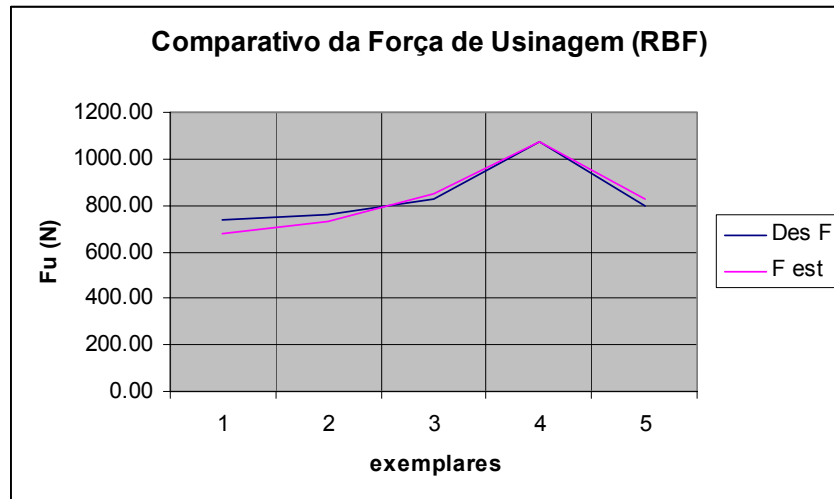


Gráfico 7.7 – Resultados do teste – topologia RBF (Força vs exemplares)

As tabelas a seguir mostram os resultados obtidos para estimativa da rugosidade, submetendo os dados de testes a rede:

A tabela 7.3 mostra o resultado do teste da rede neural, utilizando uma topologia “perceptron” multicamadas (MLP). A primeira coluna (Des Ra) indica o valor desejado para rugosidade em (N), a segunda coluna (Ra est) ilustra os valores estimados pela rede neural e a terceira coluna mostra o erro percentual relativo ao valor desejado, em (%).

Des Ra (μm)	Ra est (μm)	E%
3,111	4,037	29,77%
7,568	9,136	20,72%
3,794	3,696	2,58%
9,031	8,967	0,71%
8,115	8,405	3,57%

Tabela 7.3 – Resultados obtidos para teste do modelo MLP – Rugosidade Superficial

O gráfico 7.8 mostra um comparativo entre a rugosidade desejada e a prevista em função do número de exemplares, conforme a legenda.

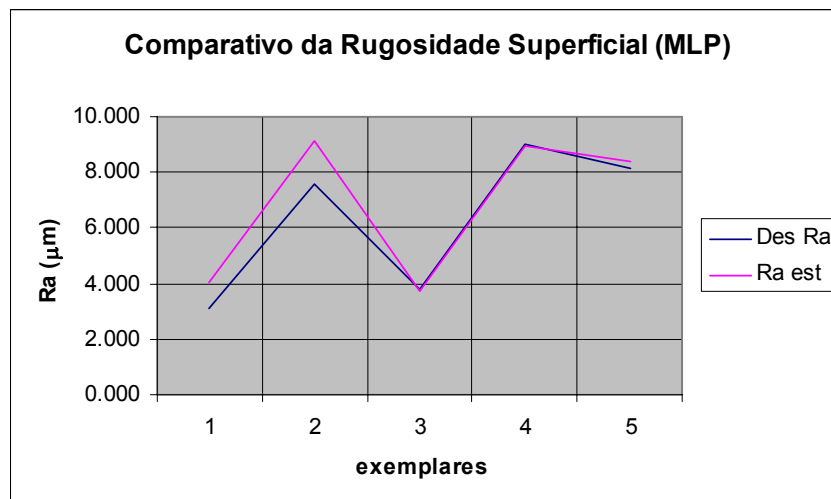


Gráfico 7.8 – Resultados do teste – topologia MLP (Ra vs exemplares)

A tabela 7.4 mostra o resultado do teste da rede neural, utilizando uma topologia função de base radial (RBF). A primeira coluna (Des Ra) indica o valor desejado para rugosidade em (N), a segunda coluna (Ra est) ilustra os valores estimados pela rede neural e a terceira coluna mostra o erro percentual relativo ao valor desejado, em (%).

Des Ra (μm)	Ra est (μm)	E%
3,111	2,565	17,55%
7,568	6,932	8,40%
3,794	4,718	24,35%
9,031	9,433	4,45%
8,115	8,589	5,84%

Tabela 7.4 – Resultados obtidos para teste do modelo RBF – Rugosidade

Analogamente ao caso anterior, o gráfico 7.9 mostra um comparativo entre a rugosidade desejada e a prevista em função do número de exemplares, conforme a legenda para a topologia RBF.

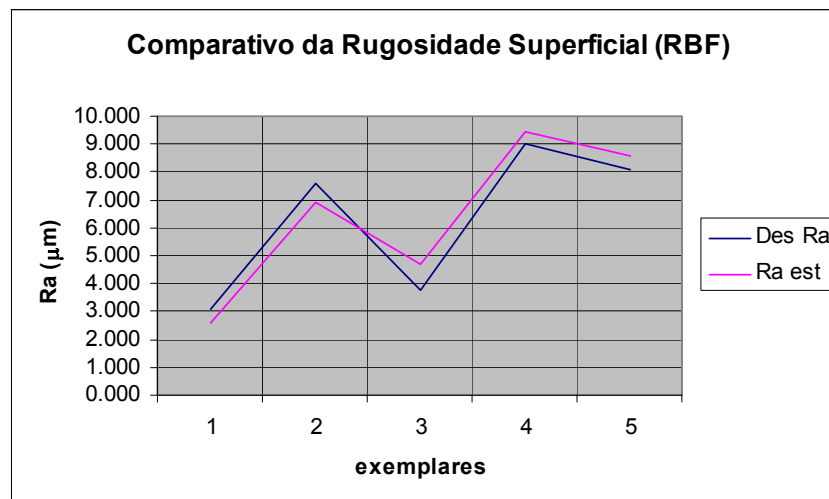


Gráfico 7.9 – Resultados do teste – topologia RBF (Ra vs exemplares)

Pode-se observar pelos resultados obtidos, que embora os dados para treinamento estivessem abaixo do mínimo desejado por Lawrence e Peterson (1998) (em torno de 28 exemplares, para este caso), o tratamento por redes neurais em ambas as topologias aproximam de forma razoável o comportamento da força e da rugosidade. Na média, o modelo RBF teve um

desempenho em aproximar a força de usinagem, enquanto o ambos os modelos obtiveram resultados semelhantes para a rugosidade.

No caso dos testes da rugosidade superficial, no modelo RBF, detectou-se uma discrepância para o exemplar n.2 em que o comportamento previsto diverge significativamente do estimado. Este fato deve-se provavelmente ao menor número de exemplares destinados ao treinamento da rede para velocidades de corte mais altas ($V_c = 202,63$ m/min).

Em termos de desempenho, a rede tipo RBF convergiu muito mais rapidamente que a similar MLP (1000 iterações x 50 iterações, respectivamente) em ambos os casos.

Análise dos Resultados de Força de Corte e Acabamento Superficial a partir do protótipo

Foram gerados alguns programas CNC – teste para verificar o comportamento do módulo de predição em diferentes condições de usinagem, e assim certificar seu funcionamento.

O primeiro caso foi de desbaste em torneamento cilíndrico com diferentes profundidades de corte, o segundo um torneamento cônico com variação contínua da profundidade e o terceiro um acabamento de um perfil.

7.1.1 Caso 1: Torneamento cilíndrico com profundidades de corte constantes por trecho

Dados:

Peça – tarugo $\phi 56$ mm x 80 mm

Material – ABNT 1045

Ferramenta – TNMG 160404 – MTJNL2525M

O programa CNC gerado foi colocado no anexo 10.1.1. Neste caso a velocidade de corte e o avanço foram mantidos constantes ($V_c = 180$ m/min e $f=0.08$ mm), e a profundidade de corte foi variada da seguinte forma:

- 1. trecho (torneamento cilíndrico) – $a_p = 0,5$ mm até o comprimento Z de 20 mm
- 2. trecho (torneamento cilíndrico) – $a_p = 1$ mm até o comprimento Z de 45 mm
- 3. trecho (torneamento cilíndrico com ressalto) – $a_p = 0,5$ mm até o comprimento Z de 45 mm e $a_p = 1,5$ mm de 45 mm até 20 mm

Um trecho da simulação na interface do software é mostrado na figura 7.1.

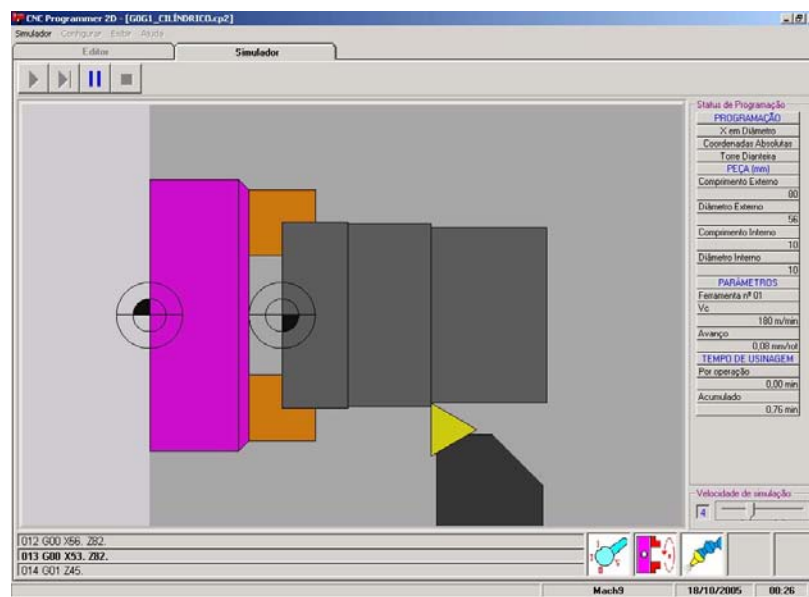


Figura 7.1 – Resultado da simulação – caso 1

Já o gráfico da força de usinagem em função do tempo gerado pode observado no gráfico 7.10:

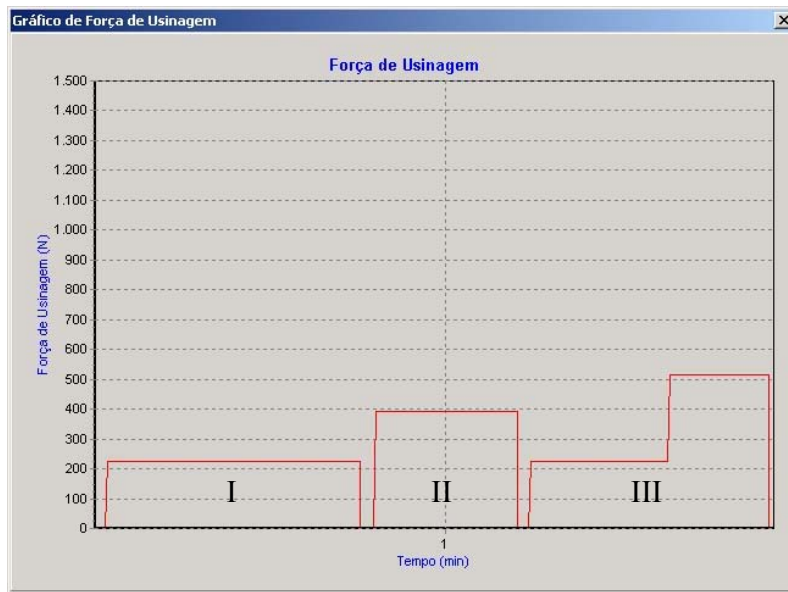


Gráfico 7.10 – Gráfico da força de usinagem – caso 1

Observe que a força de corte permanece constante para passes de igual profundidade de usinagem e avanço, ocorrendo no terceiro passe, um súbito aumento quando a ferramenta se depara com o ressalto na peça.

7.1.2 Caso 2: Torneamento cônico com variação contínua de profundidades de corte

Dados:

Peça – tarugo $\phi 56$ mm x 50 mm

Material – ABNT 1045

Ferramenta – TNMG 160404 – MTJNL2525M

O programa CNC gerado foi colocado no anexo 10.1.2. Observe que a velocidade de corte é mantida constante ($V_c=120$ m/min), e a profundidade e o avanço variados como se segue:

- 1. trecho (torneamento cilíndrico) – $a_p = 0,5$ mm até o comprimento Z de 20 mm e $f = 0,3$ mm/r
- 2. trecho (torneamento cônico com a_p decrescente) – a_p variando de 1 mm até próximo de 0 no comprimento Z de 20 mm e $f = 0,3$ mm/r

- 3. trecho (torneamento cilíndrico cônico com a_p constante) – $a_p = 1$ mm até o comprimento Z de 20 mm e $f = 0,2$ mm/r
- 4. trecho (torneamento cônico com a_p crescente) – a_p variando de 0 mm até próximo de 0,5 mm no comprimento Z de 20 mm e $f = 0.08$ mm/r

O resultado da simulação é mostrado na figura 7.2.

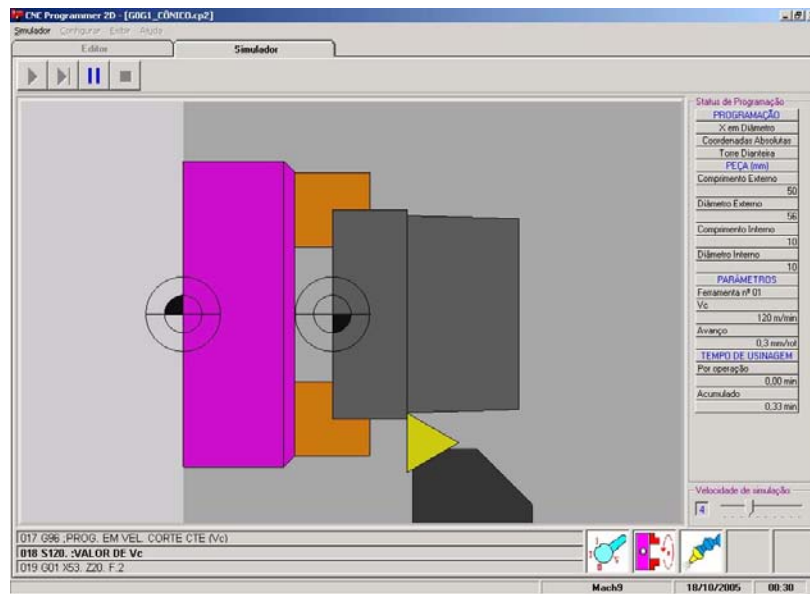


Figura 7.2 – Resultado da simulação – caso 2

Já o gráfico da força de usinagem em função do tempo gerado pode observado no gráfico 7.11:

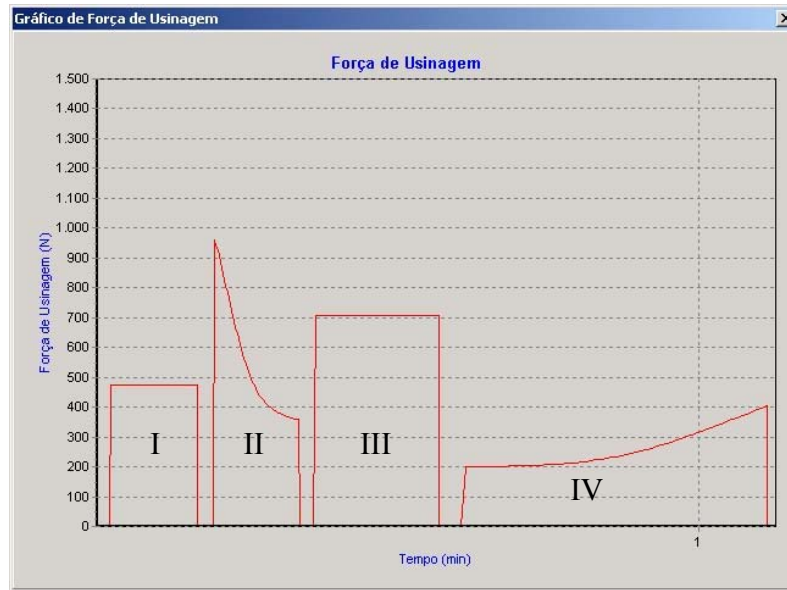


Gráfico 7.11 – Gráfico da força de usinagem – caso 2

Neste caso percebe-se que mesmo no torneamento cônico, quando a profundidade de usinagem permanece constante, a força de usinagem se mantém constante (trechos I e III). Já nos intervalos onde há crescimento ou decréscimo de profundidade há variação exponencial da força (trechos II e IV). Observe também que o valor do pico de força no trecho II é menor ao do trecho III, embora as profundidades sejam iguais, pois o avanço foi reduzido de 0,3 mm/r para 0,2 mm/r.

7.1.3 Caso 3: Acabamento de um perfil

Dados:

Peça – tarugo $\phi 56$ mm x 80 mm

Material – ABNT 1020

Ferramenta – CNMG 120412 – PCLNL 2525M

O programa CNC gerado foi colocado no anexo 10.1.3. Observe que a velocidade de corte é mantida constante ($V_c = 200$ m/min), a profundidade variada de acordo com o perfil a ser percorrido pela ferramenta e o avanço variado em dois patamares ($f = 0,08$ mm para o

faceamento e $f = 0,2$ mm para o acabamento) . Neste caso foi incluída uma interpolação circular na extremidade da peça, conforme pode ser observado na figura 7.4.

O resultado da simulação é mostrado na figura 7.3:

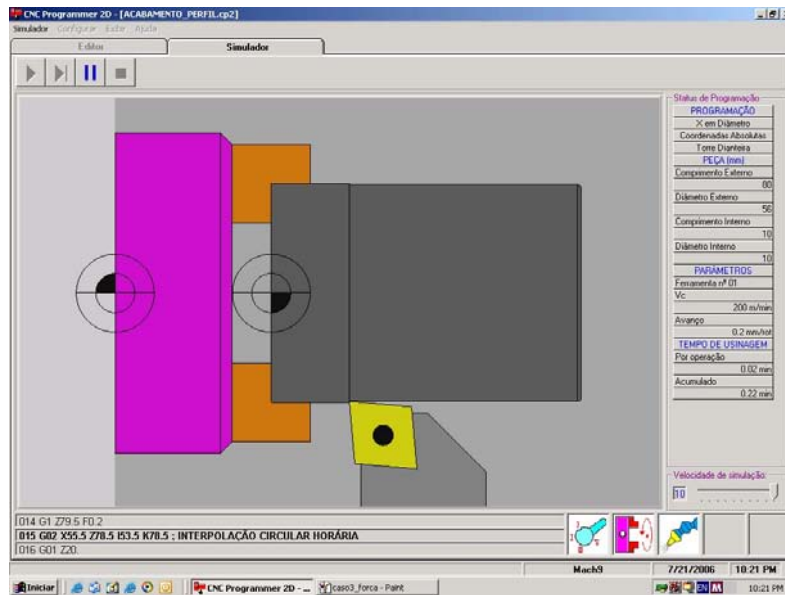


Figura 7.3 – Resultado da simulação – caso 3

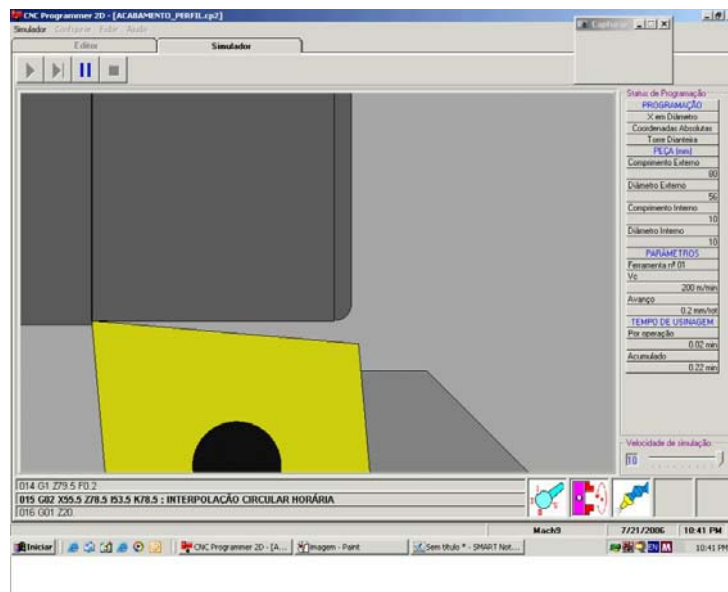


Figura 7.4 – Detalhe do arredondamento – caso 3

Já o gráfico da força de usinagem em função do tempo gerado pode observado no gráfico 7.12:

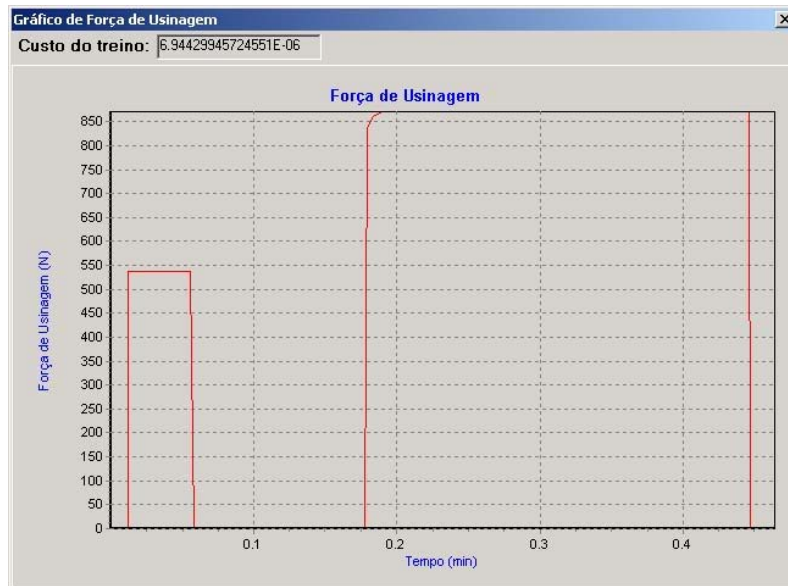


Gráfico 7.12 – Gráfico da força de usinagem – caso 3

Neste caso percebe-se a força de usinagem se mantém constante durante o faceamento, cai a zero no posicionamento e experimenta um leve aumento no início da interpolação circular, por volta de 0,2 min de usinagem. Na seqüência, mantém-se constante durante o torneamento cilíndrico de acabamento.

O gráfico da rugosidade superficial em função do tempo pode ser acompanhado no gráfico 7.13:

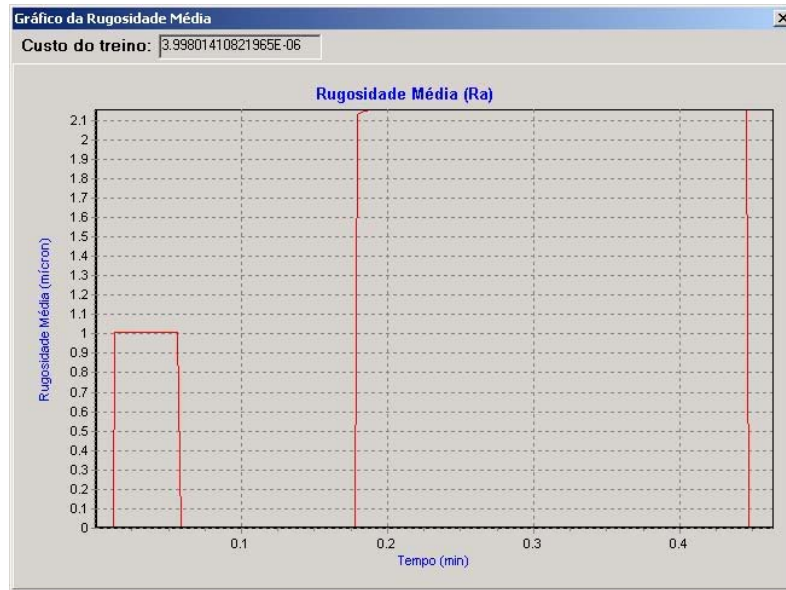


Gráfico 7.13 – Gráfico da rugosidade– caso 3

Neste caso percebe-se a rugosidade tem comportamento um pouco diferente ao da força, se mantendo constante durante o faceamento num patamar inferior e aumentando significativamente na segunda parte do perfil devido ao aumento no avanço. Observa-se que a profundidade de corte tem pouca influência no processo uma vez que durante a interpolação circular, esta varia de 1,25 até 0,5 mm no torneamento cilíndrico de acabamento e a rugosidade varia entre 2,8 e 3,0 μm aproximadamente.

8 Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido, bem como as dificuldades encontradas e propostas de continuidade.

Este trabalho teve por objetivo desenvolver um módulo de predição para força de usinagem (ou sua componente de corte) e rugosidade, acoplado a um programa comercial didático de programação CNC. Este módulo incorporou um modelo de redes neurais para realizar as aproximações necessárias. O principal resultado obtido foi um protótipo funcional do sistema computacional, capaz de interpretar as variáveis de entrada (parâmetros de usinagem) e gerar as saídas desejadas na forma gráfica.

Como conclusões pode-se citar:

1. Os modelos de rede neural utilizados demonstraram, em geral, boa capacidade em aproximar o comportamento das variáveis de saída (força e rugosidade) com relação aos parâmetros de entrada (velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem). Particularmente a arquitetura RBF, demonstrou melhores resultados na modelagem da força, enquanto o modelo MLP, apresentou-se mais satisfatório na aproximação da rugosidade.
2. A convergência dos modelos RBF foi mais rápida que o similar MLP, o que está em consonância com os resultados encontrados na bibliografia [Briceno, 2002 e Mounayri, 2005].

3. Os testes no protótipo demonstraram uma correlação satisfatória entre os valores utilizados para treinamento e os obtidos na saída para ambas as variáveis (em torno de 10% na média), desde que os valores na entrada estejam dentro do intervalo de treinamento. Testes realizados para valores de profundidade de usinagem muito maiores que aqueles a que a rede foi submetida, geraram valores de saída para força de corte inconsistente.
4. Um aspecto relevante do tratamento é que o sistema permite o aprendizado de novas condições de usinagem, bem como a inclusão de outros materiais e ferramentas, aumentando assim o domínio de aplicação da solução.
5. O usuário pode elaborar sua própria tabela de dados e treinar sua rede, de forma a então gerar resultados específicos para um determinado par ferramenta-peça.
6. O módulo de predição pode ser considerado um recurso valioso ao aprendizado do processo de usinagem, pois permite ao aluno entender como as variáveis do processo incidem sobre as especificações da peça (por exemplo, a rugosidade superficial) e sobre as restrições do ferramental e da máquina (forças e potências de usinagem).
7. Os requisitos estabelecidos para o módulo foram atendidos, visto que os resultados poderão ser disponibilizados de maneira visual e intuitiva.

As dificuldades encontradas residem basicamente na falta de dados experimentais disponíveis na bibliografia para ampliar o escopo de treinamento da rede neural e portanto melhorar sua capacidade de predição. Em geral, quando existem, os dados são poucos e restritos a um único material e ferramenta [Lin, 2001].

Quanto às possibilidades de continuidade, podemos citar:

1. Elaboração de uma interface de treinamento do módulo de predição em tempo real, com a condução de experimentos e utilizando dispositivos para aquisição de dados. Desta forma, será obtida uma ampliação da base de dados de materiais e ferramentas;
2. Extensão dos conceitos aqui mostrados para operações aplicáveis a centros de usinagem (fresamento e furação);

3. Implementação de modelos teóricos para cálculo da força de usinagem e rugosidade, de forma a permitir comparação didática dos diversos modelos, e destes com condições experimentais.

Bibliografia

- Axinte, D. A., Belluco, W., De Chiffre, L. “Evaluation of cutting force uncertainty components in turning”. *International Journal of Tools and Manufacture*. v.41, p. 719-730, 2001
- Choudhury, S.K., Appa Rao, I. V. K. “Optimization of cutting parameters for maximizing tool life”. *International Journal of Tools and Manufacture*. v.39, p. 343 - 353, 1999
- Smithy, D. W., Kapoor, S. G., Devor, R. E. “A worn tool force model for three-dimensional cutting operations”. *International Journal of Tools and Manufacture*. v.40, p. 1929-1950, 2000
- Meng Q., Arsecularatne, J. A., Mathew, P. “Calculation of optimum cutting conditions for turning operations using a machining theory”. *International Journal of Tools and Manufacture*. v.40, p. 1709 - 1733, 2000
- Diniz, A. E, Coppini, N. L. Marcondes F. C. *Tecnologia da usinagem dos materiais*, 2. ed, São Paulo, Artliber editora, 2000
- Ko, J. H. et al. “Development of a Virtual Machining System – part 1: approximation of the size effect for cutting forces prediction”. *International Journal of Tools and Manufacture*. v.42, p. 1595 - 1605, 2002
- Elgin, S.; Altintas, Y. “Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part II: inserted cutters”. *International Journal of Tools and Manufacture*. v.41, p. 2213 - 2231, 2001
- Novaski, O. *Introdução à engenharia de fabricação mecânica*, 2. ed, São Paulo, Edgard Blücher, 1998
- Sandvik. *Catálogo de produtos para usinagem. Ferramentas para torneamento*. Sandvik Coromant. 2003

SANDVIK. Catálogo de produtos para usinagem. Ferramentas rotativas. Sandvik Coromant. 1999

Baek, D. K. ; Tae, J. K., Hee, S. K “Optimization of feedrate in face milling using a surface roughness model”. International Journal of Tools and Manufacture. v.41, p. 451 - 462, 2001

Filho, J. C., Diniz, A. E., “Influence of cutting conditions on tool life and surface finish in face milling process”. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences. V. 24. march, 2002

Groover, M. Automation, Production Systems and Computer Integrated Manufacturing, 2. ed, Prentice Hall, 2000

Revista Máquinas e Metais. “V inventário de máquinas-ferramenta, n. 431, Aranda Editora, dez, 2001

Pham, D. T., “Artificial intelligence in engineering”. International Journal of Tools and Manufacture. v.39, p. 937 - 949, 1999

Briceno, J. F., Hazim, M., Mukhopdhyay, S. “Selecting an artificial neural network for efficient modeling and accurate simulation of the milling process”. International Journal of Tools and Manufacture. v.42, p. 663 - 674, 2002

Balic, J., Korosec, M. Intelligent tool path generation for milling of free faces using neural networks. International Journal of Tools and Manufacture. v.42, p. 1171 - 1179, 2002

Metodologia Via Redes Neurais para a Estimativa da Rugosidade e do Desgaste de Ferramentas de Corte no Processo de Fresamento Frontal. 2001, 205 pag. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia. 01/03/2001 – Uberlândia.

Unigraphics Inc. USA. Informações sobre produtos na área de manufatura assistida por computador. Disponível em <<http://www.unigraphics.com>>. Acessos de 05/10/2002 à 25/11/2002

Indústrias Romi S. A.. São Paulo. Informações sobre máquinas de comando numérico. Disponível em <<http://www.romi.com.br>>. Acessos de 05/10/2002 à 25/11/2002

Ong, S. K., J., Mannan, M. A., “A VRML-Java based approach to teaching APT programming”. International Journal of Mechanical Engineering Education. v.29, p. 345 - 359, 2000

Haykin, S. Neural Networks: a comprehensive foundation , 2. ed, USA, Prentice Hall, 1999

Delcam. USA. Informações sobre produtos na área de manufatura assistida por computador. Disponível em <<http://www.delcam.com>>. Acessos de 05/10/2002 à 25/11/2002

Pontifícia Universidade Católica. Rio de Janeiro. Informações sobre disciplinas na área de engenharia mecânica. Disponível em <<http://www.mec.puc-rio.br>>. Acessos de 05/10/2002 à 25/11/2002

Intelitek. Israel. Informações sobre produtos na área de manufatura assistida por computador. Disponível em <<http://www.intelitek.com>>. Acessos de 05/10/2002 à 25/11/2002

Centro Informação Metal Mecânica UFSC. Informações sobre a área de metal-mecânica. Disponível em <<http://www.cimm.com.br>>. Acessos de 05/10/2002 à 25/11/2002

Instituto Nacional de Pesquisas Educacionais. Brasil. Informações sobre o perfil da educação tecnológica no Brasil. Disponível em <<http://www.inep.gov.br>>. Acessos de 05/10/2002 à 25/11/2002

GHL. Rio de Janeiro. Informações sobre produtos na área de manufatura assistida por computador. Disponível em <[http:// www.unicam.com.br](http://www.unicam.com.br) >. Acessos de 05/10/2002 à 25/11/2002

Ascongraph. São Paulo. Informações sobre produtos na área de manufatura assistida por computador. Disponível em <[http:// www.mastercam.com](http://www.mastercam.com)>. Acessos de 05/10/2002 à 25/11/2002

Kotler, P. Administração de Marketing: a edição do novo milênio, 10ª edição, Prentice Hall, 2000
IBM. USA. Informações sobre produtos na área de projeto e manufatura assistida por computador. Disponível em <[http:// www.catia.ibm.com](http://www.catia.ibm.com)>. Acessos de 05/10/2002 à 25/11/2002

S, R.; Asokan, P., “Comparative Analysis of Conventional and Non-Conventional Optimisation Techniques for CNC Turning Processes”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 17, n. 7, pág 471-476, 2001.

Lee, B. Y., Tarng, Y. S., “Cutting Parameter Selection for Maximizing Production Rate or Minimizing Production Costs in Multistage Turning Operations”, Journal of Materials Processing Technology, v 105, n.1 , pág 61 – 66, setembro, 2000.

Yan, X., Shirase, K., Hirao, M., “Extraction and Optimization of Cutting Conditions for 2 one half Axis”, International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, v. 16, n. 10, pág 695-699, 2000

Kolahan, F., Liang, M., “Optimization of Hole Making Operations: A tabu-search approach”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 40, n. 12, pág. 1735- 1753, julho, 2000

- Nian, C. Y., Yang, W. H., “Optimization of Turning Operations with Multiple Performance Characteristics”, *Journal of Materials Processing Technology*, v 95, n.1-3 , pág 90 - 96, outubro, 1999.
- Shunmugam, M. S., Reddy, S. V., Bhaskara, Narendran, T. T., “Selection of Optimal Conditions in Multi-Pass Face Milling Using a Genetic Algorithm”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 40, n. 3, pág. 401-414, 2000.
- Gibbs, D., et al, “An Introduction of CNC Machining and Programming”, Industrial Press, 596 páginas, 1991
- Smid, P., “CNC Programming Handbook”, Book News, 600 páginas, 2000.
- Kohli, A., “A neural-network-based methodology for the prediction of surface roughness in a turning process”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v 25, n 1-2, January, 2005, p 118-129
- Bisht, H., Gupta, J; Pal, S.K; Chakraborty, P., “Artificial neural network based prediction of flank wear in turning”, *International Journal of Materials and Product Technology*, v 22, n 4, 2005, p 328-338
- Saini, D., Chungchoo, C, “On-line tool wear estimation in CNC turning operations using fuzzy neural network model” , *International Journal of machine Tools and Manufacture*, v 42, n1, January, 2002, p 29-40 ISSN: 0890-6985
- Du, Zheng-Chun, Yang, Jian-Guo; Dou, Xiao-Long; Liu, Xing, “Thermal error modeling of CNC turning center using radial basic function neural network”, *Shanghai Jiotong Daxue Xuebao/Journal of Shanghai Jiotong University*, v 37, n1, January, 2003, p 26-29, ISSN:1006-2467, Shangai Jiao Tong University

- Sick, B. "Tool wear monitoring in turning: A neural network application", Measurement and Control, v.34. n7. September.2001.p 207-211+222, ISSN: 0020-2940, Publisher. Institution of Measurement and Control
- Milfener, M., Zuperl, U. "Simulation of cutting forces in ball-end milling with neural networks", CIM 2002 Computer Integrated Manufacturing and High Speed Machining – 8 th International Scientific Conference on Production Engineering, CIM 2002 Computer Integrated Manufacturing and High Speed Machining – 8th International Scientific Conference on Production Engineering, 2002, p 1101-1111, ISBN: 9539718139
- Zuperl, U. Cus, F. "Optimization of cutting conditions during cutting by using neural networks", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, v 19. n 1-2,February/April, 2003 , p 189 – 199, ISSSN: 0736-5845
- Feng, Chang-Xue, Wang, Xian-Feng "Surface roughness predictive modeling: Neural networks versus regression"; IIE Transactions (Institute of industrial Engineers, v 35, n1, January, 2003, p 11-27, ISSN: 0740-817X
- Wang, Q., Stockton, D., "Cost model development using artificial neural networks"; Aircraft Engineering and Aerospace Technology, v 73, n 6, 2001, p 536-541, ISSN: 0002-2667
- Lei, Shuting; Pei Z.J. Lee, Jiao, Yue , E, "Fuzzy adaptive networks in machining process modeling: Surface roughness prediction for turning operations", International Journal of Machine Tools and Manufacture, v 44, n 15, December, 2004, p 1643-1651,ISSN: 0890-6955
- Risbbod, K.A.; Dixit, U.S.; Sahasrabudhe, A.D, "Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process", Journal of Materials Processing Technology, v 132, n 1-3, Jan 10, 2003, p 203-214, ISSN: 00924-0136

Haili, Wang; Hua, Shaao; Ming, Chen; Dejin, Hu , “On- Line tool breakage monitoring in turning”, Journal of Materials Processing Technology, v 139, n 1-3 SPEC, Aug 20, 2003, p 237-242, ISSN: 0924-0136

Chungchooo, C.; Saini, D, “A computer algorithm for flank and crater wear estimation in CNC turning operations”., International Journal of Machine Tools and Manufature, v 42, n 13, October, 2002 p 1465-1477, ISSN: 0890-6955

Patricar, R. M., “Modeling and simulation of surface roughness”, Applied Surface Science, v 228, n 1-4, Apr 30,2004, p 231-220, ISSN: 0169-4332

Jurkovic, Z.; Hriesik, A.; Tominovick, K., “Modeling and simulation of cutting force at turning process”, CIM 2002 Computer Integrated Manufacturing and High Speed Machining – 8 th International Scientific Conference on Production Engineering, p 1057-1064, ISBN: 9539 718139

Lin, W.S.; Lee, B.Y.; Wu, C.L, “Modeling the surface roughness and cutting force for turning”, Journal of Materials Processing Technology, v 108, n 3, Jan, 2001, p 286-293, ISSN: 0924-0136

Contribuição ao Processo de Integração de Informações de Manufatura para Empresas de Pequeno e Médio Porte. 2004, 150 pág. Tese de Doutorado – UNICAMP. 17/02/2004 – Campinas.

El Mounayri, H., Kishawy, H., Briceno, J., “Optimization of CNC ball end milling: a neural Onetwork-based model”, Journal of Materials Processing Technology, v 166, Jan, 2005, p 5-62.

Manual para Determinação das Características de Usinagem os Materiais e Ferramentas de Procedência Nacional, na Operação de Torneamento, STI/CT, 1976.

Ferraresi, D. “Fundamentos da Usinagem dos Metais”, 3. edição, Editora Edgard Blucher, 1977

SENAI – SP, “Mecânica Geral – Processos de Fabricação”, Curso de Formação de Supervisores de 1. linha, 1989, pág 131

Relatório Técnico de Pesquisa de Mercado na área de Comando Numérico, ESPM, 2002, 54 pág

Lee, K. “Principles of CAD/CAM/CAE Systems”, 1. edição, Editora Addison Wesley Longman, 1999, capítulo 11.

Ajuda on line do software “Neurosolutions”, versão 4, Neurodimension Incorporated, 2003.

Reconhecimento Automático do Locutor com Redes Neurais Pulsadas. 2004, 237 pag. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo. 2004 – São Paulo.

Redes Neurais Artificiais na Avaliação de Concentração de Tensões em Juntas Soldadas Tubulares. 1999, 171 pag. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo. 1999– São Paulo.

Szecszi, T, “Cutting Force Modeling Using Artificial Neural Networks”, Journal of Materials Processing Technology, v 92-93, 1999, p 344-349

Risbood, K. A., Dixit, U. S., “Prediction of Surface Roughness and Dimensional Deviation by measuring cutting force and vibration in turning process”, Journal of Materials Processing Technology, v 132, 2003, p 103-214

Pratkar, R. M., “Modeling and Simulation of Surface Roughness”, Applied Surface Science, v 228, 2004, p 213-220

Gibbs, W, “CAD/CAM Integration. – What’s the right choice to you”, Metalworking Technology Guide, artigo, 1998

9 Anexos

Programas CNC

9.1.1 Caso 1

G99 ;ORIGEM ZERO MÁQUINA
G90 ;SIST. COORD. ABSOLUTAS
T0101 ;DESB./ACAB. (CHAMADA DE FERR. E CORRETOR)
G54 ;ORIGEM ZERO PEÇA
M13 ;FAIXA DE ROTAÇÃO
G96 ;PROG. EM VEL. CORTE CTE (Vc)
S180. ;VALOR DE Vc
G92 S1500 M03 ;LIMITE DE RPM MÁXIMO/SENT. DE GIRO
G00 X150. Z150. M08 ;PONTO DE TROCA INICIAL
G00 X55. Z82. ;PROCESSO DE USINAGEM (DESBASTE)
G01 X55. Z20 F0.08
G00 X56. Z82.
G00 X53. Z82.
G01 Z45.
G00 X56. Z82.
G00 X52. Z82.

G01 Z20.
G00 X56. Z82.
G00 X150. Z150. M09 ;PONTO DE TROCA FINAL
M30 ;FINAL DE PROGRAMA

9.1.2 Caso 2

G90 ;SIST. COORD. ABSOLUTAS
T0101 ;DESB./ACAB. (CHAMADA DE FERR. E CORRETOR)
G54 ;ORIGEM ZERO PEÇA
M13 ;FAIXA DE ROTAÇÃO
G96 ;PROG. EM VEL. CORTE CTE (V_c)
S120. ;VALOR DE V_c
G92 S1500 M03 ;LIMITE DE RPM MÁXIMO/SENT. DE GIRO
G00 X150. Z150. M08 ;PONTO DE TROCA INICIAL
G00 X55. Z52. ;TORNEAMENTO CILÍNDRICO
G01 X55. Z20. F.3
G00 X56. Z52.
G00 X53. Z52. ;TORNEAMENTO CÔNICO COM AP DECRESCENTE
G01 X55. Z20
G00 X56. Z52.
G00 X51. Z52.
G96 ;PROG. EM VEL. CORTE CTE (V_c)
S120. ;VALOR DE V_c
G01 X53. Z20. F.2
G00 X56. Z52.
G00 X51. Z52.
G96 ;PROG. EM VEL. CORTE CTE (V_c)
S120. ;VALOR DE V_c
G01 Z20. F0.08 ; TORNEAMENTO CILÍNDRICO COM AP CRESCENTE
G00 X56. Z52.

G00 X150. Z150. M09 ;PONTO DE TROCA FINAL
M30 ;FINAL DE PROGRAMA

9.1.3 Caso 3

G99 ;ORIGEM ZERO MÁQUINA
G90 ;SIST. COORD. ABSOLUTAS
T0101 ;DESB./ACAB. (CHAMADA DE FERR. E CORRETOR)
G54 ;ORIGEM ZERO PEÇA
M13 ;FAIXA DE ROTAÇÃO
G96 ;PROG. EM VEL. CORTE CTE (Vc)
S200. ;VALOR DE Vc
G92 S4000 M03 ;LIMITE DE RPM MÁXIMO/SENT. DE GIRO
G00 X150. Z150. M08 ;PONTO DE TROCA INICIAL
G00 X58. Z79.5. ;ACABAMENTO DO PERFIL
G01 X-1 F0.08
G0 Z82
G0 X53.5
G1 Z79.5 F0.2
G02 X55.5 Z78.5 I53.5 K78.5 ; INTERPOLAÇÃO CIRCULAR HORÁRIA
G01 Z20.
G01 X58
G00 X150. Z150. M09 ;PONTO DE TROCA FINAL
M30 ;FINAL DE PROGRAMA

Arquivos de resultados – estudos de caso

9.1.4 Caso 1

Função	Tempo	Vc	Av	Ap	Força	Rugosidade		
G0	0,0005	180,0000		19,1986		0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,0010	180,0000		20,9440		0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,0015	180,0000		22,6893		0,0000	0,0000	0,0000

G0	0,0021	180,0000	24,4346	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,0026	180,0000	26,1799	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,0032	180,0000	24,9608	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,0038	180,0000	23,7416	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,0045	180,0000	22,5224	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,0051	180,0000	21,3033	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,0057	180,0000	20,0841	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,0063	180,0000	18,8650	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,0070	180,0000	17,6458	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,0076	180,0000	16,4266	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,0082	180,0000	15,2075	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,0089	180,0000	13,9883	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,0095	180,0000	12,7691	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,0102	180,0000	11,5500	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,0108	180,0000	10,3308	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,0112	180,0000	9,5993	0,0000	0,0000	0,0000
G1	0,0172	180,0000	0,0800	0,0000	0,0000	0,0000
G1	0,0232	180,0000	0,0800	0,0000	0,0000	0,0000
G1	0,0292	180,0000	0,0800	0,0000	0,0000	0,0000
G1	0,0352	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,0412	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,0472	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,0532	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,0592	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,0652	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,0712	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,0772	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,0832	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,0892	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,0952	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,1012	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,1072	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,1132	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,1192	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,1252	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,1312	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,1372	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,1432	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,1492	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,1552	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,1612	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,1672	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,1732	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,1792	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,1852	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,1912	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,1972	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,2032	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,2092	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,2152	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,2212	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,2272	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,2332	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,2392	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,2452	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,2512	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,2572	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854

G1	0,6051	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,6111	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,6171	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,6231	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,6291	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,6351	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,6411	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,6471	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,6531	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,6591	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,6651	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,6711	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,6771	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,6831	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,6891	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,6951	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,7011	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,7071	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,7131	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,7191	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,7251	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,7311	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,7371	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,7431	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,7491	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	0,7551	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G0	0,7556	180,0000	9,6134	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,7561	180,0000	9,6275	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,7566	180,0000	9,6415	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,7571	180,0000	9,6556	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,7576	180,0000	9,6697	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,7581	180,0000	9,6838	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,7586	180,0000	9,6978	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,7591	180,0000	9,7119	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,7596	180,0000	9,7260	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,7601	180,0000	9,7401	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,7606	180,0000	9,7541	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,7611	180,0000	9,7682	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,7613	180,0000	9,7738	0,0000	0,0000	0,0000
G0	0,7773	180,0000	9,2502	0,0000	0,0000	0,0000
G1	0,7831	180,0000	0,0800	0,0000	0,0000	0,0000
G1	0,7889	180,0000	0,0800	0,0000	0,0000	0,0000
G1	0,7947	180,0000	0,0800	0,0000	0,0000	0,0000
G1	0,8005	180,0000	0,0800	1,0000	392,1933	4,5774
G1	0,8062	180,0000	0,0800	1,0000	392,1933	4,5774
G1	0,8120	180,0000	0,0800	1,0000	392,1933	4,5774
G1	0,8178	180,0000	0,0800	1,0000	392,1933	4,5774
G1	0,8236	180,0000	0,0800	1,0000	392,1933	4,5774
G1	0,8294	180,0000	0,0800	1,0000	392,1933	4,5774
G1	0,8351	180,0000	0,0800	1,0000	392,1933	4,5774
G1	0,8409	180,0000	0,0800	1,0000	392,1933	4,5774
G1	0,8467	180,0000	0,0800	1,0000	392,1933	4,5774
G1	0,8525	180,0000	0,0800	1,0000	392,1933	4,5774
G1	0,8583	180,0000	0,0800	1,0000	392,1933	4,5774
G1	0,8641	180,0000	0,0800	1,0000	392,1933	4,5774
G1	0,8698	180,0000	0,0800	1,0000	392,1933	4,5774
G1	0,8756	180,0000	0,0800	1,0000	392,1933	4,5774

G0	1,2057	180,0000	9,3210	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,2062	180,0000	9,3918	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,2066	180,0000	9,4625	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,2071	180,0000	9,5333	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,2076	180,0000	9,6040	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,2081	180,0000	9,6748	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,2086	180,0000	9,7455	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,2088	180,0000	9,7738	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,2207	180,0000	9,0757	0,0000	0,0000	0,0000
G1	1,2264	180,0000	0,0800	0,0000	0,0000	0,0000
G1	1,2321	180,0000	0,0800	0,0000	0,0000	0,0000
G1	1,2377	180,0000	0,0800	0,0000	0,0000	0,0000
G1	1,2434	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,2491	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,2548	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,2604	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,2661	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,2718	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,2774	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,2831	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,2888	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,2945	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,3001	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,3058	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,3115	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,3172	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,3228	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,3285	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,3342	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,3398	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,3455	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,3512	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,3569	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,3625	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,3682	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,3739	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,3795	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,3852	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,3909	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,3966	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,4022	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,4079	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,4136	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,4193	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,4249	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,4306	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,4363	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,4419	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,4476	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,4533	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,4590	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,4646	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,4703	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,4760	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,4817	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,4873	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,4930	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854

G1	1,4987	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,5043	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,5100	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,5157	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,5214	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,5270	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,5327	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,5384	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,5440	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,5497	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,5554	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,5611	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,5667	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,5724	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,5781	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,5838	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,5894	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,5951	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,6008	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,6064	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,6121	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,6178	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,6235	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,6291	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,6348	180,0000	0,0800	0,5000	223,5565	1,1854
G1	1,6405	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,6461	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,6518	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,6575	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,6632	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,6688	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,6745	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,6802	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,6859	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,6915	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,6972	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,7029	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,7085	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,7142	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,7199	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,7256	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,7312	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,7369	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,7426	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,7482	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,7539	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,7596	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,7653	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,7709	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,7766	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,7823	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,7880	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,7936	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,7993	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,8050	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,8106	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,8163	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922

G1	1,8220	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,8277	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,8333	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,8390	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,8447	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,8504	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,8560	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,8617	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,8674	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,8730	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,8787	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,8844	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,8901	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,8957	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,9014	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,9071	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,9127	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,9184	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G1	1,9241	180,0000	0,0800	1,5000	515,1642	0,8922
G0	1,9246	180,0000	9,1320	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9251	180,0000	9,1883	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9256	180,0000	9,2446	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9261	180,0000	9,3009	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9266	180,0000	9,3572	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9271	180,0000	9,4135	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9276	180,0000	9,4698	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9281	180,0000	9,5261	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9286	180,0000	9,5824	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9291	180,0000	9,6387	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9296	180,0000	9,6950	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9301	180,0000	9,7513	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9303	180,0000	9,7738	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9309	180,0000	10,9802	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9314	180,0000	12,1865	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9320	180,0000	13,3928	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9326	180,0000	14,5992	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9332	180,0000	15,8055	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9338	180,0000	17,0118	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9344	180,0000	18,2182	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9349	180,0000	19,4245	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9355	180,0000	20,6308	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9361	180,0000	21,8371	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9367	180,0000	23,0435	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9373	180,0000	24,2498	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9379	180,0000	25,4561	0,0000	0,0000	0,0000
G0	1,9383	180,0000	26,1799	0,0000	0,0000	0,0000