

*Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia.*

**MONITORAMENTO DE DESGASTE EM FRESAS DE
TOPO ATRAVÉS DA MEDIÇÃO DE TORQUE**

VINICIUS LEAL CARNEIRO DA CUNHA

**São Paulo
2.000**

VINICIUS LEAL CARNEIRO DA CUNHA

**MONITORAMENTO DE DESGASTE EM FRESAS DE
TOPO ATRAVÉS DA MEDIÇÃO DE TORQUE**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Lucas Antônio Moscatto

São Paulo
2.000

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Lucas Antonio Moscato, por ter me recebido como aluno desta escola e me incentivado a aceitar este desafio.

Ao amigo Prof. Dr. Carlos Tu, pelas sugestões e contribuições dadas a este trabalho que se baseou num projeto fruto da sua grande criatividade.

Ao Prof. Dr. Limilson Pavadorese pelas valiosas dicas práticas sobre arte do processamento de sinais.

Ao amigo Prof. Dr. Raul Gonzales pelas palavras de confiança depositadas em mim e neste trabalho, as quais me fizeram prosseguir em momentos de incerteza.

A CAPES, cujo apoio financeiro tornou viável a minha permanência nesta escola.

Aos amigos do Laboratório de Máquinas da Poli, os quais me auxiliaram na construção do equipamento e nos ensaios.

Ao amigo Dr. Marcelo Teixeira, pelas sugestões e por ter aberto os caminhos por onde trilhei.

A minha mãe, meu pai e meus irmãos que me apoiaram e compreenderam nos momentos difíceis, e compartilharam da minha felicidade nas minhas conquistas.

A meu amor e companheira Vanessa, que me ouviu nos momentos de angústia e deu um significado especial aos momentos felizes.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste sonho.

ERRATA

Título do Trabalho: Monitoramento de Desgaste em Fresas de Topo através da Medição de Torque

Autor: Vinicius Leal Carneiro da Cunha

Orientador: Lucas Antônio Moscato

Dissertação apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Nesta dissertação foram utilizados símbolos que não estão de acordo com a norma NBR 6162. A tabela a seguir mostra a relação entre os símbolos utilizados nesta dissertação e os correspondentes conforme a norma NBR 6162.

Simbolo Utilizado	Simbolo Conforme NBR 6162	Descrição	Unidade
\varnothing	d	Diâmetro da Fresa	mm
a, b	1, 2	Arestas de corte da fresa	-
ad	f_z	Avanço por dente	mm
adr	f_{zr}	Avanço por dente real	mm
H_m	h_m	Espessura média do cavaco	mm
N	n	Rotação da Fresa	RPM
P_p	a_p	Profundidade de passada	mm
V_A	v_f	Velocidade de Avanço	mm / min
V_c	v_c	Velocidade de Corte	m / min

SUMÁRIO

VII	LISTA DE FIGURAS
IX	LISTA DE TABELAS
X	LISTA DE SÍMBOLOS
XII	RESUMO
XIII	ABSTRACT
I	I. INTRODUÇÃO
1	1.1 Motivação
4	1.2 Desenvolvimento da Tecnologia Atual
4	1.2.1 Evolução da Tecnologia:
15	1.2.2 Sensores para Monitoramento:
21	1.2.3 Métodos de Monitoramento:
36	1.2.4 Aplicações Industriais:
40	1.3 Objetivos deste Trabalho
42	2. DESENVOLVIMENTO DO TRANSDUTOR
42	2.1 Introdução
43	2.2 Princípios Básicos
44	2.3 Método para Amostragem Dinâmica de Dados
46	2.4 Software de Coleta de Dados
46	2.4.1 Aspectos Gerais:
48	2.4.2 Definições Iniciais e Programa Principal:
49	2.4.3 Rotinas de Tempo Real :
51	2.4.4 Rotina para Aferição:
53	2.4.5 Rotinas para Gravação de Arquivos de Dados
54	2.4.6 Rotina para Amostar Arquivos de Dados:
57	2.4.7 Rotina para Organizar Arquivos de Dados:
58	2.4.8 Freqüencimetro:
59	2.4.9 Rotina para Registro da Freqüência em Função do Tempo:

(30/09) 502-81-07

2.5	Circuito da Parte Girante	61
2.6	Circuito Receptor	66
2.7	Captação Óptica	68
2.8	Conjunto Mecânico	69
2.9	Problemas no Desenvolvimento	74
2.9.1	Recepção do Sinal:	74
2.9.2	Ruídos:	74
2.9.3	Instabilidade Térmica:	78
2.10	Testes de Validação e Análise Crítica do Desempenho	80
2.10.1	Comprovação do Método de Aquisição de Dados:	80
2.10.2	Avaliação do Nível de Ruído:	82
2.10.3	Testes Usinando Com Profundidade Variável:	84
2.10.4	Considerações sobre a Instabilidade Térmica:	86
2.10.5	Calibração:	86
3.	COLETA DOS DADOS DE USINAGEM	88
3.1	Descrição das Condições Laboratoriais	88
3.2	Procedimento Experimental	89
3.3	Imprevistos Durante a Coleta de Dados	91
4.	ANÁLISE DOS SINAIS	93
4.1	Características Básicas do Sinal de Torque	93
4.2	Relacionamento dos Dados ao Desgaste da Ferramenta	96
4.3	Evolução do Sinal com o Desgaste	102
4.3.1	Evolução do Sinal no Domínio do Tempo:	102
4.3.2	Normalização dos Sinais:	103
4.3.3	Evolução do Sinal no Domínio da Frequência:	104
4.4	Modelo do Sinal de Torque	107
4.4.1	Desenvolvimento do Modelo:	107
4.4.2	Solução Numérica do Modelo:	113
4.4.3	Comparação com o Sinal Real:	120

123	4.5 Aplicação de Redes Neurais para Reconhecimento do Desgaste
123	4.5.1 Pré – Processamento dos Sinais:
123	4.5.2 Estrutura e Treinamento da Rede Neural:
125	4.5.3 Desempenho da Rede Neural:
127	4.5.4 Identificação Discreta do estado da Ferramenta:
129	5. CONCLUSÃO
129	5.1 Equipamento de Medição de Torque Desenvolvido:
130	5.2 Aplicação do Sinal de Torque para Monitoramento do Desgaste
132	5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros
133	BIBLIOGRAFIA

LISTA DE FIGURAS

7	Figuras 1.1 e 1.2: Fontes Geradoras de Emissão Acústica e Parâmetros Geométricos.
32	Figura 1.4: Reconhecimento de Padrões – Método de distribuição livre.
39	Figura 1.5: Distribuição por tipo de Sensores segundo Weis (1994).
39	Figura 1.6: Distribuição por aplicação dos Sensores segundo Weis (1994).
42	Foto 2.1: Transdutor Durante Operação de Fresamento.
43	Figura 2.1: Etapas da Conversão do Sinal
45	Figura 2.2: Método Para Coleta Dinâmica de Dados
66	Figura 2.4: Circuito da Parte Girante
67	Figura 2.5: Circuito Receptor
69	Figura 2.6: Captador Óptico
70	Figura 2.7: Operação de Ranhurado
71	Figura 2.8: Conjunto Mecânico
71	Foto 2.2: Conjunto Girante Aberto
72	Foto 2.3: Conjunto Girante e Pinça Ferramenta
72	Foto 2.4: Captador Óptico e Escovas
73	Foto 2.5: Conjunto Estacionário Montado na Máquina
73	Foto 2.6: Conjunto Completo Montado na Fresadora
77	Foto 2.7: Circuito Receptor e Conjunto Mecânico
77	Foto 2.8: Caixa Metálica do Circuito Receptor e Fonte de Alimentação
79	Figura 2.9: Instabilidade Térmica.
80	Figura 2.10: Recuperação de sinal com forma de onda senoidal.
81	Figura 2.11: Recuperação de sinal com forma de onda triangular.
81	Figura 2.12: Recuperação de sinal com forma de onda quadrada.
82	Figura 2.13: Espectro do Sinal Senoidal
83	Figura 2.14: Comparação entre Sinal e Ruído
83	Figura 2.15: Espectro do ruído
83	Figura 2.16: Comparação entre os Espectros do Sinal e do Ruído
85	Figura 2.17: Testes com Profundidade de Variável

85	Figura 2.18: Sinais Obtidos Usando com Profundidade Variável
87	Figura 2.19: Resultados Obtidos na Calibração do Transdutor
87	Foto 2.9: Arranjo Experimental Utilizado para Calibração
88	Foto 3.1: Vista dos equipamentos Utilizados
94	Figura 4.1: Sinal de Torque Padrão
94	Figura 4.2: Exemplo do Espectro de um Sinal Normal
94	Figura 4.3: Sinal com distúrbio Provocado por Cavacos
95	Figura 4.4: Entrada da Ferramenta no Corpo de Prova
95	Figura 4.5: Saída da Ferramenta do Corpo de Prova
102	Figura 4.6: Amplitude das Amostras
103	Figura 4.7: Amplitude Normalizada das Amostras
105	Figura 4.8: Evolução dos Principais Picos do Espectro do Sinal com o Desgaste
106	Figura 4.9: Evolução dos Principais Picos do Espectro do Sinal com o Desgaste
107	Figura 4.10: Comparação dos Modelos - Espessura do cavaco no plano
108	Figura 4.11: Parâmetros do Modelo
112	Figura 4.12: Parâmetros geométricos da ferramenta
114	Figura 4.13: Fluxograma da Solução Numérica do Modelo.
116	Figura 4.14: Evolução do Modelo do Sinal de Torque com a variação de e
117	Figura 4.15: Evolução do Espectro do Modelo com a variação de e
118	Figura 4.16: Evolução dos Picos do Espectro do Modelo com evolução de e
119	Figura 4.17: Evolução dos Picos do Espectro do Modelo com evolução de e
121	Figura 4.18: Comparação do Modelo com o Sinal Real
122	Figura 4.19: Evolução do Espectro com o Desgaste (T^2)
124	Figura 4.20: Estrutura de rede utilizada
125	Figura 4.21: Saída da rede treinada sobre amostras utilizadas no treinamento
125	Figura 4.22: Saída da rede sobre amostras fora do treinamento (mesmos parâmetros)
126	Figura 4.23: Saída da rede sobre amostras fora do treinamento (parâmetros diferentes)

LISTA DE TABELAS

90	<i>Tabela 3.1: Parâmetros de Máquina Utilizados</i>
99	<i>Tabela 4.1: Comprimento Usinado de cada Arquivo de Dados</i>
100	<i>Tabela 4.2: Tempo de Usinagem de cada Arquivo de Dados</i>
101	<i>Tabela 4.3: Tempo Corrigido acumulado dos Arquivos de Dados</i>
104	<i>Tabela 4.4: Principais Frequências e respectivos Pontos do Espectro</i>
128	<i>Tabela 4.5: Desempenho da classificação discreta</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
ε	Deformação na superfície da fresa	Adm.
∇	Utilizado com outros símbolos para indicar variação	-
θ	Posição angular da fresa (referência na aresta a)	rad
γ	Ângulo de hélice da fresa	rad
α	Deslocamento angular provocado pelo ângulo de hélice da fresa quando a profundidade é P_p	rad
$\theta_{b/a/b}$	Posição angular da ferramenta na passagem da aresta a/b que deixou material para a aresta b/a quando a ferramenta está em θ	rad
\varnothing_F	Diâmetro da fresa	mm
θ_r	Ângulos igualmente distribuídos na F_r para permitir a justaposição dos resultados de uma volta, simulando mais de uma volta da ferramenta	rad
a, b	Arestas de corte da fresa	-
a_p	Avanço por dente	mm
a_{dr}	Avanço por dente real	mm
C	Constante empírica para determinação da vida da ferramenta	-
D	Deslocamento da fresa entre a passagem de a e b	mm
e	Excentricidade da fresa	mm
F_{12}	Frequência calculada entre os instantes T_1 e T_2	Hz
F_A	Frequência de Amostragem	Hz
F_T	Frequência emitida pelo sistema proporcional ao torque	Hz
G	Módulo de elasticidade transversal do material da fresa	kgf / mm ²
GA	Ganho do Amplificador	Adm.
GF	<i>Gage Factor</i> : Fator dos extensômetros	Adm.
$H_{b/a/b}$	Espessura do cavaco na passagem da aresta b/a sobre a superfície deixada por a/b	mm
H_M	Espessura média do cavaco	mm
K	Constante do VCO	Adm.
K_{SI}	Pressão específica de corte	kgf / mm ²

K_{sic}	Pressão específica de corte corrigida	kgf / mm ²
K_{SM}	Pressão específica de corte média	kgf / mm ²
l	Comprimento usinado com mesmos parâmetros sem interrupção	mm
M_T	Momento torsor (Torque) na fresa	N . m
N	Rotação da Fresa	RPM
n	Exponente empírico para determinação da vida da ferramenta	-
p	Profundidade quando o deslocamento angular provocado pela hélice da fresa é θ	mm
P_p	Profundidade de passada	mm
R_0	Resistência para obter o ganho desejado no amplificador	Ω
R_E	Resistência dos Extensômetros	Ω
T	Instante qualquer	s
T_0, T_1, T_2, T_3	Instantes de bordas de descida consecutivas	s
t_c	Tempo corrigido de usinagem com mesmos parâmetros sem interrupção	min
T_c	Tempo total corrigido de usinagem	min
T_m	Instante médio	s
t_r	Tempo real de usinagem com mesmos parâmetros sem interrupção	min
T_r	Tempo total real de usinagem	min
T_v	Tempo de vida da ferramenta	min
U_a	Tensão de alimentação do VCO	V
U_c	Tensão de controle do VCO	V
U_E	Tensão na saída da ponte de extensômetros	V
U_p	Tensão de alimentação da ponte de extensômetros	V
V_a	Velocidade de Avanço	mm / min
V_c	Velocidade de Corte	m / min
X	Número de dentes da Fresa	-
x/y_{ab}	Posição das arestas no sistema de coordenadas	mm
$X/Y_{ba/ab}$	Componente X/Y da espessura do cavaco na passagem da aresta b/a sobre a superfície deixada por a/b	mm
Z	Fator empírico para cálculo de K_{SM}	Adm.

É amplamente aceito que o monitoramento eficiente dos processos de usinagem, principalmente no que diz respeito à condição da ferramenta, é vital para o desenvolvimento de máquinas capazes de produzir peças baratas e de alta qualidade a um baixo custo sem a necessidade de intensa supervisão de um operador.

Este trabalho mostra o desenvolvimento de um equipamento de baixo custo capaz de medir o torque de uma operação de fresamento. O equipamento utiliza um sistema óptico, modulado em frequência, para a transmissão do sinal da ferramenta girante para o receptor estacionário. O equipamento também conta com um sistema simples de amostragem do sinal baseado na porta paralela do PC, através de um software de tempo real.

Com este equipamento foram coletados sinais durante todo o ciclo de vida de uma fresa de topo desenvolvendo uma operação de ranhurado. Os sinais foram analisados com o objetivo de estudar a aplicação da medição de torque no monitoramento do desgaste em fresas de topo. Para melhor entendimento do sinal foi desenvolvido um modelo que representa com razoável precisão a dinâmica do sinal. O modelo foi utilizado para simular as variações encontradas nos sinais coletados e o parâmetro mais associado a estas variações. Redes Neurais foram experimentadas para identificar o desgaste da ferramenta baseado no espectro do sinal.

RESUMO

ABSTRACT

It is widely accepted that efficient machining process monitoring, mainly regarding to tool condition, is vital to develop machines able to produce inexpensive and high quality parts without intense human intervention.

This work shows the development of a low cost equipment able to measure torque of a milling operation. It uses an optic frequency modulated system to transmit the signal from the rotating part to the stationary receptor. The equipment uses a simple sampling system based on the parallel printer port of the PC, through a real time software.

Using this equipment, signals were collected during a hole mill lifetime when performing a grooving operation. The signals were analyzed to access the feasibility of the torque measurement in milling tool condition monitoring. A model that reasonably represents the torque signal dynamics was developed to better understanding the signal. The model was used to simulate the variations found in the collected signals and the parameter more linked to this variations. Neural Networks were tried to identify the tool wear based on signals spectra.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A elevada competitividade, provocada por uma economia cada vez mais globalizada, transforma em requisito de sobrevivência a busca pela redução de custos e pelo aumento da qualidade dos produtos. Operações de usinagem representam uma grande percentagem dos processos de manufatura, e consequentemente uma grande percentagem dos custos.

Uma dramática redução de custos pode ser atingida com o aumento do nível de automação das máquinas. Em relação às máquinas de usinagem, aumento de automação significa principalmente melhoria radical no monitoramento do processo, visto que as modernas máquinas de usinagem já são capazes de conduzir o processo automaticamente. A experiência tem mostrado que o monitoramento do processo, mesmo quando feito por operadores preparados, é muito sujeito a erros que interferem negativamente na qualidade e nos custos dos produtos. Uma grande fonte de erros está ligada ao instante de troca de ferramentas, que poderia ser eliminada com um sistema de monitoramento. A troca prematura da ferramenta gera maior consumo, além da maior frequência de paradas de máquina. Ao contrário, a troca tardia de ferramenta pode acarretar perda de qualidade do produto, retrabalho ou mesmo o refugo do produto, que, além da perda da matéria prima, pode haver a perda relacionada à execução de caros processos de fabricação. A troca tardia da ferramenta pode, em casos mais graves, mas não menos comuns, levar à destruição, não só da ferramenta não trocada, mas de várias ferramentas, quase sempre de

custo muito elevado. Por exemplo, a quebra de uma ferramenta de desgaste, se não detectada, leva inevitavelmente à quebra da ferramenta de acabamento subsequente.

Outra grande oportunidade de redução de custos está relacionada à otimização dos

processos. Os parâmetros de trabalho nas máquinas são definidos off-line, acabam sendo extremamente conservadores para a maior parte do processo, e ótimos apenas para breves fases críticas. Este fato tem sido agravado pelo aumento da complexidade dos produtos usados para atender às solicitações de resistência e peso cada vez mais exigentes. E ainda pode-se mencionar o fato de que o tamanho dos lotes e a vida útil dos produtos é

cada vez menor. Isto leva a uma substituição, pela usinagem, de alguns processos de fabricação pouco flexíveis e portanto inadequados a pequenos lotes. Na fabricação de pequenos lotes a eficiência do processo é ainda menor, pela dificuldade em desenvolver a habilidade empírica de determinar os parâmetros do processo de maneira satisfatória em

uma fabricação não seriada.

Diante do que foi exposto, fica claro que o barateamento dos processos de

usinagem depende de duas habilidades básicas:

- Monitoramento on-line das variáveis que afetam o desempenho do processo, como desgaste e esforço na ferramenta;
- Ajuste on-line do processo com base nas informações vindas do sistema de

monitoramento, para que seja possível atingir condições ótimas o maior tempo possível. Esta habilidade é conhecida, no escopo da usinagem, como Controle

Adaptativo.

Nota-se que ambas habilidades dependem da existência de modelos capazes de

relacionar com precisão as inúmeras variáveis envolvidas nos processos de usinagem. A carência destes modelos pode ser atribuída à enorme variabilidade que pode existir entre

as operações de usinagem. Existem modelos empíricos que apresentam resultados razoáveis se testados em condições laboratoriais. Entretanto, estes modelos não são capazes de prever a enorme inconstância existente nos processos de usinagem industriais, nos quais existe variação de materiais, geometria, máquinas, fluidos e ferramentas.

Ter uma máquina trabalhando continuamente com parâmetros ótimos é argumento suficiente para justificar tantos esforços de pesquisa que atuem no desenvolvimento do Monitoramento e Controle dos processos de usinagem desde o advento das máquinas-ferramenta. Este assunto tem recebido a atenção de um grande número de pesquisadores, que atualmente se encontram reunidos em um estruturado grupo de trabalho. Genericamente, a linha de pesquisa deste grupo é conhecida como Monitoramento da Condição da Ferramenta (TCM – Tool Condition Monitoring). É consenso que a otimização do processo ligada ao controle é a extensão lógica do monitoramento.

Conclui-se, de levantamentos realizados, que as operações de usinagem na indústria são conduzidas de uma maneira pouco eficiente, e que o monitoramento utilizado para supervisão e controle/otimização dos processos de usinagem é o caminho para que se consiga reduzir a ineficiência e os custos. O monitoramento e o controle de processo dependem do desenvolvimento de modelos mais eficientes do processo de usinagem.

Thusty e Elbestawi (1977) analisaram a estabilidade dinâmica de um sistema de controle adaptativo. O objetivo era evitar picos de força acima de um limite pré-estabelecido caso a ferramenta encontrasse a peça em velocidades não apropriadas para a profundidade. O feed-back (monitoramento) do processo para o sistema de controle era feito através de um dinamômetro. Naquele trabalho, foi estudada a estabilidade do sistema ao passar por uma brusca variação na profundidade de usinagem. Concluíram que

Os trabalhos que possuem uma ligação mais direta com o tema Monitoramento, da maneira como é entendido hoje, começaram a surgir com grande intensidade na década de 70. Nesta época as máquinas CNC tornavam-se cada vez mais difundidas. Neste contexto, surgiram inúmeros trabalhos abordando o tema Controle Adaptativo. relacionava a força de corte com a geometria da ferramenta.

relacionamento da temperatura da ferramenta com a sua vida útil, e também se fenômeno físico por traz do corte dos metais. Apesar disso, já nesta época se fazia o mas o estudo do processo em si, visando o entendimento e o melhor equacionamento do primeiros passos, o objetivo na época não era o monitoramento da condição do processo, temperatura da ferramenta de corte. Podendo considerar estes trabalhos como os 1905, ocorreram muitos experimentos utilizando termopares que se destinavam a medir a dinamômetro para a ferramenta de torno capaz de medir a força nas três direções. Em através do equilíbrio de contra pesos. Ainda segundo Finnie, já em 1904 existia um corte de metais em tornos já em 1882; estes equipamentos mediam as forças de corte Em publicação histórica, Finnie (1956) se referiu a dinamômetros aplicados ao

1.2.1 Evolução da Tecnologia:

1.2 Desenvolvimento da Tecnologia Atual

o sistema pode diminuir os picos de força acima do limite que acontece nesta situação, porém houve uma instabilidade provocada pela entrada e saída de cada dente da ferramenta pela sua rotação.

Este problema poderia ser contornado com o aumento da velocidade de resposta dos sistemas eletrônicos. Isto foi atingido poucos anos mais tarde e foi descrito pelo trabalho de **Yen e Wright (1983)**, que citam que alguns pesquisadores já aplicavam com sucesso sistemas de controle adaptativo como o descrito. Estes trabalhos foram classificados em dois tipos:

- Um que utiliza as já tradicionais equações de Taylor ou versões aprimoradas destas e aplicam um critério econômico para otimizar a velocidade de corte e avanço. Este método é chamado Controle Adaptativo de Otimização (**ACO** da expressão em inglês);

- O segundo, tendo em vista as dificuldades associadas à otimização, direciona as atenções para a manutenção de uma operação “segura” dentro de certas restrições físicas do processo como, por exemplo, a força máxima na ferramenta. Este método é chamado Controle Adaptativo de Restrições (**ACC** da expressão em inglês).

Ainda segundo **Yen**, apesar de alguns pesquisadores conseguirem aplicar com sucesso o controle adaptativo em operações de torneamento e fresamento, muito pouco desta tecnologia foi aplicada na indústria. Ele propôs uma nova abordagem baseada nas restrições físicas do desgaste da ferramenta, indo um pouco além da abordagem **ACC** convencional. Neste trabalho, **Yen** vinculou o sucesso de sua proposta a um confiável monitoramento de variáveis do processo. Segundo a sua avaliação, este monitoramento já podia ser considerado adequado para força de corte na ferramenta, mas ainda não era disponível um método adequado para monitorar a temperatura da ferramenta.

Observando-se a vasta literatura existente, pode-se perceber que por volta de 1980 houve um redirecionamento dos esforços. A maioria dos trabalhos começou a focalizar o aprimoramento do monitoramento do processo, deixando de lado o controle adaptativo, mais especificamente, o monitoramento da condição da ferramenta, mesmo sabendo ser o objetivo, a longo prazo, o controle adaptativo. Não é difícil perceber que o monitoramento da condição da ferramenta pode eliminar enormes desperdícios, e é algo mais vantajoso do que os benefícios que a otimização através do controle adaptativo pode trazer, tendo em vista o atual estágio de desenvolvimento em que se encontram as manufaturas reais. Por analogia com uma corrida de automóveis, de que adianta ter um ótimo piloto (controle adaptativo) se ele falha em escolher o momento correto de trocar os pneus (monitoramento da condição da ferramenta). Este redirecionamento foi justificado por **Kannatey-Asibu et al. (1981)**. Segundo eles, a maioria dos parâmetros de entrada para o controle adaptativo podia, de forma direta ou indireta, ser mensurados com a tecnologia existente na época; entretanto, o monitoramento em tempo real do desgaste da ferramenta tem sido por um longo período, e ainda é, um grande desafio.

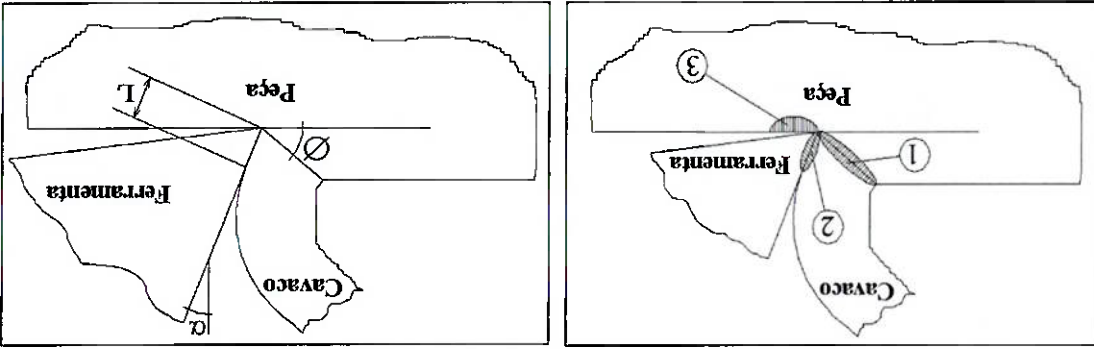
Sentindo alguns dos problemas que surgiram, e percebendo o potencial de outros métodos, alguns pesquisadores iniciaram a busca de formas alternativas de medição indireta para monitoramento da condição da ferramenta. Segundo **Kannatey-Asibu** outros métodos para medição indireta do desgaste da ferramenta têm sido aplicados para algumas operações de usinagem específicas. Estes métodos, destacando-se o da medição da força de corte, não obtiveram amplo sucesso por não conseguirem monitorar simultaneamente as regiões da interface cavaco - ferramenta e da interface flanco da ferramenta - peça. Neste trabalho, **Kannatey-Asibu** determinou teoricamente e confirmou experimentalmente algumas relações entre os parâmetros do corte ortogonal e

o sinal de emissão acústica. Foram mapeadas três fontes principais de geração de emissão acústica (vide figura 1.1):

1. Zona primária de cisalhamento;
2. Interface cavaco - ferramenta;
3. Interface flanco da ferramenta - peça.

Foi estudada a variação da intensidade do sinal (RMS) conforme variava-se a

velocidade de corte, o ângulo de saída do cavaco α , o ângulo de cisalhamento ϕ e o comprimento de contato entre o cavaco e a ferramenta L . Grandes ligadas as duas primeiras fontes de geração de emissão acústica citadas. Neste trabalho não foi estudada a influência da interface flanco da ferramenta - peça, por haver dificuldade em isolar as variáveis a ela associada. **Kannatey-Asibu** conclui que o sinal de emissão acústica esta relacionado ao desgaste da ferramenta por alterar as propriedades das três fontes geradoras do sinal, apesar da terceira fonte não ter sido estudada.



Figuras 1.1 e 1.2: Fontes Geradoras de Emissão Acústica e Parâmetros Geométricos.

Por volta de 1983, monitoramento já era um tema muito forte, despertando grande interesse da indústria que já percebia que este era o próximo passo para o desenvolvimento das máquinas-ferramenta. Neste contexto, o *“Technical Scientific Committee on Machine Tools”* solicitou aos Professores **Justy e Andrews (1983)** uma análise abrangente dos sensores aplicados em monitoramento de processos de usinagem.

Neste trabalho foram abordados tanto os sensores que estavam sendo pesquisados em laboratórios como os que estavam disponíveis no mercado. Segundo ele, os principais objetivos dos sistemas de monitoramento deviam ser:

1. Verificar a geometria, dimensões e qualidade das peças, compensando efeitos do desgaste da ferramenta ou de deformações térmicas;

2. Monitoramento da ferramenta e do desempenho do processo de usinagem em si, com o objetivo de trocar a ferramenta: formação do cavaco, desgaste e quebra da ferramenta;

3. Monitoramento do correto funcionamento das partes estruturais da máquina: rolamentos, guias e acionamento;

4. Monitoramento do sistema de controle da máquina.
- Em relação aos sensores encontrados comercialmente, **Trusty** citou alguns, que segundo a sua óptica, atendiam aos objetivos citados:

1. **Apalpador**: Verificação da peça antes e após a usinagem, verificação de desvios térmicos, monitoramento de desgaste e detecção de quebra da ferramenta. Identificação de problemas apenas após eles ocorrerem;

2. **Apalpador sem contato**: Análogo ao anterior utilizado apenas em furação;
3. **Plataformas dinamométricas**: Monitoramento de desgaste e detecção de quebra. Uso limita operações. Sinal pode ser utilizado para controle adaptativo;

4. **Sensor "Promess"**: Strain-gauges aplicados aos rolamentos. Seu sinal pode ser utilizado para monitorar desgaste e detectar quebra da ferramenta. Também verifica o pré - carregamento dos rolamentos. Pode ser utilizado para controle adaptativo;

5. **Sensor de Torque:** Monitoramento de desgaste e detecção de quebra. Pode ser

utilizado para monitorar defeitos no barramento e avanço das máquinas. Sinal pode ser utilizado para controle adaptativo.

Jelly (1984) complementou o trabalho de Tlusty, definindo as seguintes

características que os sistemas de monitoramento deveriam ter, em se tratando mais especificamente do monitoramento da condição da ferramenta, com o objetivo de troca

automática:

1. Devem dar um sinal claro (baixo ruído) e confiável;

2. Devem ser suficientemente sensíveis para indicar a taxa de desgaste gradual;

3. Devem ser robustos o suficiente para operar em ambiente de chão de fábrica;

4. Devem ter mínimo tempo de detecção para falhas da ferramenta. O tempo necessário

pode ser inferior a um mili-segundo para detecção de quebra;

5. Devem ser flexíveis para que possam ser aplicados a vários processos de usinagem;

6. Devem ser baratos e seguros para que possam ser aplicados industrialmente;

7. Devem fornecer um sinal que possa ser lido pelo sistema de controle da máquina.

Fazendo uma análise genérica de alguns trabalhos daquela época, pode-se

concluir que o assunto-chave para o monitoramento do desgaste da ferramenta passa a

ser, mais do que coletar os sinais, a maneira de tratar os sinais coletados e conseguir

extrair deles a condição da ferramenta. Alguns pesquisadores já conseguiram analisar os

sinais e reconhecer o desgaste para casos específicos, em geral aplicáveis apenas à

ferramenta e à operação utilizadas para os ensaios (Rangwala e Dornfeld (1990); Tlusty

e Tarnag (1988); Kannatey-Asibu et al. (1981) e Spiewak e Wu (1988)).

A medição de força para monitoramento do desgaste já havia sido bastante

pesquisada, conforme afirmam Spiewak e Wu (1988). Segundo eles, várias grandezas

físicas podem ser utilizadas com o objetivo de medição indireta do desgaste da ferramenta e detecção de quebra, considerando a força apropriada, pois indica a adequação de uma ferramenta para cortar. Entretanto, ninguém havia conseguido encontrar um método de analisar o sinal de força de maneira satisfatória e abrangente capaz de monitorar o desgaste da ferramenta. Apesar do sinal de força conter informações sobre o desgaste, **Spiewak** comenta que o monitoramento é particularmente difícil para o caso de fresamento com ferramentas de vários insertos. O corte interrompido e excentricidade são apenas alguns dos fatores que causam grandes variações das forças de corte, deteriorando o desempenho do sistema de monitoramento. Tendo em vista estas dificuldades, **Spiewak** propôs um método que se baseia na classificação dos fatores de variação da força de corte, em uma classe de natureza determinística e outra de natureza estocástica. Sendo:

Fatores de natureza determinística

1. Ação de corte descontínua de cada inserto;

2. Superposição das ações de cada inserto;

3. Excentricidade da ferramenta;

4. Variações já conhecidas da profundidade de usinagem;

5. Vibrações forçadas.

Fatores de natureza estocástica

1. Desgaste da ferramenta e falhas;

2. Variações na usinabilidade das peças;

3. Fenômenos associados com o processo de remoção de material: quebra de cavacos, aresta postíca de corte, etc;

4. Vibrações transmitidas de partes móveis da máquina ou do ambiente;

5. Variações não conhecidas da profundidade de usinagem.

Com esta separação, com base nos dados coletados durante os primeiros instantes de usinagem, localizam-se os parâmetros de um modelo analítico da força de corte, sendo esta a parte determinística. Subtraindo-se a parte determinística do sinal total resta a parte estocástica, que é modelada através de um modelo auto - regressivo de média móvel (ARMA), com a vantagem de obter-se um modelo de uma ordem menor do que o obtido se fosse considerada a parte determinística do sinal. Acredita-se que por se tratar de uma pesquisa financiada por entidade privada, os resultados finais aplicados ao monitoramento não foram divulgados. Este trabalho limita-se a transcrever os comentários finais de **Spiewak**: "Sinais separados de acordo com parâmetros de modelos identificados durante esta separação facilitaram uma mais simples, mais precisa, mais rápida e mais universal medição do desgaste da ferramenta e detecção de falhas do que por outros métodos baseados na análise da força de corte".

Muitos trabalhos haviam até então aplicado sofisticados métodos matemáticos para analisar os sinais de sensores e extrair a informação relevante para o monitoramento da condição da ferramenta, a exemplo do que foi apresentado por **Spiewak**. Apesar de alguns deles terem apresentado bons resultados, os pesquisadores e a indústria ainda não estavam convencidos da eficácia destes métodos para aplicações no ambiente do chão de fábrica, aonde não se pode contar com a coordenação de um especialista. Neste contexto surgiram os primeiros trabalhos que propuseram o uso de inteligência artificial (Redes Neurais) para a solução deste problema.

Neste contexto, **Rangwala e Dornfeld (1989)** fizeram uma breve revisão sobre a adaptação e no monitoramento, para que este pudesse ser aplicado com sucesso no

ambiente industrial. Eles concluíram que, para contornar a carença de modelos analíticos, capazes de descrever todas as variações existentes nos processos de usinagem, os sistemas devem ser capazes de aprender com a experiência e utilizar este conhecimento para entender e otimizar o processo, de forma análoga a um operador iniciante que adquire experiência e se torna capaz de entender o que significam as inúmeras informações sensoriais que recebe do processo e suas implicações, sendo capaz de atuar para otimizar o processo.

Rangwala verificou a capacidade das redes neurais de “*aprender*” as relações entre variáveis de entrada e de saída em um processo de torneamento. No seu trabalho, foram consideradas as seguintes variáveis de entrada, que são controláveis: avanço, profundidade de corte e velocidade de corte. Força, potência, temperatura da ferramenta e rugosidade da peça usinada foram consideradas variáveis de saída, ou seja, funções das variáveis de entrada. Além disso, as variáveis de saída foram escolhidas de tal forma a representarem limitações comuns dos processos e também por poderem ser monitoradas através de sensores.

Rangwala criou conjuntos de amostras das variáveis de entrada e saída, baseado em modelos analíticos. Foi comprovada a capacidade da rede em aprender o comportamento e simular os modelos analíticos. Numa segunda etapa do trabalho, foram fixadas algumas limitações para as variáveis de saída, e a rede treinada foi utilizada para otimizar as variáveis de entrada. O objetivo era maximizar a taxa de remoção de material, respeitando as limitações impostas nas variáveis de saída. Estes resultados foram comparados com a otimização feita utilizando os modelos analíticos. Foi observada grande coerência na otimização feita através da rede treinada. O trabalho de **Rangwala** foi um dos percursos de uma série de trabalhos que viriam a seguir que utilizaram as

Redes Neurais para análise dos dados de sensores com o objetivo de monitorar a condição da ferramenta.

Em outra publicação, **Rangwala e Dornfeld (1990)** descreveram um sistema que utilizava redes neurais para o monitoramento. O objetivo do trabalho era reconhecer o estado de desgaste da ferramenta em uma operação de torneamento. No trabalho também foi introduzido um novo conceito: a integração dos sinais de dois sensores distintos. Assim, foram instalados um sensor de força e um de emissão acústica no suporte da ferramenta. Os sinais no tempo coletados pelos sensores foram convertidos para frequência através de transformada rápida de Fourier (FFT). Foi coletado um conjunto de dados utilizando uma ferramenta boa e outro utilizando uma ferramenta desgastada. O processamento dos sinais foi feito da seguinte forma por **Rangwala**:

Observando-se os espectros dos sinais dos dois sensores, existe um grande número de frequências. Foram localizadas algumas que são mais sensíveis ao desgaste da ferramenta, num processo conhecido como "*feature extraction*". Os valores do espectro nas frequências escolhidas são entradas da rede neural, as chamadas "*features*". A escolha das *features* é feita com base na maximização de um critério que indica a relação da frequência escolhida com o que se quer identificar, maximizando a relação sinal / ruído. Também foram escolhidas como *features* a velocidade de corte e o avanço pois afetam os sinais dos sensores. A profundidade de corte, apesar de afetar muito não foi considerada uma *feature* pois não é facilmente obtida do controlador da máquina e sofre variações durante os diferentes processos. A variação da profundidade representa um ruído.

Num separador de padrões, para que se consiga bom poder de generalização, o treinamento deve obedecer a critérios que relacionam o número mínimo de amostras

disponíveis para o treinamento e o número de entradas para este separador. A rede neural neste caso está sendo utilizada como um separador de padrões, assim o seguinte critério foi utilizado:

$$N^{dados} = 2(p + 1)$$

onde p é o número de diferentes *features* e N^{dados} é o número mínimo de amostras

disponível para o treinamento da rede neural. A rede neural foi treinada utilizando as *features* como entradas. A rede possui uma única saída; foi apresentado o valor 0,01 para ferramenta em bom estado e o valor 0,99 para ferramenta gasta. Várias estruturas foram testadas, variando-se o número de amostras de treinamento, o número de *features* e a topologia da rede. Na saída da rede, valores de 0 a 0,5 foram considerados ferramenta em bom estado. Obteve-se um sucesso na identificação maiores que 95% utilizando para teste um conjunto de dados não utilizados no treinamento.

O trabalho de **Rangwala** representou uma grande contribuição pois demonstrou muito bem a capacidade das redes neurais de filtrar um sinal ruidoso e de extrair e ampliar a informação de sensores distintos.

Dornfeld (1990), estendendo os trabalhos anteriores, introduziu como *features*,

além das frequências, coeficientes de um modelo auto regressivo dos sinais. Com isto, **Dornfeld** obteve uma grande capacidade de generalização. A grande vantagem do sistema foi ter utilizado apenas uma condição de usinagem para o treinamento, sendo testado com várias condições de velocidade de corte, avanço e profundidade diferentes das utilizadas no treinamento. Mesmo assim o sistema obteve em torno de 95% de sucesso na correta classificação do estado da ferramenta, o que demonstrou uma grande capacidade de generalização.

1.2.2 Sensores para Monitoramento:

Na seção anterior foram abordados alguns trabalhos que se destacaram por sua contribuição, e ela serviu para dar uma idéia da abrangência do tema. Muito mais é necessário para que se possa formar uma visão ampla do contexto em que se encontram as pesquisas na área. Nesta seção, pretende-se suprir esta necessidade. O trabalho desenvolvido por *Byrne et al. (1996): "Tool Condition Monitoring (TCM) – The Status of Research and Industrial Application"* serviu de base para preparação das seções 1.1.2 e 1.2.3. Este trabalho foi um esforço conjunto dos pesquisadores que formam o **Tool Condition Monitoring Working Group**, contando com a participação de representantes de pesquisadores acadêmicos, de fabricantes de sistemas industriais e de usuários dos sistemas, representando portanto um estudo abrangente.

a) Generalidades:

Byrne et al. revisaram as características básicas que os sensores devem possuir para que possam ser utilizados para monitoramento da condição da ferramenta no ambiente de chão de fábrica:

1. Medição tão próxima quanto possível à usinagem;
2. Nenhuma redução na rigidez estática e dinâmica da máquina;
3. Nenhuma restrição do espaço de trabalho e dos parâmetros de corte;
4. Livres de manutenção e desgaste, trocas fáceis e baixos custos;
5. Resistência à sujeira, cavacos e a influências mecânicas, térmicas e eletromagnéticas;
6. Funcionamento independente da ferramenta ou peça;
7. Características de medição adequadas (linearidade, estabilidade, etc.);

8. Quando aplicável, confiabilidade na transmissão de sinal de partes móveis para partes fixas.

Observa-se que estas características limitam muito os sensores disponíveis para utilização em monitoramento da condição de ferramenta.

As seguintes distinções são válidas para classificar os sensores: por um lado podem ser de medição contínua ou intermitente, por outro lado podem ser de medição direta ou indireta. Medição contínua quer dizer que o sensor foi projetado para coleta de dados durante o processo de usinagem, ao contrário, o intermitente só é capaz de coletar dados em intervalos do processo de usinagem, por exemplo troca da peça. Sistemas de medição direta são os sistemas que medem a grandeza diretamente. No caso de desgaste da ferramenta podem ser palpadores, sensores ópticos, etc. Sistemas de medição indireta medem alguma outra grandeza e dela se extrai a informação, através de relações analíticas ou empíricas.

Enquanto os métodos diretos são mais precisos, os métodos indiretos são mais favoráveis a aplicações práticas. Os métodos intermitentes só são capazes de detectar os problemas passados algum tempo da sua ocorrência, em geral tarde demais para evitar danos e prejuízos. Apesar disso os métodos intermitentes têm demonstrado suas aplicações na medição de desgaste.

Medição direta contínua seria a melhor combinação. Alguns métodos já foram tentados com este propósito. Métodos ópticos e métodos que utilizaram o aumento da distância, provocado pelo desgaste, da aresta de corte ao referencial obtido com a ferramenta nova (offset). Só o offset não é suficiente para representar o desgaste de uma ferramenta de corte devido aos inúmeros mecanismos pelos quais esta pode se desgastar. Todos estes métodos no entanto ainda estão restritos aos laboratórios.

Sistemas que medem a temperatura da aresta de corte e a variação da resistência elétrica entre a peça e a ferramenta estão disponíveis como forma de medição indireta do desgaste da ferramenta. Entretanto estes sistemas são altamente restritos a condições laboratoriais e apenas para a operação de torneamento. Estes sistemas sofrem muita influência dos cavacos, do fluido refrigerante. Sistemas que utilizam microfones também ainda não conseguiram demonstrar aplicações industriais devido a ruídos externos que não são gerados pelo processo de usinagem monitorado.

b) Sistemas de Monitoramento Contínuo Indireto Aplicáveis Industrialmente:

Os sensores mais importantes para monitoramento contínuo indireto são os que medem as forças de corte ou suas consequências (deformação). Estes sistemas se baseiam no fato de existir um aumento das forças de corte conforme ocorre o desgaste. Observa-se para torneamento e fresamento que ocorre um aumento menor da força primária de corte, correspondente, em ambos os casos, ao torque no eixo árvore. Um aumento consideravelmente maior ocorre para forças de corte nas direções ortogonais à força primária.

Monitoramento baseado em Força:

Dinamômetros comerciais representam a forma mais precisa de medição das forças de corte em todas as direções. Utilizam em geral transdutores piezoeletricos, o que dificulta a medição de forças estáticas por um longo período sem “drift”. São amplamente utilizados em estudos fundamentais. Entretanto são caros e sensíveis a sobrecargas, o que limita o seu uso industrial. Adaptações nos porta-ferramentas de

tornos, utilizando os mesmos princípios dos dinamômetros, também sofrem as mesmas limitações.

Discos e placas de medição consistem de finos elementos intermediários nos quais estão acoplados transdutores de medição de força. Nestes tipos de sensores não existe problema de sobrecarga pois os transdutores estão sujeitos apenas a uma pequena parcela da força aplicada no sensor. Existem sensores deste tipo que utilizam strain-gauges, porém apresentam uma rigidez muito inferior aos piezoeletricos. Discos e placas são instalados entre partes estruturais convenientes das máquinas. Em tornos são instalados atrás do castelo de ferramentas. Em centros de usinagem são instalados atrás da flange do eixo-árvore. Até agora não foram obtidos bons resultados com estes sensores em centros de usinagem, devido à variações e dilatações térmicas.

Pinos e sensores de extensão são elementos que detectam as forças indiretamente. Para melhor compreender estes sensores, basta interpreta-los como se fossem substitutos dos elementos de fixação normal existentes na máquina como pinos e parafusos. Para o funcionamento, estes elementos devem ser instalados entre partes da estrutura da máquina diretamente sujeitas aos esforços de corte. Podem ser facilmente adaptados em qualquer máquina, porém a melhor posição em geral é localizada experimentalmente. Em geral estes sensores possuem baixa sensibilidade, só são capazes de detectar quebra e desgaste da ferramenta em usinagem pesada.

Existem rolamentos para eixo-árvore adaptados para medição de forças através de strain-gauges. Estes rolamentos possuem o inconveniente de diminuir a rigidez da máquina. Além disso um filtro passa baixa deve ser utilizado para eliminar as frequências originadas da passagem das esferas. Assim, perde-se a possibilidade de monitorar fenômenos que ocorrem em frequências mais altas.

A força e o torque nos eixos-árvores também podem ser medidos como forma de monitoramento. Entretanto, normalmente é necessário um sistema altamente complexo para que se possa medir os esforços por toda a faixa de potência das máquinas com uma resolução adequada. Outro problema é a transmissão do sinal da parte girante para a parte estacionária. Já existem disponíveis porta-ferramentas para fresadoras capazes de medir o torque e as forças radiais e axiais. Este dispositivo é aplicável para uma boa gama de ferramentas, porém seu custo ainda é proibitivo, pois cada ferramenta deve possuir o seu sistema. Medição diretamente no eixo-árvore ainda está em desenvolvimento. Complicações como perda de rigidez e falta de espaço são as principais limitações encontradas.

Medição da Corrente e Potência dos Motores

São as formas de sensores mais simples e de baixo custo. Também são as de mais fácil adaptação em máquinas existentes. Existe uma ampla gama de sensores disponíveis para as mais variadas aplicações. Quando estes sensores são utilizados para medir a corrente dos motores dos avanços, possuem a desvantagem de, nestes motores, a maior parte da força ser devida à inércia e ao atrito das partes da máquina, e não da usinagem. Quando utilizados para medir o torque no eixo-árvore, possuem a desvantagem de estarem medindo a força na direção menos sensível ao desgaste, tornando difícil obter a sensibilidade necessária. Apesar destes problemas, estes sensores podem ser utilizados para monitorar colisões, quebra de ferramenta e desgaste, desde que se esteja removendo uma quantidade razoável de material por passagem da ferramenta (seção de grande área).

Ainda segundo **Byrne**, a emissão acústica é formada principalmente pela ruptura dos materiais, assim a quebra da ferramenta gera um sinal de grande amplitude. A emissão acústica é portanto bastante útil para detecção de quebra da ferramenta. A grande vantagem deste método é que a emissão acústica, ao contrário do que se podia imaginar, não ocorre em grande intensidade nas entradas e saídas da ferramenta que ocorrem em operações com corte interrompido. Recentemente muitos sensores de emissão acústica,

(1996).

que devem ser levadas em conta nos casos reais de usinagem, segundo **Byrne et al.** emissão acústica analisadas por **Kannatey-Asibu et al. (1981)** vistos acima, a quebra dos cavacos e o impacto dos cavacos contra a peça também são fontes de emissão acústica estrutura da máquina com frequências acima de 150 kHz. Tendo em vista as fontes de Emissão acústica são ondas de tensão elástica que se propagam através da

Emissão Acústica

propagados pela estrutura da máquina com frequências até 150 kHz.

versatilidade, sendo utilizados para medir vibrações de baixa frequência assim como sons o ambiente agressivo das operações de usinagem. Acelerômetros possuem uma grande alimentados por injeção eletrônica. Este tipo de sensor é de baixo custo e é adequado para criado originalmente para detectar detonação em motores de combustão interna acelerômetros piezoeletrônicos convencionais ou utilizando-se um tipo de sensor que foi ocorre um pico no sinal RMS de vibração. As vibrações podem ser medidas através de vibrações são alteradas pelo desgaste da ferramenta. No caso de quebra da ferramenta As oscilações das forças de corte geram vibrações na estrutura da máquina. Estas

Vibrações

projetados especialmente para monitoramento de processos de usinagem, surgiram no mercado. Os sensores são geralmente fixados à estrutura da máquina mas algumas formas alternativas têm sido tentadas com o objetivo de aumentar a proximidade com o processo, amenizando o efeitos de amortecimento do sinal: transmissão do sinal pelo fluido de corte ou por outro fluido, transmissão do sinal por indução eletromagnética sem contato.

1.2.3 Métodos de Monitoramento:

Du et al. (1995a) fizeram um amplo estudo dos métodos de monitoramento em uso. Neste trabalho os sistemas de monitoramento foram divididos em três partes: *Sensoramento, Processamento do Sinal e Tomada de Decisão*. O processamento do sinal e a tomada de decisão podem ser, segundo Du, considerados uma tarefa chamada de *Método de Monitoramento*. Na seção 1.2.2 foi feita uma revisão do estado atual da pesquisa e foram estabelecidas algumas diretrizes abordando a etapa que se convencionou chamar de sensoramento. Nesta seção, salvo menção em contrário baseada no trabalho de Du et al. (1995a), serão comentados aspectos ligados ao que corresponde ao método capaz de interpretar os sinais vindos dos sensores, o *Método de Monitoramento*. Segundo Du, em geral, os métodos de monitoramento podem ser separados em duas categorias: métodos baseados em modelos e métodos baseados em características.

a) Método Baseado em Modelos:

Os sinais dos sensores podem ser considerados saídas de um sistema dinâmico; assim o monitoramento do processo pode ser feito através de modelamento do sistema e análise do modelo. Sistemas dinâmicos podem ser não lineares e variantes no tempo;

entretanto os sistemas lineares e invariantes no tempo são muito melhor compreendidos e estudados. Estes sistemas podem ser modelados através de técnicas como: modelo de estado – espaço, função de transferência de entradas – saídas e modelos auto regressivos (AR e ARMA). Existem ainda dois métodos para estimação dos parâmetros do modelo: o método exato e o método aproximado.

Uma vez que o modelo foi encontrado, o monitoramento pode ser feito pela observação dos parâmetros do modelo e/ou as variações das respostas esperadas do sistema. A tomada de decisão é feita com o estabelecimento de valores limite para os parâmetros ou respostas que estão sendo monitoradas. Segundo **Du**, os métodos baseados em modelos possuem duas importantes limitações:

- Os processos de usinagem são processos não lineares. A não linearidade é provocada pela iteração regenerada entre a vibração da estrutura e as forças de corte. Embora esquemas de adaptação possam ser utilizados, os métodos de monitoramento baseados em modelos são geralmente menos efetivos à mudança estrutural do processo;

- O sinais dos sensores são dependentes das condições de trabalho do processo, tornando difícil identificar quando uma mudança nos sinais é provocada por mudanças nas condições de trabalho ou quando é provocada pela deterioração do processo.

b) Métodos Baseados em Características:

Os métodos baseados em características têm sido amplamente pesquisados. Estes métodos se baseiam em características adequadas dos sinais dos sensores, relacionando estas características às condições do processo. A identificação das características do sinal

sensíveis às condições do processo em geral é feita em uma etapa de pré processamento. Nesta etapa a enorme quantidade de dados gerada pela etapa de sensoramento é tratada e reduzida para que os dados resultantes sejam, o mais possível, sensíveis ao fenômeno a ser observado. Segundo **Du** os dados resultantes do pré-processamento dos sinais são chamados *Índices de Monitoramento*. Na seção **b1** falar-se-á sobre algumas técnicas utilizadas no pré – processamento dos sinais.

Os índices de monitoramento são geralmente as entradas de uma outra etapa do método responsável por interpretá-los e tomar a decisão do monitoramento. A exemplo do que é feito nos métodos baseados em modelos, a tomada de decisão pode ser feita com o estabelecimento de valores limites para os índices que indicam a região normal de trabalho. Fora destes limites o processo é considerado anormal.

Em geral, apenas o estabelecimento de limites não é suficiente, devido à grande variação de condições que ocorre no processo de usinagem: um limite que poderia ser considerado normal para uma operação, não será para outra. Neste caso pode-se determinar os limites experimentalmente. Em geral, para a correta interpretação destes índices são utilizadas estruturas mais complexas capazes de “aprender” como se comportam os índices. Na seção **b2** falar-se-á sobre algumas técnicas empregadas na interpretação e tomada de decisão.

b1) Pré – Processamento e Índices de Monitoramento:

De acordo com o tipo de sinal, a escolha do índice de monitoramento pode variar; a figura 1.3 mostra uma diretriz geral para esta escolha. Algumas vezes os métodos de monitoramento baseados em modelos podem ser utilizados na etapa de pré – processamento de um método de monitoramento baseado em características. Neste caso,

os parâmetros do modelo passam a ser os índices de monitoramento do método baseado em características. Uma etapa comum a maioria dos índices de monitoramento é a filtragem do sinal, geralmente a primeira etapa do processamento. A filtragem pode eliminar a influência de vários distúrbios provocados por ruídos, além de maximizar a informação na faixa de frequência que se quer observar.

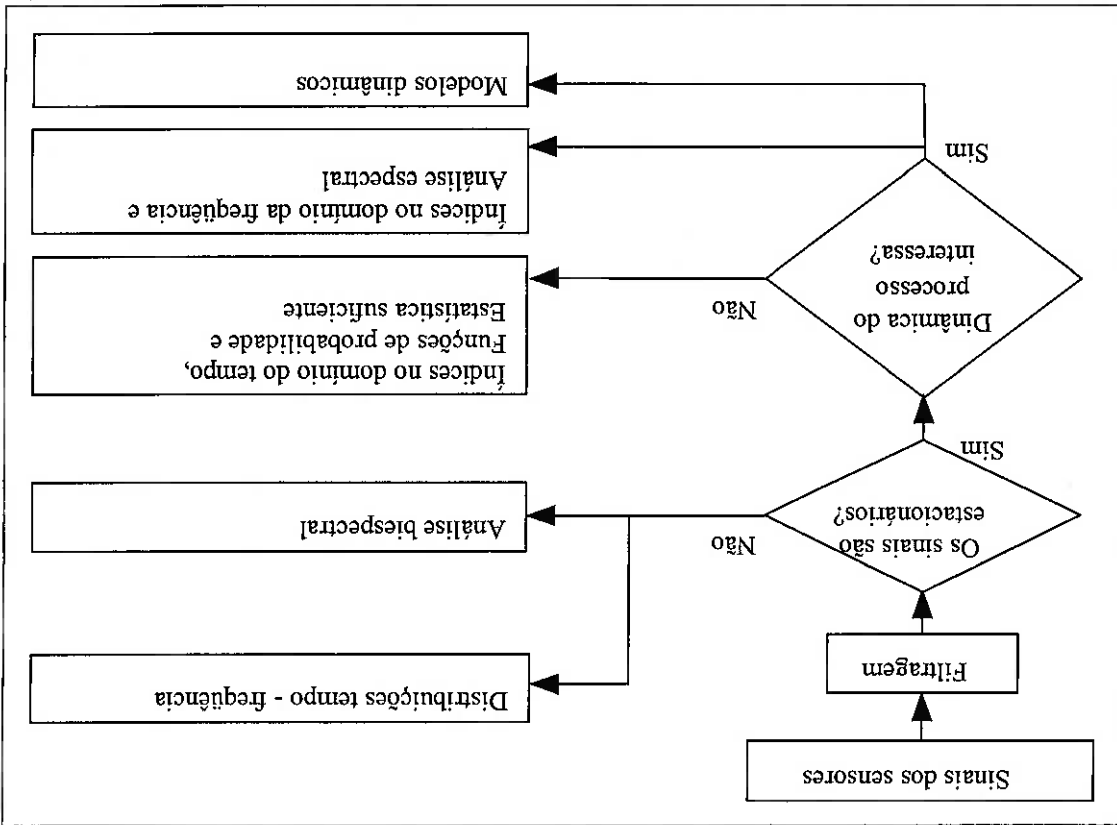


Figura 1.3: Diretriz para escolha dos índices de monitoramento por Du et al. (1995a).

A escolha dos índices de monitoramento é crucial para o bom funcionamento do sistema, que idealmente devem ser:

- Sensíveis as condições de *saúde* do processo;
- Insensíveis as condições de trabalho do processo;
- De custo compatível.

Na prática a escolha dos índices de monitoramento deve ser baseada em estudo analítico, simulações de computador e experimentos. Entretanto, constata-se que em muitas aplicações a correta seleção de um índice de monitoramento ainda é uma arte. A seguir serão comentadas algumas técnicas comuns no pré – processamento dos sinais.

Análise Estatística e Índices no Domínio do Tempo

Segundo **Du**, para sinais estacionários, os índices mais utilizados são as características estatísticas como média e variância. Sinais de sensores são tipicamente variáveis aleatórias; portanto suas características podem ser descritas por distribuições de probabilidade ou por funções de densidade de probabilidade (*probability density functions – PDF*). Na prática as *PDF* podem ser aproximadas pelo histograma do sinal. Deve ser observado que o histograma do sinal pode variar dependendo do intervalo de composição utilizado. Assim, a forma paramétrica da *PDF* é preferível e pode ser determinada pela *estatística suficiente*. Se a *PDF* de um sinal possui distribuição normal, a média e a variância são a *estatística suficiente*.

Além destes, existem outros índices no domínio do tempo que podem ser bastante efetivos: máximo, mínimo, RMS, desvio padrão, *skewness*, *kurtosis*, *zero crossing rate* e *crest factor*. Médias e diferenças no domínio do tempo também podem ser aplicadas em conjunto com estes índices.

Um fato importante observado por **Du**, é que a *PDF* e os demais índices no domínio do tempo não refletem a dinâmica do sinal. Assim a sua aplicação deve estar limitada aos casos onde as mudanças nas condições do processo são caracterizadas por variações na amplitude e forma do sinal.

Ânalise Espectral e Índices no Domínio da Frequência

A análise espectral é uma das formas mais usadas para o monitoramento de processos. Em geral, consiste de duas etapas: o cálculo do espectro e a análise. A transformada rápida de Fourier (FFT) é o método mais utilizado para o cálculo do espectro. O cálculo do espectro através da FFT possui algumas limitações que devem ser observadas:

- Resolução em frequência é limitada. Ou seja, existe uma razoável separação entre pontos consecutivos do espectro, e entre estes pontos não há nenhuma informação. A separação em frequência entre os pontos do espectro é obtida pela razão entre a frequência de amostragem e o número de pontos de dados utilizado para o cálculo do espectro;
- Como o espectro é calculado apenas com uma parte do sinal, existe uma perda de informação. Esta perda pode ser reduzida com as técnicas de janelamento e médias;
- O espectro fica em uma forma não paramétrica. Assim, pode-se utilizar a energia em determinadas faixas de frequência como índices de monitoramento; entretanto é muito difícil de determinar os limites de variação destes índices;
- Ocorre a perda da informação de fase do sinal.

Segundo **Du**, atualmente, existem métodos mais modernos para se determinar o espectro de forma paramétrica, como através de um modelo auto - regressivo com média móvel (ARMA). Desta forma tanto a resolução como a precisão podem ser significativamente melhoradas. Na técnica chamada de *cepstrum* a informação de fase é mantida. O *cepstrum* é obtido com a transformada de Fourier do logaritmo do espectro. Uma outra técnica é a chamada *análise espectral sequenciada*. Esta técnica é baseada em

transformações sequenciais como a transformação de Walsh. Estas técnicas em geral necessitam de menos processamento, sendo então apropriadas para aplicações on-line.

Teixeira (1998) demonstrou o uso da Codificação Preditiva Linear (LPC do inglês *Linear Predictive Coding*) na identificação de desgaste de fresas de topo. A LPC's foram desenvolvidas e são hoje amplamente utilizadas para compressão de sinal de vozes, facilitando a sua transmissão. A grande vantagem da LPC é que se consegue preservar a essência de toda a informação compreensível do sinal de voz. Assumindo que o sinal seja a saída de um sistema dinâmico, uma das mais poderosas formas de LPC utilizadas atualmente consiste em criar um modelo tal que a saída presente do sistema, ou seja o sinal, é uma combinação linear das saídas passadas e das entradas atuais e passadas. Pode-se dizer então que o sistema é previsível com base nas saídas passadas e entradas presentes e passadas. **Teixeira** utilizou os coeficientes de um modelo LPC como índices de monitoramento que foram interpretados por uma rede neural. O resultado mais interessante de **Teixeira** foi a obtenção de um índice de acerto de 98,83% na identificação do desgaste utilizando um sensor de corrente.

Distribuições em Tempo – Frequência

Se a característica não estacionária de um sinal é dependente do tempo, então as distribuições em tempo – frequência são indicadas para a análise destes sinais. Distribuições em tempo – frequência podem ser vistas como uma transformada capaz de representar a energia ou densidade de um sinal simultaneamente no domínio do tempo e da frequência. Uma das distribuições mais utilizadas é a distribuição de Wigner-Ville.

Além das técnicas descritas por **Du**, pode-se colocar nesta categoria as transformadas *Wavelets* (WT). A vantagem da WT diante da FFT consiste no fato de se

conseguir a informação de frequência do sinal em uma forma localizada no tempo. Assim, pode-se identificar no sinal frequências que ocorreram apenas em um determinado instante no tempo. **Tansel et al. (1993)** fornece um exemplo da aplicação de *Wavelets* no monitoramento do processo de furação.

Espectros de Ordem Elevada

Esta é uma outra técnica adequada para o processamento de sinais não estacionários. O espectro de ordem elevada mais utilizado é o *biespectro*. Esta técnica possui as seguintes vantagens:

- Extrair informação devido a desvios em relação a curva normal (distribuição de Gauss);
- Estimar a fase dos sinais não Gaussianos;
- Detectar e caracterizar as propriedades não lineares dos mecanismos que geram seqüências no tempo através de relações entre as fases dos componentes harmônicos.

Seleção de Características (Feature Extraction)

Este método foi utilizado por **Dornfeld (Rangwala e por Dornfeld, Dornfeld (1990)**. O objetivo é reduzir a dimensão dos dados originais, separando o que é mais sensível ao fenômeno que se deseja observar, ou seja, características que proporcionem a melhor separabilidade entre os sinais das duas classes distintas: sinais com a ferramenta nova e sinais com a ferramenta desgastada. Nos trabalhos de **Rangwala e Dornfeld** este método foi aplicado sobre o espectro calculado através da FFT. Assim, foram selecionadas frequências específicas que seriam mais sensíveis ao desgaste da

ferramenta. Todo este processamento é realizado off – line, para a simples separação on – line das *features* pré selecionadas.

O método consiste na maximização de um critério que represente a relação sinal–ruído das *features*. O critério adotado por **Dornfeld** foi:

$$J = \frac{\text{trace}(S_w)}{\text{trace}(S_b)}$$

Onde S_b é a matriz de espalhamento entre – classes e S_w é a matriz de espalhamento intra – classes. A separação das *features* foi feita utilizando o algoritmo *Sequential Forward Search (SFS)* desenvolvido por **Whitney (1971) apud Dornfeld (1990)**.

b2) Interpretação dos Índices de Monitoramento e Tomada de Decisão:

Para a interpretação dos índices e a consequente tomada de decisão, os métodos baseados em características devem passar por uma fase de “aprendizado”. Isto é feito a partir de amostras de uma massa de dados experimentais obtida em condições conhecidas do processo. As condições devem ser similares às que posteriormente o sistema terá que identificar. Na fase de aprendizado, um algoritmo é responsável por ensinar ao sistema o comportamento dos dados, utilizando as entradas e saídas desejadas. As entradas são os índices de monitoramento e as saídas são as condições do processo que deverão ser identificadas.

Reconhecimento de Padrões

As técnicas de reconhecimento de padrões têm sido amplamente utilizadas no monitoramento dos processos de fabricação. Em geral pode-se dividir os métodos em dois grupos:

- Métodos estatísticos ou métodos não determinísticos de classificação de padrões;
- Métodos de distribuição livre ou métodos determinísticos de classificação de padrões.

Os métodos estatísticos de reconhecimento de padrões são baseados na estimativa de Bayes, que pode ser calculada pela seguinte probabilidade (q_j):

$$q_j(x) = \sum_{n=1}^x d_j \cdot C_{oj} \cdot f_j(x/\Omega_j)$$

q_j : Estimativa de Bayes (probabilidade);

x : Amostra;

d_j : Probabilidade inicial que a condição do processo esteja na classe h_j ;

C_{oj} : Custo da classificação errada: como se x pertencesse à classe h_a mas de fato pertence à h_j ;

$f_j(x/\Omega_j)$: Função da probabilidade de x pertencer a classe h_j ;

Ω_j : Conjunto de parâmetros conhecidos.

Na fase de aprendizado, o custo C_{oj} e a probabilidade inicial d_j são inicialmente

definidos. Depois os parâmetros da função $f_j(x/\Omega_j)$ são definidos por:

$$n_j = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \delta_{jk} x_k$$

$$\sum_j = \sum_j \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \delta_{jk} \cdot (x_k - n_j) \cdot (x_k - n_j)$$

n_j : Vetor de média;

N_j : Número de amostras que pertencem a classe j ;

Σ_j : Matriz de covariância;

δ_{jk} : Função de variação tal que: $\delta_{jk}=1$ se $h(x_k)=h_j$
 $\delta_{jk}=0$ se $h(x_k)\neq h_j$

Na fase de classificação, para a nova amostra x , $q_j(x)$, $j=1, 2, \dots, n$, são inicialmente calculados. Com isso, a condição do processo estimada h_j^* é determinada

por:

$$h_j^* = \arg \min \{q_j(x)\}$$

O desempenho do reconhecimento de padrões estatístico depende da distribuição

de probabilidade $f_j(x/\Omega_j)$. Se a distribuição for Gaussiana ou próxima desta, a estimação

de Bayes fornece uma classificação ótima. Entretanto, nos processos de manufatura

geralmente as distribuições não são conhecidas e podem ser distintas da Gaussiana, assim

os métodos de distribuição livre podem ser mais adequados em alguns casos.

Os métodos de distribuição livre são baseados nas similaridades entre a amostra x

e os padrões que descrevem as condições do processo. De um ponto de vista geométrico,

as técnicas sem distribuição podem ser interpretadas conforme o exemplo na figura 1.4:

- X_1, X_2 e X_3 são os índices de monitoramento;

- d_1, d_2 e d_3 são padrões que definem três diferentes condições do processo;

- d_1, d_2 e d_3 são as distâncias entre a amostra x e os padrões.

- Como d_1 é a menor distância, é estimado que a amostra x foi obtida com o processo

na condição h_1 .

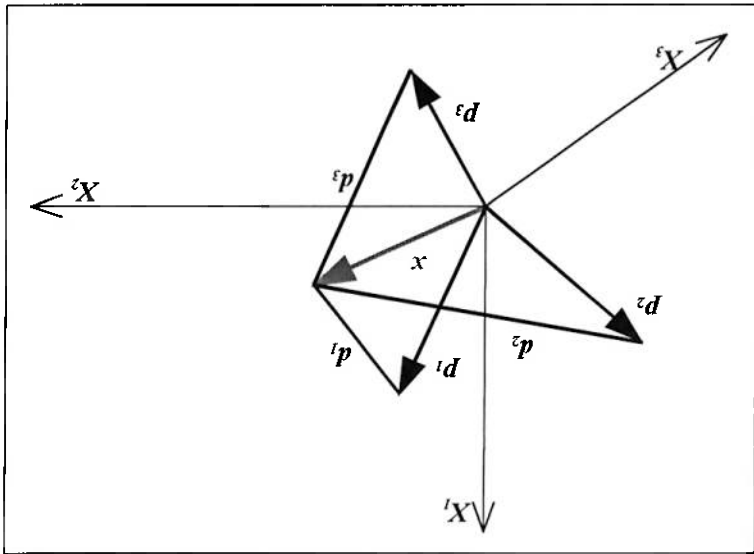


Figura 1.4: Reconhecimento de Padrões – Método de distribuição livre.

Existem várias maneiras de se determinar os padrões e as distâncias, o que resulta em um grande número de métodos de reconhecimento de padrões de distribuição livre. Genericamente nestes métodos, assumindo que as distâncias d_j assumem o mesmo papel da probabilidade calculada p_j , a classificação nos métodos de distribuição livre ocorre da mesma maneira que nos métodos estatísticos.

Sistemas Fuzzy

Segundo **Du**, o desgaste da ferramenta nos processos de usinagem pode manifestar-se de várias formas, cada uma resultando numa consequência diferente. Assim, a decisão de monitoramento é geralmente não apenas qual é a condição do processo, mas em que grau o processo está nesta condição. Este tipo de questão é bem interpretada pelos sistemas fuzzy. Nestes sistemas, eventos incertos são descritos por meio de um grau fuzzy, ou seja, quando não existe uma separação clara entre duas situações. Uma descrição mais detalhada da matemática que implementa estes conceitos pode ser encontrada em **Du et al. (1995a)**.

Um conceito geralmente mal entendido é a diferença entre o grau fuzzy e a probabilidade: o grau fuzzy representa a imprecisão ou indefinição de um evento, enquanto que a probabilidade representa a frequência de ocorrência. Quando trabalhando com as incertezas inerentes aos processos de usinagem, os sistemas fuzzy apresentam a vantagem de fornecer uma maneira sistemática de descrever as relações entre as condições da ferramenta e as diversas assinaturas do processo representadas pelos índices de monitoramento.

Árvores de Decisão

Em alguns casos, um índice de monitoramento pode ser em uma determinada faixa especialmente sensível à certas condições do processo. Isto indica que os índices de monitoramento podem ser utilizados mais efetivamente se o espaço representado por estes índices for decomposto em regiões. Esta decomposição do espaço pode ser feita através de árvores de decisão. Em geral as árvores de decisão são representadas da seguinte forma:

$$C_1 : D_1 ; \quad C_2 : D_2 ; \quad \dots ; \quad C_M : D_M$$

Onde C_α , $\alpha = 1, 2, \dots, M$, são condições lógicas mutuamente exclusivas e exaustivas e D_α pode ser tanto a parte da própria árvore de decisão ou então um dos extremos da árvore, a *folha*, indicando uma condição do processo (por exemplo, condição do processo = h_j). As condições lógicas são regras de classificação e tipicamente envolvem um dos índices de monitoramento.

O processo de construir uma árvore de decisões é chamado aprendizado ou treinamento, e pode ser feito de duas maneiras: por instruções ou por amostras. Para os processos de manufatura, as instruções para a tomada de decisão são geralmente

incompletas, imprecisas e subjetivas. Por outro lado, amostras podem ser obtidas através de experimentos sistemáticos. Assim, o treinamento por amostras é geralmente preferido. A idéia básica do treinamento por amostras é a partição. Uma maneira comum é a utilização de cada amostra como uma ramificação da árvore de decisão. Como isto resultaria em uma árvore muito grande, uma melhor maneira é agrupar as amostras semelhantes para formar cada ramificação. Realizar todos os agrupamentos e partições criaria uma árvore de decisão ótima, porém isto requer uma carga computacional elevada, e se existirem um número grande de amostras pode-se tornar inviável. Para contornar este problema foram criados algoritmos capazes de criar árvores de decisão sub - ótimas. Entre eles destacam-se o *ID3* e o *AQ15*. Uma descrição da estrutura básica destes algoritmos pode ser encontrada em **Du et al. (1995a)**.

Nestes algoritmos as árvores de decisão são construídas por meio de partição nas amostras de treinamento. Como resultado, sintomas irrelevantes que podem estar presentes nas amostras serão usados como regras de classificação. Para minimizar este efeito as árvores de decisão necessitam de *poda*, que é um processo realizado após o treinamento através de um dos muitos algoritmos criados com este objetivo.

As regras de classificação nas árvores de decisão se caracterizam por serem estanques, ou seja, *sim* ou *não*. Isto pode gerar erros de interpretação se os dados estiverem próximos às fronteiras. Para minimizar estes problemas, árvores de decisão com regras de classificação baseadas em probabilidade ou em lógica fuzzy têm sido experimentadas. **Du et al. (1995a)**.

Redes neurais são sistemas capazes de processar a informação de maneira paralela. Elas podem consistir de várias entradas, várias camadas, com um número próprio de neurônios, além de saídas que correspondem ao número de neurônios na última camada da rede. Na rede, cada neurônio é descrito pelas suas conexões com os outros neurônios. Estas conexões são ajustadas por fatores chamados pesos. A rede forma um sistema que devolve saídas para as entradas apresentadas. O aspecto principal de uma rede neural é a sua capacidade de *modelar* o comportamento de uma massa de dados através do ajuste dos pesos que definem as conexões entre os neurônios. Para isso a massa de dados é apresentada à rede e, através de algoritmos de treinamento, é feito o ajuste dos pesos. Dentre os algoritmos, o mais utilizado é o *back-propagation*. Se o treinamento obtiver sucesso, a rede pode ser utilizada como um modelo que se comporta

Redes Neurais

Estes sistemas são formados por três partes: uma máquina de inferência, uma interface homem – máquina e uma base de conhecimento. A maior parte do esforço em desenvolver um sistema especialista está no estabelecimento da base de conhecimento. Para monitoramento de processos o estabelecimento da base de conhecimentos deve seguir os métodos utilizados nas árvores de decisão em combinação com outras informações e conhecimento incluindo regras empíricas ou semi – empíricas, além de simulações teóricas, estudos computacionais e testes experimentais. Além disso, um algoritmo de aprendizado deve ser utilizado para adaptar o sistema às mudanças no ambiente. Espera-se que, com o rápido avanço da informática, cada vez mais estes sistemas sejam utilizados para o monitoramento de processos.

Sistemas Especialistas

de maneira equivalente ao que é observado na massa de dados. Além disso, ela pode tornar-se capaz de generalizar, ou seja de interpolar, quando entradas que não foram usadas no treinamento são apresentadas. Revisões sobre a estrutura e história das redes neurais podem ser achadas em diversas literaturas. **Teixeira (1998)** fez uma revisão abrangente sobre redes neurais aplicadas no monitoramento de usinagem. Nos últimos anos apareceram muitos trabalhos que obtiveram sucesso utilizando as redes neurais para o monitoramento de processos.

Segundo **Du**, não existem resultados que possam ser generalizados para ajudar na definição da melhor estrutura de uma rede neural; entretanto existem algumas regras empíricas:

- As entradas similares devem ser dadas representações similares para a rede;
- Classes a serem separadas devem ser dadas representação distintas para a rede. Se uma classe em particular é importante, então um número maior de neurônios deve ser utilizado para representá-la;
- Deve haver tanto pré – processamento quanto possível; assim a parte adaptativa da rede será o menos possível solicitada.

1.2.4 Aplicações Industriais:

A exemplo da seção 1.2.2, esta seção foi extraída de **Byrne et al. (1996)**.

Comentários sobre outros trabalhos citados nesta seção foram extraídos do trabalho de **Byrne**.

Apesar do grande histórico de desenvolvimento, a tecnologia atual ainda está muito longe de ser amplamente utilizada industrialmente. Muito pouco mudou no que se refere a monitoramento do desgaste da ferramenta nos processos de usinagem.

Segundo Keeg (1993) *apud Byrne et al.* (1996), as questões técnicas levantadas

pelos novos processos de produção não são os únicos desafios para o sucesso do monitoramento da condição da ferramenta na indústria. O usuário também tem uma certa dificuldade em determinar qual o tipo de tecnologia mais adequado e até mesmo o que deve ser medido. As razões que levam a um desempenho inadequado ou inesperado dos sistemas de monitoramento podem não estar relacionadas à tecnologia dos sensores em si, mas a outras dificuldades como defeitos na interface com a máquina ou a erros na

preparação do sistema de monitoramento. Além disso, dependendo do que se pretende, construir o sistema na máquina ferramenta como parte integrante ou adicionar um sistema como acessório para atender a um usuário específico, a opinião que se tem a respeito da função que o sistema deve ter pode ser bastante adversa: construtores de máquinas geralmente preferem ver estes sistemas como proteção da máquina ou do fuso contra eventos inesperados ou falhas, ao contrário dos usuários que esperam que estes sistemas otimizem seus processos de fabricação. Vários estudos recentes dos usuários de sistemas no Japão, Alemanha e nos Estados Unidos ilustraram as necessidades e expectativas dos sensores, sob o ponto de vista dos usuários.

Inasaki (1994) *apud Byrne et al.* (1996), baseado num relatório de 31 usuários no Japão, concluiu que os usuários destes sensores estavam distribuídos da seguinte maneira: fabricantes de máquinas ferramentas (30%), fabricantes de autopeças (17%), fabricantes de produtos elétricos e mecânicos (25%), além de outros usuários (15%). Os usuários apontaram a confiabilidade como característica mais importante, considerando o monitoramento do desgaste de menor importância.

Alguns importantes trabalhos foram realizados na indústria automobilística alemã a respeito do tema monitoramento de usinagem, apresentados em Dornfeld (1993) *apud*

Byrne *et al.* (1996). A Mercedes Benz AG fez uma avaliação dos sistemas implementados na sua manufatura, chegando aos seguintes dados: 57% dos sistemas eram utilizados para torneamento, 42% eram usados em furação, e apenas uma pequena parcela era usada em fresamento. Em relação a funcionalidade dos sistemas implementados, foi constatado que 46% dos sistemas eram totalmente funcionais, 16% funcionavam com limitações e 25% dos sistemas não funcionavam devido à limitações técnicas. É importante ressaltar que esta avaliação foi realizada baseada em equipamentos com aproximadamente 6 anos de vida, o que representa uma grande defasagem, tendo em vista os grandes avanços alcançados nos últimos anos. Análises realizadas pelo "TCM Working Group" concluíram que a principal causa da não utilização destes sistemas na produção está ligada a interação inadequada por parte do usuário. Portanto o treinamento assume um papel vital para a implementação de sucesso de um sistema de monitoramento. Além disso, existe uma tendência de diminuir a necessidade de treinamento através do desenvolvimento de interfaces com o usuário mais amigáveis.

Mais recentemente, Weis (1994) apud Byrne *et al.* (1996) analisou 26 fabricantes e 20 usuários de sistemas de monitoramento, com um total de 1.161 sistemas instalados, envolvendo uma gama de indústrias com ênfase na automobilística. Os tipos de sensores mais usados eram de emissão acústica, força e corrente (Figura 1.5). Os sistemas estavam implementados para monitorar desgaste de ferramenta (28%), colisão (22%) e quebra (50%). Em relação ao tipo de operação, os sistemas estavam distribuídos principalmente em furação, torneamento, fresamento e retificação (Figura 1.6).

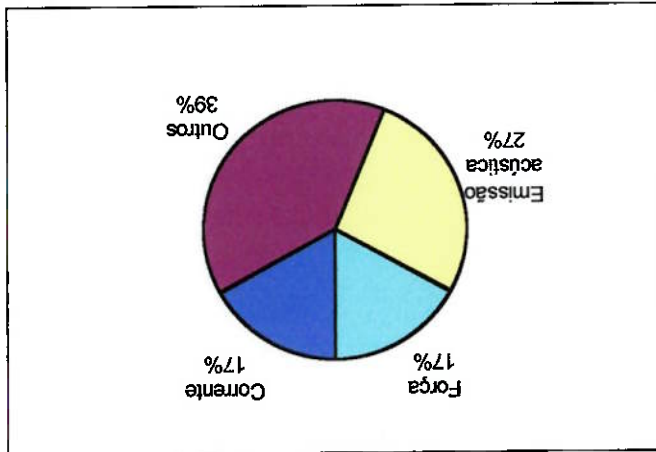


Figura 1.5: Distribuição por tipo de Sensores segundo Weis (1994).

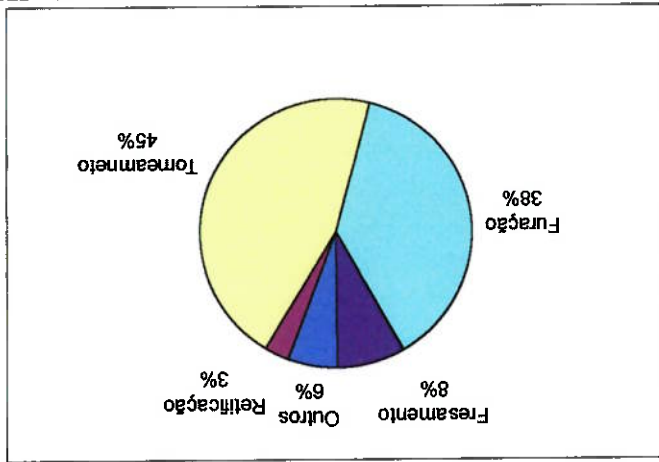


Figura 1.6: Distribuição por aplicação dos Sensores segundo Weis (1994).

Outro levantamento importante realizado por Diel (1994) apud Byrne *et al.* (1996) apontou que apenas uma pequena parcela das falhas dos sistemas de monitoramento estavam relacionadas aos sistemas em si (15%). A maior parte das falhas foi atribuída a outros fatores, sendo o erro de operação o mais relevante (50%).

1.3 Objetivos deste Trabalho

Tendo em vista o tema "Monitoramento da Condição da Ferramenta" em processos de usinagem, percebe-se que o processo de fresamento ainda foi pouco estudado e monitorado, sendo que a maior parte dos trabalhos se dedica ao monitoramento da operação de torneamento, provavelmente devido a dificuldade de coletar dados, por se tratar de uma ferramenta girante e também devido a maior complexidade geométrica do processo. Com este trabalho espera-se contribuir com a apresentação do desenvolvimento de um sistema capaz de medir o torque dinâmico, que foi aplicado com sucesso a uma operação de fresamento. O equipamento desenvolvido pode ser utilizado para o monitoramento do processo de fresamento, permitindo a sua melhor compreensão.

O sistema desenvolvido utiliza de uma maneira diferenciada os recursos disponíveis em um computador IBM PC padrão, utilizando como sistema de coleta de dados apenas um software. Faz parte do objetivo deste trabalho demonstrar que é possível desenvolver um sistema confiável e de baixo custo partindo-se de um equipamento extremamente comum como o PC. Esta característica é compatível com os requisitos para sistemas de monitoramento em ambiente fabril apresentados anteriormente. Além disso, dadas as severas condições envolvidas no processo de fresamento, espera-se comprovar a eficácia e robustez do sistema óptico de transmissão do sinal para aplicações em monitoramento de usinagem ou em outras aplicações semelhantes.

Com o equipamento desenvolvido, foram coletados sinais de torque durante a usinagem, e neste trabalho foi feita uma análise inicial do sinal buscando a identificação

de características relacionadas ao desgaste da ferramenta. A localização de características no sinal de torque que pudessem ser relacionadas ao desgaste foi um dos grandes fatores que motivaram o desenvolvimento deste equipamento nesta aplicação. Para tornar mais consistente a análise dos dados foi desenvolvido um modelo para o torque no processo de fresamento. Com isso, espera-se dar uma contribuição na busca de máquinas de usinagem mais auto-suficientes e eficientes, capazes de gerar produtos mais baratos e de melhor qualidade.

2. DESENVOLVIMENTO DO TRANSDUTOR

2.1 Introdução

Um dos maiores problemas da medição de torque, devido à rotação do eixo, é a transmissão do sinal para o equipamento estacionário de coleta de dados. As técnicas atualmente em uso baseiam-se principalmente em escovas e em transformadores rotativos, além das técnicas de medição indireta. Neste trabalho utilizou-se uma abordagem diferenciada para o problema, baseada em uma conexão óptica modulada em frequência.



Foto 2.1: Transdutor Durante Operação de Fresamento.

A modulação em frequência e a conexão óptica são ferramentas que já demonstraram sua eficiência nas mais diversas aplicações e destacam-se pela elevada imunidade a ruídos. Ferreira (1988) demonstrou a viabilidade da medição de torque através desta técnica. O transdutor aqui desenvolvido é uma extensão daquele trabalho, onde a grande contribuição é o desenvolvimento do método para aplicar a técnica dinamicamente, juntamente com o software que a implementa. Outra contribuição foi o desenvolvimento de um equipamento que se mostrou suficientemente robusto e prático, com o qual se pode obter uma grande e consistente massa de dados, mesmo no ambiente agressivo e ruidoso da usinagem em máquina CNC.

2.2 Princípios Básicos

Desde a ferramenta, onde o torque está aplicado, o sinal obtido é convertido diversas vezes até ser gravado em disco pelo computador.

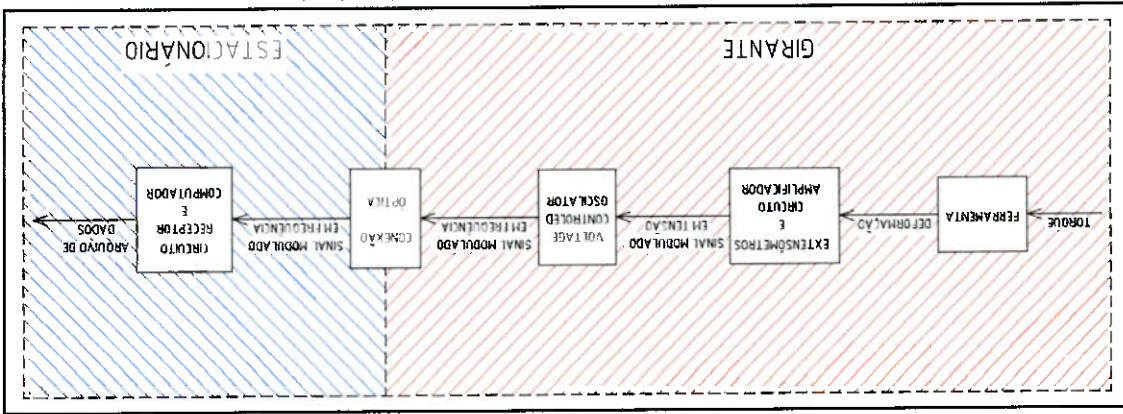


Figura 2.1: Etapas da Conversão do Sinal

A parte denominada girante corresponde ao conjunto formado pela ferramenta, extensômetros, e pelo circuito que amplifica, modula e transmite o sinal. A modulação em frequência é feita por um componente denominado VCO, ou oscilador controlado por tensão. O circuito da parte girante é alimentado através de escovas.

A conexão óptica se baseia em leds infravermelhos na parte girante (transmissora) e fototransistor na parte estacionária (receptora). Esta se compõe de um circuito receptor e de um captador óptico que recebe o sinal dos leds. O circuito receptor fornece um sinal em forma de onda quadrada, com frequência variando de acordo com o torque aplicado à ferramenta. Este sinal já possui os níveis de tensão adequados para ser lido diretamente pela porta paralela do PC, através do software desenvolvido com este objetivo.

2.3 Método para Amostragem Dinâmica de Dados

O computador é responsável por medir e guardar a frequência do sinal colocado na porta paralela. A frequência deste sinal está diretamente relacionada ao torque, chamada aqui de Frequência de Torque, F_T . Porém para se conseguir uma medição dinâmica, seria necessário fazer a observação instantânea da grandeza F_T a uma Frequência de Amostragem constante, F_A . Isto gera um conflito conceptual, pois não se pode medir frequência com uma observação instantânea, sendo necessário a observação durante, no mínimo, tempo de um ciclo do sinal. A estratégia adotada foi medir o tempo (ΔT) entre duas bordas de descida consecutivas deste sinal (T_1 e T_2), utilizando as bordas de descida, e não subida, pois o hardware da porta paralela é capaz de detectar esta ocorrência.

Mesmo assim, não há como determinar em que instante T entre T_1 e T_2 ocorreu a frequência calculada F_{12} utilizando estes instantes. Isto gera um erro de posicionamento temporal. É claro que este erro pode ser desprezado se a frequência de modulação do sinal, no caso corresponde a F_{12} , for razoavelmente grande em relação à frequência de amostragem F_A . Observou-se porém que o computador não conseguia boa precisão quando se utilizava frequência de modulação elevadas, estabelecendo um compromisso entre frequência de modulação, frequência de amostragem e precisão.

Para se conseguir então uma frequência de amostragem razoável, sem aumentar muito a frequência de modulação, o que comprometeria a precisão, desenvolveu-se um método para minimizar o erro de posicionamento. A base para este método é adotar que a

frequência F_{12} calculada utilizando T_1 e T_2 ocorreu no instante médio, T_M :

$$T_M = \frac{T_2 - T_1}{2}$$

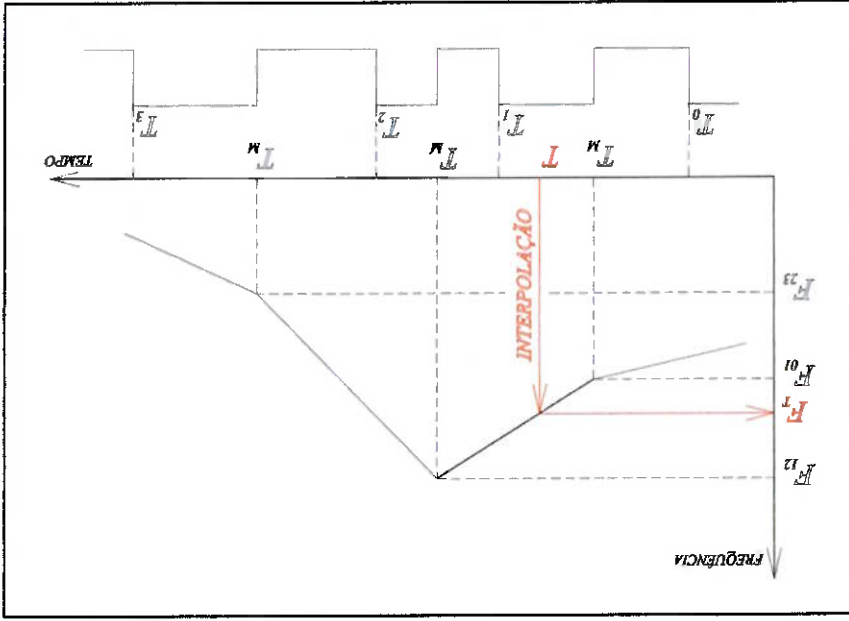


Figura 2.2: Método Para Coleta Dinâmica de Dados

Tendo então definido um instante para localizar a frequência calculada F_{12} , utilizou-se interpolação linear para calcular o valor de F_r num instante T qualquer, diferente de T_1 , T_2 ou T_m , utilizando-se para isso o instante consecutivo ou anterior mais próximo de T , T_j ou T_0 . Os instantes T consecutivos, correspondentes aos instantes onde as amostragens devem ser efetuadas, são definidos, é claro, em função da frequência de amostragem utilizada, F_r .

2.4 Software de Coleta de Dados

2.4.1 Aspectos Gerais:

Numa primeira análise, baseada em trabalhos anteriores (Teixeira, 1998), concluiu-se que uma amostragem a 1.000 Hz seria suficiente para observar a dinâmica do sinal, que não deveria possuir frequências superiores a 500 Hz. Para atingir esta frequência de amostragem, conseguindo uma boa demodulação do sinal, planejou-se trabalhar inicialmente com o sinal modulado em frequências variando de 5.000 a 10.000 Hz. Com estes dados desenvolveu-se o software de aquisição de dados, em Pascal, sendo que as rotinas mais críticas foram desenvolvidas em Assembler, para maior velocidade. O Pascal foi escolhido por ser a linguagem mais rápida nas funções básicas utilizadas na rotina de aquisição de dados (Ozkul, 1997).

O primeiro passo foi encontrar um modo de medir o tempo do ciclo de um sinal com frequência da ordem de 10 KHz. Este problema foi resolvido utilizando um clock e um contador padrões do PC, os quais são normalmente utilizados para a produção de som pelo autofalante interno (Buchanan, 1996). O contador utilizado é de 16 bits e é acessado por software através de uma instrução de leitura (IN) na porta de endereço 42H.

Este contador está associado a um clock com frequência de aproximadamente 1,2 MHz. O contador pode ser programado para gerar interrupções e para utilizar frações da frequência do clock. A programação do contador fica gravada no registrador acessado pelo endereço 43H. Deseja-se apenas que o contador seja sempre decrementado na frequência máxima, voltando ao seu valor inicial, 65535, ao atingir zero. Esta programação é obtida ao escrever (OUT) o valor 178 naquele registrador.

O hardware do PC conta com o recurso de detectar uma borda de descida no pino 10 da porta paralela, podendo gerar uma interrupção do processador. Para isso é necessário que esta função esteja habilitada, o que ocorre quando o 4º bit do registrador de endereço 37A possui o valor 1. Isto pode ser feito escrevendo o valor 16 neste registrador (IBM-PC Technical Documentation; Monidata – Manual do Computador). A interrupção gerada por este recurso é a interrupção nº 15, ativada pela linha IRQ7 do gerenciador de interrupções. As linhas de interrupção podem ser habilitadas ou desabilitadas por um registrador de 8 bits acessado pelo endereço 21H (Buchanan, 1996). Durante o desenvolvimento, percebeu-se que outras interrupções estavam interferindo no funcionamento do programa e desabilitaram-se todas as outras interrupções, escrevendo-se o valor 127 naquele registrador (Buchanan, 1996); restabeleceu-se a configuração original após o término da rotina de aquisição de dados.

2.4.2 Definições Iniciais e Programa Principal:

Nesta seção são definidas as variáveis globais e realizada a interface com o

usuário para a escolha da rotina a ser utilizada.

{Definições Iniciais}	
program portab08;	• Label do Programa Principal
uses crt,dos;	• Módulos necessários
const	
tick=1193181.7;	• Frequência do clock
size=32004;	• Comprimento padrão do vetor de dados
var	
size,t,s,o:word;	• size: Comprimento do vetor de dados;
	• t: Contador de pontos gravados;
	• s: segmento de memória;
	• o: offset de memória.
dados:text;	• dados: arquivo para gravar dados
key:char;	• key: tecla de comando
nomearq:string;	• nomearq: nome dos arquivos gravados
c1:array[1..size]of word;	• c1: Vetor de dados
{Rotina de Tratamento da Interrupção (Tempo Real)}	
{Rotina de Aquisição de Dados (Tempo Real)}	
{Rotina para Aterição}	
{Rotina para Gravação de Arquivo de Dados}	
{Rotina para Gravação de Arquivos de Dados Consecutivos}	
{Rotina para Amostar Arquivos de Dados}	
{Rotina para Organizar Arquivos de Dados}	
{Frequencimetro}	
{Rotina para Gravação da Frequência em Função do Tempo}	
{Programa Principal}	
begin	• Início do Programa Principal
repeat	• Início da repetição
size:=size;	• Inicia o tamanho do vetor de dados com o valor padrão
clrscr;	• Imprime na tela a interface com o usuário
gotoxy(1,2);	
writeln('*****');	
writeln('* AMOSTRAGEM PELA PORTA PARALELA *');	
writeln('* 1: Aterir.');	
writeln('* 2: Frequencimetro.');	
writeln('* 3: Coleta de um arquivo de dados.');	
writeln('* 4: Coleta sequencial.');	
writeln('* 5: Amostragem de um arquivo de dados.');	
writeln('* 6: Organizacao de um arquivo de dados.');	
writeln('* 7: Frequencia em funcao do tempo.');	
writeln('* 8: Sair do programa.');	
writeln('*****');	
key:=readkey;	• Lê a tecla pressionada

case key of	• Desvia o processamento para a sub-rotina correspondente a tecla pressionada
'1:ateri;	
'2:requenc;	
'3:grava1;	
'4:grava2;	
'5:amostra;	
'6:amostra2;	
'7:freqtemp;	
end;	
until (key='8');	• Fim da repetição quando tecla 8 é pressionada
end.	• Fim do Programa Principal.

2.4.3 Rotinas de Tempo Real :

Estas rotinas são utilizadas por todos as outras rotinas do programa que dependem de aquisição de dados, e não são chamadas diretamente pelo programa principal. Durante a rotina de aquisição de dados, o computador é colocado em um "Do Nothing Loop" e fica apenas aguardando uma interrupção gerada por uma borda de descida. Quando esta interrupção é detectada o processamento é desviado para a rotina de tratamento da interrupção que lê o conteúdo do contador utilizado para medir o tempo, e armazena este conteúdo em um vetor e volta ao *loop* de espera da rotina de aquisição de dados. O programa detecta todas as bordas de descida que ocorrem durante um ciclo de aquisição, registrando para cada uma o conteúdo do contador.

A rotina de aquisição de dados pode ser chamada por outras rotinas do programa, conforme será visto adiante, e ao seu término o processamento retorna para a rotina que a chamou. O resultado das rotinas de tempo real é o preenchimento de um vetor de dados com o conteúdo do contador a cada instante em que foram detectadas bordas. O comprimento deste vetor pode ser alterado pela rotina que chama a rotina de aquisição de dados; entretanto, devido à quantidade de memória disponibilizada para as variáveis no compilador, o limite de 32.004 linhas foi estabelecido para o comprimento do vetor de dados, sendo este limite, também o tamanho padrão do vetor de dados.

procedure interrup;	• Label da sub-rotina e informação que é para o tratamento de uma interrupção
Begin	• Início da sub-rotina
Asm	• Início da programação em Assembler
in al,042h	• Grava no registrador al o byte inferior do contador (porta 42h) e copia em bl
mov bl,al	• Grava no registrador al o byte superior do contador (porta 42h) e copia em bh
in al,042h	• Grava em ds o segmento de memória onde foi definido o array c1
mov ds,s	• Grava em di o offset de memória onde deverá ser gravado o ponto de dado
mov di,o	• Grava no endereço definido por ds e di valor do contador armazenado em bx
add o,2	• Incrementa o offset para corresponder ao próximo elemento do array c1
inc it	• Incrementa o contador de pontos it
mov al,32	• Coloca valor 32 porta 20h, determinando o fim da rotina de interrupção.
out 20h,al	• Processamento desviado de volta ao "Do nothing Loop".
end;	• Fim da programação em Assembler
end;	• Fim da sub-rotina de tratamento de interrupção.
{Rotina de Aquisição de Dados (Tempo Real)}	
procedure coleta;	• Label da sub-rotina
var	
a:byte;	• a. back-up do contador de interrupções
b:pointer;	• b. Variável para endereçamento
begin	• Início da sub-rotina
it:=0;	• Inicializa o contador
port[\$43]=178;	• Programa e inicializa o contador do Hardware do PC
port[\$42]=255;	
port[\$42]=255;	
a=port[\$21];	• Armazena em a o valor inicial do contador de interrupções
port[\$37a]=16;	• Habilita a interrupção nº15 gerada pela porta paralela
getintvec(15,b);	• Armazena em b endereço inicial para onde esta apontada interrupção nº15
s:=seg(c1[1]);	• Armazena em s o segmento de memória onde foi definido o array c1
o:=ofs(c1[1]);	• Armazena em o o offset de memória onde foi definido o 1º elemento de c1
setintvec(15,addr(interm));	• Aponta a interrupção nº15 para a rotina que trata a interrupção
asm	• Início da programação em Assembler
mov cx,size	• Armazena em cx o valor de size (número de pontos a ser gravado)
mov al,127	• Joga o valor 127 na porta 21h, desabilitando todas as interrupções exceto a nº15
out 21h,al	• Do Nothing Loop: aguarda interrupção. Sai do Loop quando gravou o número especificado de pontos (it=cx).
jne @nada	• Restaura o valor inicial armazenado em a ao controlador de interrupções.
mov al,a	
out 21h,al	
end;	• Fim da programação em Assembler
setintvec(15,b);	• Aponta a interrupção nº15 para o endereço inicial armazenado em b.
end;	• Retorna ao Programa Principal.

2.4.4 Rotina para Aferição:

Esta rotina calcula os desvios em torno da média de um conjunto de dados adquiridos com frequência, e/ou torque, constante. Assim pode-se analisar a coerência do sinal adquirido, identificando-se problemas, como, por exemplo, a não detecção de bordas, ou a presença de ruído excessivo provocando a detecção de bordas não ocorridas. Esta rotina mostrou que o computador era capaz de ler 32.000 bordas, sem perder nenhuma, a uma frequência de 10.000 Hz, com desvio máximo, dentro destas 32.000 bordas, inferior a 1,5% na frequência calculada.

A precisão que se obteve está ligada diretamente ao problema da resolução. Como o clock utilizado possui frequência em torno de 1,2 MHz, para medir uma frequência de 10 KHz são contados em torno de 100 ciclos de clock e um ciclo contado a mais ou a menos provoca um erro de 1%. Percebeu-se, que ao ler frequências diferentes, o número de ciclos errados contados se mantém, o que permite concluir que a precisão aumenta a medida que a frequência diminui. Por este motivo, houve um esforço para abaixar a frequência de modulação utilizada, visando uma maior precisão. Testes realizados mostraram que uma frequência de modulação em torno de 2.500 Hz permitia a amostragem a 1.000 Hz, como era desejado, sem comprometer a recuperação do sinal. O procedimento e os resultados dos testes de recuperação do sinal serão mostrados adiante neste texto.

{Rotina para Aferição}	procedure aferir;	• Label da sub-rotina
var		
f,imed,pf:real;	• f,imed: Cálculo da frequência em Hz • pf: Percentagem de erro da frequência	
d,i,max,fmin,mmax,nmin:word;	• d: delta (ciclos de clock) • i: contador • fmax/fmin: delta max/min encontrados • nmax/nmin: número de repetições de fmax/fmin	

• Início da sub-rotina	begin
• Início da repetição	repeat
• Escreve mensagem na tela	clrscr;
	writeIn('Rotina para afericao');
	gotoxy(1,2);
• Chama rotina de aquisição de dados	writeIn('Amostrando, aguarde.');
	coleta;
• Volta cursor	gotoxy(1,2);
• Inicializa registros	fmax:=65535;
	fmin:=0;
	fmed:=0;
	nmax:=0;
	nmin:=0;
• Início do loop para leitura da variável que contém os dados adquiridos (c1)	for i:=4 to (size-1) do
	begin
• Calcula o delta entre dois pontos consecutivos de c1	d:=c1[i]-c1[i+1];
• Calcula a frequência	f:=fck/d;
• Somatória para cálculo da média	fmed:=fmed+f;
• Verifica se é novo limite superior e registra. O registro de número de repetições do limite anterior é apagado.	if d>fmax then
	begin
	fmax:=d;
	nmax:=0;
	end;
• Verifica se é novo limite inferior e registra. O registro de número de repetições do limite anterior é apagado.	if d<fmin then
	begin
	fmin:=d;
	nmin:=0;
	end;
• Incrementa os registros de repetições dos limites	if d=fmax then nmax:=nmax+1;
	if d=fmin then nmin:=nmin+1;
	end;
• Fim do loop de leitura da variável	fmed:=fmed/(size-4);
• Calcula frequência média e o número de ciclos de clock equivalente e escreve na tela.	f:=fck/fmed;
	write('Fmed:',f,7:1,'Hz N.CLK:',f,6:1);
	f:=fck/fmed;
• Calcula o erro total em torno da média e escreve na tela.	f:=fck/fmax-fck/fmin)*100/fmed;
	writeIn('Erro Total:',f,5:2,'%');
• Calcula a frequência máxima e escreve na tela junto com o número de ciclos de clock equivalente	write('Fmax:',f,7:1,'Hz N.CLK:',fmax:4);
	f:=fck/fmax;
• Calcula o erro superior e a percentagem de pontos nesta condição. Escreve na tela junto com o número de pontos	f:=f-fmed)*100/fmed;
	pt:=nmax*100/(size-4);
	writeIn('Erro Sup:',f,5:2,'% PF:',nmax:5);
	=,pt,5:2,'%);
• Calcula a frequência mínima e escreve na tela junto com o número de ciclos de clock equivalente	write('Fmin:',f,7:1,'Hz N.CLK:',fmin:4);
	f:=fck/fmin;
• Calcula o erro inferior e a percentagem de pontos nesta condição. Escreve na tela junto com o número de pontos	f:=(fmed-1)*100/fmed;
	pt:=nmin*100/(size-4);
	writeIn('Erro Inf:',f,5:2,'% PF:',nmin:5);
	=,pt,5:2,'%);
• Escreve mensagem na tela e aguarda opção do usuário.	write('Digite S para sair, outra tecla para repetir.');
	repeat until(keypressed);
• Lê tecla pressionada. Repete se diferente se "s". Sai da rotina se é "s".	key:=readkey;
	until (key='s');
• Fim da sub-rotina.	end;

Para a gravação de arquivos o programa utiliza rotinas que chamam a rotina de aquisição de dados, gravando no disco os dados adquiridos com nome do arquivo especificado. Além de uma rotina que grava um único arquivo de dados, foi criada uma rotina que grava arquivos consecutivos, inserindo como extensão ao nome especificado o número de ordem do arquivo gravado. Nesta rotina, existe um pequeno intervalo de tempo entre dois arquivos consecutivos onde o sinal não é observado, ou seja, os arquivos gravados com esta rotina não podem ser considerados “absolutamente consecutivos”;

2.4.5 Rotinas para Gravação de Arquivos de Dados

{Rotina para Gravação de Arquivo de Dados}	
procedure grava1;	Var
	i:word;
	Begin
	Repeat
	clrscr;
	write('Rotina para coleta de arquivos de dados.');
	write('Entre o nome do arquivo.');
	readln(nomearq);
	write('Digite uma tecla quando estiver pronto');
	repeat until keypressed;
	key:=readkey;
	gotoxy(1,3);
	write('Coletando dados, aguarde.');
	coleta;
	gotoxy(1,3);
	write('Gravando arquivo.');
	assign(dados,nomearq);
	rewrite(dados);
	for i:=4 to (size-1) do
	Begin
	write(dados,c1[i]:5);
	end;
	write(dados,c1[size]:5);
	close(dados);
	gotoxy(1,3);
	write('Digite S para sair, outra tecla para repetir.');
	repeat until keypressed;
	key:=readkey;
	until (key='s');
	end;
• Label da sub-rotina	
• i: Contador	
• Início da sub-rotina	
• Início da repetição	
• Escreve mensagem na tela	
• write('Rotina para coleta de arquivos de dados.');	
• write('Entre o nome do arquivo.');	
• Lê o nome do arquivo digitado	
• Escreve mensagem na tela e aguarda liberação da	
• aquisição de dados	
• Lê tecla pressionada para descarregar buffer	
• Escreve mensagem na tela e chama rotina de	
• coleta;	
• gotoxy(1,3);	
• write('Coletando dados, aguarde.');	
• Escreve mensagem na tela	
• write('Gravando arquivo.');	
• assign(dados,nomearq);	
• rewrite(dados);	
• for i:=4 to (size-1) do	
• Begin	
• write(dados,c1[i]:5);	
• end;	
• write(dados,c1[size]:5);	
• close(dados);	
• gotoxy(1,3);	
• write('Digite S para sair, outra tecla para repetir.');	
• repeat until keypressed;	
• key:=readkey;	
• until (key='s');	
• end;	
• Label da sub-rotina	
• i: Contador	
• Início da sub-rotina	
• Início da repetição	
• Escreve mensagem na tela	
• write('Rotina para coleta de arquivos de dados.');	
• write('Entre o nome do arquivo.');	
• Lê o nome do arquivo digitado	
• Escreve mensagem na tela e aguarda liberação da	
• aquisição de dados	
• Lê tecla pressionada para descarregar buffer	
• Escreve mensagem na tela e chama rotina de	
• coleta;	
• gotoxy(1,3);	
• write('Coletando dados, aguarde.');	
• Escreve mensagem na tela	
• write('Gravando arquivo.');	
• assign(dados,nomearq);	
• rewrite(dados);	
• for i:=4 to (size-1) do	
• Begin	
• write(dados,c1[i]:5);	
• end;	
• write(dados,c1[size]:5);	
• close(dados);	
• gotoxy(1,3);	
• write('Digite S para sair, outra tecla para repetir.');	
• repeat until keypressed;	
• key:=readkey;	
• until (key='s');	
• end;	

Rotina para Gravação de Arquivos de Dados Consecutivos	
• Label da sub-rotina	procedure grava2;
	Var
	num:string;
	i,j,n:word;
• i, j: Contadores	
• n: número d arquivos.	
• Inicio da sub-rotina	Begin
• Inicio da repetição	Repeat
	clscr;
• Escreve mensagem na tela	writeln('Rotina de coleta sequencial de arquivos de dados,');
	write('Entre o nome base para os arquivos,');
	readln(nomearq);
	write('Quantos arquivos deseja criar,');
• Escreve mensagem na tela	readln(n);
• Lê o número de arquivos a ser gravado	gotoxy(1,3);
• Escreve mensagem na tela e aguarda liberação da	writeln('Digite uma tecla quando estiver pronto');
• aquisição de dados	repeat until keypressed;
	key:=readkey;
	for i:=1 to n do
	Begin
	gotoxy(1,3);
• Escreve mensagem na tela e chama rotina de	writeln('Amostra atual: ',i:3,' de ',n:3,'');
• aquisição de dados	coleta;
	str(i,num);
	num:=concat(nomearq,';',num);
• Armazena em num o nome do arquivo com a	
• extensão sequencial	assign(dados,num);
• Associa variável ao nome do arquivo	rewrite(dados);
• Inicializa o arquivo	for i:=4 to (size-1) do
• Escreve conteúdo de c1 linha a linha na variável	Begin
• arquivo	writeln(dados,c1[i]:5);
	end;
• Escreve conteúdo da última linha de c1	writeln(dados,c1[size]:5);
• Grava o arquivo	close(dados);
• Fim do loop de gravação de múltiplos arquivos	end;
• Escreve mensagem na tela e aguarda opção do	gotoxy(1,3);
• usuário.	writeln('Digite S para sair, outra tecla para repetir.');
	repeat until keypressed;
	key:=readkey;
• Lê tecla pressionada. Repete se diferente se "s". Sai	until (key='s');
• Fim da sub-rotina.	end;

2.4.6 Rotina para Amostar Arquivos de Dados:

Os arquivos gravados precisam ser amostrados para serem utilizados em uma análise digital. A amostragem foi implementada pelo método descrito na seção 2.3. Ressaltando-se que o arquivo de dados utilizado como ponto de partida possui apenas um vetor de dados com o conteúdo do contador a cada instante em que foram detectadas bordas.

O resultado da rotina de amostragem é um arquivo de dados com um novo vetor onde ficam registrados os valores da frequência calculada. Esta frequência calculada é o que, de fato, se deseja medir, pois o sinal de torque é modulado em frequência. Os dados obtidos por esta rotina são adequados para análise digital, ou seja, são amostras em intervalos regulares de tempo. Além dos dados de frequência esta rotina registra a diferença entre o instante de amostragem e o instante mais próximo dentro os dois utilizados para a interpolação. Esta diferença é registrada em número de ciclos do clock. Na seção 2.3 e figura 2.2 há um maior detalhamento deste item.

{Rotina para Amostragem de Dados}	
procedure amostra;	
var	
nomearq2:string;	
nomearq2: Nome do arquivo para gravar dados amostrados	
i,d0,d1: word;	
dados2:text;	
f: frequência calculada	f:=fa,cd,cr1,cr2,erro,d0r,d1r:double;
fa: frequência de amostragem	
cd: centro do intervalo	
cr1, cr2: instantes das bordas (ciclos de clock)	
d0r, d1r: delta em variáveis reais para cálculo	
erro: diferença no tempo entre o ponto entre as bordas e o ponto de amostragem (ciclos de clock)	
begin	
repeat	
clrscr;	
write('Rotina para amostrar um arquivo de dados.');	
write('Nome do arquivo de dados que sera aberto: ');	
readln(nomearq);	
write('Nome do arquivo para gravar dados amostrados: ');	
readln(nomearq2);	
write('Frequencia de amostragem: ');	
readln(fa);	
write('Nome do arquivo de dados que sera aberto	
dados que receberá dados amostrados	
Escreve mensagem na tela e lê a frequência de amostragem a ser utilizada	
Associa os nomes das variáveis aos nomes dos arquivos informados	
assign(dados,nomearq);	
assign(dados2,nomearq2);	
rewrite(dados2);	
reset(dados);	
Reinicia o arquivo	
Reinicia o arquivo apagando seu conteúdo anterior	

• Inicia o contador	!:=1;
• Lê todos os dados do arquivo e armazena na variável c1	begin readln(dados,c1[1]); !:=+1; end;
• Fecha o arquivo	close(dados);
• Armazena em size o número de pontos do arquivo	size:=-1;
• Calcula fa em múltiplos da frequência do clock	fa:=fck/fa;
• Calcula o primeiro delta do arquivo	d0:=c1[1]-c1[2]; d0r:=d0;
• Transforma em variável real	cd:=d0r/2;
• Acho o instante que se deve realizar a amostra (o primeiro corresponde ao instante médio entre c1 e c2)	cr1:=0;
• Instante da primeira borda (0 ciclos de clock)	for i:=1 to (size-2) do
• Início do loop para amostragem dos dados	begin d0:=c1[i]-c1[i+1]; d0r:=d0; cr2:=cr1+d0r;
• Transforma em variável real	erro:=(cr1+cr2)/2-cd;
• Calcula o erro: diferença entre o instante médio (cr1 e cr2) e o instante em que se deve realizar a amostra (cd)	if erro<0 then begin d1:=c1[i+1]-c1[i+2]; d1r:=d1; end; if erro=0 then d1r:=d0r; if erro>0 then begin d1:=c1[i]-c1[i+1]; d1r:=d1; end;
• Se o erro é igual a zero utiliza o delta atual	
• Se o erro é menor que zero utiliza o delta anterior	
• Faz a interpolação com base no erro, considerando o intervalo atual (d0r) e o intervalo anterior ou posterior (d1r)	$f := (2 * \text{erro} / (d0r * d1r)) - (2 * \text{erro} / (d0r * d0r)) + (1 / d0r);$
• Calcula a frequência em Hz, multiplicando o resultado da interpolação (ciclos de clock) pela frequência do clock	f:=fck*f;
• Escreve a frequência calculada no arquivo	writeln(dados2,erro:5:1,f9:1);
• Acha o novo ponto em que deve ser feita a amostragem	cd:=cd+fa;
• Fim da rotina de interpolação	end;
• Início do intervalo passa a ser o fim do intervalo anterior	cr1:=cr2;
• Volta ao loop de amostragem dos dados	end;
• Grava e fecha o arquivo com os dados amostrados	close(dados2);
• Escreve mensagem na tela e aguarda opção do usuário.	write('Digite S para sair, outra tecla para repetir.');
• Lê tecla pressionada. Repete se diferente se "s". Sai da rotina se é "s".	repeat until keypressed; key:=readkey;
• Fim da sub-rotina	until (key='s'); end;

2.4.7 Rotina para Organizar Arquivos de Dados:

Esta rotina calcula todas as frequências contidas em um arquivo de dados e insere definido pela frequência de amostragem: ela aproveita todos os pontos do arquivo inicial. O resultado da rotina é um arquivo de dados formado por dois vetores correspondentes: um com as frequências calculadas e outro com o instante correspondente à ocorrência daquela frequência (escala de tempo). Para uma visualização correta deste arquivo a escala de tempo deve ser utilizada, pois os pontos não estão em intervalos regulares de tempo, ao contrário da rotina que amostra os dados para análise digital. Esta rotina foi criada para verificar visualmente a capacidade de recuperação da forma de onda original do sinal nas situações onde a frequência de modulação não é muito maior que a frequência da dinâmica do sinal.

{Rotina para Organizar Arquivos de Dados}	
procedure amostra2;	Label da sub-rotina
var	
nomearq2:string;	nome do arquivo para gravar dados
l:d:word;	i: contador;
	d: delta
dados2:text;	dados2: arquivo para gravar dados organizados
f,d:cr,t:double;	f: frequência calculada
	dr: delta em variável real
	cr: instante médio entre as bordas (ciclos de clock)
	t: instante médio entre as bordas (segundos)
begin	início da sub-rotina
repeat	início da repetição
clrscr;	
writeln('Rotina para organizar um arquivo de dados.');	
write('Nome do arquivo de dados que sera aberto: ');	Escreve mensagem na tela e lê o nome do arquivo de dados que será aberto
readln(nomearq);	
write('Nome do arquivo para gravar dados amostrados: ');	Escreve mensagem na tela e lê o nome do arquivo de dados que receberá os dados organizados
readln(nomearq2);	
assign(dados,nomearq);	Associa as variáveis aos nomes dos arquivos
assign(dados2,nomearq2);	informados

• Reinicia o arquivo apagando seu conteúdo anterior	reset(dados);
• Reinicia o contador	!:=1;
• Lê todos os dados do arquivo e armazena na variável c1	while not eof(dados) do begin readln(dados,c1[!]); !:=!+1;
	end;
• Fecha o arquivo	close(dados);
• Armazena em size o número de pontos do arquivo	size:=!-1;
• Inicia o instante médio	cr:=0;
• Início do loop de organização	for i:=1 to (size-1) do begin d:=c1[!]-c1[!+1]; Calcula o delta Transforma em variável real Calcula a frequência correspondente ao delta Calcula o instante médio atual (ciclos de clock) Calcula o instante médio atual (segundos) Determina o ponto inicial para achar o próximo instante médio
• Escreve no arquivo a frequência e o instante médio correspondente	writeln(dados2,t:10:8,t:9:1);
• Fim do loop de organização do arquivo	end;
• Grava e fecha o arquivo	close(dados2);
• Escreve mensagem e aguarda opção do usuário	write('Digite S para sair, outra tecla para repetir.');
• Lê tecla pressionada. Repete se diferente se "s". Sai da rotina se é "s".	repeat until keypressed; key:=readkey;
• Fim da sub-rotina	until (key='s'); end;

2.4.8 Freqüencímetro:

Esta rotina foi criada para permitir calibração estática e testes do equipamento, e utiliza a rotina básica de coleta de dados, porém com um menor número de pontos. Ao final desta pequena amostra a frequência média é calculada e exibida na tela, num ciclo repetitivo. A quantidade de pontos para o cálculo da média pode ser mudada a qualquer instante, possibilitando obter um tempo de resposta conveniente de acordo com a frequência que está sendo amostrada.

Esta rotina foi criada para observar a estabilidade estática do equipamento. O seu resultado é a gravação de um arquivo com dois vetores de dados contendo respectivamente a frequência e o instante, em minutos, em que ela ocorreu.

2.4.9 Rotina para Registro da Frequência em Função do Tempo:

Label da sub-rotina	procedure frequenc;
	var
d: delta	d1,n:word;
i: contador	
n: número de pontos da amostra	
f: frequência	f:real;
Inicio da subrotina	begin
Escreve mensagem na tela	clrscr;
	writeln('Frequencimetro, aperte S para sair.');
	size:=100;
Determina o número de pontos da amostra	key:=5;
Inicia a tecla com valor 5	repeat
Inicio da repetição	repeat
Repetição até escolha de novo tamanho de amostra	gotoxy(1,2);
Posiciona o cursor	f:=0;
Inicia a frequência	coleta;
Chama a rotina de coleta de dados em tempo real	for i:=4 to (size-1) do
Le os dados armazenados em c1 e calcula a somatória dos deltas	begin
	d:=c1[i]-c1[i+1];
	f:=f+d;
	end;
Calcula a frequência média com base na somatória	f:=f/(size-4);
Calcula a frequência em Hertz	f:=f*k/f;
Atribui a a tecla pressionada (caso seja tecla numérica)	if (ord(key)<58)and(ord(key)>47) then n:=ord(key)-48;
Faz n=10 caso n seja 0	if n=0 then n:=10;
Escreve na tela a frequência calculada e n	writeln('Frequencia: ',f:9:1,' Hz Divide: ',n:2);
Ajusta a quantidade de pontos da amostra	if f<(3200*n) then size:=round(f/n) else size:=3200;
Repete até que uma tecla seja pressionada	until keypressed;
Le a tecla pressionada	key:=readkey;
Sai da repetição se a tecla for "s"	until (key='s');
Fim da sub-rotina	end;

{Rotina para Registro da Frequência em Função do Tempo}	
Var	h: hora s: segundo cs: centésimos de segundo d: delta i: contador m1, m2, mabs: minutos
f:real;	f: frequência
freq;text;	freq: arquivo para gravação dos resultados
Begin	Início da sub-rotina
clrscr;	Escreve mensagem na tela
writeIn('Coleando frequencias, aperte uma tecla para sair.');	
assign(freq,'freq;tem');	Associa a variável ao nome do arquivo
rewrite(freq);	Reinicia o arquivo apagando seu conteúdo anterior
size:=50;	Define o tamanho da amostra
mabs:=0;	Inicia o contador de minutos
gettime(h,m1,s,cs);	Retira do sistema a hora atual
repeat	Início da repetição
gotoxy(1,2);	Movê o cursor
coleta;	Chama a rotina de coleta de dados em tempo real
f:=0;	Inicia a frequência para cálculo da média
for i:=4 to (size-1) do	Lê os dados armazenados em c1 e calcula a
begin	somatória dos deltas
d:=c1[i]-c1[i+1];	
f:=f+d;	
end;	
f:=f/(size-4);	Calcula a frequência média (ciclos de clock)
f:=fck/f;	Calcula a frequência média (Hertz)
write('Freq: ',f:10:2,' Hz;', Apos: ',mabs:5,' minutos.');	Escreve na tela a frequência calculada e instante atual
writeIn(freq,f:10:2,mabs:10);	Escreve no arquivo a frequência e o instante atual
repeat	
gettime(h,m2,s,cs);	Verifica a hora atual até que o minuto se altere ou uma tecla seja pressionada
until((m2<>m1)or(keypressed));	
m1:=m2;	
mabs:=mabs+1;	Iguala os minutos para funcionamento do loop
until keypressed;	Volta ao loop até que uma tecla seja pressionada
close(freq);	Grava e fecha o arquivo
end;	Fim da sub-rotina.
procedure freqtemp;	Label da sub-rotina

2.5 Circuito da Parte Girante

O circuito da parte girante pode ser dividido nas seguintes partes básicas:

1. Fonte de Alimentação;
2. Elementos Sensores e Balançamento;
3. Amplificação e Filtragem;
4. Modulação em Freqüência;
5. Acendimento dos Leds (Transmissão).

Na fonte de alimentação foram tomados certos cuidados para minimizar os ruídos provocados pela alimentação por escovas. Foram utilizados estabilizadores tipo 78xx para alimentar todo o circuito. Instalou-se uma grande carga capacitiva na entrada dos estabilizadores, além de uma carga menor nas suas saídas. Também instalou-se uma pequena carga indutiva logo após as escovas, com o objetivo de reduzir os efeitos das pequenas perdas de contato elétrico que ocorrem neste tipo de alimentação.

Os elementos sensores consistem em quatro extensômetros, de resistência de $350\Omega (R^x)$, colados a 45° na ferramenta, ligados em Ponte Completa de Wheatstone com um tripot para balanceamento. A amplificação do sinal dos extensômetros é feita por um amplificador operacional na configuração diferencial com filtro passa-baixa, além de outro filtro passa baixa na saída do amplificador. Os filtros foram dimensionados com freqüência de corte em torno de 500 Hz. Utilizou-se um offset na amplificação, para que o amplificador, na inexistência de torque aplicado, fornecesse uma saída diferente de zero. Assim, pode-se, em função deste offset, escolher a freqüência que representa torque

zero, decisão fundamental para que o sistema de medição consiga observar a dinâmica do torque.

O VCO recebe o sinal vindo do amplificador e gera uma frequência modulada por este sinal. Um resistor e um capacitor ligados ao VCO são responsáveis pela escolha da faixa de frequência que será gerada. Também instalou-se um pequeno capacitor que, segundo o manual do equipamento, ajuda a gerar um sinal mais estável.

A saída do VCO é um sinal em onda quadrada de tensão de grande amplitude. Porém, pela necessidade de corrente utilizou-se um transistor para o acendimento dos quatro *leds*. Um divisor resistivo, na base do transistor, e um resistor, ligado em série com os *leds*, foram necessários para se conseguir um bom ajuste da corrente. Os resistores foram escolhidos para se atingir o acendimento com corrente próxima da máxima e, por outro lado, o apagamento total dos *leds*. Desta forma, obteve-se um sinal suficiente para garantir “conexão óptica” através do captador.

Através de um dimensionamento preliminar estimou-se a amplificação necessária. Após os primeiros testes, a amplificação foi corrigida para se obter a sensibilidade desejada para gerar, na situação de trabalho, a faixa de frequência adequada. **Bonassi, (1994)** compilou as informações utilizadas para o cálculo do momento torsor.

Dados da Operação:

Ferramenta: Fresa de Topo $\varnothing_f = 25$ mm $X = 2$ dentes
Corpo de Prova: Aço 1020 Trefilado Dureza = 170 HB

Dados de Usinagem Recomendados pelo Machinability Data Center (1980):

Profundidade Adotada (f_p): 10 mm
 Avanço por Dente (a_p): maior que 0,089 mm
 Velocidade de Corte (V_c): maior que 27 m/min

Rotação (N):

$$N = \frac{V_c}{\pi \cdot \phi_f}$$

$$N = 344 \text{ RPM}$$

$$\text{Adotar: } N_{REAL} = 355 \text{ RPM}$$

Velocidade de Avanço (V_f):

$$V_f = a_d \cdot N_{REAL} \cdot 2$$

$$\text{Adotar: } V_f = 64 \text{ mm/min}$$

Espessura Média do Cavaco (H_M):O avanço por dente real (a_{DR}):

$$0,0901 \text{ mm}$$

Para a operação em questão:

$$H_M = \frac{2 \cdot a_{DR}}{\pi}$$

$$\text{Portanto: } H_M = 0,0574 \text{ mm}$$

Pressão Específica de Corte Média (K_{SM}):Pressão Específica de corte tabelada (K_{SI}):

$$195 \text{ kgf/mm}^2$$

Fatores de correção:

Devido a utilização de fluido de corte:

$$0,8$$

Devido ao material da ferramenta:

$$1,3$$

Obtem-se $K_{SIC} = 202,8 \text{ kgf/mm}^2$ Fator tabelado para o cálculo da K_{SM} (Z):

$$0,16$$

A Pressão Específica Média é calculada por:

$$K_{SM} = K_{SIC} \cdot H_M^{-Z}$$

$$\text{Portanto: } K_{SM} = 320,4 \text{ kgf/mm}^2$$

Momento Torsor Médio (M_T):

$$M_T = K_{SM} \cdot P_p \cdot H_M \cdot \frac{\phi_F}{2}$$

$$\text{Portanto: } M_T = 23,0 \text{ N.m}$$

Deformação da Fresa (ϵ):

Módulo de Elasticidade Transversal do Material da Fresa (G):

$$21,12 \cdot 10^3 \text{ kgf/mm}^2$$

A deformação na superfície da fresa pode ser calculada por:

$$\epsilon = \frac{16 \cdot M_T}{\pi \cdot \phi_p^3 \cdot G}$$

Portanto: $\epsilon = 3,55 \cdot 10^{-5}$

Varição de tensão na ponte de extensômetros (ΔU^E):

Fator dos extensômetros utilizados (GF):

$$2,18$$

Tensão de Alimentação da Ponte (U_p):

$$8,0 \text{ V}$$

A variação da tensão na ponte pode ser calculada por:

$$\Delta U^E = U_p \cdot GF \cdot \epsilon$$

Portanto: $\Delta U^E = 0,62 \text{ mV}$

Varição da tensão de controle do VCO (ΔU^C):

Foram realizados testes com o VCO utilizando tensão de alimentação $U_a = 8,0 \text{ V}$,

e observando a forma de onda e a frequência produzida de acordo com a tensão colocada

no terminal de controle (U^C). Nestas condições, verificou-se que o VCO produzia um

signal muito adequado quando $U^C = 7 \pm 0,9 \text{ V}$. Assim, $7,0 \text{ V}$ foi escolhida como tensão de

controle para torque zero, que é a tensão de offset colocada no amplificador. Segundo o

fabricante do equipamento, a frequência produzida pelo VCO é proporcional a diferença

entre a tensão de alimentação e a tensão de controle:

$$F_T = K \cdot (U_a - U^C)$$

Utilizando 2.500 Hz como frequência de torque zero, adotou-se 3.500 Hz como

frequência para o torque médio calculado acima (M_T), representando uma variação de

40%. Para gerar esta variação, deve ocorrer uma variação de 0,4 V na tensão de controle:

Portanto: $\Delta U_c = 0,4 \text{ V}$

Ganho do Amplificador (GA):

O ganho do amplificador pode ser obtido por:

$$GA = \frac{\Delta U_c}{\Delta U_e}$$

Portanto: $GA = 645$

Resistência de Ganho (R_0):

Para um amplificador na configuração diferencial, ligado na ponte de

extensômetros, a resistência de ganho é calculada por:

$$R_0 = GA \cdot \frac{R_E}{2} = 113K\Omega$$

Por conveniência, foram utilizados resistores de precisão que estavam disponíveis

no laboratório. Tomou-se esta decisão pela necessidade de equalizar com uma boa

precisão os resistores de um amplificador na configuração diferencial, para garantir a

rejeição de ruído no modo comum. Assim: $R_0 = 100 K\Omega$

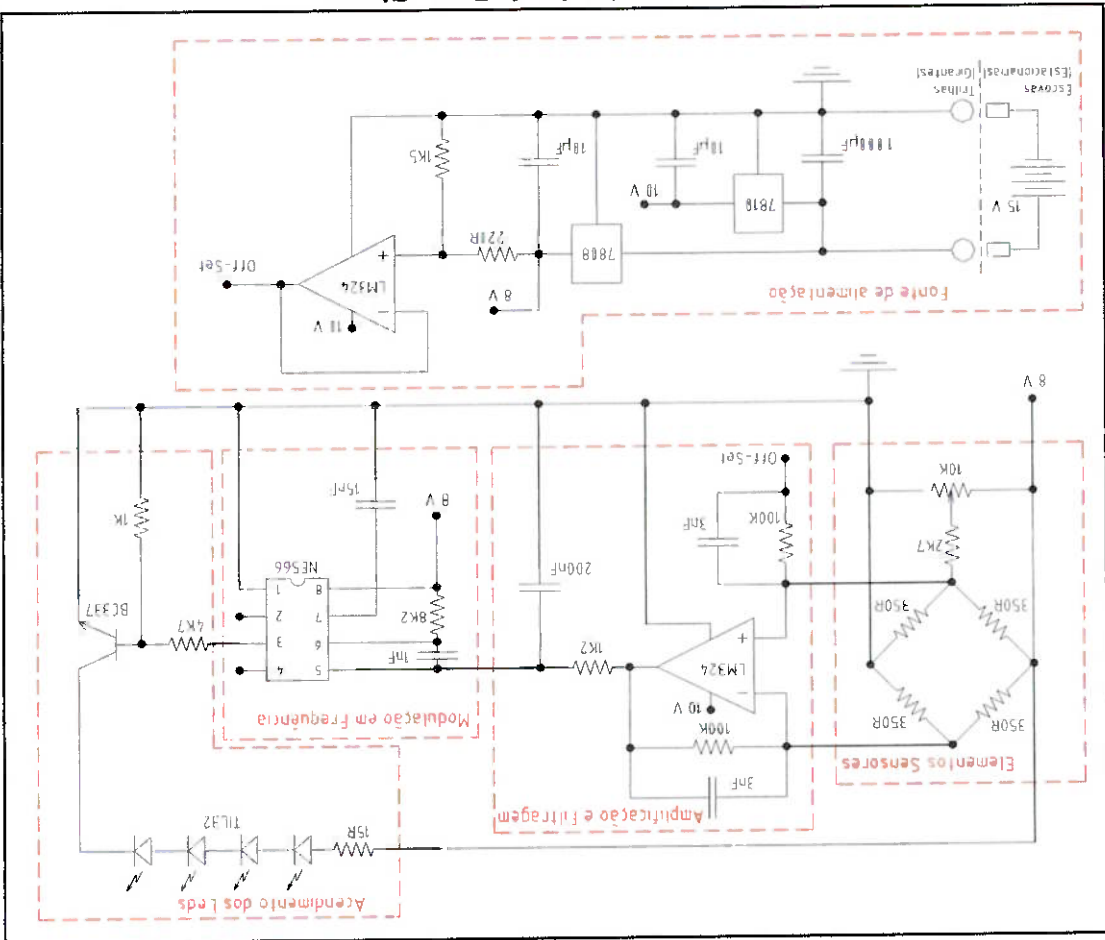
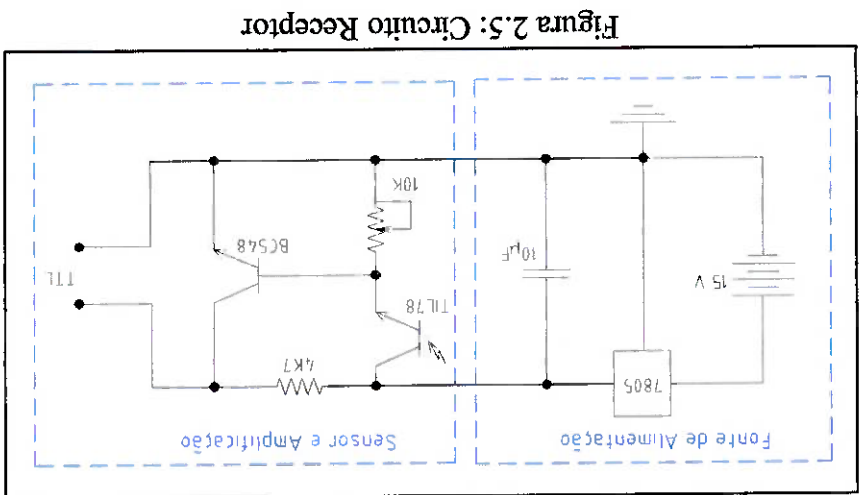


Figura 2.4: Circuito da Parte Girante

O circuito receptor, estacionário, é responsável por detectar o sinal dos leds da parte girante e amplificá-lo para o padrão TTL, para ser lido diretamente pela porta paralela do computador (Fregni, 1995). O circuito receptor é formado pelo conjunto elemento sensor e amplificação e pela fonte de alimentação. Esta consiste simplesmente de um estabilizador de 5,0 V e um capacitor.

O circuito funciona com base na saturação do transistor BC 548 provocada pela recepção de sinal luminoso pelo TTL 78. A saturação gera queda de tensão no resistor 4K7, levando a saída do circuito a tensão próxima de zero. A sensibilidade é ajustada pelo trimpot 10K. O ajuste adequado da sensibilidade eliminou muitos erros de leitura. Uma porta tipo schmitt trigger foi testada para "retificar" a saída do circuito. Entretanto percebeu-se que sem este elemento o computador obtve leituras menos sujeitas a ruídos. Este resultado pode ser observado e interpretado utilizando o osciloscópio para a observação simultânea dos dois sinais. Observou-se que o sinal sem passar pelo schmitt trigger não é um sinal absolutamente quadrado, possuindo uma certa inclinação nas transições. Nas transições também se percebe uma maior susceptibilidade a ruído. Esta característica fez com que a porta schmitt trigger, apesar da histereze inerente a estes dispositivos, gerasse nas transições comutações inexistentes. O hardware existente na porta paralela do PC detectou sem problemas as bordas de descida do sinal apesar da inclinação e da presença maior de ruído. O hardware da porta paralela funciona pelo princípio de detecção do gradiente do sinal, ao contrário da porta schmitt trigger que funciona através de limites de limites de tensão.



2.7 Captador Óptico

Segundo o modelo desenvolvido por Ferreira (1988), para se efetivar uma conexão óptica permanente entre a parte estacionária, utilizou-se um captador de formato elíptico. Um espelho elíptico tem a propriedade de desviar a luz que incide na direção radial a um de seus focos para o outro foco. Os leds da parte girante da conexão óptica, em número de quatro, foram instalados radialmente ao eixo da ferramenta igualmente espaçados. Cabe ressaltar que os leds são de acendimento simultâneo. Como estes leds possuem um feixe de luz razoavelmente direcionado, pode-se imaginar que o feixe emitido tem a direção radial ao eixo da ferramenta. Assim ao colocarmos um dos focos de um espelho elíptico coincidindo com o eixo da ferramenta, a luz emitida pelos leds é desviada para o outro foco do espelho.

O captador, confeccionado em acrílico, evita uma maior dispersão da luz no caminho até o espelho, aproveitando o fenômeno da reflexão total dentro do captador, e, em princípio apenas, o espelho elíptico seria suficiente. O uso do captador também viabilizou a elaboração do espelho elíptico, o que foi feito apenas com a instalação de papel alumínio na superfície elíptica do captador.

Observou-se também que o receptor possuía pouca sensibilidade à luz que incide radialmente ao seu eixo, tendo uma sensibilidade muito maior à luz que incide em sua superfície frontal. Para contornar isto, o receptor não foi instalado diretamente no foco da elipse. Neste local foi instalado um elemento que desvia a luz que incide radialmente para uma direção perpendicular ao plano da elipse e o receptor foi instalado então na extremidade do elemento. O captador cobre um ângulo maior que o necessário para garantir a recepção constante, independentemente da rotação da ferramenta, para se

conseguir pelo menos dois leds enviando sinal simultaneamente. Esta configuração proporcionou um sinal bastante forte, dispensando o uso de um circuito amplificador mais elaborado e assim também se eliminou a necessidade de filtrar os ruídos provenientes da luz ambiente ou de outras fontes.

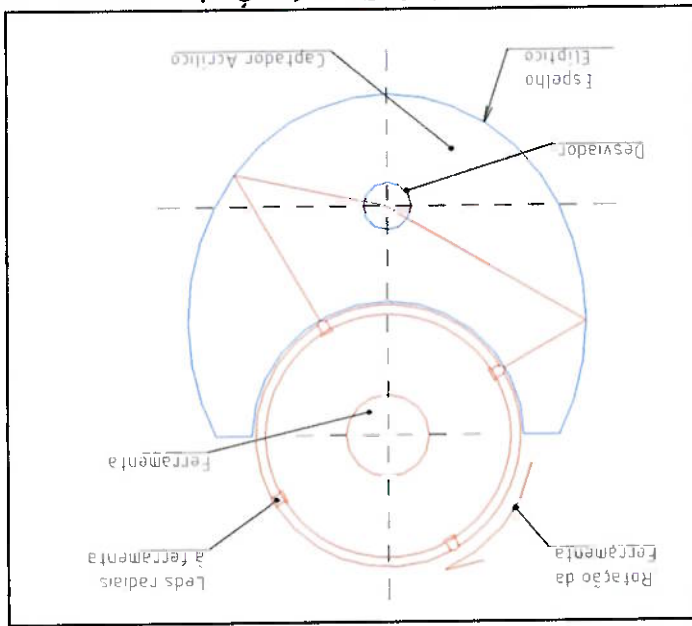


Figura 2.6: Captador Óptico

2.8 Conjunto Mecânico

O primeiro passo para o projeto mecânico foi a escolha da ferramenta a instrumentar. A ferramenta escolhida foi uma fresa de topo helicoidal de 2 cortes de 25 mm de diâmetro (DIN 326), que já havia sido utilizada, em pesquisas semelhantes, pelo Dr. Marcelo Teixeira. Foi dada preferência a este tipo ferramenta por ser utilizado para fresamento pesado e operações de corte cheio (fresamento de ranhuras), operações que seriam as mais beneficiadas por um sistema de monitoramento como o proposto. Para facilitar a instrumentação, desejava-se uma ferramenta com um diâmetro razoável.

Adotou-se a ferramenta de 25 mm por ser este o maior diâmetro que se poderia utilizar com o conjunto de pinças disponível em nosso laboratório.

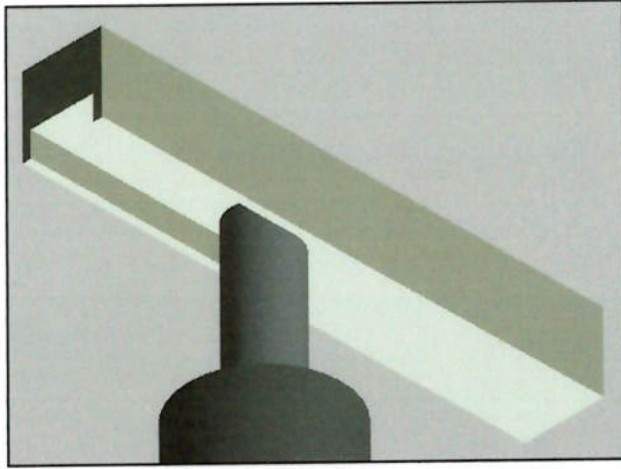


Figura 2.7: Operação de Ranhurado

Para se conseguir instalar todo o circuito da parte girante, tendo em vista a agressividade do meio, foi criado um alojamento hermético e rígido fixado na própria ferramenta por meio de parafusos. Este alojamento deveria dar também sustentação mecânica para os leds e para as trilhas da alimentação por escovas. Outra função importante do alojamento é a de dar proteção aos extensômetros colados na ferramenta. A parte estacionária, referindo-se aqui especificamente ao captador e às escovas de alimentação, deveriam ser fixados na estrutura da fresadora. Esta fixação é bastante crítica tendo em vista a alimentação por escovas e o sensível posicionamento do captador em relação aos leds para que a conexão óptica se efetive. O projeto final dos componentes mecânicos e o protótipo desenvolvido podem ser vistos na figura 2.8 e nas fotos 2.2 a 2.6.

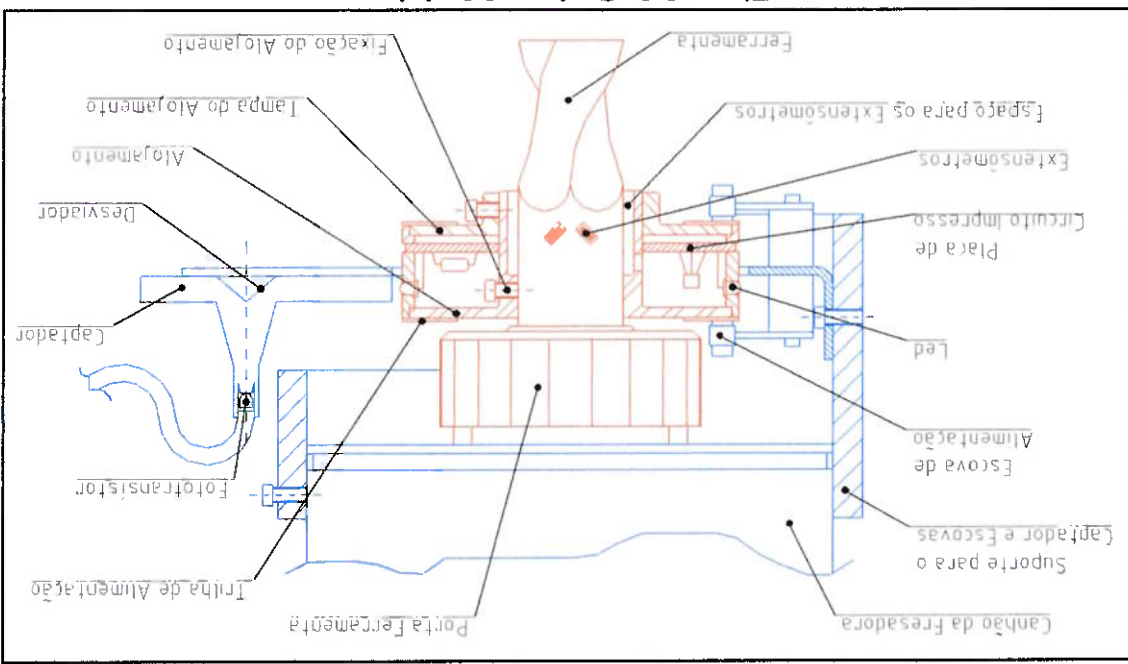


Figura 2.8: Conjunto Mecânico

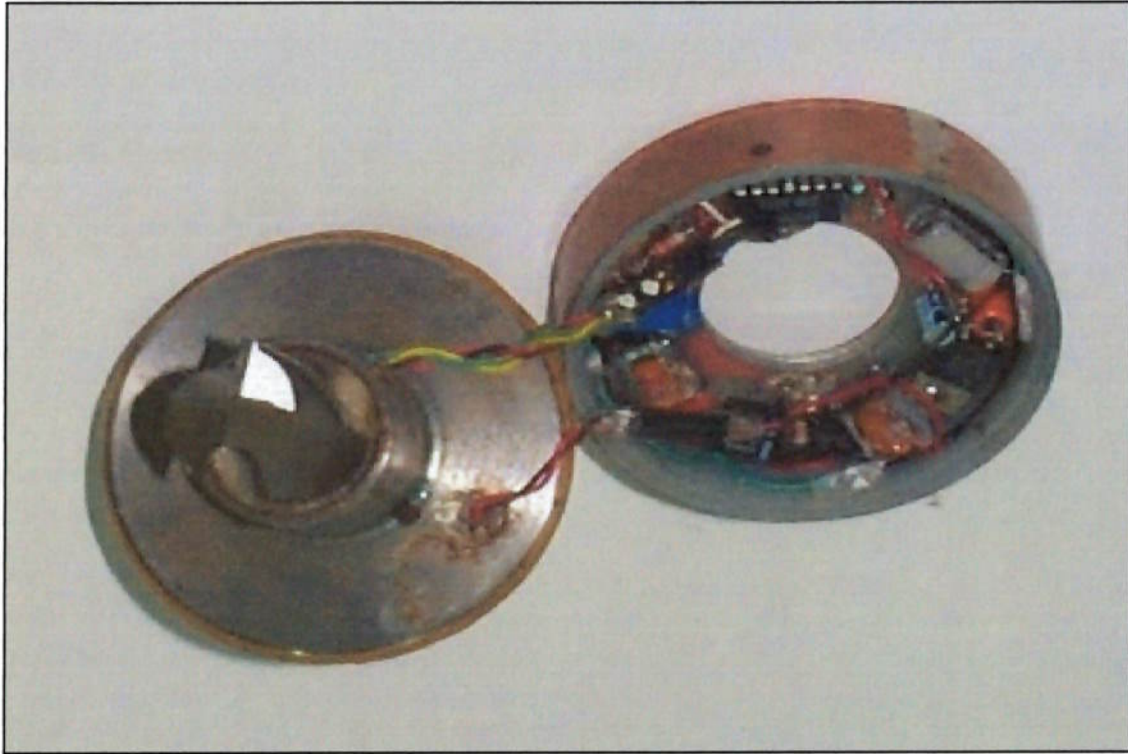


Foto 2.2: Conjunto Girante Aberto



Foto 2.3: Conjunto Girante e Pinça Porta Ferramenta

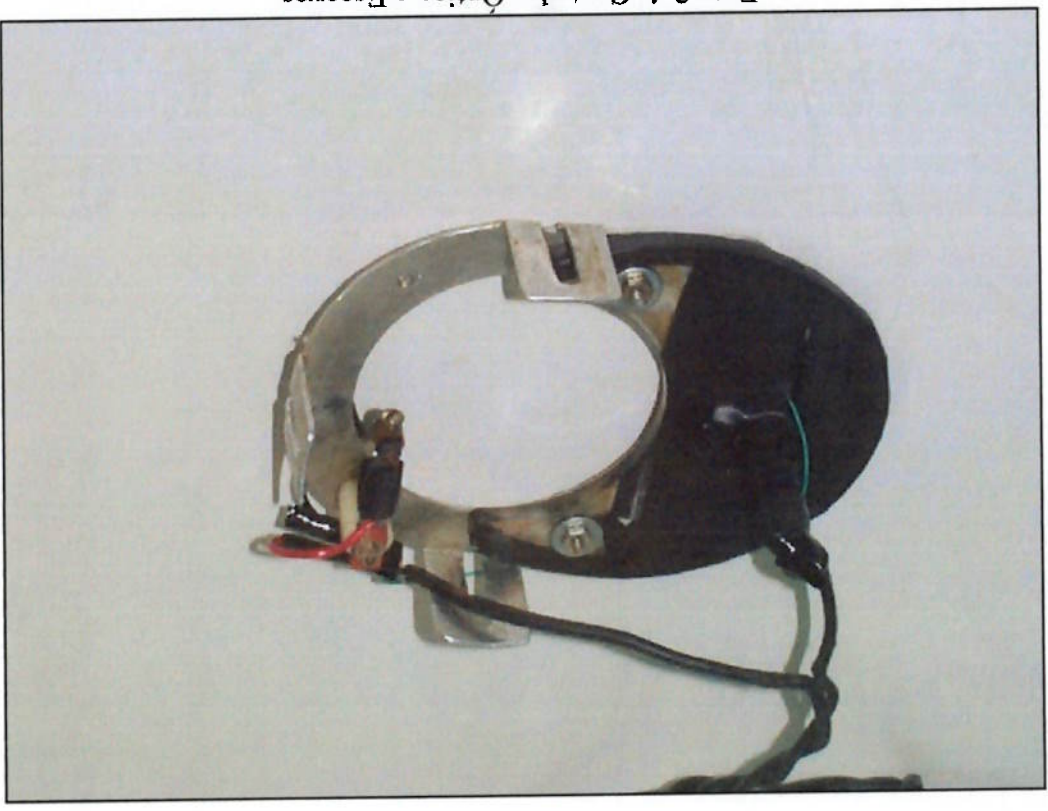


Foto 2.4: Captador Óptico e Escovas

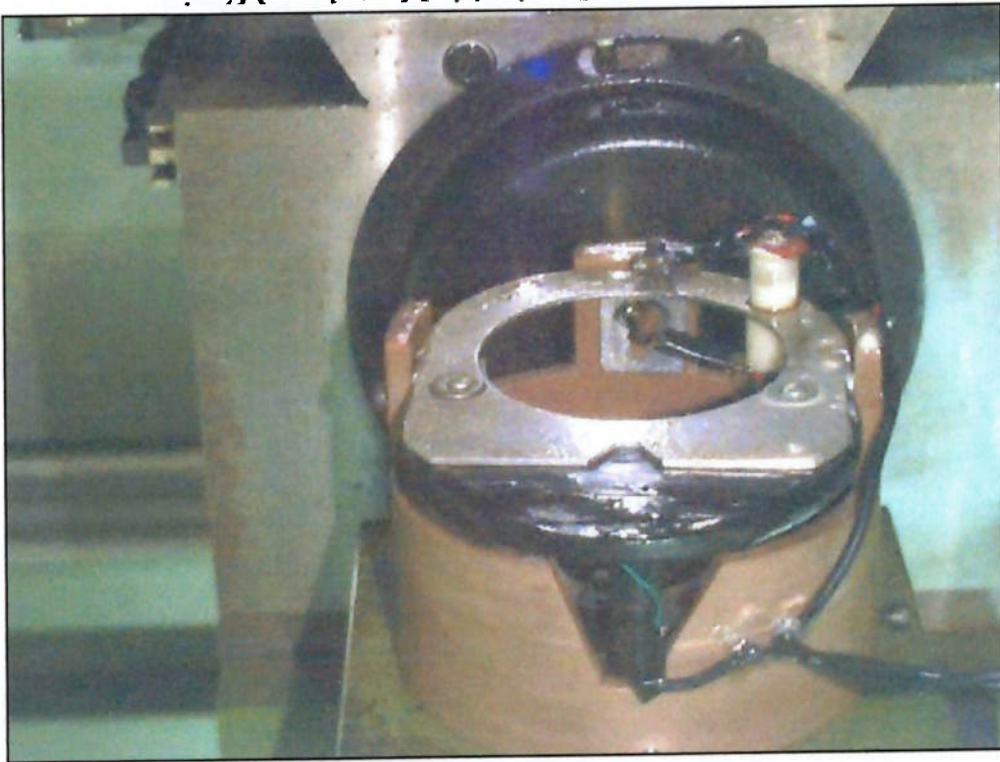


Foto 2.5: Conjunto Estacionário Montado na Máquina

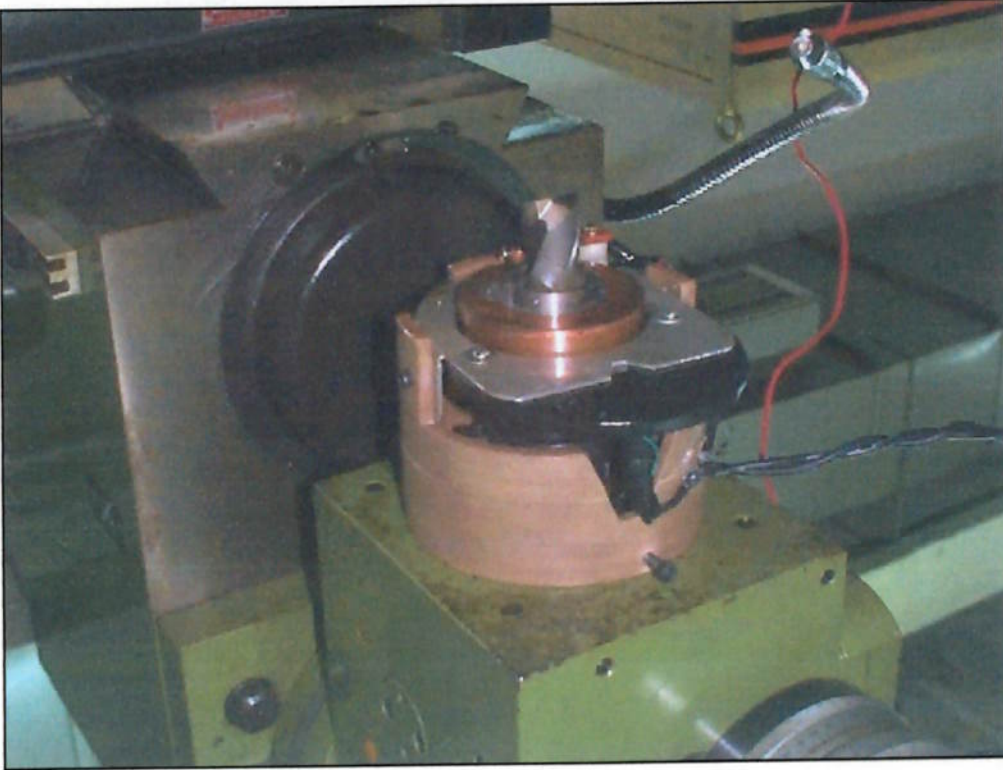


Foto 2.6: Conjunto Completo Montado na Fresadora

2.9 Problemas Enfrentados no Desenvolvimento

2.9.1 Recepção do Sinal:

O circuito receptor desenvolvido inicialmente não possuía sensibilidade para receber o sinal através do captador óptico. O primeiro passo para solucionar este problema foi o seu aprimoramento através de polimento e otimização para obter-se o maior sinal possível. O desviador utilizado no captador também foi desenvolvido neste sentido. As melhorias desenvolvidas no captador, apesar do aumento do sinal, ainda não foram suficientes para obtenção de uma leitura confiável, sendo necessário o aprimoramento do circuito receptor. Inicialmente foi experimentada utilização de um amplificador operacional, o que proporcionou um bom resultado, apesar do aparecimento de um ruído que não pode ser facilmente eliminado. Assim melhorou-se empiricamente o circuito original com a introdução de um transistor de maior ganho e adequação dos resistores. Também foi retirado um *led* que originalmente indicava a recepção do sinal e que foi, posteriormente, incluído na saída do circuito, onde já não afetava mais a sensibilidade. Estas mudanças proporcionaram um excelente sinal, forte e “limpo” o suficiente para ser lido sem erros pelo computador.

2.9.2 Ruídos:

O ruídos observados foram classificados em três tipos:

- Ruído Devido a Resolução: Como descrito anteriormente, provocado pela relativamente baixa frequência do clock do computador utilizado. Este ruído, para a frequência de modulação utilizada, provocava um desvio em torno de 0,7% na

frequência lida. Este erro apesar de não ser suficientemente pequeno, provocava no espectro do sinal um ruído praticamente branco, considerado tolerável.

- Erros de Leitura: Quando o sistema de medição foi instalado na máquina ocorreram erros de leitura provocados por ruídos, ou seja, o computador detectava bordas que não estavam ocorrendo de fato. Pode-se admitir que este tipo de erro tem características digitais, pois ocorre na parte do sinal já modulado em frequência, ou seja, não altera a informação contida no sinal, desde que o sinal possa ser lido corretamente. Para isso este ruído tinha que ser eliminado.

- Ruídos Analógicos: Detectou-se, também, no espectro do sinal outros ruídos que são considerados de características analógicas; entre eles pode-se citar o tradicional ruído de 60 Hz provocado pela rede de energia. Também se considerou como ruído analógico o que apareceu na frequência de rotação da ferramenta.

Muitas melhorias foram introduzidas para eliminar os últimos dois tipos de ruído, algumas com bons resultados, outras não apresentando os resultados esperados. Algumas destas medidas são descritas a seguir por se considerar que os resultados obtidos são de grande valia para trabalhos futuros:

- Utilização de cabo com malha de proteção aterrada para levar o sinal do fototransistor até o circuito receptor (cabo utilizado normalmente em microfones).
- Instalação de um novo fio terra na estrutura da máquina, vindo do mesmo ponto de aterramento do circuito e do computador. Ressalte-se aqui que por falta de alternativa, o negativo dos dois circuitos foi ligado a este terra.
- Instalação do circuito receptor em caixa metálica aterrada. O circuito da parte girante também foi protegido com uma folha de cobre, também aterrada.

Estas três primeiras medidas básicas foram suficientes para conseguir as primeiras medições, ou seja para eliminar os erros de leitura. Observando-se o espectro obtido com as primeiras leituras, percebeu-se a presença do ruído de 60 Hz. As seguintes medidas foram adotadas para minimizá-lo:

- Utilização de um cabo com malha aterrada também para a alimentação do circuito da parte girante.

- Aterramento do cabeçote superior da máquina.

- Alteração na configuração da fonte de alimentação básica dos dois circuitos, introduzindo também nesta fonte um estabilizador 7815.

- Introdução de uma separação metálica dentro da caixa, também metálica, onde estava instalado o circuito receptor. Nesta separação foi colocada a fonte para os dois circuitos, que consiste de transformador, diodos, capacitores e o estabilizador.

Detectou-se também um pequeno ruído na frequência de rotação da ferramenta. Na tentativa de diminuir este problema foi introduzido um pequeno indutor na alimentação do circuito girante. Além disso, também houve um esforço para maximizar a planicidade das trilhas de alimentação, por onde deslizam as escovas. Estas medidas não apresentaram o resultado esperado: mas, observou-se, ao coletar sinais com a ferramenta usinando efetivamente, que este ruído era desprezível quando comparado com o sinal do torque; assim este problema foi desprezado sem prejuízo na qualidade do sinal obtido.

Foto 2.8: Caixa Metálica do Circuito Receptor e Fonte de Alimentação

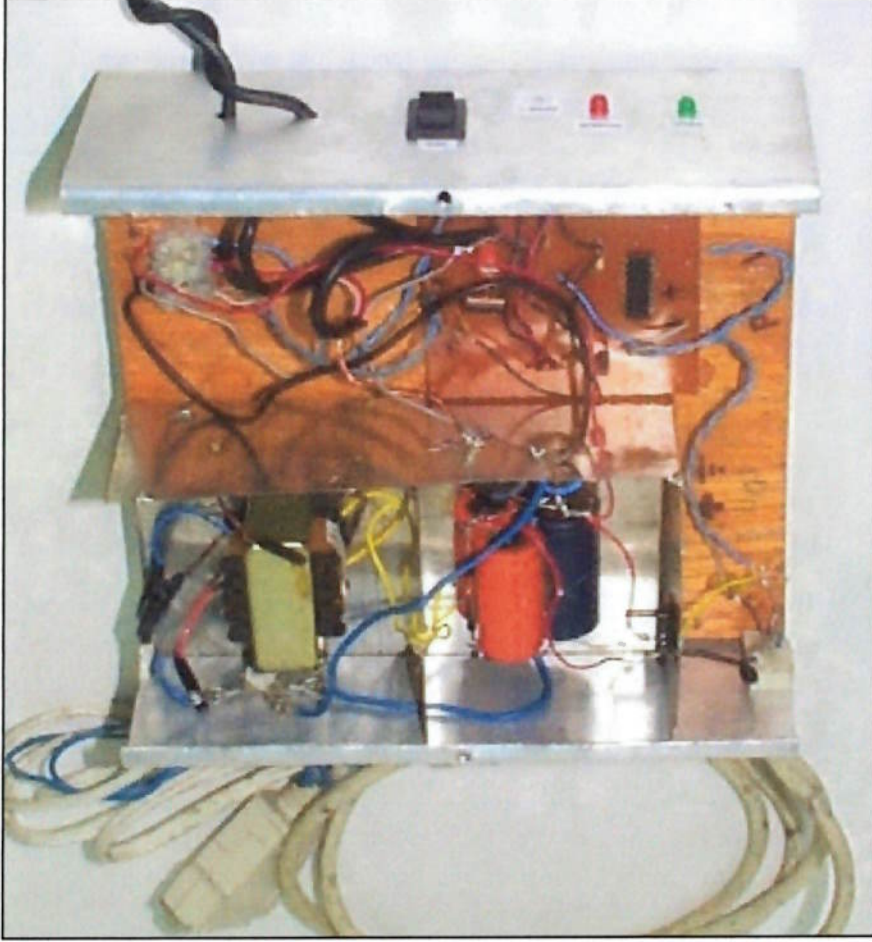


Foto 2.7: Circuito Receptor e Conjunto Mecânico



2.9.3 Instabilidade Térmica:

O problema mais grave enfrentado foi a instabilidade térmica. A frequência gerada pelo circuito, que corresponde ao torque, variava quando o circuito permanecia ligado um certo tempo e se aquecia. Com a primeira ferramenta instrumentada, o circuito apresentou uma instabilidade muito acentuada, chegando a atingir uma variação de 47% em relação à frequência inicial.

Com o objetivo de localizar a fonte desta variação, inverteu-se a ligação dos extensômetros, o que provocou a inversão da variação. Assim, pode-se concluir que o problema era gerado pelos extensômetros. Isto foi confirmado em testes realizados com equipamento comercial de amplificação aplicado na ferramenta instrumentada. O circuito amplificador também foi testado utilizando uma célula de carga comercial, e não se percebeu nenhuma instabilidade expressiva. O problema nos extensômetros foi atribuído a alguma imperfeição durante a colagem dos extensômetros: por serem muito pequenos a dissipação de calor se torna crítica. Assim, qualquer pequena diferença na capacidade de dissipação provoca um aquecimento desigual destes elementos, o que desequilibra a ponte e gera a instabilidade.

Decidiu-se instrumentar uma nova ferramenta, utilizando extensômetros maiores, com maior capacidade de dissipação de calor, mais adequados a tensão de 8,0 V adotada. Com estes novos extensômetros, o equipamento ainda apresentou uma pequena instabilidade que não ultrapassou 1,5%, chegando à estabilização após duas horas, em média. Não se conseguiu localizar a fonte desta instabilidade. Na próxima seção serão apresentadas considerações a respeito da instabilidade que permaneceu, e como o problema foi parcialmente contornado.

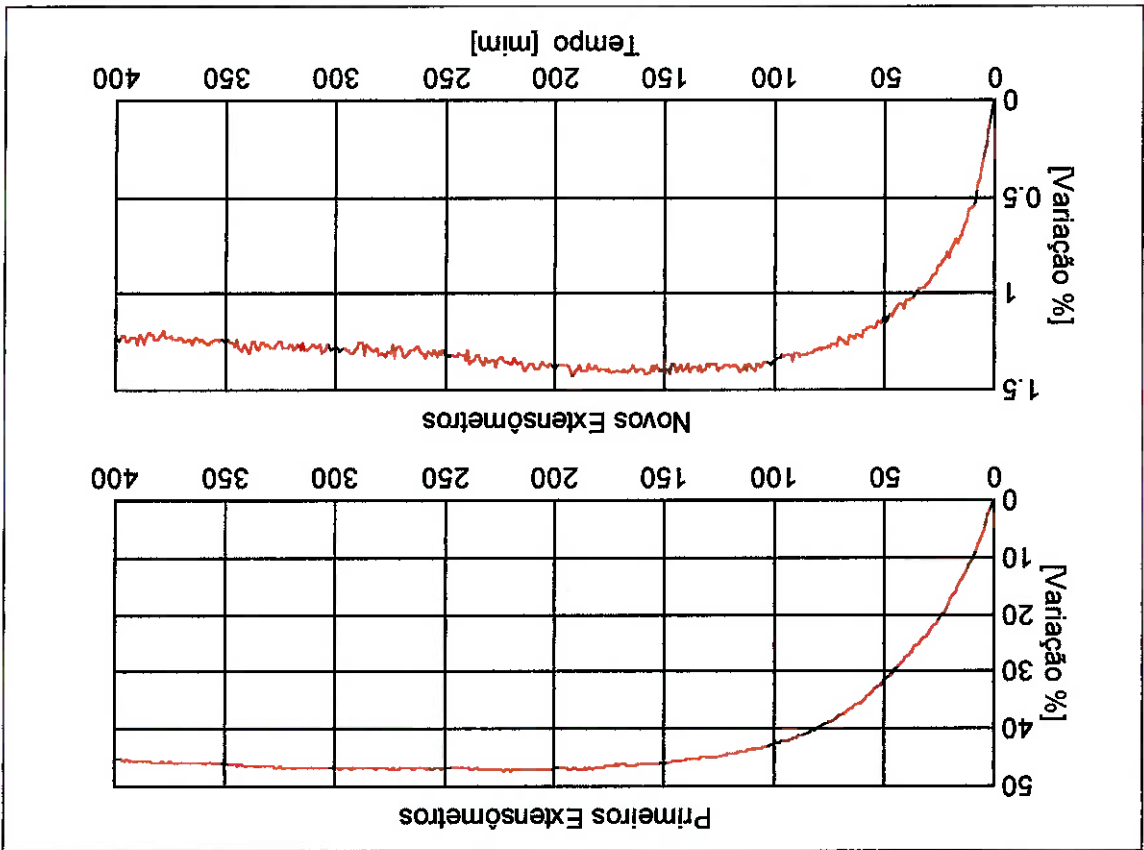


Figura 2.9: Instabilidade Térmica.

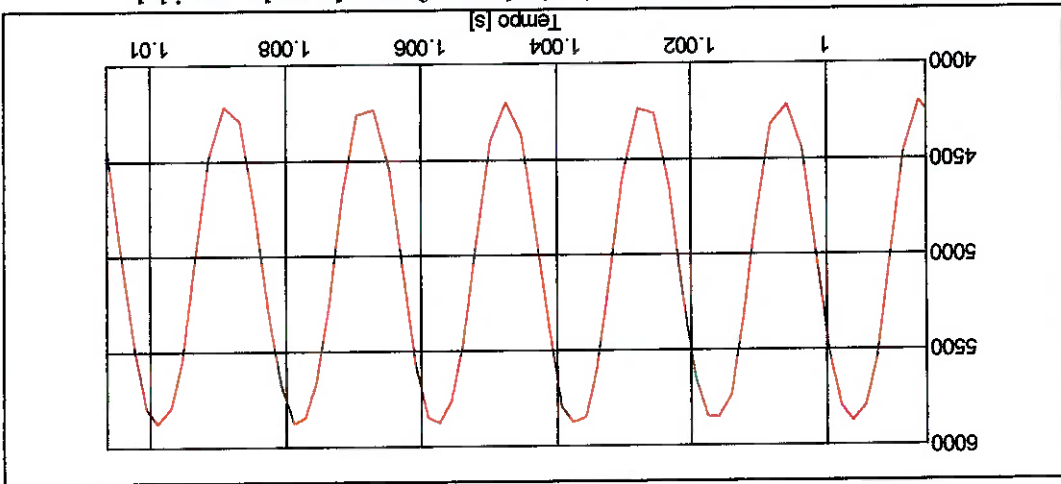
2.10 Testes de Validação e Análise Crítica do Desempenho

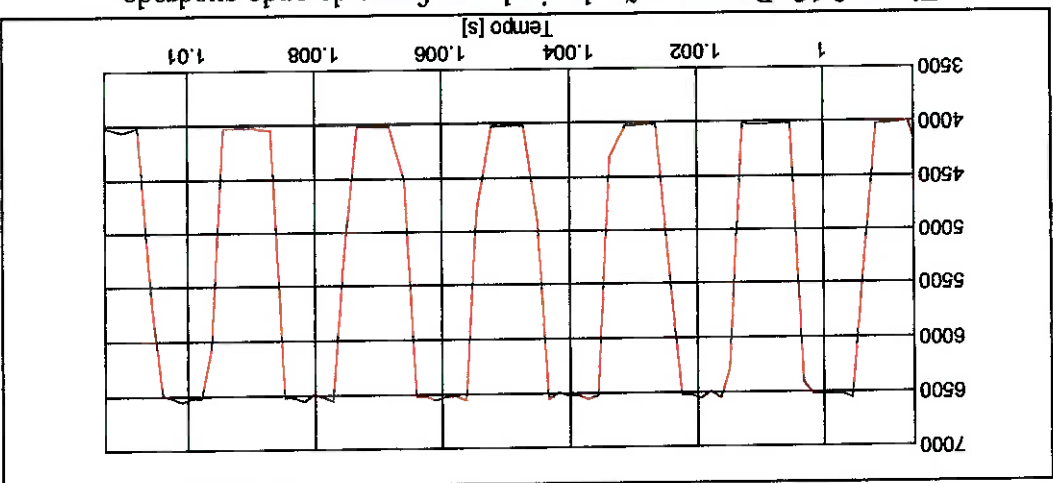
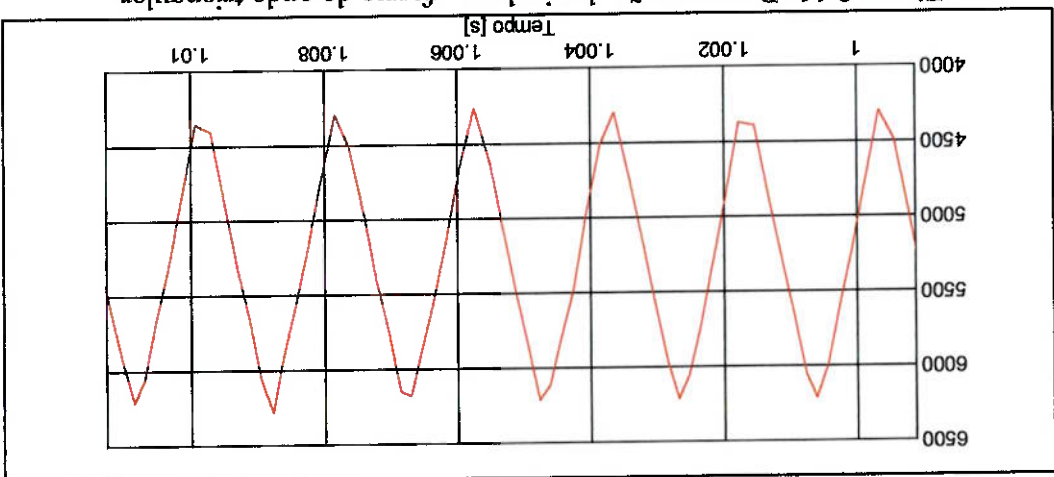
2.10.1 Comprovação do Método de Aquisição de Dados:

Para validação do método de aquisição dinâmica de dados, foram realizados testes utilizando uma fonte conhecida de sinal: um gerador de sinais foi ligado ao circuito da parte girante, com o objetivo de simular um sinal real. Assim foram realizadas coletas de dados com o gerador de sinais ajustado em 500 Hz e com diferentes formas de onda.

Realizou-se uma primeira análise com o objetivo de verificar a capacidade de

recuperação da forma de onda do sinal original: organizando-se os arquivos de dados, inserindo neles uma escala de tempo, com a localização dos pontos baseada no método descrito anteriormente, ou seja, no instante médio entre as bordas detectadas. Nesta análise, a interpolação não foi utilizada, pois todos os pontos do arquivo de dados foram utilizados. A “plotagem” dos resultados mostra que se obteve uma boa recuperação do forma de onda do sinal original.



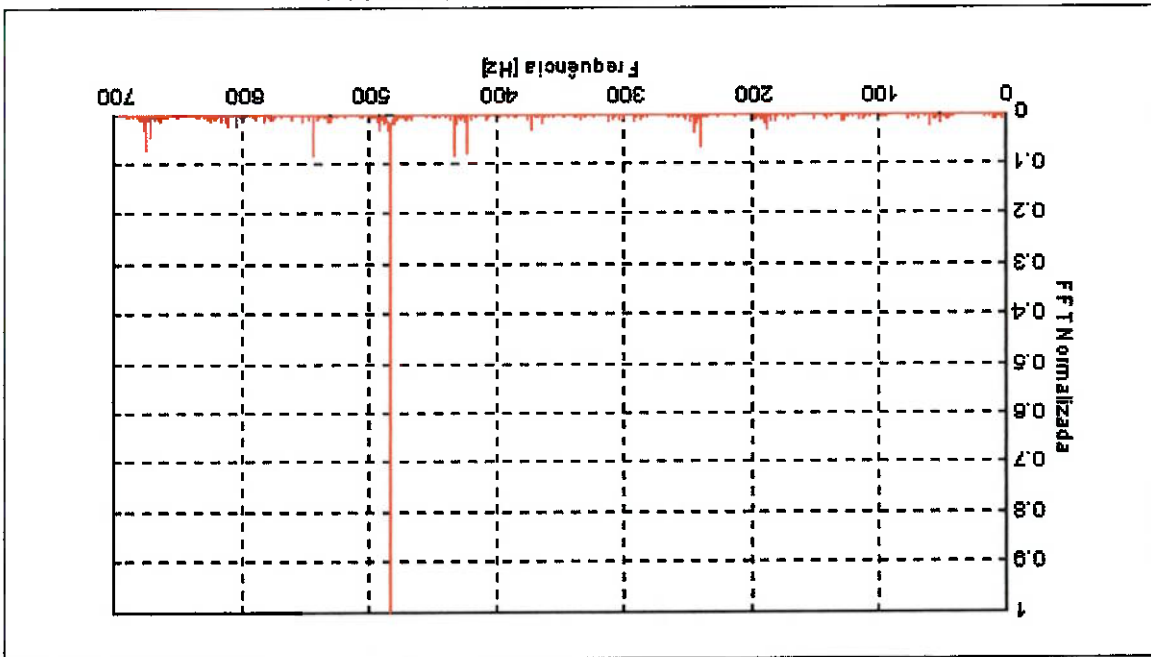


O espectro do sinal senoidal foi calculado, e pode-se comprovar a capacidade do sistema de obter uma análise em frequência coerente. Observou-se que o espectro do sinal recuperado é muito próximo do ideal, ou seja, um pico em uma única frequência. Notou-se um pequeno desvio entre a frequência indicada pelo gerador de sinais, 500 Hz, e a frequência obtida no espectro calculado, 487 Hz. Comprovou-se, utilizando um osciloscópio, que este desvio era devido à imprecisão do visor do gerador de sinais, não sendo erro do método de amostragem utilizado, o qual, neste aspecto, apresentou elevada precisão.

2.10.2 Avaliação do Nível de Ruído:

Para avaliar a influência do ruído, comparou-se um sinal de torque obtido com a ferramenta em trabalho e um sinal coletado com a ferramenta girando em vazio. Nesta situação, todos os ruídos estão presentes mas não há torque aplicado, o que permite uma análise muito boa da relação sinal ruído. Nas figuras a seguir pode-se perceber que o ruído é muito pequeno quando comparado com o sinal, mesmo possuindo concentração de energia em algumas frequências de importância.

Na figura 2.13 observa-se o sinal e o ruído no tempo, sendo que o sinal mostrado corresponde ao final de uma coleta de dados, quando cessava o avanço da ferramenta. Neste instante o esforço na ferramenta é praticamente nulo. O sinal do ruído foi coletado em situação semelhante, com a ferramenta totalmente fora do corpo de prova. Na figura 2.14, apresenta-se o espectro do ruído, e finalmente, na figura 2.15 apresentados os espectros do sinal e do ruído em escala logarítmica.



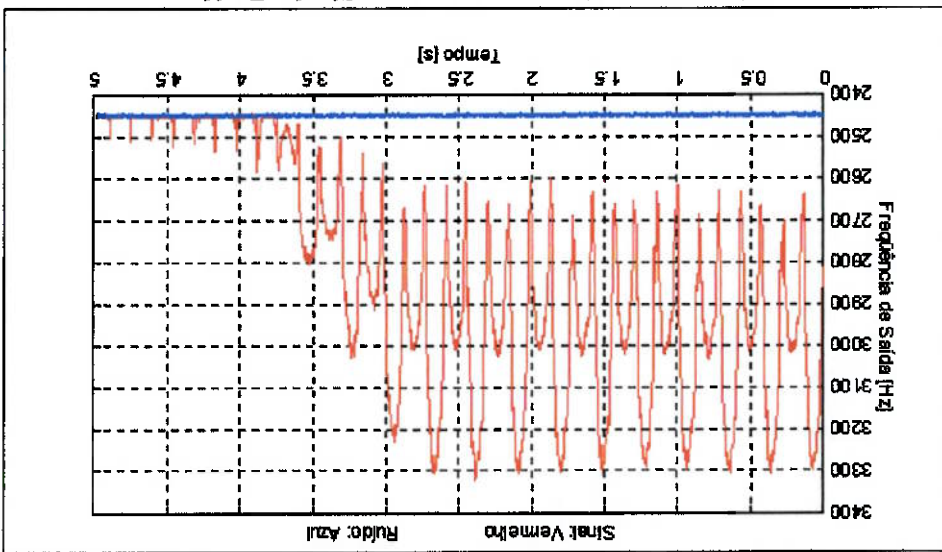


Figura 2.14: Comparação entre Sinal e Ruído

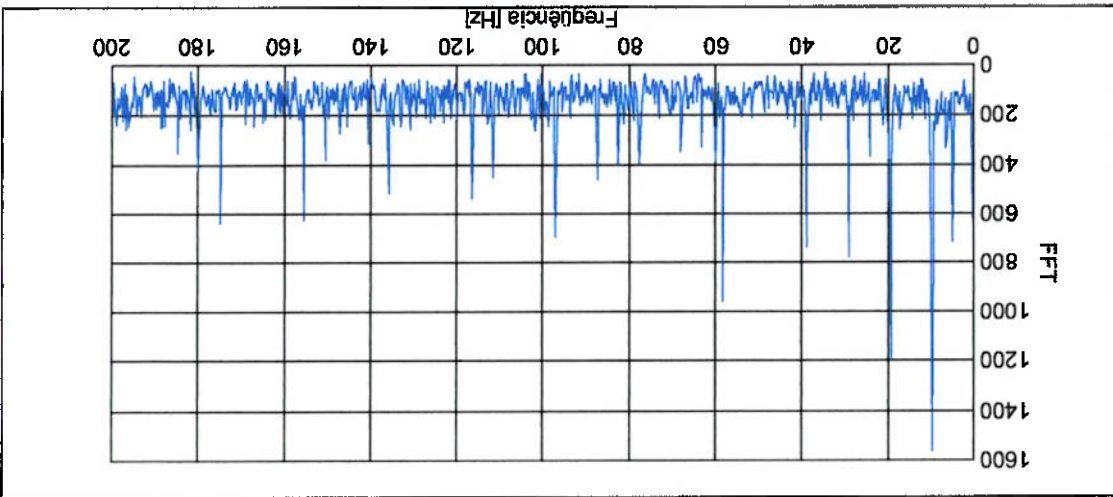


Figura 2.15: Espectro do ruído

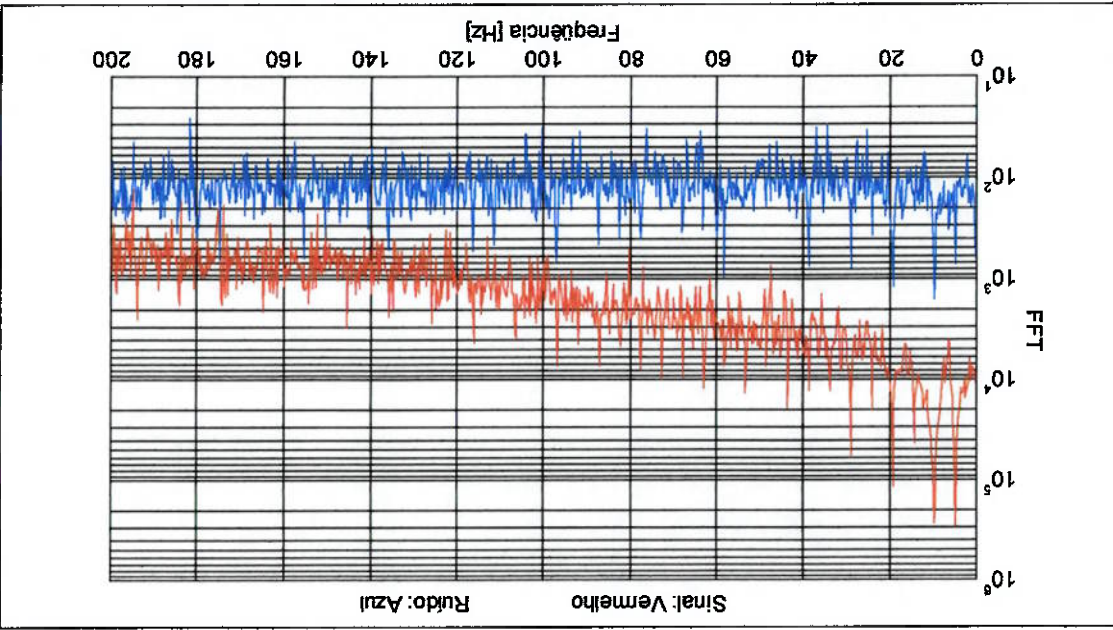


Figura 2.16: Comparação entre os Espectros do Sinal e do Ruído

2.10.3 Testes Usinando Com Profundidade Variável:

Sabendo que o torque de usinagem é aproximadamente proporcional à profundidade da passada, foram realizados testes com a profundidade variável para avaliar a linearidade dinâmica do transdutor. Os sinais obtidos nestas operações foram amostrados a 1000 Hz; porém, neste caso não é interessante a observação de variações tão rápidas do torque e o sinal foi filtrado através de um filtro digital passa baixa. Os resultados mostrados na figura 2.17 foram obtidos utilizando-se um filtro elíptico de 3ª ordem com frequência de corte 10^3 vezes a frequência de amostragem.

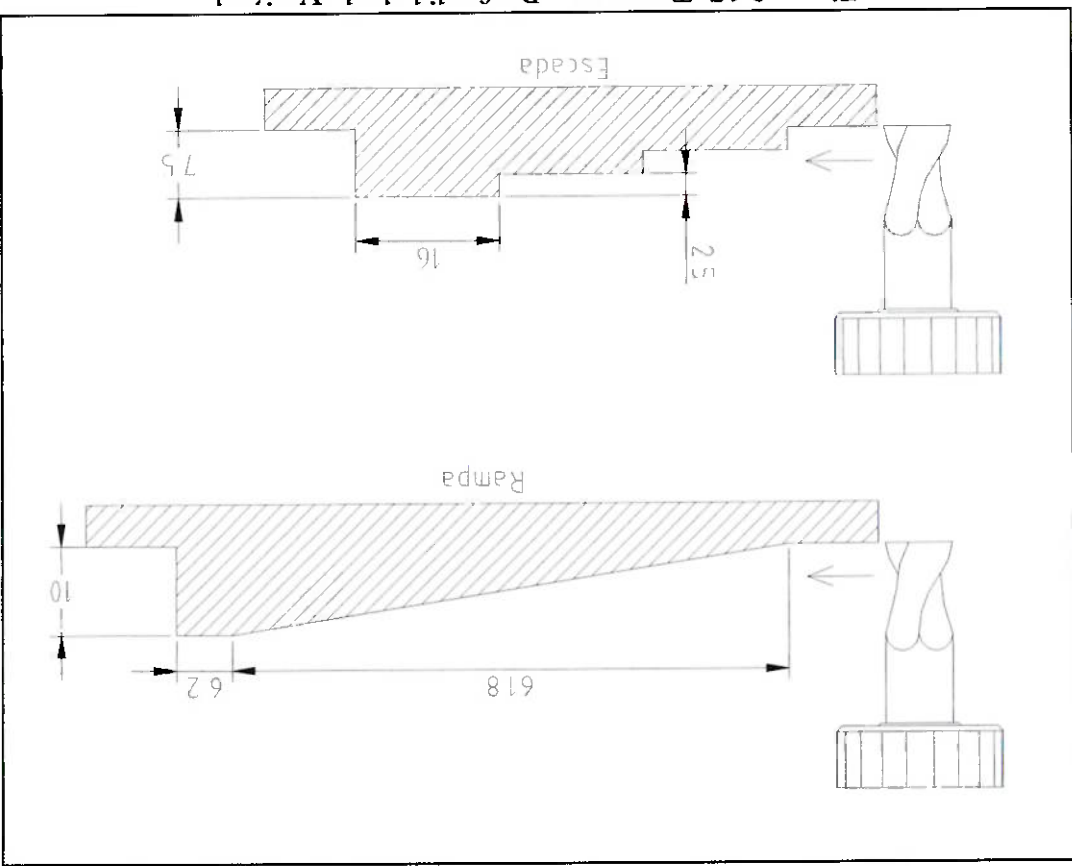


Figura 2.17: Testes com Profundidade de Variável

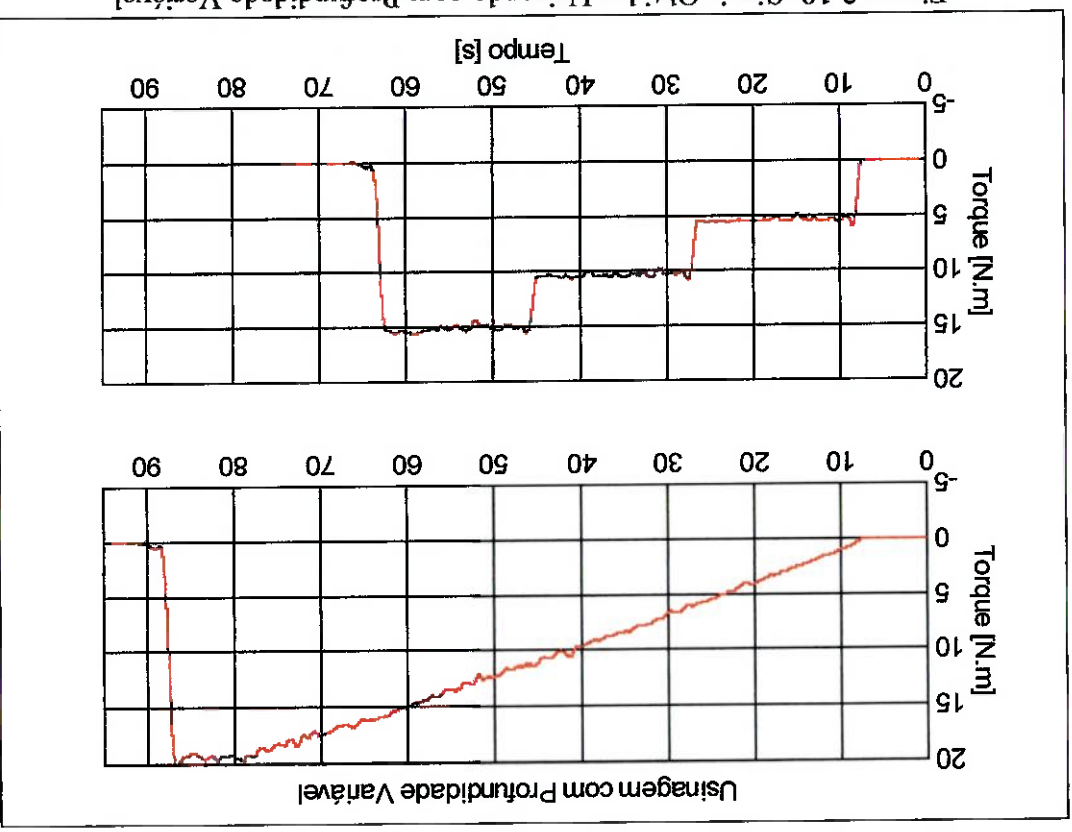


Figura 2.18: Sinais Obtidos Usinando com Profundidade Variável

2.10.4 Considerações sobre a Instabilidade Térmica:

Decidiu-se prosseguir nos testes, apesar da instabilidade que não se conseguiu eliminar, da ordem de 1,5%. Esta decisão foi apoiada nas seguintes premissas:

- O tempo de coleta de cada sinal, ou mesmo de vários sinais, é muito menor do que a dinâmica gerada pela instabilidade. Assim, a variação gerada pela instabilidade dentro de cada sinal é absolutamente desprezível;

- Pequenas variações na profundidade de corte, material dos corpos de prova ou do fluido de lubrificação geram, como a instabilidade, variações na amplitude do sinal. Diante disto, não era o objetivo deste trabalho monitorar o desgaste da ferramenta apenas com a observação da amplitude do sinal.

2.10.5 Calibração:

Calibrou-se o transdutor aplicando-se torques conhecidos. A ferramenta instrumentada foi fixada pela sua haste na placa de um torno mecânico. Na outra extremidade da ferramenta foi fixado um suporte e hastes de madeira com marcação de distância. Dois pesos de massas iguais e conhecidas foram posicionados nos pontos marcados nas hastes. Numa das hastes o peso foi pendurado através de uma roldana fixa, ao invés, de diretamente na haste, ou seja, forçando a haste para cima. Este arranjo com dois pesos foi utilizado para eliminar o efeito da flexão.

Com este experimento foram obtidos nove pontos, pelos quais foi ajustada uma reta. Os pontos experimentais se mostraram muito pouco dispersos da reta interpolada, o que significa uma boa linearidade do transdutor. As cargas aplicadas foram escolhidas para representar a faixa de torque à qual o transdutor foi submetido nos testes de

usagem. A equação da reta interpolada mostrada a seguir, pode ser considerada a equação de conversão, que transforma os dados modulados em frequência, na unidade apropriada para medição de torque:

$$T = 0.03257 \cdot F - 85.40$$

Onde: T é o torque aplicado [N.m];

F é a frequência emitida pelo transdutor [Hz].

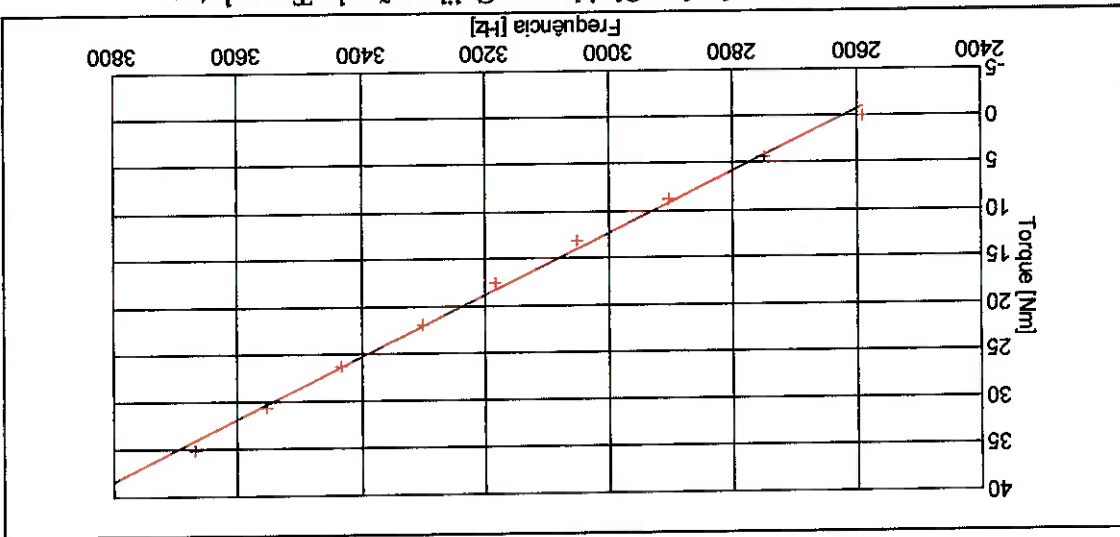


Figura 2.19: Resultados Obtidos na Calibração do Transdutor

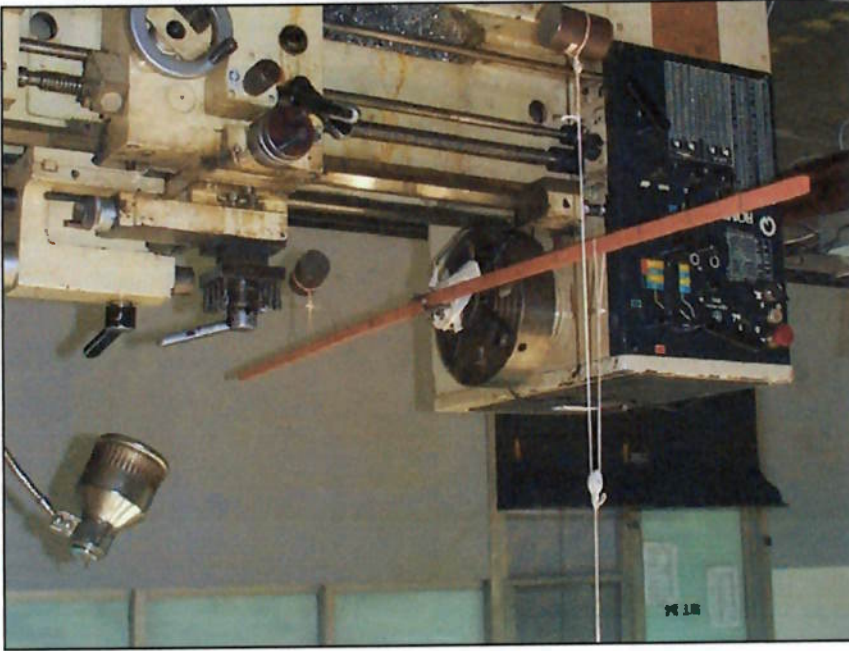


Foto 2.9: Arranjo Experimental Utilizado para Calibração

3. COLETA DOS DADOS DE USINAGEM

3.1 Descrição das Condições Laboratoriais

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Máquinas da Escola Politécnica da USP, utilizando-se uma Fresadora CNC Universal TRAUB, modelo TND 60, fabricada em 1986. Vale a pena destacar-se, que o sistema de acionamento do eixo - árvore se baseia em motor de indução com caixa de velocidades manual, ou seja, não é possível variar a rotação do eixo árvore via programação. Para a coleta e gravação dos dados, o equipamento desenvolvido foi acoplado a um computador Pentium 100 MHz. Como mencionado anteriormente, a ferramenta adotada foi uma fresa de topo helicoidal de 2 cortes de 25 mm de diâmetro (DIN 326), construída em aço rápido que foi fixada normalmente através de pinça.



Foto 3.1: Vista dos equipamentos Utilizados

3.2 Procedimento Experimental

Foram utilizados corpos de prova de SAE 1020, cortados de barras quadradas treilhadas a frio de 32 mm. Uma camada superficial de 0.5 mm foi extraída das superfícies para tornar o material mais homogêneo. As dimensões dos corpos de prova eram 200x32x31 mm. Foi medida a dureza de todos os corpos de prova utilizados, obtendo-se valores muito similares, em torno de 170 Brinel, comprovando uma uniformidade entre eles. A geometria dos corpos de prova foi escolhida de modo a facilitar a fixação por morsa, garantindo a rigidez e para permitir que a operação de ranhurado tivesse um bom aproveitamento do material.

Os ensaios visavam observar a evolução do sinal de torque, à medida que ocorria o desgaste da ferramenta, e esta observação realizada com diferentes parâmetros de corte para ser mais conclusiva. Além disso, também se deu importância na geração de uma boa e consistente massa de dados, tornando possível o desenvolvimento de métodos de análise que pudessem extrair do sinal de torque a característica “desgaste”. Concionou-se adotar uma profundidade constante de 8 mm para proporcionar um desgaste uniforme da aresta de corte, pois do contrário a parte inferior da aresta de corte se desgastaria mais que a parte superior, o que dificultaria a interpretação dos resultados. A efetividade desta abordagem foi comprovada em testes preliminares que mostraram que a profundidade da operação influa apenas na amplitude do sinal. A determinação das velocidades básicas de corte e de avanço foi baseada no recomendado pelo *Machinability Data Center (1980)* e adotou-se uma variação negativa em torno da recomendada para obter os diferentes parâmetros a serem utilizados. Adotou-se uma

variação negativa para permitir que uma maior massa de dados fosse gerada antes que um desgaste mais acentuado se iniciasse.

Ferramenta: Fresa de Topo $\varnothing_F = 25 \text{ mm}$ $X = 2 \text{ dentes}$

Corpo de Prova: Ago 1020 Trefilado Dureza = 170 HB

Dados de Usinagem Recomendados pelo Machinability Data Center (1980):

Profundidade Adotada (F_p): 8 mm

Avanço por Dente (a_D): maior que 0,089 mm

Velocidade de Corte (V_C): maior que 27 m/min

Aplicando-se uma pequena variação negativa, quatro diferentes parâmetros de máquina foram obtidos e utilizados durante a maior parte dos ensaios. Ao final da vida da ferramenta, alguns dados foram coletados com velocidades de corte bem superiores à calculada. Com isso provocou-se um desgaste mais acelerado da ferramenta, e também pode-se verificar a eficiência do transdutor atuando em condições bastante severas.

Operação	Rotação [RPM]	Vel. de Avanço [mm/min]
1	280	39
2	280	50
3	355	50
4 (Calculada)	355	64
5	450	64
6	560	78
7	710	99

Tabela 3.1: Parâmetros de Máquina Utilizados

Os experimentos foram realizados usinando-se um pequeno trecho do corpo de prova com cada parâmetro e observando-se visualmente e através de torque o estado da aresta de corte e o acabamento superficial obtido. Assim foram obtidos dados com os diferentes parâmetros ao longo da vida da ferramenta. Para cada trecho usinado foi gravado um conjunto de arquivos.

Observou-se durante a coleta dos arquivos que algumas vezes cavacos eram arrastados pela ferramenta gerando um pico de força na ferramenta; o efeito desta ocorrência podia ser observado pela rápida variação no som produzido pela ferramenta, semelhante a algum tipo de impacto e no sinal coletado, este fenômeno se reflete na forma de um pico rápido de força. Decidiu-se eliminar este distúrbio retirando-se os cavacos das proximidades da ferramenta durante a usinagem, com o auxílio de uma pequena espátula.

Foram coletados dados até que a ferramenta estivesse visivelmente desgastada, o que era evidenciado pela formação de rebarbas e pelo mau acabamento obtido na superfície usinada do corpo de prova; além disso começaram a aparecer marcas claras de desgaste nas arestas de corte da ferramenta. Segundo **Theegarten (1950)**, as fresas de aço rápido devem ser realfiadas assim que se começa a notar sinais de desgaste, com o objetivo de evitar que a realfição seja muito onerosa ou mesmo inviável, inutilizando a ferramenta. Nos nossos experimentos, continuou-se coletando dados um pouco após atingido um nível de desgaste para o qual se recomenda a realfição da ferramenta, para gerar uma quantidade razoável de dados obtidos com a ferramenta desgastada, ou seja, quando atingido o instante de troca.

3.3 Imprevistos Durante a Coleta de Dados

Para checagem do instrumento e reaperto, a ferramenta teve que ser retirada e recolocada no porta - ferramenta. Registraram-se os instantes destas operações , e, após análise detalhada dos sinais, percebeu-se que houve um distúrbio nestes pontos.

Um outro imprevisto que não pode ser evitado, foi a presença de alguma instabilidade no ponto “zero” do transdutor. Este fato, foi percebido após a realização dos experimentos, durante a fase de análise dos dados. A solução para contornar este problema foi aproveitar, para cada sinal, a parte do sinal na qual a ferramenta ainda não estava trabalhando. Esta referência foi utilizada para achar o “zero” de cada sinal.

Também não foi possível manter-se durante os experimentos um controle preciso da profundidade de corte, devido principalmente à dificuldade em posicionar-se os corpos de provas com precisão. Este fato, associado à instabilidade do ponto zero, impediu a utilização, com confiabilidade, da amplitude do sinal. Apesar destes problemas que afetaram a amplitude do sinal, cabe destacar que optou-se por não realizar nova coleta de dados, tendo em vista que um sistema para monitoramento de desgaste não deve ser afetado pela variação da amplitude do sinal.

4. ANÁLISE DOS SINAIS

4.1 Características Básicas do Sinal de Torque

Serão apresentados alguns sinais úteis para caracterizar o sinal de torque, permitindo entender o comportamento e a dinâmica do sinal. A figura 4.1 mostra o aspecto do sinal padrão, ou seja, quando a ferramenta está totalmente imersa no corpo de prova. Neste sinal cada lobo corresponde ao trabalho de uma aresta de corte da ferramenta, num total de duas. A característica marcante deste sinal é a diferença entre os lobos, provocada principalmente pela excentricidade da ferramenta, provocando que uma das arestas retire mais material que a outra, gerando esta visível desigualdade de forças. Esta característica se repetiu em toda as amostras coletadas, independentemente do parâmetro utilizado.

Nos espectros dos sinais padrão, o primeiro pico corresponde à frequência de rotação da fresa e os outros picos são múltiplos desta frequência. O espectro mostrado na figura 4.2 foi obtido da seguinte forma: um conjunto de dados de 8192 pontos foi separado em dois blocos de 4096 pontos cada: em seguida a parcela constante de cada bloco foi eliminada através da subtração da média do bloco e foi calculada a FFT de cada bloco. O espectro mostrado é a média das FFT's dos dois blocos.

Alguns sinais foram afetados por cavacos que foram arrastados e usinados junto com o material novo. Este fenômeno se reflete no sinal de torque na forma de picos estreitos que se sobressaem dos lobos normais do sinal. A figura 4.3 mostra este distúrbio em um sinal padrão.

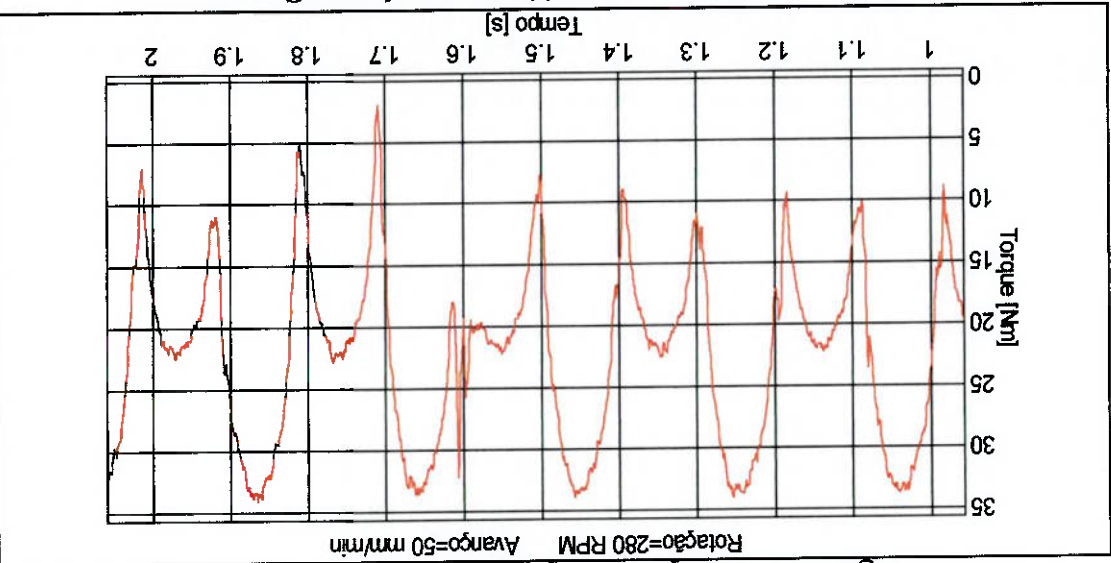
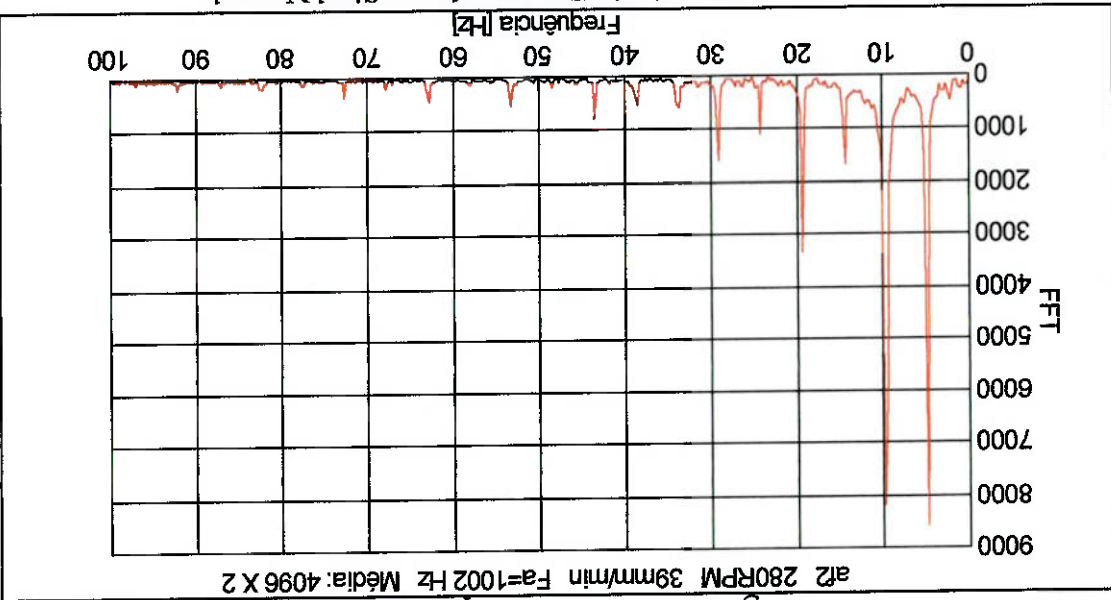
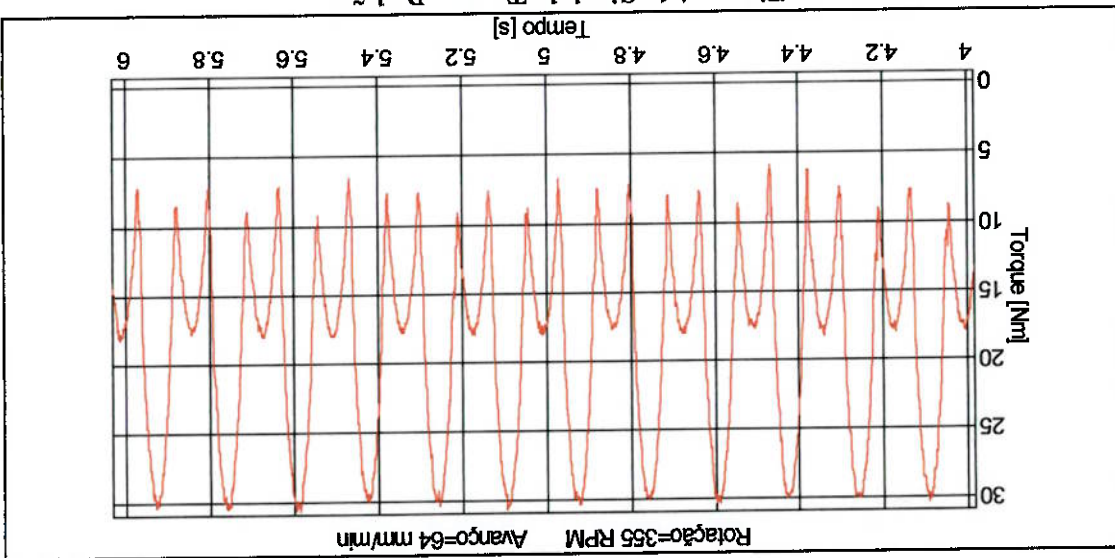


Figura 4.3: Signal com distúrbio Provocado por Cavacos

Além do sinal padrão, pode-se observar apenas dois outros tipos de sinais: os que são os obtidos durante a entrada e a saída da ferramenta do corpo de prova. Estes sinais podem ser considerados parcelas que quando somadas resultam no sinal obtido com a ferramenta totalmente imersa no corpo de prova. O sinal de entrada se caracteriza por picos que refletem o contato inicial da ferramenta quando ocorre o alinhamento de uma das arestas de corte com a direção do avanço. O contrário ocorre na saída, quando se dá o alinhamento, e uma das arestas de corte já está fora do corpo de prova; desta forma, o que ocorre é uma repentina queda de força, justamente onde ocorreria o ponto de força máxima.

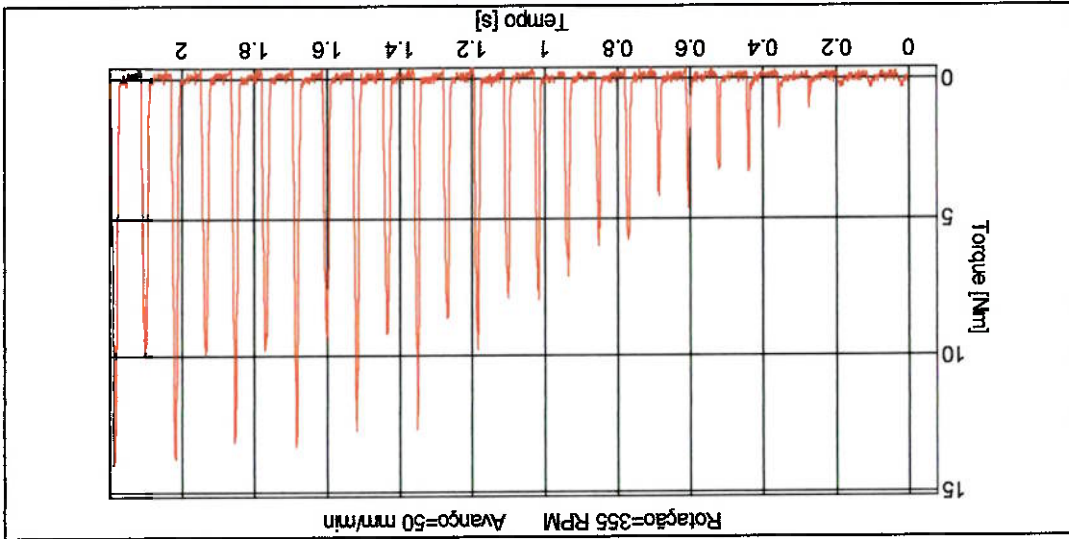


Figura 4.4: Entrada da Ferramenta no Corpo de Prova

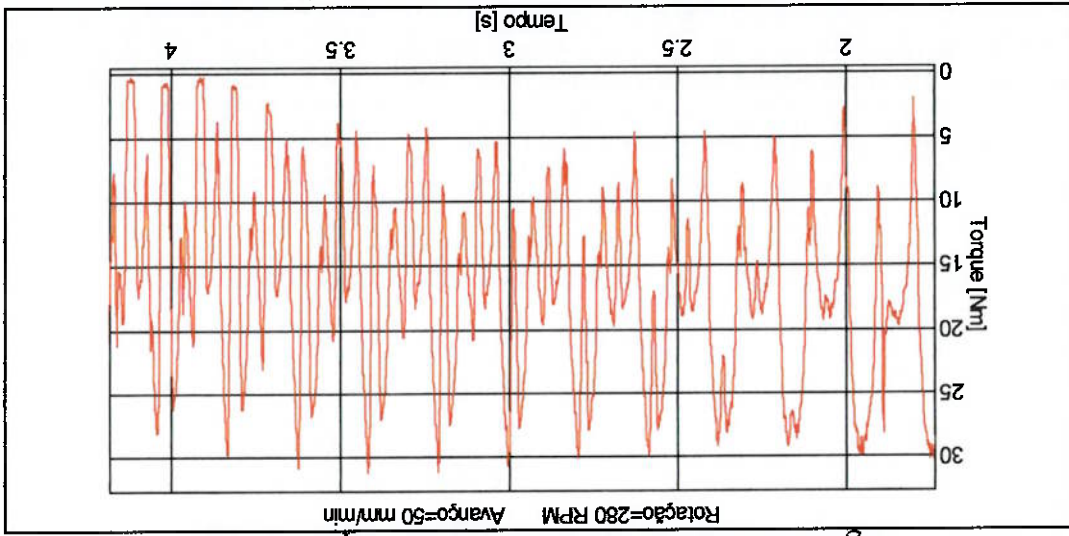


Figura 4.5: Saída da Ferramenta do Corpo de Prova

4.2 Relacionamento dos Dados ao Desgaste da Ferramenta

Para estudar a evolução do sinal de torque durante o desgaste da ferramenta, desejava-se obter uma grandeza que expressasse o desgaste. Inicialmente foi testada a medição da rugosidade da superfície usinada. Porém, após diversas medições percebeu-se que não havia uma boa repetibilidade. Também foi testada a medição direta do desgaste na ferramenta, utilizando um projetor de perfil, mas os resultados também não se mostraram confiáveis. Não se podia contar com um recurso que conseguisse realizar as medições ao pé da máquina, o que foi outro ponto que ajudou a descartar de vez esta última possibilidade. Assim, decidiu-se fazer o relacionamento dos sinais com o desgaste da ferramenta de forma indireta.

A vida de uma ferramenta de usinagem é o tempo que a ferramenta é capaz de trabalhar em determinados parâmetros até ser considerada sem condições de uso. Segundo **Bonassi (1994)**, um modelo bastante genérico que relaciona velocidade de corte com a vida útil da ferramenta é dada por:

$$C = V^c \cdot T^n$$

Equação 4.1

Onde:

C : Constante empírica;

V^c : Velocidade de Corte;

T^n : Vida útil da Ferramenta;

n : Expoente empírico de correção.

A formulação descrita a seguir, criada neste trabalho, foi desenvolvida unicamente com o objetivo de buscar um indicador de desgaste que fosse coerente com a

forma com que foram realizados os experimentos de desgaste da ferramenta neste trabalho. Não se pretende que esta formulação consiga modelar com precisão o desgaste em ferramentas de fresamento; entretanto se aplica bem ao objetivo de criar um indicador de desgaste coerente com a massa de dados.

O primeiro passo foi a criação de uma tabela (Tabela 4.1) com o comprimento usado para cada conjunto de arquivos de dados (t) que foram coletados conforme descrito no Capítulo 3. Com base nesta tabela, foi montada uma segunda tabela (Tabela 4.2) que relaciona o tempo real de usinagem (t_R) dos conjuntos de arquivos de dados. A soma total destes tempos, que é o tempo real total de usinagem da ferramenta, vai ser chamada de T_R .

A ferramenta utilizada nos ensaios deste trabalho foi desgastada utilizando diferentes parâmetros de usinagem. Assim, para poder-se estabelecer um indicador de desgaste da ferramenta foi calculado um tempo de usinagem corrigido (t_c). O cálculo foi feito utilizando uma formulação desenvolvida neste trabalho, baseando-se na vida da ferramenta obtida através da equação 4.1. O tempo de usinagem corrigido foi calculado por:

$$t_c = t_R \cdot \frac{2 \cdot T_V}{T_R}$$

Equação 4.2

Nesta equação, o fator “2”, multiplicando a vida da ferramenta T_V , foi utilizado para adequar a utilização da equação 4.1. A maioria dos dados tabelados para a equação 4.1 foram coletados em operações de torneamento, ou seja, a ferramenta está continuamente em trabalho. No caso do fresamento, abordado neste trabalho, pode-se aproximar o tempo de trabalho efetivo de cada aresta à metade do tempo total de trabalho

da ferramenta. Este fator fez com que a formulação explicada a seguir se tornasse mais coerente com os fatores tabelados.

A Tabela 4.3 foi montada utilizando a Tabela 4.2, as equações 4.1 e 4.2 e, inicialmente, em dados tabelados para os fatores empíricos da equação 4.1. Por esta tabela pode-se calcular o tempo corrigido total (T_c).

Com base em dados tabelados, foi adotado inicialmente o valor de 0,25 para o expoente n . Com este valor os resultados não foram satisfatórios. Isto foi atribuído ao fato dos dados tabelados serem para operação de torneamento. Não foram localizados dados semelhantes para a operação de fresamento. Na operação de fresamento a temperatura da ferramenta é, para as velocidades de corte utilizadas, muito inferior que na operação de torneamento. Assim passou-se a utilizar valores mais altos para n , mais próximos dos valores tabelados para usinagem com ferramentas de metal duro.

Também ocorreu uma discrepância entre o tempo total de usinagem real (T_R) e o tempo corrigido total (T_c). Assim, foi fixado o fator n e, utilizando os recursos do Excel, foi calculada uma constante C que eliminasse esta discrepância, ou seja, foi buscado um fator C que fizesse T_R igual a T_c .

Tabela 4.1: Comprimento Usinado de cada Arquivo de Dados

	<i>l</i> [mm]			
<i>V_a</i> [mm ³ /min] =	39,00	50,00	50,00	50,00
<i>N</i> [RPM] =	280	355	450	560
<i>V_c</i> [m/min] =	21,99	21,99	27,88	43,98
ARQ	L	28039	28050	35564
T	50	50,00	0,00	0,00
AA	150	25,00	25,00	0,00
AB	238	25,00	18,00	0,00
AC	338	25,00	25,00	0,00
AD	432	25,00	24,00	0,00
AE	532	25,00	25,00	0,00
AF	621	25,00	24,00	0,00
AG	701	20,00	20,00	0,00
AH	769	17,00	17,00	0,00
AI	849	20,00	20,00	0,00
AJ	929	20,00	20,00	0,00
AK	1003	20,00	20,00	0,00
AL	1071	17,00	17,00	0,00
AM	1193	60,00	20,00	0,00
AN	1273	20,00	20,00	0,00
AO	1353	20,00	20,00	0,00
AP	1433	20,00	20,00	0,00
AQ	1533	20,00	20,00	0,00
AR	1610	17,00	20,00	0,00
AS	1700	30,00	20,00	0,00
AT	1797	28,00	29,00	0,00
AU	1887	30,00	20,00	0,00
AV	1935	12,00	12,00	0,00
AW	2005	20,00	15,00	0,00
AX	2081	12,00	30,00	0,00
AY	2140	12,00	15,00	0,00
AZ	2201	12,00	15,00	0,00
BA	2262	12,00	15,00	0,00
BB	2323	12,00	15,00	0,00
BC	2384	12,00	15,00	0,00
BD	2461	22,00	15,00	0,00
BE	2518	12,00	15,00	0,00
BF	2579	12,00	15,00	0,00
BG	2653	25,00	15,00	0,00
BH	2714	12,00	15,00	0,00
BI	2776	13,00	15,00	0,00
BJ	2837	12,00	15,00	0,00
BK	2907	12,00	15,00	0,00
BL	2968	12,00	15,00	0,00
BM	3029	12,00	15,00	0,00
BN	3099	12,00	15,00	0,00
BO	3151	9,00	13,00	0,00
BP	3203	9,00	13,00	0,00
BQ	3255	9,00	13,00	0,00
BR	3307	9,00	13,00	0,00
BS	3359	9,00	13,00	0,00
BT	3411	9,00	13,00	0,00
BU	3471	9,00	13,00	0,00
BV	3585	15,00	17,00	0,00
BW	3674	15,00	17,00	0,00
BX	3783	15,00	17,00	0,00
BY	3867	15,00	17,00	0,00
BZ	3963	15,00	17,00	0,00
CA	4061	12,00	15,00	0,00
CB	4159	12,00	15,00	0,00
CC	4257	12,00	15,00	0,00
CD	4355	12,00	15,00	0,00
CE	4453	12,00	15,00	0,00
CF	4551	12,00	15,00	0,00
CG	4645	9,00	12,00	0,00
CH	4739	9,00	12,00	0,00
CI	4833	9,00	12,00	0,00
CJ	4927	9,00	12,00	0,00
CK	5021	9,00	12,00	0,00
CL	5115	9,00	12,00	0,00
CM	5209	9,00	12,00	0,00
CN	5303	9,00	12,00	0,00
CO	5397	9,00	12,00	0,00
CP	5491	9,00	12,00	0,00
CQ	5585	9,00	12,00	0,00
CR	5679	9,00	12,00	0,00
CS	5778	9,00	12,00	0,00
CT	5877	9,00	12,00	0,00
CU	5976	9,00	12,00	0,00
CV	6075	9,00	12,00	0,00
CW	6174	9,00	12,00	0,00
CX	6273	9,00	12,00	0,00
CY	6372	9,00	12,00	0,00
CZ	6471	9,00	12,00	0,00
DA	6570	9,00	12,00	0,00
DB	6669	9,00	12,00	0,00
DC	6768	9,00	12,00	0,00
DD	6867	9,00	12,00	0,00
DE	6966	9,00	12,00	0,00
DF	7065	9,00	12,00	0,00
ESC1	7129	0,00	0,00	0,00
ESC2	7177	0,00	0,00	0,00
RAM1	7245	0,00	68,00	0,00
RAM2	7313	0,00	68,00	0,00
DG	7345	6,00	8,00	0,00

Tabela 4.2: Tempo de Usagem de cada Arquivo de Dados

v_c [mm/min]	T_c [min.]	v_c [mm/min]	T_c [min.]	v_c [mm/min]	T_c [min.]	v_c [mm/min]	T_c [min.]
39,00	1,28	50,00	1,28	64,00	1,28	78,00	1,28
21,99	280	50,00	280	64,00	280	78,00	280
N [RPM]	280	21,99	27,88	35,34	43,98	55,76	71,0
T_c [min]	28039	28050	35550	45064	56078	71099	
T	1,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AA	3,31	0,50	0,39	0,39	0,50	0,00	0,00
AB	5,11	0,64	0,36	0,40	0,39	0,00	0,00
AC	7,14	0,64	0,50	0,39	0,39	0,00	0,00
AD	9,05	0,64	0,48	0,40	0,39	0,00	0,00
AE	11,08	0,64	0,50	0,50	0,39	0,00	0,00
AF	12,91	0,64	0,48	0,40	0,31	0,00	0,00
AG	14,54	0,51	0,40	0,40	0,31	0,00	0,00
AH	15,92	0,44	0,34	0,27	0,31	0,00	0,00
AI	17,55	0,51	0,40	0,40	0,31	0,00	0,00
AJ	19,17	0,51	0,40	0,34	0,31	0,00	0,00
AK	20,69	0,51	0,40	0,34	0,27	0,00	0,00
AL	22,07	0,44	0,34	0,34	0,27	0,00	0,00
AM	24,75	1,54	0,40	0,34	0,27	0,00	0,00
AN	26,38	0,51	0,40	0,40	0,31	0,00	0,00
AO	28,00	0,51	0,40	0,40	0,31	0,00	0,00
AP	29,63	0,51	0,40	0,40	0,31	0,00	0,00
AQ	31,57	0,51	0,40	0,40	0,63	0,00	0,00
AR	33,12	0,44	0,40	0,40	0,31	0,00	0,00
AS	35,00	0,77	0,40	0,40	0,31	0,00	0,00
AT	37,01	0,72	0,58	0,40	0,31	0,00	0,00
AU	38,89	0,77	0,40	0,40	0,31	0,00	0,00
AV	39,86	0,31	0,24	0,19	0,19	0,00	0,00
AW	41,29	0,51	0,30	0,30	0,31	0,00	0,00
AX	42,79	0,31	0,60	0,30	0,27	0,00	0,00
AY	43,97	0,31	0,30	0,30	0,27	0,00	0,00
AZ	45,17	0,31	0,30	0,30	0,30	0,00	0,00
BA	46,38	0,31	0,30	0,30	0,30	0,00	0,00
BB	47,58	0,31	0,30	0,30	0,30	0,00	0,00
BC	48,79	0,31	0,30	0,30	0,30	0,00	0,00
BD	50,34	0,56	0,30	0,30	0,39	0,00	0,00
BE	51,48	0,31	0,30	0,30	0,23	0,00	0,00
BF	52,69	0,31	0,30	0,30	0,30	0,00	0,00
BG	54,23	0,64	0,30	0,30	0,30	0,00	0,00
BH	55,43	0,31	0,30	0,30	0,30	0,00	0,00
BI	56,66	0,33	0,30	0,30	0,30	0,00	0,00
BJ	57,86	0,31	0,30	0,30	0,30	0,00	0,00
BK	59,21	0,31	0,30	0,30	0,44	0,00	0,00
BL	60,41	0,31	0,30	0,30	0,30	0,00	0,00
BM	61,62	0,31	0,30	0,30	0,30	0,00	0,00
BN	62,96	0,31	0,30	0,44	0,30	0,00	0,00
BO	63,98	0,23	0,26	0,26	0,27	0,00	0,00
BP	65,00	0,23	0,26	0,26	0,27	0,00	0,00
BQ	66,01	0,23	0,26	0,26	0,27	0,00	0,00
BR	67,03	0,23	0,26	0,26	0,27	0,00	0,00
BS	68,05	0,23	0,26	0,26	0,27	0,00	0,00
BT	69,06	0,23	0,26	0,26	0,27	0,00	0,00
BU	70,20	0,23	0,26	0,26	0,14	0,00	0,00
BV	72,28	0,38	0,34	0,34	0,39	0,00	0,00
BW	73,93	0,38	0,34	0,34	0,39	0,00	0,00
BX	75,74	0,38	0,34	0,34	0,39	0,00	0,00
BY	77,30	0,38	0,34	0,34	0,39	0,00	0,10
BZ	78,97	0,38	0,34	0,34	0,39	0,00	0,22
CA	80,55	0,31	0,30	0,30	0,30	0,00	0,37
CB	82,13	0,31	0,30	0,30	0,30	0,00	0,37
CC	83,71	0,31	0,30	0,30	0,30	0,00	0,37
CD	85,29	0,31	0,30	0,30	0,30	0,00	0,37
CE	86,87	0,31	0,30	0,30	0,30	0,00	0,37
CF	88,44	0,31	0,30	0,30	0,30	0,00	0,37
CG	89,86	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,45
CH	91,27	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,45
CI	92,69	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,45
CJ	94,11	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,45
CK	95,52	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,45
CL	96,94	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,45
CM	98,35	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,45
CN	99,77	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,45
CO	101,18	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,45
CP	102,60	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,45
CQ	104,01	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,45
CR	105,43	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,45
CS	106,89	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,51
CT	108,36	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,51
CU	109,83	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,51
CV	111,29	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,51
CW	112,76	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,51
CX	114,22	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,51
CY	115,69	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,51
CZ	117,15	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,51
DA	118,62	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,51
DB	120,09	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,51
DC	121,55	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,51
DD	123,02	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,51
DE	124,48	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,51
DF	125,95	0,23	0,24	0,24	0,25	0,00	0,51
ESC1	127,23	0,00	0,00	1,28	0,00	0,00	0,00
ESC2	128,19	0,00	0,00	0,96	0,00	0,00	0,00
RAM1	129,55	0,00	0,00	1,36	0,00	0,00	0,00
RAM2	130,91	0,00	0,00	1,36	0,00	0,00	0,00
DG	131,54	0,15	0,16	0,16	0,16	0,00	0,00

Tabela 4.3: Tempo Corrigido acumulado dos Arquivos de Dados

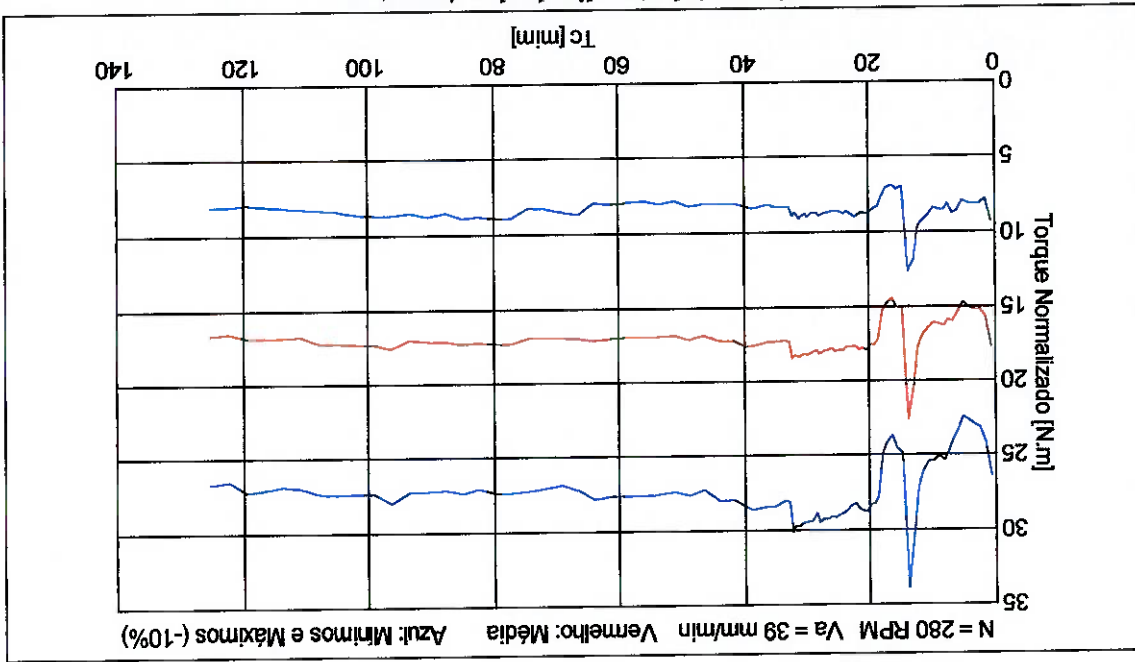
Tc =	21,99	21,99	27,88	27,88	43,98	55,76
Tv =	197	197	197	100	51	27
C =	139,78	28050	35550	35564	45064	56078
ARQ	28039	28050	35550	35564	45064	56078
T	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
AA	0,64	0,81	1,14	1,39	1,39	1,39
AB	1,61	1,73	1,99	2,25	2,25	2,25
AC	2,46	2,63	2,96	3,21	3,21	3,21
AD	3,43	3,59	3,85	4,11	4,11	4,11
AE	4,32	4,49	4,82	5,07	5,07	5,07
AF	5,29	5,45	5,71	5,91	5,91	5,91
AG	6,09	6,22	6,48	6,69	6,69	6,69
AH	6,83	6,95	7,17	7,34	7,34	7,34
AI	7,51	7,65	7,91	8,12	8,12	8,12
AJ	8,29	8,42	8,68	8,89	8,89	8,89
AK	9,06	9,19	9,42	9,59	9,59	9,59
AL	9,74	9,85	10,07	10,25	10,25	10,25
AM	10,76	10,90	11,16	11,38	11,38	11,38
AN	11,55	11,69	11,95	12,16	12,16	12,16
AO	12,33	12,46	12,72	12,93	12,93	12,93
AP	13,10	13,23	13,50	13,70	13,70	13,70
AQ	13,87	14,01	14,27	14,68	14,68	14,68
AR	14,83	14,96	15,22	15,43	15,43	15,43
AS	15,68	15,82	16,08	16,29	16,29	16,29
AT	16,52	16,72	16,98	17,19	17,19	17,19
AU	17,44	17,58	17,84	18,04	18,04	18,04
AV	18,15	18,23	18,39	18,51	18,51	18,51
AW	18,68	18,78	18,98	19,18	19,18	19,18
AX	19,28	19,48	19,68	19,88	19,88	19,88
AY	19,98	20,08	20,28	20,45	20,45	20,45
AZ	20,55	20,65	20,85	21,05	21,05	21,05
BA	21,15	21,25	21,45	21,64	21,64	21,64
BB	21,74	21,84	22,04	22,24	22,24	22,24
BC	22,34	22,44	22,64	22,83	22,83	22,83
BD	23,02	23,12	23,32	23,57	23,57	23,57
BE	23,68	23,78	23,97	24,13	24,13	24,13
BF	24,23	24,33	24,53	24,72	24,72	24,72
BG	24,94	25,04	25,23	25,43	25,43	25,43
BH	25,53	25,63	25,83	26,02	26,02	26,02
BI	26,13	26,23	26,43	26,63	26,63	26,63
BJ	26,73	26,83	27,03	27,22	27,22	27,22
BK	27,32	27,42	27,62	27,91	27,91	27,91
BL	28,01	28,11	28,31	28,50	28,50	28,50
BM	28,61	28,71	28,90	29,10	29,10	29,10
BN	29,20	29,30	29,50	29,79	29,79	29,79
BO	29,86	29,95	30,12	30,30	30,30	30,30
BP	30,37	30,46	30,63	30,80	30,80	30,80
BQ	30,88	30,97	31,14	31,31	31,31	31,31
BR	31,39	31,48	31,65	31,82	31,82	31,82
BS	31,90	31,99	32,16	32,33	32,33	32,33
BT	32,41	32,50	32,67	32,84	32,84	32,84
BU	32,92	33,00	33,18	33,34	33,52	33,52
BV	33,65	33,76	33,99	34,24	35,05	35,05
BW	35,18	35,29	35,52	35,77	36,24	36,24
BX	36,37	36,48	36,70	36,96	36,96	36,96
BY	38,77	38,89	39,11	39,37	39,37	39,37
BZ	39,97	40,09	40,31	40,57	40,57	40,57
CA	41,73	41,83	42,03	42,22	42,22	42,22
CB	44,10	44,20	44,40	44,60	44,60	44,60
CC	46,48	46,58	46,78	46,97	46,97	46,97
CD	48,85	48,95	49,15	49,35	49,35	49,35
CE	51,23	51,33	51,52	51,72	51,72	51,72
CF	53,60	53,70	53,90	54,09	54,09	54,09
CG	55,95	56,03	56,19	56,35	56,35	56,35
CH	58,59	58,67	58,83	59,00	59,00	59,00
CI	61,24	61,32	61,48	61,64	61,64	61,64
CJ	63,88	63,96	64,12	64,28	64,28	64,28
CK	66,52	66,60	66,76	66,93	66,93	66,93
CL	69,17	69,25	69,41	69,57	69,57	69,57
CM	71,81	71,89	72,05	72,21	72,21	72,21
CN	74,45	74,53	74,69	74,86	74,86	74,86
CO	77,10	77,18	77,34	77,50	77,50	77,50
CP	79,74	79,82	79,98	80,14	80,14	80,14
CQ	82,38	82,46	82,62	82,79	82,79	82,79
CR	85,03	85,11	85,27	85,43	85,43	85,43
CS	87,67	87,75	87,91	88,07	88,07	88,07
CT	90,55	90,63	90,79	90,96	90,96	90,96
CU	93,44	93,52	93,68	93,84	93,84	93,84
CV	96,32	96,40	96,56	96,72	96,72	96,72
CW	99,21	99,29	99,44	99,61	99,61	99,61
CX	102,09	102,17	102,33	102,49	102,49	102,49
CY	104,97	105,05	105,21	105,38	105,38	105,38
CZ	107,86	107,94	108,10	108,26	108,26	108,26
DA	110,74	110,82	110,98	111,14	111,14	113,55
DB	113,63	113,71	113,86	114,03	114,03	114,03
DC	116,51	116,59	116,75	116,91	116,91	116,91
DD	119,39	119,47	119,63	119,80	119,80	119,80
DE	122,28	122,36	122,52	122,68	122,68	122,68
DF	125,16	125,24	125,40	125,56	125,56	127,97
ESC1	127,97	127,97	128,81	128,81	128,81	128,81
ESC2	128,81	128,81	129,44	129,44	129,44	129,44
RAM1	129,44	129,44	130,33	130,33	130,33	130,33
RAM2	130,33	130,33	131,23	131,23	131,23	131,23
DG	131,23	131,23	131,54	131,54	131,54	131,54

4.3 Evolução do Sinal com o Desgaste

4.3.1 Evolução do Sinal no Domínio do Tempo:

Quando se observa as várias amostras do sinal no tempo, a única diferença que se percebe com a evolução do desgaste, expressa por T_c , é a variação da diferença que existe entre a amplitude dos lóbulos. A variação que se pode observar na amplitude do sinal como um todo, os dois lóbulos ao mesmo tempo, não pode ser considerada como provocada pelo desgaste, pois conforme mencionado anteriormente ocorreram distúrbios não controlados que afetaram a amplitude.

A variação não controlada da amplitude pode ser observada na figura 4.6, que mostra o torque médio, mínimo e máximo de cada amostra coletada com rotação a 280 RPM e velocidade de avanço a 39 mm/min. Nesta figura os mínimos e os máximos foram calculados extraindo-se 10% dos pontos da amostra que se encontravam abaixo ou acima destes limites, evitando assim pontos isolados fora do padrão do sinal.



4.3.2 Normalização dos Sinais:

Com objetivo de observar melhor a variação na dinâmica do sinal com o desgaste, os sinais no domínio do tempo passaram por uma transformação, reduzindo os efeitos da variação da amplitude e eliminando a parte contínua do sinal:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_i = x_i - \bar{X} \\ z_i = \frac{y_i}{igr(Y)} \end{array} \right.$$

x_i : Ponto de dado original;

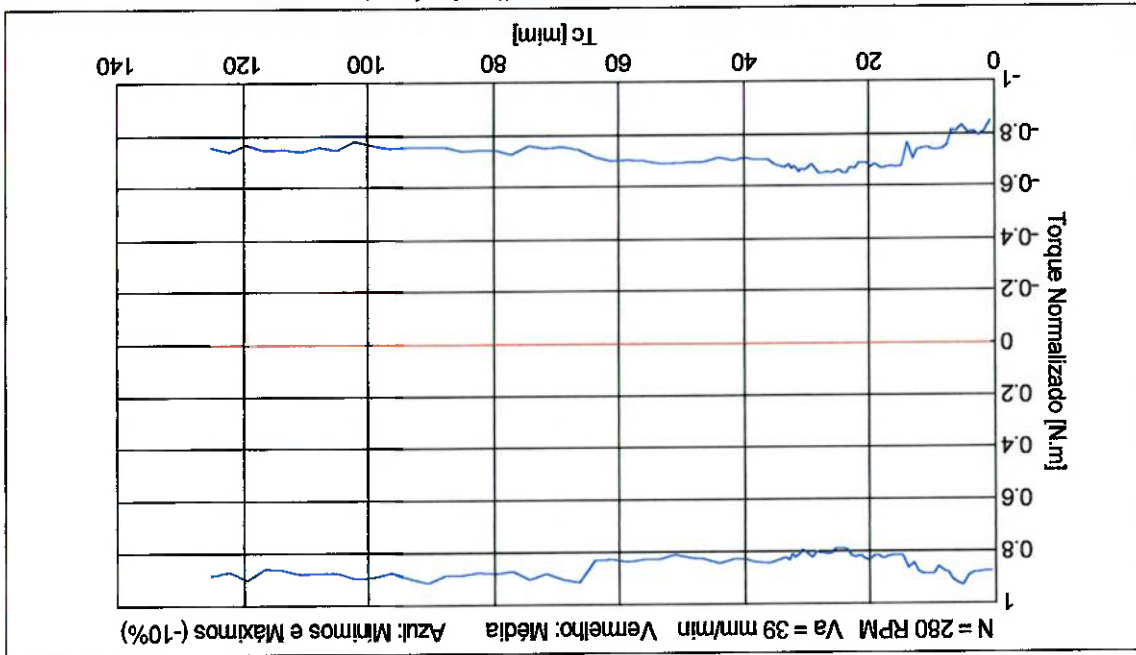
\bar{X} : Média dos pontos x_i ;

y_i : Ponto de dado após 1ª transformação;

z_i : Ponto de dado após 2ª transformação;

$igr(Y)$: Variação interquartis dos pontos y_i . É uma forma robusta de estimar

variação, onde o limite inferior é o ponto imediatamente maior que 25% da amostra, e o limite superior é o ponto imediatamente maior que 75% da amostra.



4.3.3 Evolução do Sinal no Domínio da Frequência:

Desejava-se observar a variação das características do espectro com a evolução do desgaste, expressa por T_c . Para isso, o espectro do sinal foi obtido da seguinte forma:

- Uma amostra de 8192 pontos foi separada em dois blocos menores de 4096 pontos;
- Cada bloco foi normalizado, conforme descrito na seção 4.3.2;
- Foi calculada a FFT de cada bloco de dados e calculada a FFT média entre eles.

Para visualização, foram separadas as seis maiores frequências do espectro de cada amostra, que são as seis primeiras. A primeira delas correspondente à rotação da ferramenta. Para a separação selecionou-se os seis pontos correspondentes do espectro, formado por um total de 2048 pontos. Para as amostras coletadas com 280 RPM e frequência de amostragem 1.002,225* Hz, estes pontos e suas respectivas frequências são mostrados na tabela 4.4. As figuras 4.8 e 4.9 mostram o resultado desta análise. A amplitude da FFT em cada frequência foi normalizada de 0 a 1 para melhor observação.

$N = 280$ RPM		$F_s = 1.002,225^* \text{ Hz}$		Espectro com 2048 pontos	
Ponto do Espectro	21	41	60	80	100
Frequência [Hz]	4,90	9,79	14,44	19,34	24,24
					29,13

Tabela 4.4: Principais Frequências e respectivos Pontos do Espectro

Não se observou nenhuma característica no espectro dos sinais que evoluísse de forma correlacionada com o desgaste da ferramenta. Com base nos relatórios experimentais, observou-se que as grandes variações na evolução aconteciam exatamente onde houve a necessidade de retirada e reinstalação da ferramenta. Na reinstalação os parâmetros do processo e demais condições são mantidas. Entretanto, ocorrem variações na excentricidade da ferramenta. Conclui-se que a variação na excentricidade foi a principal causa da evolução observada do espectro do sinal.

* A escolha desta frequência de amostragem está ligada ao modo como foi feita a solução numérica do modelo, o que será vista adiante na seção 4.5.

Figura 4.8: Evolução dos Principais Picos do Espectro de Sinal com o Desgaste

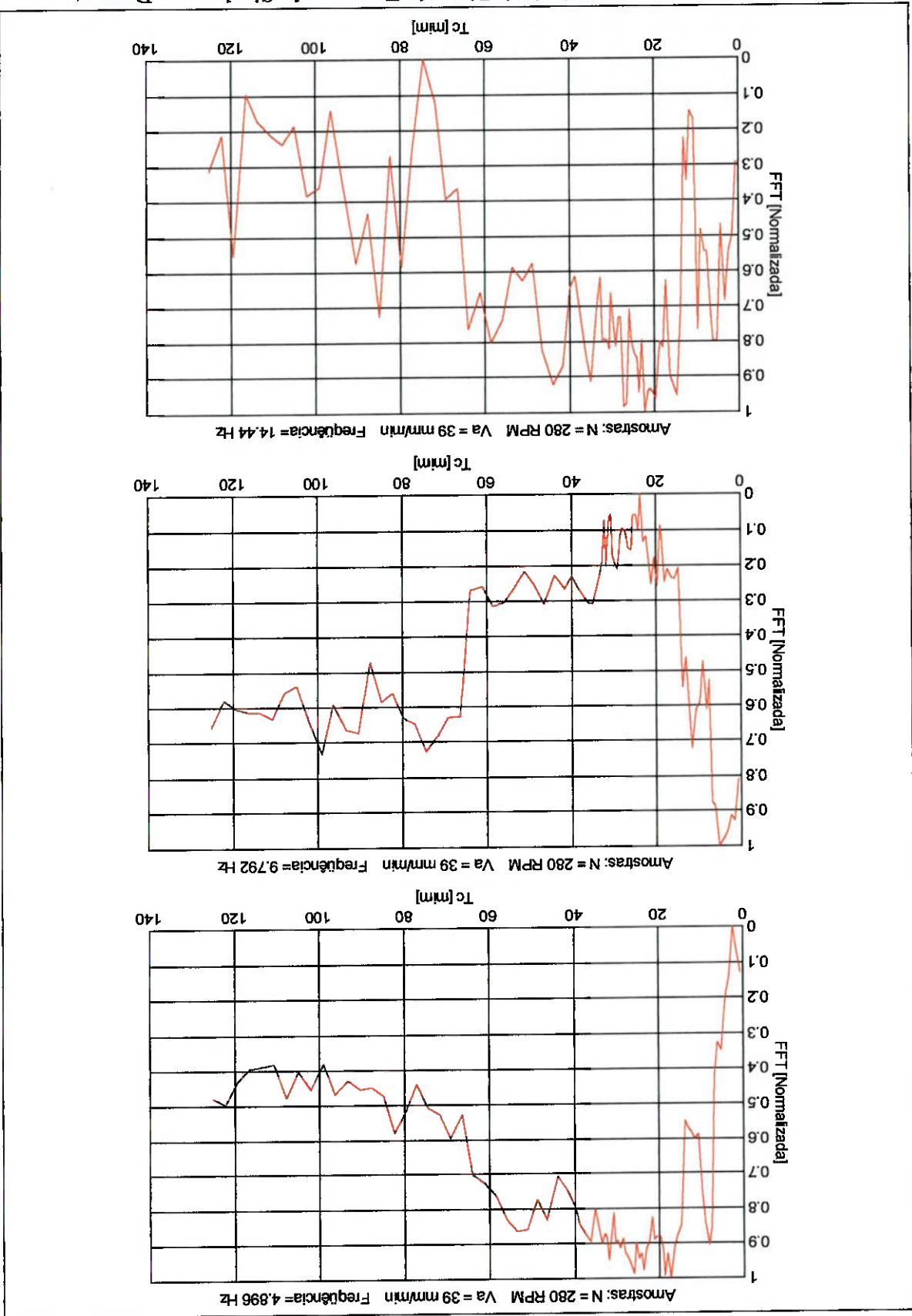
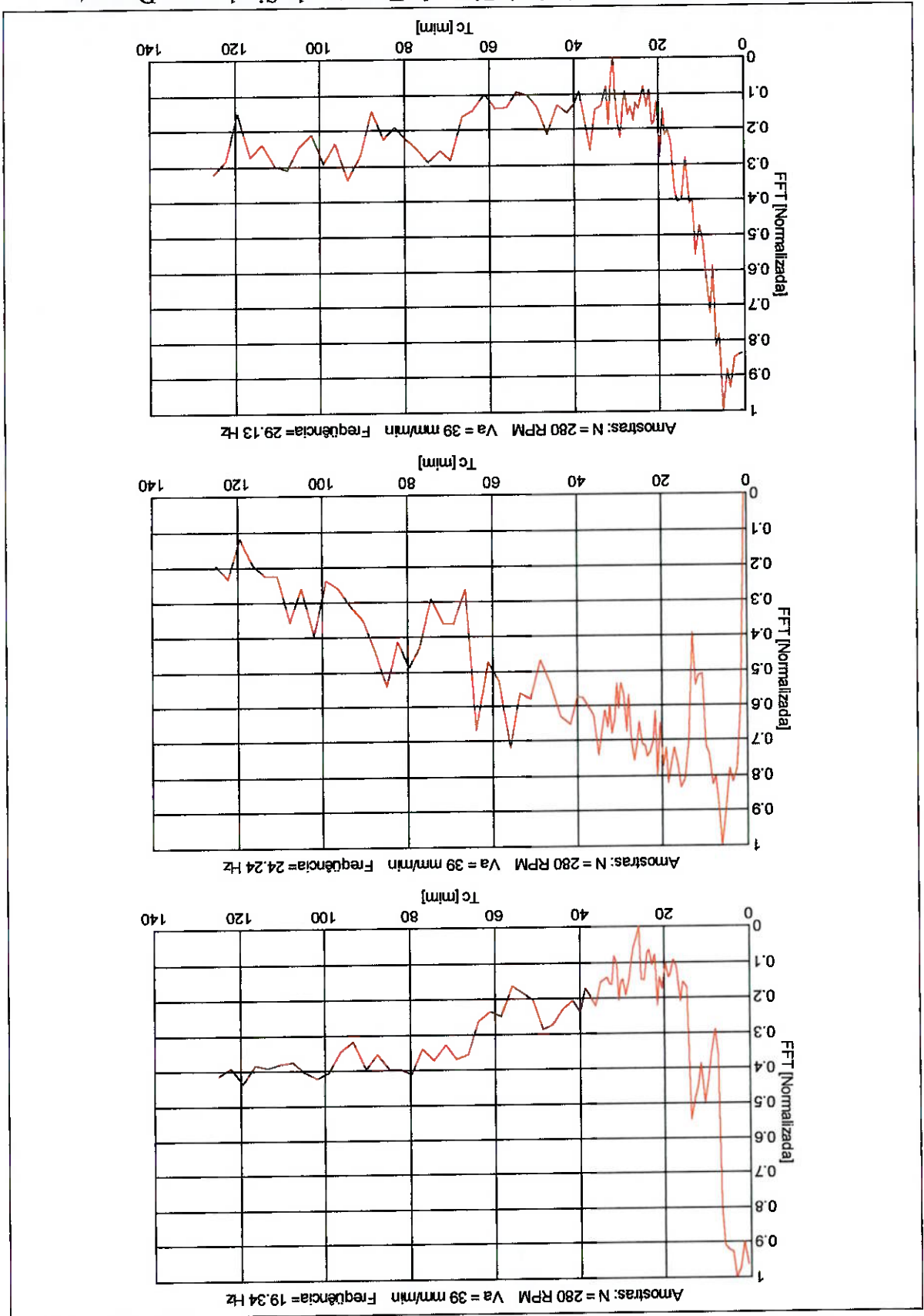


Figura 4.9: Evolução dos Principais Picos do Espectro do Sinal com o Desgaste

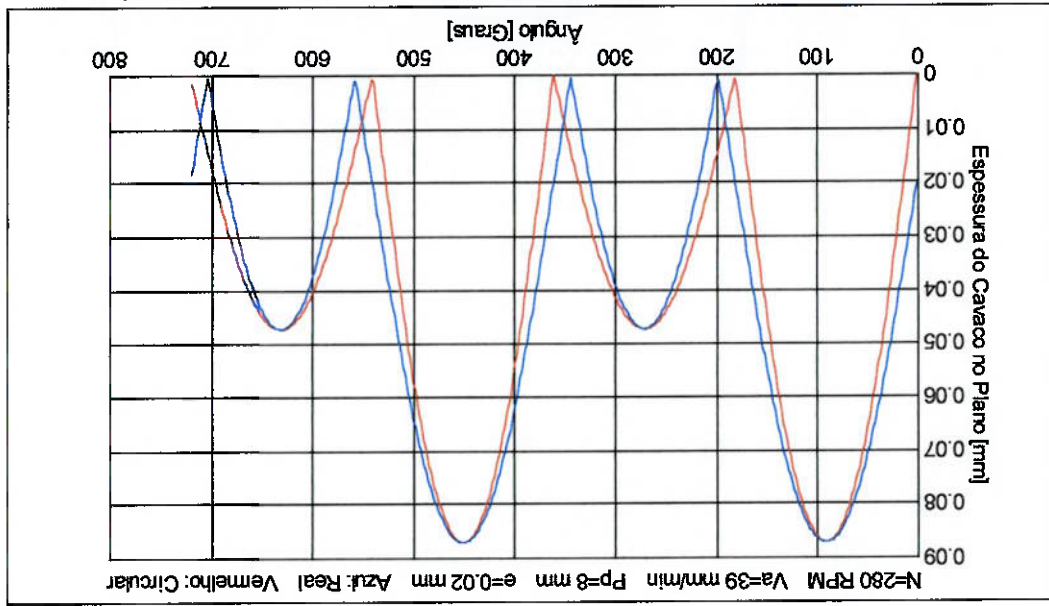


4.4 Modelo do Sinal de Torque

4.4.1 Desenvolvimento do Modelo:

Com o objetivo de entender melhor as causas das variações observadas no sinal, foi desenvolvido um modelo do sinal de torque, envolvendo os parâmetros que se desejava observar. Este modelo se baseia no levantamento da espessura instantânea de corte como variável fundamental para calcular o torque. Um modelo semelhante foi desenvolvido por **Justy e Macneil (1975)**. Neste modelo, a trajetória da ferramenta foi considerada circular, desprezando-se o efeito do avanço.

O modelo desenvolvido nesta dissertação descreve a trajetória real da ferramenta ponto a ponto. Quando se quer considerar a excentricidade da ferramenta, o modelo com a trajetória real da aresta apresenta melhor resultado. A figura 4.10 mostra a comparação da espessura do cavaco no plano obtida pelas dois modelos. A diferença entre os modelos é maior quando a posição angular da ferramenta está mais defasada ou adiantada em relação à direção do avanço.



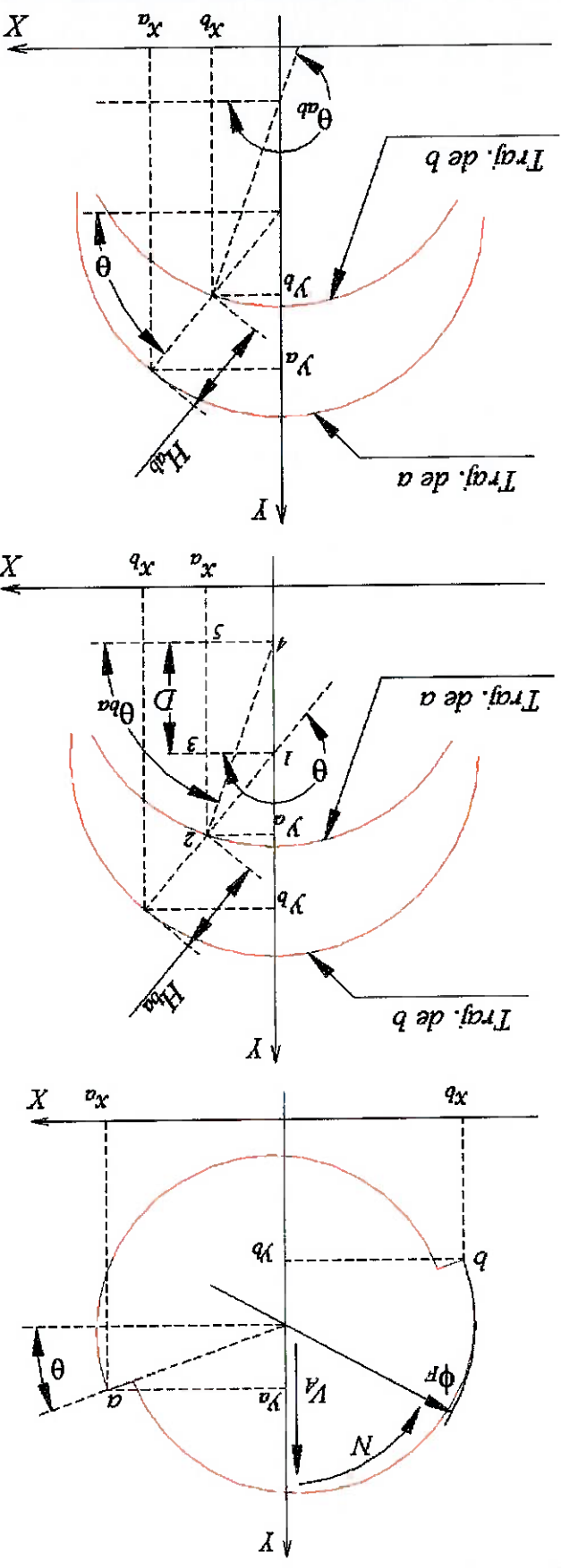


Figura 4.11: Parâmetros do Modelo

Onde:

a/b : Arestas de Corte;

ϕ_r : Diâmetro da fresa;

e : Excentricidade da fresa (não representada nas figuras);

N : Rotação da fresa;

V_f : Velocidade de Avanço da fresa;

a/b : Arestas da fresa;

x/y_{ab} : Posição das arestas no sistema de coordenadas;

θ : Ângulo em que se encontra a fresa em relação a a ;

$H^{b/a}$: Espessura na passagem de b/a sobre a superfície gerada por a/b ;

D : Deslocamento da ferramenta entre a passagem de a e a de b ;

$\theta^{b/a}$: Ângulo da ferramenta na passagem da aresta anterior.

As posições das arestas em função do ângulo da fresa são dadas por:

$$x^a(\theta) = \frac{(\phi_r + e)}{2} \cdot \cos(\theta)$$

Equação 4.3

$$x^b(\theta) = \frac{(\phi_r - e)}{2} \cdot \cos(\theta + \pi)$$

Equação 4.4

$$y^a(\theta) = \frac{(\phi_r + e)}{2} \cdot \sin(\theta) + \frac{V_f \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot \theta}$$

Equação 4.5

$$y^b(\theta) = \frac{(\phi_r - e)}{2} \cdot \sin(\theta) + \frac{V_f \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot \theta}$$

Equação 4.6

O objetivo inicial é achar os ângulos θ_{ba} em função de θ . Para vamos obter o

deslocamento D por dois caminhos diferentes e igualar as duas equações. Inicialmente,

baseando-se na trajetória da ferramenta em função da velocidade de avanço e da rotação

temos:

Equação 4.7

$$D = \frac{(\theta - \theta_{ba}) \cdot V^a}{2 \cdot \pi \cdot N}$$

Em seguida, podemos calcular a deslocamento D em função da geometria

encontrada. Isto é feito tomando-se os triângulos formados pelos pontos 123 e 425:

$$\tan \theta = \frac{\frac{\phi_f + e}{2} \cdot \cos \theta_{ba}}{\frac{\phi_f + e}{2} \cdot \sin \theta_{ba} - D}$$

Isolando-se D :

Equação 4.8

$$D = \frac{\theta_f + e}{2} \cdot (\sin \theta_{ba} - \tan \theta \cdot \cos \theta_{ba})$$

Igualando 4.7 com 4.8 e simplificando, obtêm-se:

Equação 4.9

$$\frac{(\theta - \theta_{ba}) \cdot V^a}{2 \cdot \pi \cdot N} - \frac{(\phi_f + e)}{2} \cdot (\sin \theta_{ba} - \tan \theta \cdot \cos \theta_{ba}) = 0$$

Fazendo o mesmo para obter θ_{ab} em função de θ :

Equação 4.10

$$\frac{(\theta - \theta_{ab}) \cdot V^a}{2 \cdot \pi \cdot N} + \frac{(\phi_f - e)}{2} \cdot (\sin \theta_{ab} - \tan \theta \cdot \cos \theta_{ab}) = 0$$

Utilizando 4.9 e 4.10 podemos calcular θ_{ba} e θ_{ab} em função de θ Com este

resultado a espessura do cavaco nas direções x e y pode ser obtida por:

Equação 4.11

$$X_{ba}(\theta) = x^a(\theta) - x^a(\theta_{ba})$$

Equação 4.12

$$Y_{ba}(\theta) = y^a(\theta) - y^a(\theta_{ba})$$

Equação 4.13

$$X_{ab}(\theta) = x^a(\theta) - x^a(\theta_{ab})$$

Na verdade, o resultado destas equações deve ser interpretados como a distância

entre a passagem consecutiva das arestas da ferramenta. Desta forma estas equações

forneem um resultado diferente de zero mesmo quando a aresta está na parte oposta à

direção do avanço, ou seja, girando em vazio. Assim o resultado destas equações deve ser

filtrado. A maneira mais fácil de realizar isto é tomar por base a distância na direção x:

Esta grandeza tem um comportamento senoidal com um ciclo aproximadamente a cada

meia volta da ferramenta. A espessura do cavaco é considerada zero para um destes

ciclos, só sendo válida para o outro ciclo.

Após a eliminação dos pontos inválidos pode-se calcular a espessura do cavaco

por:

$$H^{ba}(\theta) = \sqrt{X_2^{ba}(\theta) + Y_2^{ba}(\theta)}$$

Equação 4.15

$$H^{ab}(\theta) = \sqrt{X_2^{ab}(\theta) + Y_2^{ab}(\theta)}$$

Equação 4.16

Tendo-se as espessuras do cavaco em função do ângulo, podemos calcular o

Torque com a seguinte equação:

$$M^T(\theta) = K^{sic} \cdot P^p \cdot \frac{Z}{2} \cdot \phi^F \cdot (H^{ba}(\theta))^{(1-Z)} + H^{ab}(\theta)^{(1-Z)}$$

Equação 4.17

Onde:

K^{sic} : Pressão específica de corte corrigida;

Z : Coeficiente para a correção da pressão específica;

P^p : Profundidade da passada.

Esta equação é válida para uma fresa de dentes retos. No nosso caso temos uma fresa de dentes helicoidais. Assim, ao longo da parte da ferramenta imersa no material,

temos um diferente ângulo de posição para cada ponto da aresta cortante. Para resolver este problema, o primeiro passo é colocar a profundidade em função deste ângulo:

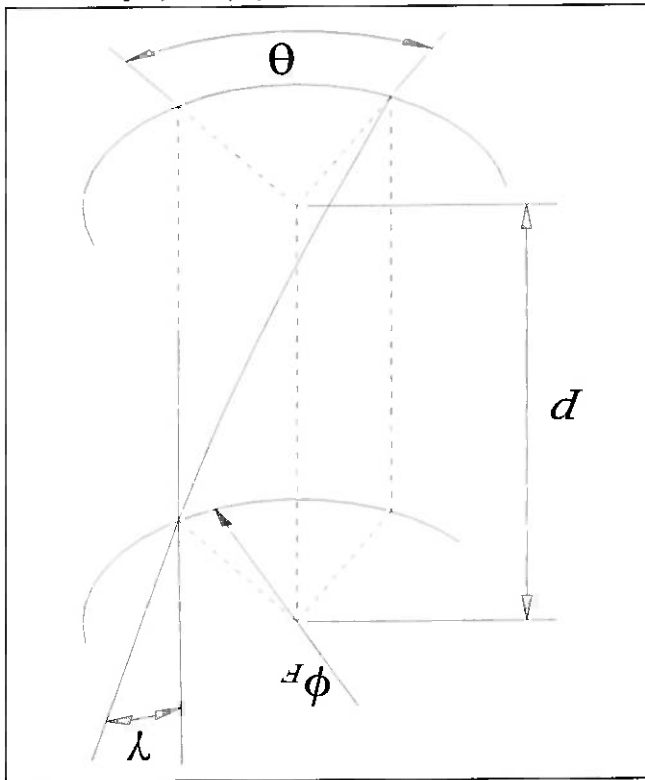


Figura 4.12: Parâmetros geométricos da ferramenta

A profundidade p em função do ângulo θ é dada por:

$$p = \frac{\theta \cdot \phi_r}{2 \cdot \tan \gamma}$$

Equação 4.18

Onde:

p : Profundidade de corte para ângulo θ ;

θ : Ângulo no plano para profundidade p ;

γ : Ângulo de helice da fresa;

ϕ_r : Diâmetro da fresa.

Chamo de α o ângulo θ que gera profundidade igual a R_p .

Substituindo esta equação, exceto o fator θ , no lugar de P_p da equação 4.17, acho

uma grandeza que vou chamar de $S(\theta)$:

$$S(\theta) = \frac{K_{SIC} \cdot \phi_F^2}{4 \cdot \tan \gamma} \cdot (H^{ba}(\theta) + H^{ab}(\theta))^{(1-Z)}$$

Equação 4.19

Tal que:

$$M_T(\theta) = \int_{\theta}^{\theta-\alpha} S(\theta) \cdot d\theta$$

Assim:

$$M_T(\theta) = \int_{\theta}^{\theta-\alpha} \frac{K_{SIC} \cdot \phi_F^2}{4 \cdot \tan \gamma} \cdot (H^{ba}(\theta) + H^{ab}(\theta))^{(1-Z)} \cdot d\theta$$

Equação 4.20

4.4.2 Solução Numérica do Modelo:

Para as equações descritas acima foi desenvolvida uma solução numérica com o

objetivo de comparar os resultados do modelo com o sinal de torque real.

O início do processo é a discretização do ângulo de hélice α para possibilitar a

solução numérica da equação 4.20. Assim são estabelecidos um número n de pontos que

variam de zero a α , chamados genericamente de α_p , sendo que o intervalo entre eles é

equivalente a $d\theta$. Este intervalo é $\Delta\theta_p$.

Para diminuir o tempo de processamento sem perder a qualidade dos resultados, a

solução abrange apenas uma volta completa da ferramenta. O modelo é descrito em

função de θ , assim foram escolhidos pontos igualmente espaçados em θ que cobrissem

toda a circunferência. O espaçamento entre o último ponto e o primeiro também é igual.

Assim pode-se colocar várias seqüências dos mesmos pontos justapostas sem afetar o

espaçamento angular entre eles, como se fosse uma amostragem contínua de várias voltas

da ferramenta. Além disso o espaçamento angular entre os pontos foi definido tomando como base a rotação utilizada nas coletas reais de sinais e na frequência de amostragem real, ou seja, os pontos igualmente espaçados em θ obtidos correspondem aos que seriam obtidos realizando uma amostragem no tempo com frequência e rotação constantes. O conjunto destes pontos é θ_v .

Com base nestas definições, pode-se representar a solução numérica desenvolvida

por:

$$M^T(\theta_v) = \sum_{i=1}^n S(\theta_v - \alpha_i) \cdot \Delta\theta_i$$

Equação 4.21

A figura 4.13 mostra o Fluxograma da estrutura de programação utilizada para a

solução das equações que definem o Modelo:

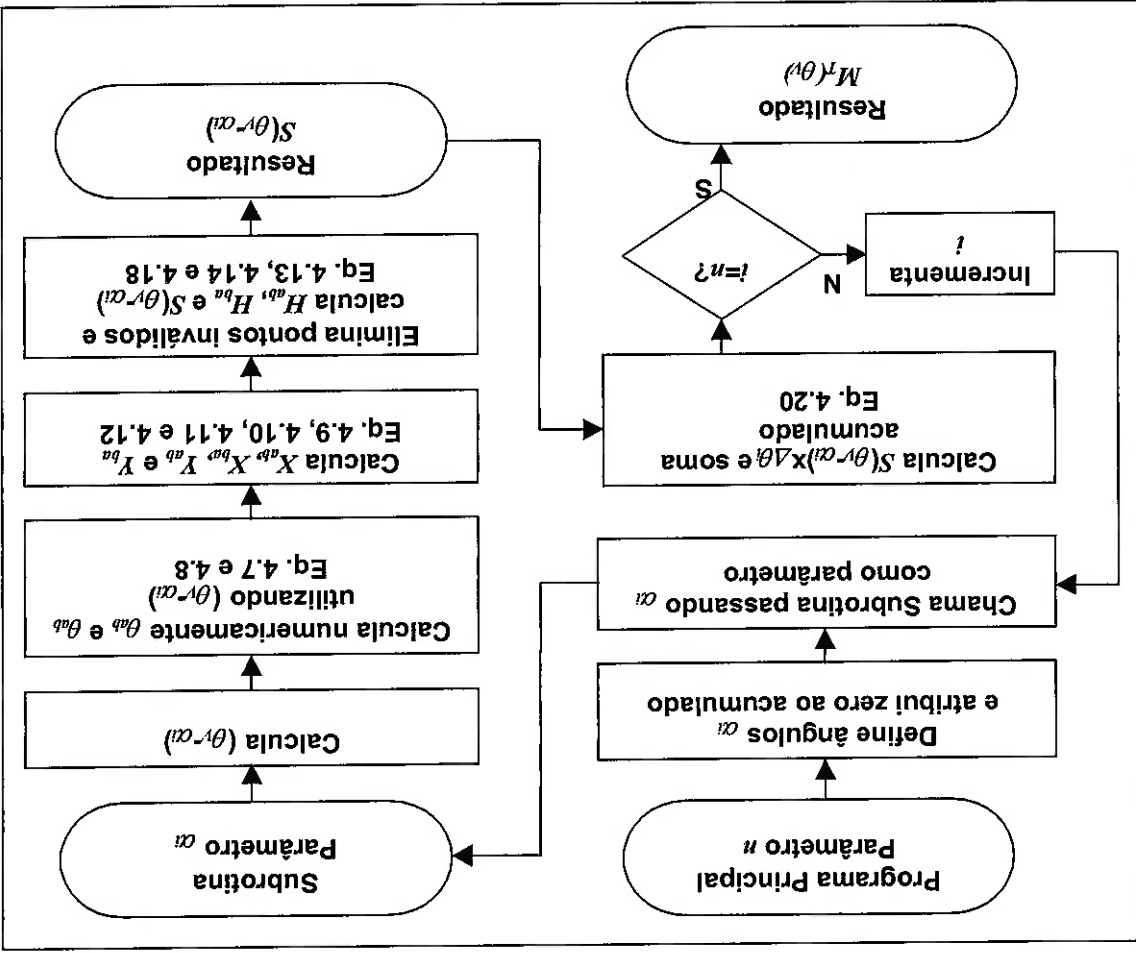


Figura 4.13: Fluxograma da Solução Numérica do Modelo.

Para as simulações das equações do modelo, os seguintes parâmetros foram

utilizados:

ϕ_r	= 25 mm	Real da Fresa;
γ	= 30°	Real da Fresa;
K_{sic}	= 202,8 Kgf / mm ²	Vide Capítulo 2;
Z	= 0,16	Vide Capítulo 2.

Os outros parâmetros do modelo foram escolhidos conforme o que se desejava

estudar ou com que sinal comparar:

P_p : Obtido por medição do corpo de prova utilizado para coletar o sinal;

N : Calculada através do espectro do sinal real;

V_n : Real utilizada durante a coleta do sinal (Programa CNC);

e : Não foi medida durante a coleta dos dados reais, portanto este

parâmetro será adotado, tanto para demonstração do modelo como para

a comparação com sinais reais.

Nas páginas a seguir são mostrados os sinais resultantes do modelo, de acordo

com a evolução de e , e fixando os outros parâmetros em:

P_p : 8 mm (Média);

N : 290,5* RPM;

V_n : 39 mm/min.

Para a obtenção dos espectros mostrados os sinais no tempo foram normalizados

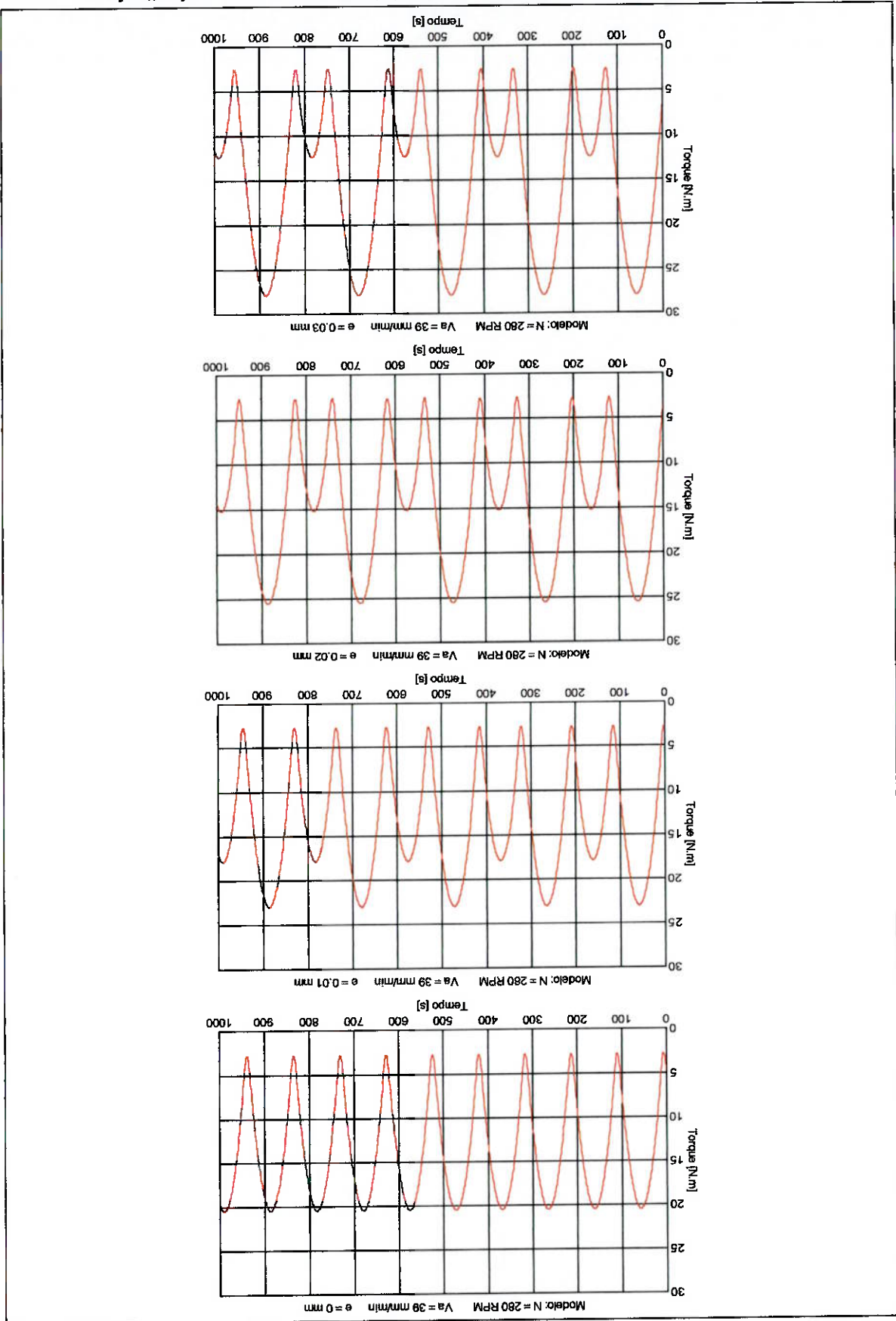
conforme descrito na seção 4.3.2 e o espectro foi obtido conforme descrito na seção

4.3.3. Nas figuras 4.16 e 4.17 a amplitude da FFT em cada frequência foi normalizada de

0 a 1 para melhor observação.

*Esta rotação foi medida com precisão a partir do espectro do sinal real. Porém nas figuras e ao longo do texto convencionou-se mencionar a rotação indicada na máquina de 280 RPM, para maior clareza.

Figura 4.14: Evolução do Modelo do Sinal de Torque com a variação de e



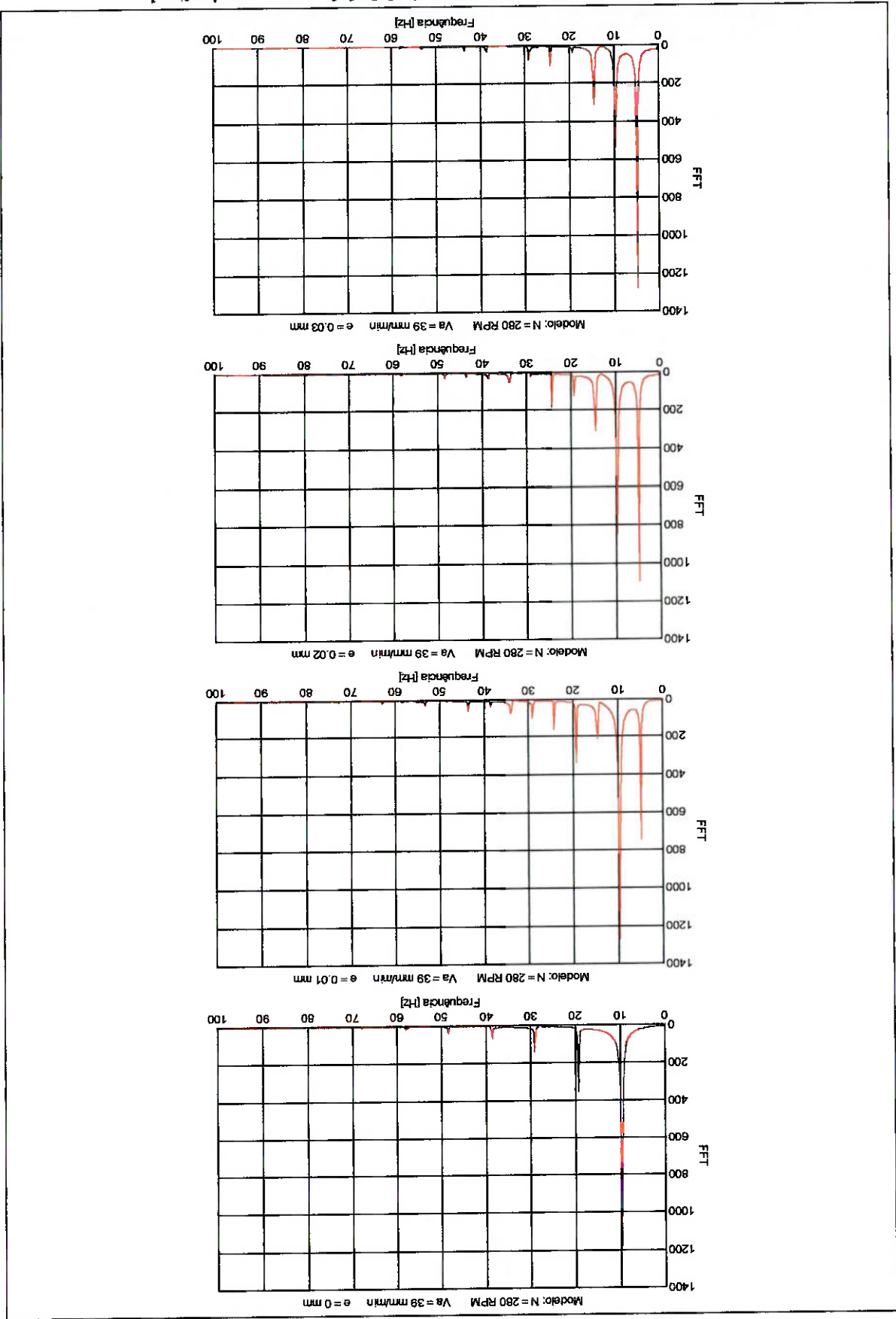


Figura 4.15: Evolução do Espectro do Modelo com a variação de e

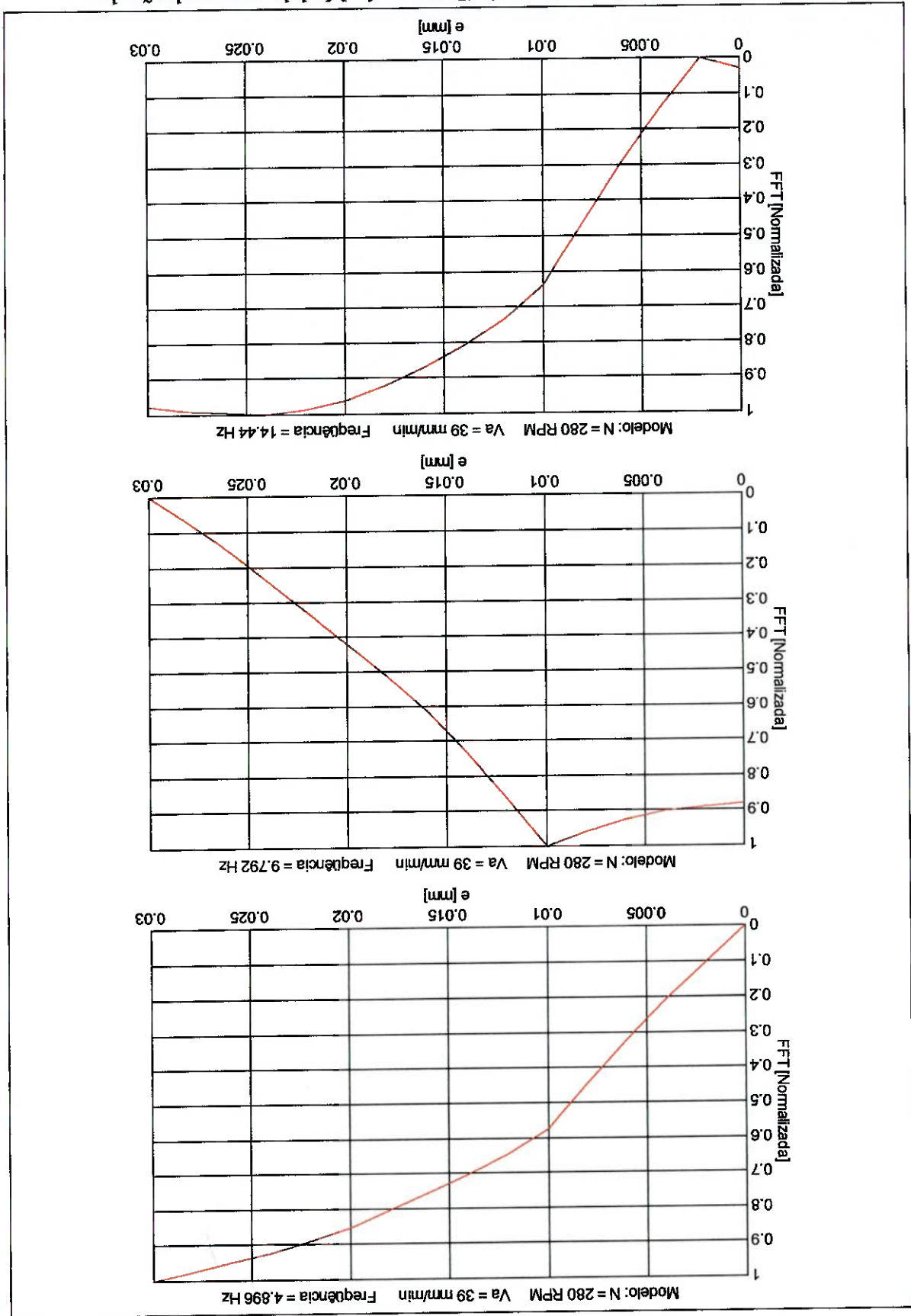
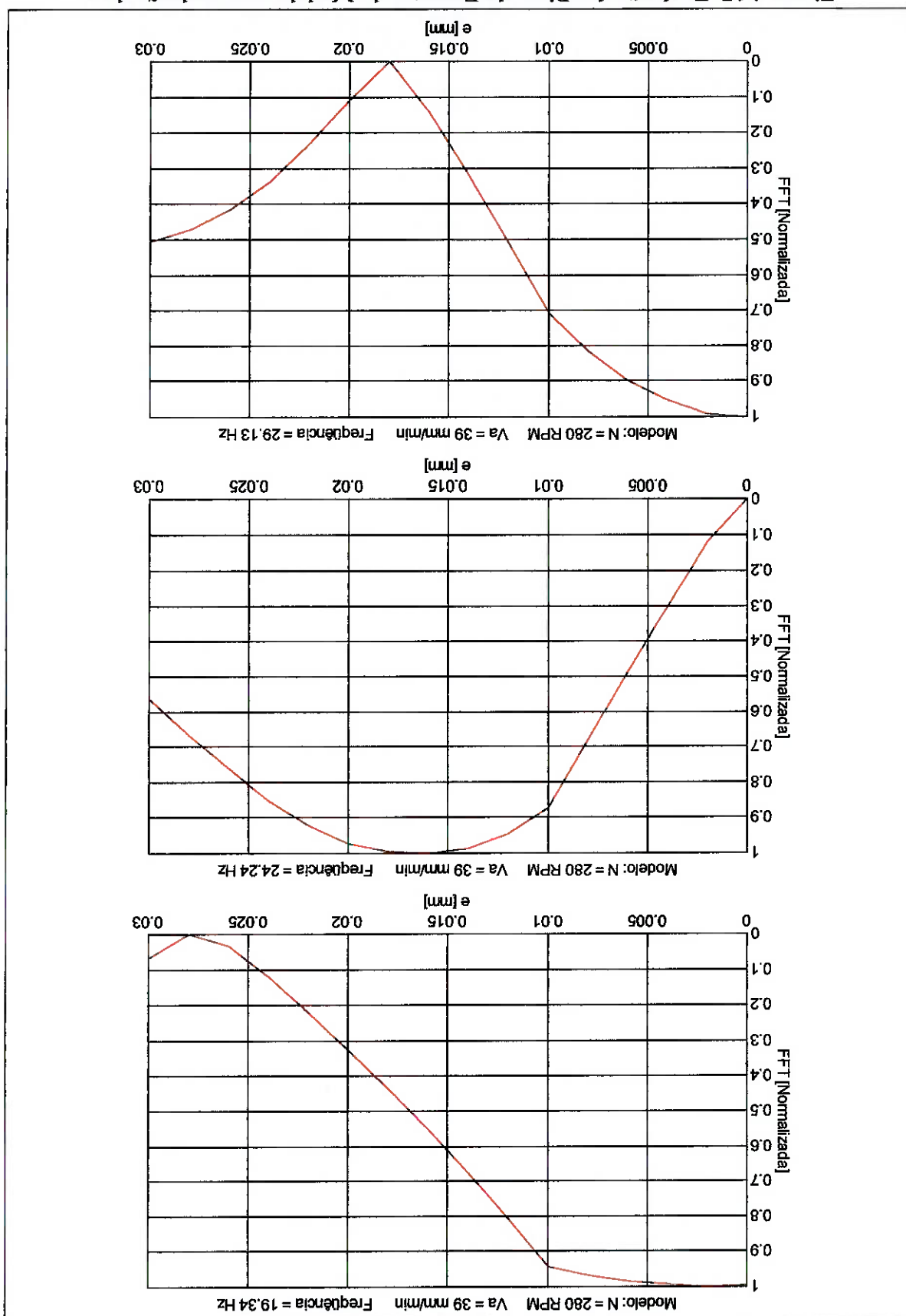


Figura 4.16: Evolução dos Picos do Espectro do Modelo com evolução de e

Figura 4.17: Evolução dos Picos do Espectro do Modelo com evolução de e



4.4.3 Comparação com o Sinal Real:

Na figura 4.18 apresenta-se a comparação entre o sinal real e o modelo. A figura se baseia na série de dados coletados a 280 RPM e 39 mm/mim de velocidade de avanço. Pode-se observar que o modelo consegue acompanhar razoavelmente bem a dinâmica do sinal real. Conseguiu-se reproduzir a amplitude do sinal real sem a necessidade de fatores de correção do modelo, o que foi considerado um aspecto muito positivo do modelo, e também mostra a efetividade dos dados tabelados para pressão específica de corte. O modelo não se mostrou eficaz em reproduzir os vales do sinal real.

Um dos objetivos do desenvolvimento do modelo, foi demonstrar a forte correlação das variações observadas nos sinais coletados com a variação na excentricidade da ferramenta. A figura 4.19 mostra a comparação da evolução com o desgaste dos principais picos do espectro do sinal real com a evolução do desgaste simulada pelo modelo através do ajuste da excentricidade, e . Para a simulação do desgaste pelo modelo, o parâmetro e foi escolhido ponto a ponto com base na relação entre os primeiros picos do espectro do sinal real: calculando-se esta relação para o espectro do sinal real, foi localizado o e que provocasse no modelo o mesmo valor. Com esta análise mostra-se que variando-se apenas a excentricidade da ferramenta pode-se obter a evolução mostrada nos sinais reais à medida que ocorre o desgaste da ferramenta. Para a obtenção dos espectros os sinais no tempo foram normalizados conforme descrito na seção 4.2.2 e o espectro foi obtido conforme descrito na seção 4.2.3. Na figura 4.19 a amplitude da FFT em cada frequência foi normalizada de 0 a 1 para melhor observação. As simulações foram realizadas com base nas amostras coletadas a 280 RPM e 39 mm/mim de velocidade de avanço.

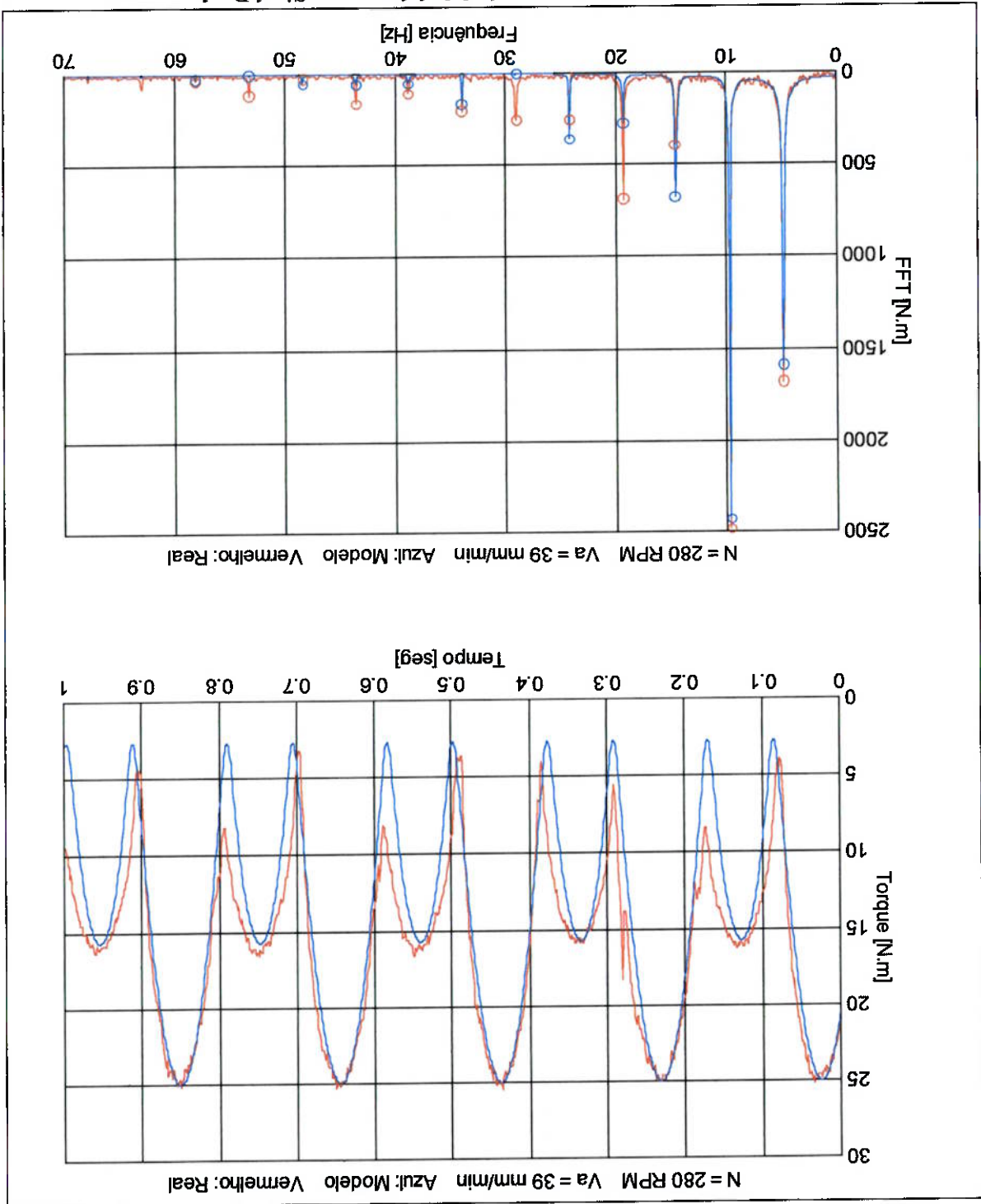
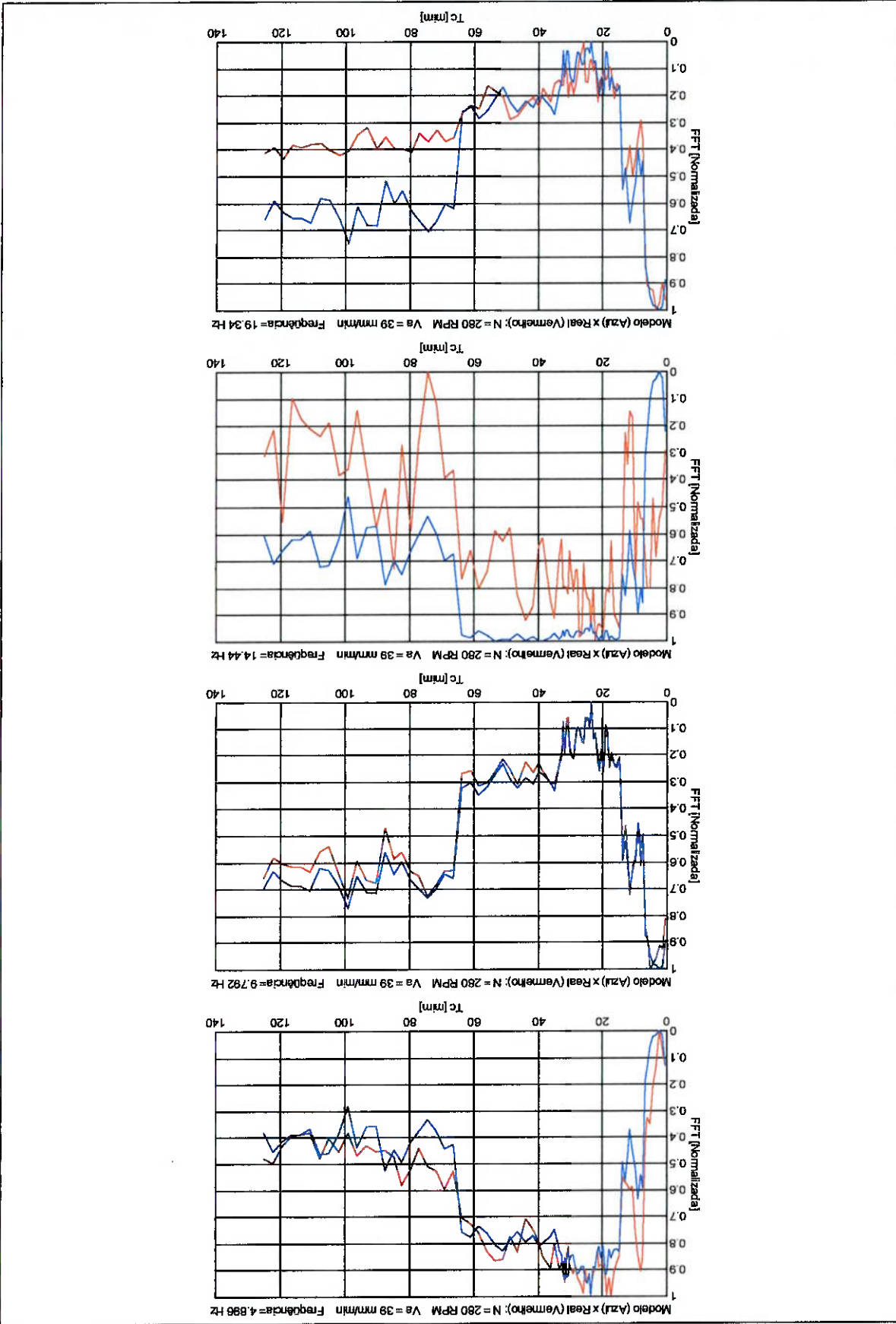


Figura 4.18: Comparação do Modelo com o Sinal Real

Figura 4.19: Evolução do Espectro com o Desgaste (T_c)



4.5 Aplicação de Redes Neurais para Reconhecimento do Desgaste

As redes neurais já demonstraram a sua eficácia no reconhecimento de padrões, sendo capazes de identificar características desejadas em um sinal ruidoso. Sua aplicação no reconhecimento do desgaste da ferramenta já foi tema de inúmeros trabalhos. Assim, apesar de ter-se observado que grande parte das variações observadas no sinal são geradas pela variação da excentricidade, foi testada a utilização das redes neurais com o objetivo de identificar o desgaste da ferramenta.

4.5.1 Pré – Processamento dos Sinais:

Para a obtenção das entradas para rede neural, ou seja, os índices de monitoramento, os sinais no tempo foram normalizados conforme descrito na seção 4.3.2 e o espectro foi obtido conforme descrito na seção 4.3.3.

Do espectro assim calculado, foram separadas as seis maiores frequências de cada amostra, que são as seis primeiras, a primeira delas correspondente à rotação da ferramenta. Para a separação selecionaram-se os seis pontos correspondentes do espectro, formado por um total de 2048 pontos. O valor do espectro em cada uma destas frequências foi normalizado de 0 a 1, o que foi finalmente colocado como a entrada da rede neural, que foi estruturada com seis entradas.

4.5.2 Estrutura e Treinamento da Rede Neural:

Utilizou-se redes com estrutura *feed forward perceptron multilicamada* com função de ativação *logaritmo sigmoideal*. Esta estrutura de rede foi treinada através do algoritmo *back propagation*. A rede utilizada também possui em cada neurônio uma

constante de soma que pode, assim como os pesos, ser alterada pelo algoritmo de treinamento. Esta constante é chamada de "bias".

O treinamento, realizado de maneira supervisionada foi feito utilizando-se 42 do

total de 84 amostras de dados obtidas nos experimentos realizados com rotação da fresa a 280 RPM e velocidade de avanço a 39 mm/min. As 42 amostras restantes nestas condições foram separadas para teste. A separação foi feita sequencialmente, sendo uma

amostra para treinamento, uma para teste e assim sucessivamente. A rede foi estruturada para seis entradas, conforme explicado na seção anterior. Adotou-se uma única saída para

a rede, obtida normalizando-se de 0,01 a 0,99 o tempo corrigido de usinagem (T_c), que

foi o parâmetro escolhido para representar o desgaste. Varias estruturas de rede foram

testadas. Dentre todas, a estrutura que apresentou melhores resultados era formada por 12

neurônios na primeira camada, uma camada intermediária com 7 neurônios e 1 neurônio

na camada de saída, conforme mostrado na figura 4.20.

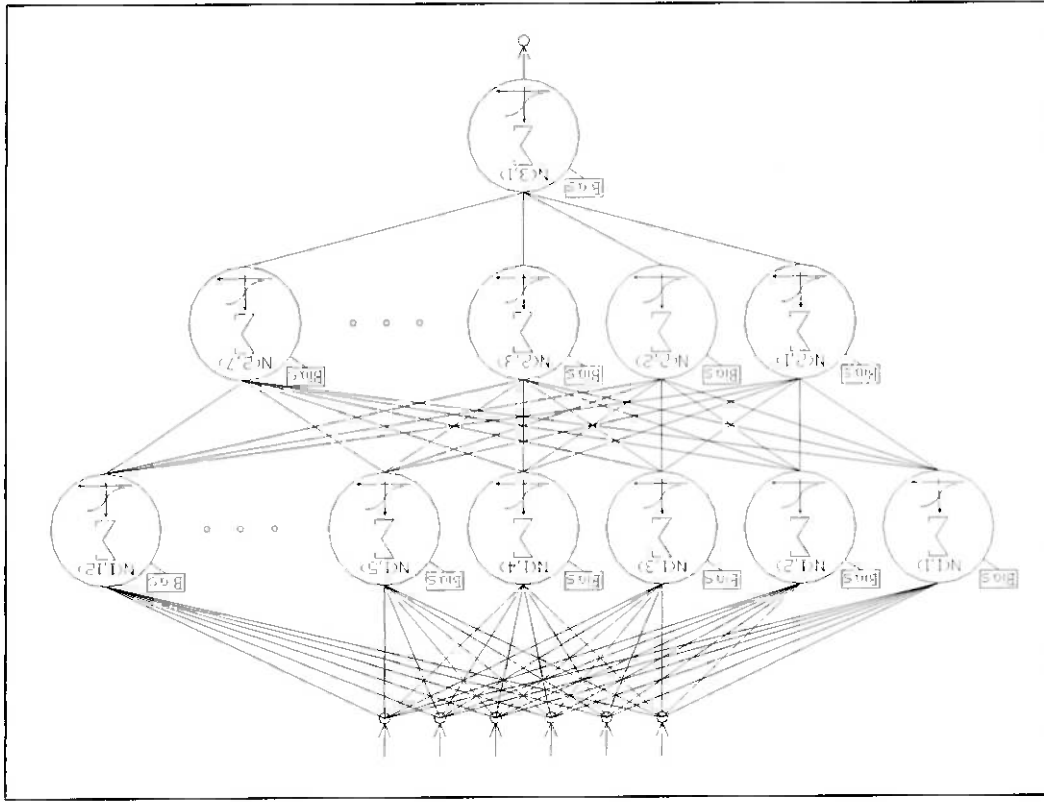


Figura 4.20: Estrutura de rede utilizada

4.5.3 Desempenho da Rede Neural:

Na figura 4.21 pode-se observar o resultado do treinamento, com a rede colocada diante dos mesmos dados utilizados para o treinamento. O eixo horizontal é o valor esperado de saída da rede, e o vertical é o valor da saída da rede após treinamento.

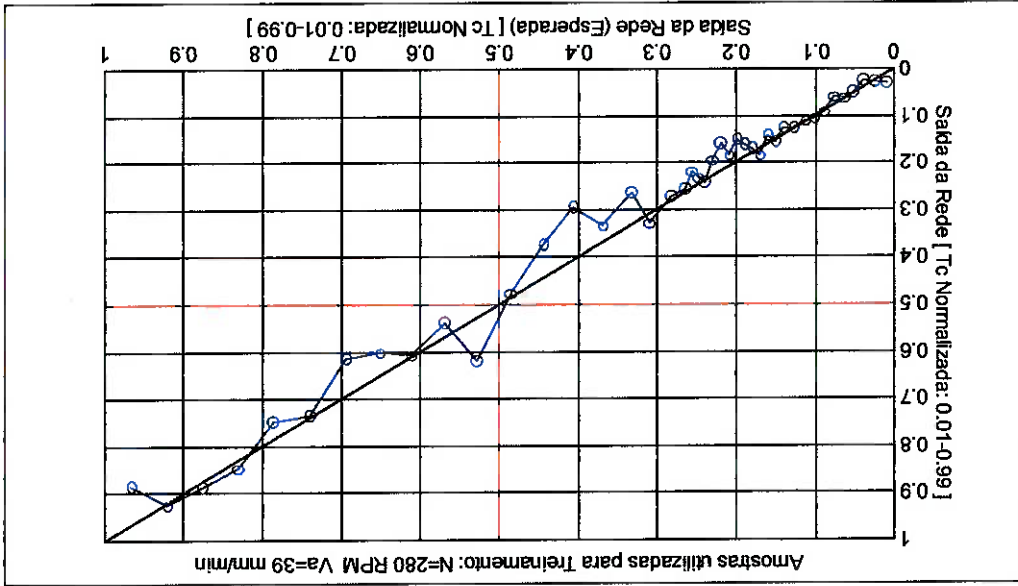


Figura 4.21: Saída da rede treinada sobre amostras utilizadas no treinamento

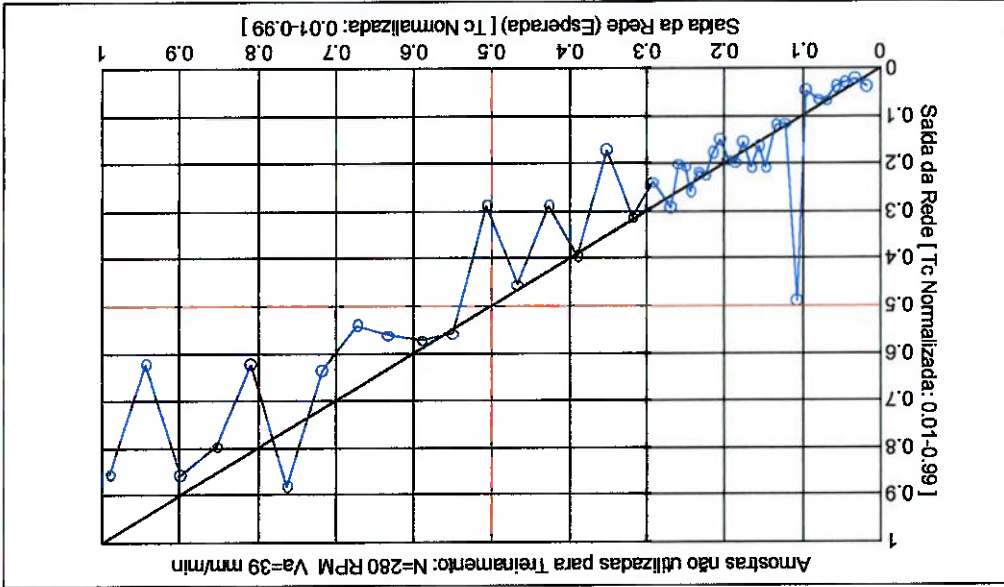


Figura 4.22: Saída da rede sobre amostras fora do treinamento (mesmos parâmetros)

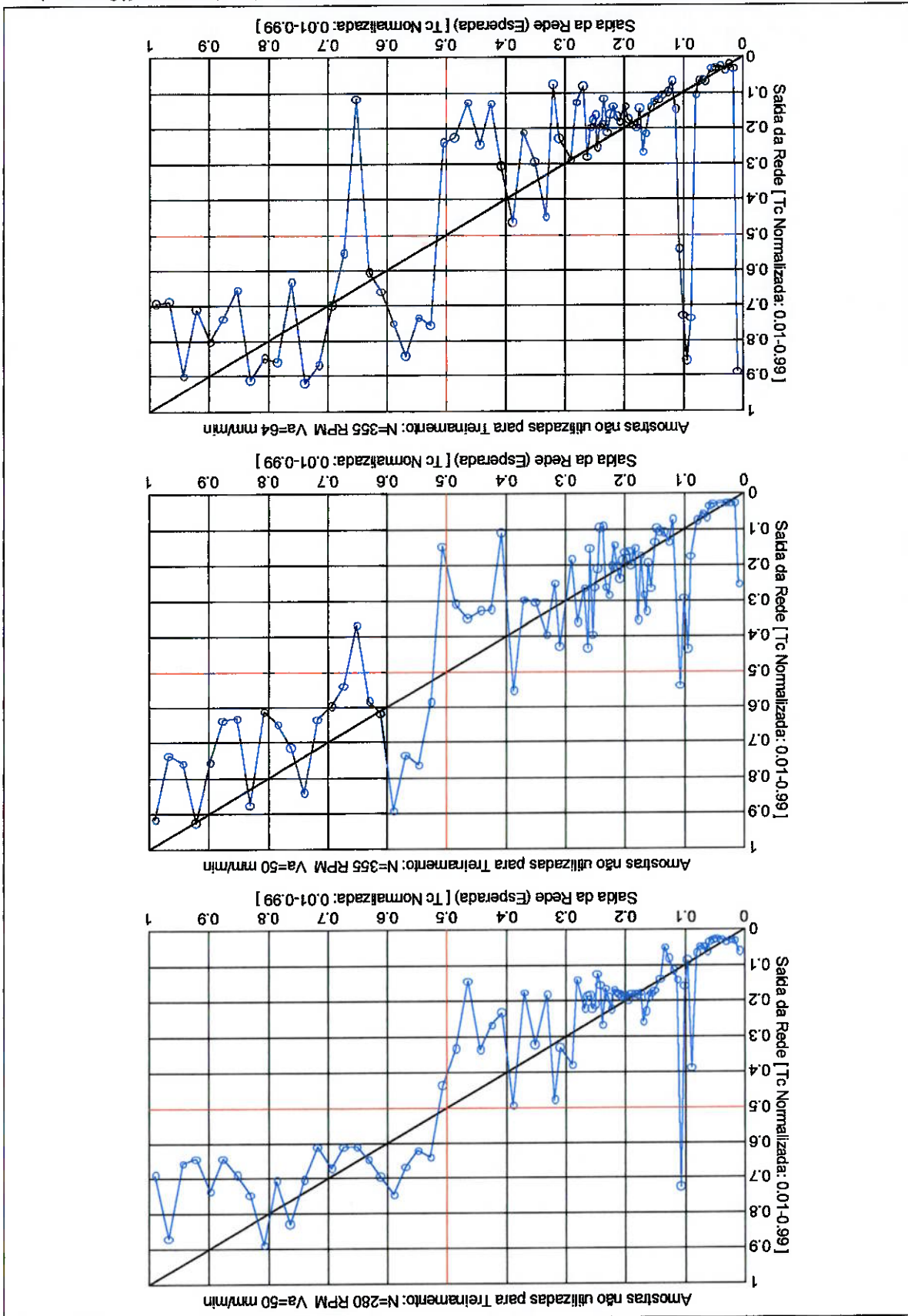


Figura 4.23: Saída da rede sobre amostras fora do treinamento (parâmetros diferentes)

Nas amostras coletadas com os mesmos parâmetros que as amostras de treinamento, pela grande similaridade e proximidade era de se esperar que não ocorressem desvios tão grandes quanto os observados na figura 4.22. Isto significa que a rede não foi capaz de uma boa generalização, adaptando-se apenas as características específicas das amostras de treinamento. Pode-se interpretar este resultado, sob o ponto de vista dos dados, como a falta de uma boa correlação dos dados utilizados na rede com o que se deseja observar.

Na figura 4.23 pode-se ver o desempenho da rede quando colocada diante de dados não utilizados para o treinamento e, além disso, com parâmetros de usinagem diferentes. Observa-se uma degradação crescente do desempenho quanto mais distintos são os parâmetros dos utilizados para o treinamento.

4.5.4 Identificação Discreta do estado da Ferramenta:

Na seção anterior, o desempenho da rede na identificação foi analisado considerando o desgaste da ferramenta uma variável contínua. Nesta seção, passa-se a considerar o desgaste uma variável discreta. Com base no tempo corrigido de usinagem (T_c), que foi o parâmetro escolhido para representar o desgaste, podemos considerar dois estados discretos de desgaste da ferramenta, em método semelhante ao utilizado por

Rangwala e Dornfeld (1990):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Gasta:} \\ \text{Nova:} \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{se } (T_c \geq 0,5) \\ \text{se } (T_c < 0,5) \end{array}$$

O resultado desta discretização está representado nas figuras 4.43 a 4.47 na forma de linhas vermelhas, dividindo a área dos gráficos em quadrantes. Todos os pontos que

estão no 1° e no 3° quadrante obedecem os critérios estabelecidos, sendo portanto

considerados classificações corretas. A tabela 4.4 mostra os resultados observados.

Parâmetros de Usinagem	Total de Amostras	Classificações Corretas	Sucesso
N=280 RPM Va=39 mm / min	42	41	97,6%
N=280 RPM Va=50 mm / min	83	81	97,6%
N=355 RPM Va=50 mm / min	81	77	95,1%
N=355 RPM Va=64 mm / min	79	72	91,1%
Geral	285	271	95,1%

Tabela 4.5: Desempenho da classificação discreta

Conforme mostrado anteriormente, existe uma forte correlação das amostras com a variação da excentricidade que ocorre durante o desgaste da ferramenta, e também devido a retirada e reinstalação da ferramenta. Assim, apesar de a rede ter conseguido acompanhar razoavelmente bem a variação do desgaste dentro dos limites estabelecidos, este resultado não pode ser generalizado. Uma ferramenta igual à utilizada, submetida aos mesmos ensaios poderá apresentar evolução da excentricidade distinta da observada nestas amostras, o que certamente resultaria na total deterioração da capacidade de classificação observada com estas amostras.

5. CONCLUSÃO

5.1 Equipamento de Medição de Torque Desenvolvido:

Neste trabalho foi desenvolvido um equipamento capaz de medir o torque dinâmico de uma operação de fresamento. A respeito deste desenvolvimento, chegou-se às seguintes conclusões:

- A técnica de transmissão ótica do sinal modulado em frequência, desenvolvida por Teixeira (1998), mostrou sua efetividade em uma nova aplicação. Com esta técnica foi possível desenvolver um equipamento de baixo custo, que se mostrou capaz de operar num ambiente mecanicamente agressivo, e com nível de ruído eletromagnético extremamente elevado. A experiência obtida no desenvolvimento do transdutor permite sugerir a técnica empregada para outras aplicações.

- Neste trabalho desejava-se observar também a dinâmica do sinal, ao contrário do trabalho de Teixeira. Para isso foi desenvolvida e comprovada uma técnica que permitiu utilizar o sinal modulado em frequência para a análise digital de sinais.

- Foi desenvolvido um software capaz de coletar o sinal modulado em frequência diretamente a partir da porta paralela do PC. O conjunto de soluções citadas gera uma nova perspectiva sob a qual pode-se implementar, com facilidade e a um baixo custo, sistemas confiáveis para aquisição de dados de origem mecânica. Não só para sistemas rotativos, mas pode-se também aproveitar a transmissão óptica do sinal para obter e transmitir o sinal de uma maneira imune a ruídos e com total isolamento entre a fonte geradora do sinal e o equipamento de gravação de dados.

5.2 Aplicação do Sinal de Torque para Monitoramento do Desgaste

Desejava-se estudar a aplicação do sinal de torque para o monitoramento do desgaste da ferramenta. Sobre este assunto chegou-se às seguintes conclusões:

- A principal evolução observada no sinal de torque foi a variação da diferença que existe entre o esforço realizado por cada uma das arestas de corte da ferramenta. No domínio do tempo, esta variação se expressa através da variação da diferença que existe entre a amplitude dos cumes do sinal no tempo. No domínio da frequência esta evolução pode ser observada ao acompanhar a evolução da amplitude relativa do pico na frequência de rotação da ferramenta e o seu primeiro múltiplo.

- A diferença entre os esforços das arestas de corte pode ser gerada tanto pela excentricidade da ferramenta, como também pode ser provocada por desgaste, irregular entre as arestas de corte. Nos sinais apresentados neste trabalho, sabe-se, pela simples observação da ferramenta gasta, que a diferença entre os esforços foi gerada principalmente pela excentricidade.

- A diferença entre os esforços não é um bom parâmetro para o desgaste, pois pode ser provocada por situações comuns e de difícil controle no ambiente de fábrica. A simples retirada e reinstalação da ferramenta, se não estiver sendo utilizado um suporte de precisão, afeta sensivelmente a excentricidade, provocando variação na diferença entre os esforços.

- O modelo do sinal de torque, conseguiu simular grande parte da variação encontrada no sinal, através da escolha do parâmetro de excentricidade considerado, sendo a melhor demonstração das causas que provocam a evolução observada com o modelo.

- Não foi possível controlar com precisão os parâmetros experimentais que afetam a amplitude média do sinal: principalmente a instabilidade do sistema de medição, e variação na profundidade de usinagem. Assim, a amplitude média não foi considerada como indicador do desgaste da ferramenta. Sabe-se que a amplitude média do sinal pode ser utilizada para monitoramento de desgaste em operações repetitivas. Apesar disso, não era intenção deste trabalho analisar a amplitude do sinal para o monitoramento do desgaste, por julgar-se que não há muito o agregar neste sentido.
- Não foi observada, no sinal, nenhuma característica marcante que pudesse ser correlacionada com o desgaste da ferramenta.
- As redes neurais utilizadas conseguiram acompanhar razoavelmente bem a evolução do desgaste, baseadas em um conjunto relativamente pequeno de dados. Quando o desgaste foi analisado de uma maneira discreta, o resultado foi excelente, alcançando 95% de classificações corretas. Porém, este resultado deve ser observado com grande cuidado, pois como as principais variações nos sinais que serviram de entrada para a rede foram geradas pela variação na excentricidade, é possível afirmar que esta performance não se repetiria se a rede fosse testada em dados de uma outra ferramenta, que teria uma evolução da excentricidade com o desgaste, diferente da que foi utilizada para o aprendizado da rede.

5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

A experiência adquirida no decorso deste trabalho, permite sugerir alguns temas

de pesquisa:

- O circuito utilizado na parte girante pode ser melhorado para se conseguir maior estabilidade.

- O circuito receptor pode ser melhorado para obter maior sensibilidade, facilitando a conexão óptica, permitindo a experimentação da coleta remota dos dados.

- Implementação do sistema e do equipamento desenvolvido neste trabalho em outras formas de monitoramento de usinagem, com o objetivo não só de identificar o desgaste, mas também de conhecer e aprender mais sobre o processo.

- A coleta de novos dados de torque, em condições mais estáveis, permitiria outras formas de analisar o sinal e compreender as suas características. A excentricidade da ferramenta deve ser um parâmetro controlado durante a coleta de dados.

- Sobre os dados coletados, ainda cabe a experimentação de outras técnicas de análise de sinais não abordadas neste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- Bonassi, V. L. "Usinagem dos Metais." São Bernardo do Campo, 1994. Notas do curso ministrado na Faculdade de Engenharia Industrial.
- Buchanan, W. "Applied PC Interfacing, Graphics and Interrupts." London, Addison Wesley Longman, 1996.
- Byrne, G.; Dornfeld, D.; Inasaki, I.; Ketteler, G.; König, W. e Teti, R. "Tool Condition Monitoring (TCM)- The Status of Research and Industrial Application." 1996.
- Dima, D. E., Lister, P. M. and Leighton, N. J. "Neural Network Solutions to the Tool Condition Monitoring Problem in Metal Cutting - A Critical Review of Methods." International Journal Machine Tools Manufacturing, v. 37, n. 9, 1997.
- Dornfeld, D. A. "Neural Network Sensor Fusion for Tool Condition Monitoring." Annals of the CIRP, v. 39/1, 1990.
- Du, R., Elbestawi, M. A. e Wu, S. M. "Automated Monitoring of Manufacturing Process, Part I: Monitoring Methods." Journal Engineering for Industry v.117, 1995a.
- Du, R., Elbestawi, M. A. e Wu, S. M. "Automated Monitoring of Manufacturing Process, Part 2: Applications." Journal Engineering for Industry v.117, 1995b.
- Ferreira, W. P. e Chieng-Ching, C. T. "Torquímetro Dinâmico Óptico em Frequência Modulada." Relatório Técnico, 1988.
- Finnie, I. "Review of the Metal-Cutting Analyses of the Past Hundred Years." Mechanical Engineering, p. 715-21, Agosto de 1956.

- Fregni, E. "Engenharia do Projeto Lógico Digital." Sao Paulo, Edgard Blucher, 1995.
- Horowitz, P. "The Art of Electronics." Cambridge, New York: Cambridge University Press, 1986.
- IBM-PC Technical Documentation. s.n.t. Xerocópia.
- Jety, S. "Measuring Cutting Tool Wear On-Line: Some Practical Considerations." Manufacturing Engineering, 1984.
- Kannatey-Asibu, Elijah Jr. e Dornfeld, David A. "Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting." Transactions of the ASME, Agosto de 1981.
- Machinability Data Center. "Machining Data Handbook." 3.ed., Cincinnati, Ohio, v.1, 1980.
- Monidata - Manual do Computador. s.n.t. Xerocópia.
- Ozkul, T. "Estimating Acquisition Loop Time for Time-Critical Real-Time Data Acquisition Applications for the Purpose of Selecting Appropriate Hardware and Software." J. SYSTEMS SOFTWARE 37, v.37, 1997.
- Rangwala, S. e Dornfeld, D. "Learning and Optimization of Machining Operations Using Computing Abilities of Neural Networks." IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics v. 19 n.2 Março/Abril 1989.
- Rangwala, S. e Dornfeld, D. "Sensor Integration Using Neural Networks for Intelligent Tool Condition Monitoring." Journal of Engineering for Industry, v. 112, Agosto de 1990.

- Spiewak, S. e Wu, S. M. "Tool Wear Monitoring and Breakage Detection Based on Intelligent Filtering." *International Journal Machine Tools Manufacturing*, v. 28, n. 4, 1988.
- Tansel, I. N.; Mekdecı, C.; Rodriguez, O. e Uragun, B. "Monitoring Drill Conditions with Wavelet based Encoding and Neural Networks." *International Journal of Machine Tools Manufacturing*, v. 33 n. 4, 1993.
- Teixeira, M. "Monitoramento do Desgaste de Ferramentas de Corte através de um Sistema Multi-Sensorial." São Paulo, 1998. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Teti, R. "A Review of Tool Condition Monitoring Literature Data Base." *Annals of the CIRP*, v.44/2, 1995.
- Theegarten, A. e Geyer, M. "Milling." *The Machinery Publishing Co. Ltd.*, London, 1950.
- Tlustý, J e Andrews, G. C. "A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining." *Annals of the CIRP*, v. 32/2, 1983.
- Tlustý, J e Elbestawi, M. A. A. "Analysis of Transients in an Adaptive Control Servomechanism for Milling With Constant Force." *Trasactions of the ASME*, Agosto de 1977.
- Tlustý, J. e Macneil, P. "Dinamics of Cutting Forces in End Milling." *Annals of the CIRP*, v. 24/1, 1975.
- Tlustý, J. e Tarnag, Y. S. "Sensing Cutter Breakage in Milling." *Annals of the CIRP*, v. 37/1, 1988.

- Tompkins, W. J. e Webster, J. G. "Terfacing Sensors to the IBM PC." Englewood Cliffs, N.J. Prentice Hall, 1993.
- Yen, D. W. e Wright, P. K. "Adaptive Control in Machining - A New Approach Based on the Physical Constrains of Tool Wear Mechanisms." Journal of Engineering for Industry, v. 105, Fevereiro de 1983.