

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE
FUNÇÕES DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTES NUM
TORNO CNC UTILIZANDO TÉCNICAS DE
MONITORAMENTO POR EMISSÃO ACÚSTICA



Eng. André João de Souza



Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho

São Carlos

1999

Class.	TESE-EESC
Cutt.	5782
Tombo	192/99

3 1 1 0 0 0 0 6 5 3 1

9999501 S/5

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE
FUNÇÕES DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTES NUM
TORNO CNC UTILIZANDO TÉCNICAS DE
MONITORAMENTO POR EMISSÃO ACÚSTICA

Eng. André João de Souza



Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S729d Souza, André João de
Desenvolvimento e implementação de funções de
automação inteligentes num torno CNC utilizando
técnicas de monitoramento por emissão acústica / André
João de Souza. -- São Carlos, 1999.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.

Área: Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho.

1. Sistema de monitoramento. 2. Emissão acústica.
3. Função inteligente. 4. Medição on-line. I. Título.

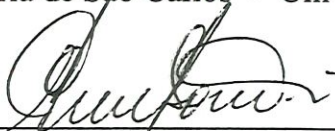
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **ANDRÉ JOÃO DE SOUZA**

Dissertação defendida e aprovada em 28.06.1999
pela Comissão Julgadora:



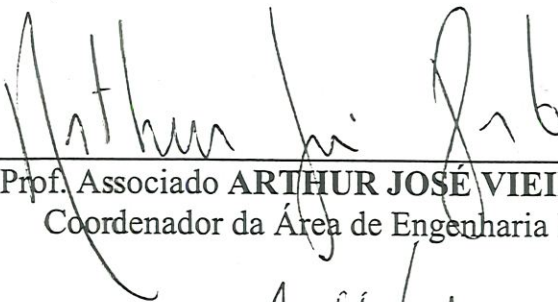
Prof. Doutor **REGINALDO TEIXEIRA COELHO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



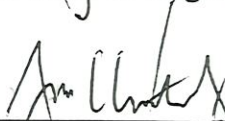
Prof. Doutor **EVANDRO LUIS LINHARI RODRIGUES**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **PAULO ROBERTO DE AGUIAR**
(UNESP – Campus de Bauru)



Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



JOSÉ CARLOS A CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

“É inútil automatizar aquilo que é irracional e improdutivo em sua essência.
Antes é preciso otimizar, racionalizar e, só então,
viabilizar a automação do processo.”

Abraham Goldstein, engenheiro elétrico.
Atua no setor de automação desde 1979

*Em memória ao meu pai,
meu primeiro e maior professor.*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor *Reginaldo Teixeira Coelho* pela confiança, orientação e amizade.

À *Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP* pela bolsa de estudo concedida.

Aos colegas das empresas *INDEX (Pedro e Aguirre)* e *RENISHAW (Ronaldo)* pela atenção e colaboração.

À todos os companheiros do *Grupo de Otimização de Processos de Fabricação (GOPF-NUMA)*, aos professores e a todos os funcionários do *Departamento de Engenharia Mecânica da EESC-USP* pela cooperação direta ou indireta.

Aos meus amigos da *MEC-92* e ao *Roberto “Chico Bento”* pelo apoio, convivência e momentos de descontração.

À minha *Família* pelo incentivo.

À *Deus*, por tudo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vi
LISTA DE SÍMBOLOS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Conceito de Função Inteligente em Máquinas CNC	3
1.2. Objetivos.....	3
2. PROBLEMAS NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO EM MÁQUINAS CNC.....	5
2.1. Colisão da Ferramenta com a Máquina.....	5
2.2. Avarias da Ferramenta	6
2.3. Problemas no Acabamento Superficial da Peça Usinada	8
2.4. Offset da Ferramenta.....	9
3. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE SISTEMAS DE MONITORAMENTO	10
3.1. Métodos Diretos de Monitoramento	14
3.1.1. Sensores Ópticos	14
3.1.2. Sensores de Resistência Elétrica.....	15
3.1.3. Sensor de Radioatividade.....	16
3.1.4. Sensor de Contato.....	17
3.2. Métodos Indiretos de Monitoramento	17
3.2.1. Forças de Corte.....	18
3.2.2. Emissão Acústica	20
3.3. Exemplos de Aplicações Industriais	23
3.3.1. RENISHAW	23
3.3.2. MAZAK.....	24
3.3.3. OKUMA.....	24
4. PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO DE FUNÇÕES INTELIGENTES NUM TORNOCNC BASEADA EM TÉCNICAS DE EMISSÃO ACÚSTICA.....	25
4.1. Relação entre o Sinal de EA e os Fenômenos Decorrentes do Processo.....	26
4.1.1. Detecção dos Sinais de Emissão Acústica	27
4.2. Estabelecimento de Critérios para a Definição das Funções Inteligentes.....	28
4.2.1. Detecção de Colisão.....	28
4.2.2. Controle Dimensional da Peça Torneada	28

5. SISTEMA DE DETECÇÃO E CONTROLE DIMENSIONAL DE PEÇAS EM PROCESSO VIA EMISSÃO ACÚSTICA	29
5.1. Montagem do Banco de Ensaios	30
5.1.1. <i>Máquina Ferramenta</i>	<i>31</i>
5.1.2. <i>Sensor de Emissão Acústica</i>	<i>31</i>
5.1.3. <i>Sistema de Monitoramento e Aquisição de Dados</i>	<i>32</i>
5.1.4. <i>Dispositivo de Medição por Contato</i>	<i>34</i>
5.1.5. <i>Interface de Monitoramento</i>	<i>35</i>
5.1.6. <i>Peça Obra</i>	<i>36</i>
6. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA EMISSÃO ACÚSTICA NO SISTEMA DE DETECÇÃO E CONTROLE DIMENSIONAL DE PEÇAS EM PROCESSO	37
6.1. Escolha dos Parâmetros	37
6.2. Erros de Posicionamento	38
6.2.1. <i>Detecção de Colisão</i>	<i>39</i>
6.2.2. <i>Detecção de Contato</i>	<i>43</i>
6.3. Ajustes dos Limites Estáticos	45
6.4. Análise da Detecção de Contato Apalpador/Peça para Diferentes Parâmetros de Medição	46
6.4.1. <i>Análise de Variância (ANOVA)</i>	<i>46</i>
6.4.2. <i>Avaliação do Comportamento dos Parâmetros em Materiais Diferentes</i>	<i>48</i>
7. CONCEITOS E CRITÉRIOS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE FUNÇÕES INTELIGENTES	50
7.1. Detecção de Colisão	50
7.2. Controle Dimensional da Peça Torneada	51
7.3. Funções Inteligentes	52
8. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS FUNÇÕES INTELIGENTES EM CICLOS DE TORNEAMENTO	55
8.1. Detecção de Colisão	55
8.2. Sistema de Controle Dimensional da Peça em Processo	56
8.2.1. <i>Estabilidade do Processo</i>	<i>57</i>
8.2.2. <i>Capacidade do Processo</i>	<i>58</i>
9. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES	60
10. ANEXOS	63
A. Erros de Posicionamento	63
B. Ajuste dos Limites Estáticos	66
C. Análise da Detecção Apalpador/Peça para Diferentes Parâmetros de Medição	67
D. Programas	70
E. Sistema de Controle Dimensional de Peças em Processo	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
Referências Citadas	74
Bibliografia Consultada	77
APÊNDICES	82

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – DESGASTES CONVENCIONAIS DA FERRAMENTA DE CORTE	7
FIGURA 3.1 – SISTEMAS DE MONITORAMENTO	11
FIGURA 3.2 – EVOLUÇÃO DA AUTOMAÇÃO DOS PROCESSOS DE USINAGEM.....	12
FIGURA 3.3 – SISTEMA DE DETECÇÃO ÓPTICO PARA A MEDIÇÃO DIRETA DO DESGASTE DA FERRAMENTA.....	15
FIGURA 3.4 – SISTEMA DE MEDIÇÃO COM SENSOR DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA.....	16
FIGURA 3.5 – SISTEMA DE CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DO DIÂMETRO E COMPENSAÇÃO DA FERRAMENTA, E UM SISTEMA APALPADOR DE INSPEÇÃO DA PEÇA COM COMUNICAÇÃO INFRAVERMELHA, NUMA MÁQUINA CNC.	18
FIGURA 3.6 – COMPARAÇÃO DAS FAIXAS DE FREQUÊNCIA DE EA E OUTROS TIPOS DE ONDA.	21
FIGURA 3.7 – EMISSÃO ACÚSTICA GERADA NO PROCESSO DE CORTE.	22
FIGURA 3.8 – PRESET DA FERRAMENTA NUM TORNO CNC, MOSTRANDO UM SENSOR TS20, EM CONJUNTO COM UM BRAÇO REMOVÍVEL HPA.	23
FIGURA 4.1 – SINAL BRUTO E VALOR RMS DE EA.....	26
FIGURA 5.1 – ESQUEMA DE MONTAGEM DO BANCO DE ENSAIOS UTILIZADO NA DETECÇÃO DO APALPADOR COM A PEÇA	30
FIGURA 5.2 – SENSOR DE EMISSÃO ACÚSTICA: (A) LOCALIZAÇÃO NA MÁQUINA. (B) DIMENSÕES	32
FIGURA 5.3 – SENSIS® BM-12	33
FIGURA 5.4 – LIGAÇÕES ELÉTRICAS DO SISTEMA.....	33
FIGURA 5.5 – APALPADOR UTILIZADO NO TRABALHO.....	34
FIGURA 5.6 – DIAGRAMA DE BLOCOS DA VI.....	35
FIGURA 5.7 – INTERFACE DA VI PARA O MONITORAMENTO	36
FIGURA 6.1 – DEFINIÇÃO DOS ERROS DE PARÂMETRO E POSIÇÃO	39
FIGURA 6.2 – MARCAS NA PEÇA PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE AVANÇO EM X.....	40
FIGURA 6.3 – GRÁFICO DO ERRO DE POSICIONAMENTO EM FUNÇÃO DO AVANÇO EM X DA FERRAMENTA PARA UMA MÉDIA DE 10 ENSAIOS DE COLISÃO	40

FIGURA 6.4 – ENSAIO PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE AVANÇO RÁPIDO EM Z	42
FIGURA 6.5 – GRÁFICO DO ERRO DE POSICIONAMENTO EM FUNÇÃO DO AVANÇO EM Z- DA FERRAMENTA PARA UMA MÉDIA DE 10 ENSAIOS DE COLISÃO	42
FIGURA 6.6 – GRÁFICO DO ERRO DE POSICIONAMENTO EM FUNÇÃO DO AVANÇO EM Z+ DA FERRAMENTA PARA UMA MÉDIA DE 10 ENSAIOS DE COLISÃO	43
FIGURA 6.7 – GRÁFICO DO ERRO DE POSICIONAMENTO EM FUNÇÃO DO AVANÇO EM X DO APALPADOR PARA UMA MÉDIA DE 10 ENSAIOS DE CONTATO	44
FIGURA 6.8 – TENSÃO $E_{A_{RMS}}$ E ENTRADA DO CLP NO CONTATO DA FERRAMENTA CONTRA A PEÇA	45
FIGURA 6.9 – GRÁFICOS DA VARIAÇÃO DO DIÂMETRO COM A VELOCIDADE DE AVANÇO PARA DIFERENTES MATERIAIS DA PEÇA OBRA: (A) ALUMÍNIO, (B) 1020, (C) 1030, (D) 8640	48
FIGURA 6.10 – AÇÃO DO APALPADOR SOBRE DIFERENTES MATERIAIS DA PEÇA: (A) ALUMÍNIO, (B) AÇOS 1020 E 1030 ENDURECIDO, (C) AÇO 8640 TEMPERADO	49
FIGURA 7.1 – FUNÇÕES DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTES IMPLEMENTADAS NO TORNO CNC UTILIZANDO TÉCNICAS DE MONITORAMENTO POR EMISSÃO ACÚSTICA	53
FIGURA 8.1 - DESENHO DA PEÇA FINAL COM AS DIMENSÕES CONTROLADAS PARA VERIFICAÇÃO	57
FIGURA 8.2 - CARTA DE CONTROLE PARA OS VALORES OBSERVADOS	58
FIGURA 8.3 - HISTOGRAMA PARA OS VALORES LEVANTADOS	59

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – CLASSIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS SENSORES DE DETECÇÃO DO ESTADO DA FERRAMENTA DE CORTE.....	13
TABELA 4.1 – CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO.....	25
TABELA 5.1 – SITUAÇÕES DE MONITORAMENTO VIA EMISSÃO ACÚSTICA	29
TABELA 7.1 – TABELA DE DECISÕES EM FUNÇÃO DO SINAL DE EMISSÃO ACÚSTICA	54
TABELA 10.1 – DADOS OBTIDOS NA COLISÃO DA FERRAMENTA CONTRA A PEÇA EM X.....	64
TABELA 10.2 – DADOS OBTIDOS NA COLISÃO DA FERRAMENTA CONTRA A PEÇA EM Z-.....	64
TABELA 10.3 – DADOS OBTIDOS NA COLISÃO DA FERRAMENTA CONTRA A PEÇA EM Z+.....	65
TABELA 10.4 – DADOS OBTIDOS NO CONTATO DO APALPADOR COM A PEÇA EM X.....	65
TABELA 10.5 – LEITURA NO REGISTRADOR R COM A FUNÇÃO MEAS DOS DADOS OBTIDOS NO CONTATO DO APALPADOR COM A PEÇA	66
TABELA 10.6 – PONTOS DE AMOSTRAGEM ENCONTRADOS NA MEDIÇÃO VIA LABVIEW® NO TOQUE DA FERRAMENTA CONTRA A PEÇA	66
TABELA 10.7 – VALORES OBTIDOS NA MEDIÇÃO DO CONTATO DO APALPADOR CONTRA A PEÇA ATRAVÉS DA FUNÇÃO MEAS (DESPREZANDO O ERRO DE PARÂMETRO)	67
TABELA 10.8 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS ENSAIOS PRELIMINARES.....	69
TABELA 10.9 – VALORES OBTIDOS (PARÂMETRO R) PARA A COMPARAÇÃO DO EFEITO DO APALPADOR NO CONTATO COM DIFERENTES MATERIAIS.....	69
TABELA 10.10 – MEDIDA DA PEÇA EFETUADA AO LONGO DO TEMPO.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS*

A/D	– Analógico-Digital
CBN	– <i>Cubic Boron Nitride</i> (Nitreto de Boro Cúbico)
CEP	– Controle Estatístico do Processo
CLP	– Controlador Lógico Programável
CNC	– Comando Numérico Computadorizado
CPU	– Unidade Central de Processamento
EA	– Emissão Acústica
FI	– Função Inteligente
FPA	– Filtro de Frequências Passa-Altas
HPA	– <i>High Precision Arm</i> (Braço de Alta Precisão) para determinação automática do <i>preset</i> da ferramenta [RENISHAW]
HD	– <i>Hard Disk, Winchester</i> ou Disco Rígido
HSS	– <i>High Speed Steel</i> (Aço Rápido)
I/O	– Interface de Entrada e Saída do comando SINUMERIK 810D
ISO	– <i>International Standards Organization</i> (Norma Internacional)
LVDT	– <i>Linear Variable Differential Transformer</i> (Transdutor de Deslocamento)
MFDP	– Sistema Máquina Ferramenta – Dispositivo de Fixação – Peça
PCD	– <i>Polycrystalline Diamond</i> (Diamante Policristalino)
PCMCIA	– <i>Personal Computer Memory Card International Association</i>
RMS	– <i>Root Mean Square</i> (Desvio Médio Quadrático) dos Valores Obtidos
UFSCar	– Universidade Federal de São Carlos
VI	– Rotina de Programação do Programa LabView®

* Não foram adicionados “abreviaturas e siglas” aplicados nos apêndices.

LISTA DE SÍMBOLOS*

a	– avanço (também representado no trabalho por F – <i>feed rate</i>)
Cd	– distância do centro da cratera à aresta de corte
Cp	– profundidade da cratera
d	– deslocamento da aresta cortante
ΔE	– variação ou gasto de energia contida na emissão acústica (EA)
D_{DT}	– diâmetro detectado pelo sensor
D_N	– diâmetro nominal
D_F	– dimensão final desejada na peça (diâmetro)
D_{PC}	– diâmetro da peça
D_{PD}	– diâmetro de parada da ferramenta
Δt	– intervalo de tempo para o gasto de energia contida na EA
F	– <i>feed rate</i> ou taxa de avanço (em mm/min)
ϕ	– simbologia referente a diâmetro
l_L	– largura de desgaste
k	– constante que multiplica o número de verificações das peças com o aumento do desgaste da ferramenta
LIC	– limite inferior na carta de controle do processo
LIE	– valor limite inferior de tolerância especificado para a peça
LSC	– limite superior na carta de controle do processo
LSE	– valor limite superior de tolerância especificado para a peça

* Não foram adicionados os “símbolos” utilizados nos apêndices.

MEAS	– função de medição disponível no comando SINUMERIK 810D
NF	– frequência de verificação das peças torneadas em ciclos de FI
R_i	– registradores temporários, usados como variáveis globais nos programas. O comando 810D dispõe de $i = 99$ registradores
ρ^2	– índice de correlação linear
S_x	– desvio padrão da amostra
S_x^2	– variância da amostra
t_0	– início do ciclo de contato
t_1	– instante do contato
t_2	– detecção do contato pelo sensor
t_3	– instante de parada da ferramenta
t_4	– final do ciclo de contato
t_L	– tolerância (LSE – LIE)
T	– amplitude da amostra
\bar{T}	– média das amplitudes das amostras
v	– faixa que define onde a ferramenta se rompe no caso de quebra do gume cortante devido a desgastes excessivos
X	– sentido longitudinal de coordenada na máquina ferramenta
X_i	– elementos de uma amostra (medida de diâmetro – avanço em X)
\bar{X}	– média da amostra
$\bar{\bar{X}}$	– média das médias das amostras
Z	– sentido transversal de coordenada na máquina ferramenta

RESUMO

Com o aumento do nível de automação dos processos, tornou-se necessário um estudo mais amplo sobre os problemas envolvidos nas operações de torneamento, relacionados com qualidade e produtividade. Visando melhorar a confiabilidade das operações, com aumento de qualidade e redução de custos, foi proposto um sistema de controle dimensional da peça em processo que se utiliza de técnicas de monitoramento por emissão acústica para efetuar a medição em ciclos de torneamento das dimensões da peça-obra. Garantir a integridade das peças finais neste ciclo é tarefa das funções de automação, implementadas com o intuito de tomar decisões inteligentes perante qualquer anomalia detectada, tanto para valores mensurados abaixo ou acima da tolerância especificada pelo projeto, quanto para uma colisão imprevista na movimentação do cabeçote revólver. Abaixo do limite inferior, o operador fica ciente que a peça está refugada. Acima da superior, a máquina efetua automaticamente o retrabalho, após as devidas correções nos parâmetros de *offset* por compensação do desgaste da ferramenta. Desta forma, um controle efetivo das dimensões da peça pode permitir um controle indireto da vida da ferramenta, já que se as compensações não forem suficientes para garantir as medidas especificadas, o operador é informado pela máquina que provavelmente a aresta cortante da ferramenta deve ser substituída.

Palavras-chave:

Sistema de monitoramento, emissão acústica, função inteligente, medição on-line.

ABSTRACT

The increase in the level of process automation has necessary promoted a wider study on turning operation problems which involves quality and productivity. For the purpose of improving the production reliability with quality increasing and cost reductions, a part-dimensional control system was proposed in this work. It applies monitoring techniques by acoustic emission to measure the dimensions of the workpiece in turning cycles. The implemented automation functions require ensuring the integrity of the final work in this cycle. These functions need taking "intelligent" decisions before any detected abnormality, not only for values measuring below or above the specified tolerance set by the project but also for an unexpected collision in the movement of the turret tool. Below the inferior tolerance limit, the machine reports to operator that the piece is rejected. Above the superior, the CNC lathe makes the rework automatically, after the due corrections in the offset parameters by tool wear compensation. Therefore, an effective control of the part dimensions can lead to an indirect control of the tool life, since if the compensations are not enough to secure the specified measures, the worker is informed by machine that the cutting edge should probably be replaced.

Keywords:

Monitoring system, acoustic emission, smart function, on-line measuring.

1. INTRODUÇÃO

A incessante busca pela satisfação pessoal tem conduzido o homem a empreender novos esforços, refletindo na rapidez do processo de evolução tecnológica e na difusão do conhecimento. Como a qualidade de vida almejada está diretamente relacionada ao conforto e à possibilidade de consumo, o aumento do padrão de consciência e exigência do consumidor tem exigido das empresas uma maior variedade de produtos, novidades de função e desempenho, menor custo, maior rapidez de atendimento, melhor qualidade, além de amparo legal e prazos mais extensos de garantia. Trata-se de uma melhoria evidente na qualidade dos produtos e serviços oferecidos, bem como da sua produtividade, com o intuito de atender a demanda com eficiência. Os equipamentos e processos fabris desta empresa devem necessariamente ser capazes de se ajustar facilmente aos novos produtos. Para isso, elas investem em novas tecnologias de produção, desenvolvimento e concepção.

A importância destes investimentos para o Brasil é uma consequência da necessidade do país ser competitivo e participar da globalização da economia. Como esta abertura é irreversível, é preciso utilizar-se de todas as tecnologias disponíveis, locais e internacionais, com o intuito de permitir que a capacidade de produção, industrial ou não, possa obter resultados, a fim de concorrer num ambiente internacionalizado, habitado por bilhões de pessoas.

Em especial, nas indústrias do setor metal-mecânico, a busca por maiores índices de qualidade e produtividade¹, principalmente no setor de produção, prioriza a diminuição de tempos de montagem e a melhoria do acabamento superficial das peças. Isto proporcionou uma evolução natural de máquinas e equipamentos, já que as indústrias passaram a necessitar cada vez mais de peças fabricadas com maior precisão, qualidade e intercambiabilidade, aliadas a um crescimento na frequência de pequenos lotes fabricados com baixo custo de produção. Tais necessidades fizeram com que os sistemas de produção

¹ A produtividade é aceita como um índice de medida de crescimento, que pode ser aplicado a uma nação, indústria, empresa, ou grupo de operários. Através dela é possível avaliar o emprego de recursos, ou ser usada como recurso adicional ao planejamento. Pode ser aplicada ainda para a decisão de alternativas, na seleção de recursos às devidas aplicações. Os dados de produtividade servem como incentivo para que, com a sua disseminação, contribuam para que as atividades sejam feitas cada vez melhores [AGOSTINHO (1995)].

automatizados e flexíveis passassem a ser indispensáveis ao quadro da indústria moderna. Hoje há uma tendência mundial no uso de sistemas de controle que interagem com a máquina, monitorando o processo e reduzindo a supervisão humana. Esta maior autonomia do processo permite obter níveis de repetibilidade que dificilmente seriam obtidos se tal tecnologia não fosse aplicada.

Uma evolução evidente da automação está na substituição de grandes células de manufatura por máquinas individuais e sistemas flexíveis de fabricação, que facilitam tanto a programação quanto o *setup* [GROOVER (1987a)]. Com uma maior flexibilidade na fabricação, surgiu a necessidade de um estudo mais detalhado dos processos em máquinas ferramentas com comando numérico, suas características, vantagens e limitações. A partir daí, problemas foram encontrados durante os processos, e soluções têm sido pesquisadas. Normalmente, estas soluções implicam na interrupção do processo, necessária para se fazer correções referentes a uma possível colisão da ferramenta contra a placa, ou correções nos parâmetros de *offset* relativos aos eventuais desgastes da ferramenta de corte, ou ainda a inevitável troca da ferramenta devido a trinca, fratura ou quebra. Alguns exemplos práticos conduzem a se concluir que tais problemas são geralmente detectados visualmente ou por análise dimensional de peças acabadas através de dispositivos de medição adequados, e as correções realizadas de forma manual por um funcionário altamente qualificado, resultando em produção interrompida e tempo perdido.

Surgiu então a necessidade de um sistema que fosse capaz de analisar o processo, através do monitoramento *on-line* das grandezas físicas envolvidas ou geradas por este. Um dos métodos de monitoramento de processos convencionais de usinagem mais estudados nos últimos anos é o que emprega a análise do sinal de emissão acústica (EA), já que este é sensível ao contato (ferramenta/peça/cavaco), à deformação plástica do material da peça, e às avarias da ferramenta [BLUM et al.(1988); DORNFELD (1994); KLAIBER et al. (1990); RANGWALA & DORNFELD (1991a); SAINI & PARK (1996); WASCHKIES et al. (1994)]. Uma das principais vantagens deste método é não interferir no processo, já que o sistema capta os diferentes sinais de EA gerados pelos fenômenos citados acima através de um único sensor fixado num determinado ponto da estrutura da máquina. Assim, a utilização das técnicas de EA pode viabilizar a implementação de sistemas de monitoramento em torneamento, uma vez que os sinais de EA são excelentes para avaliar a existência de contato entre superfícies em movimento, o qual ocorre de forma intensa no processo em questão.

1.1. Conceito de Função Inteligente em Máquinas CNC

A proposta de Torneamento Inteligente baseia-se no processo de usinagem de corte com alto nível de informação, que faz uso de sistemas de monitoramento para controlar automaticamente as variáveis de operações em máquinas ferramentas CNC, tomando decisões a partir das informações monitoradas com a mínima participação humana. O conjunto de reações implementadas na máquina que possibilitam tomar tais decisões de forma automática e variada diante de determinadas situações no ambiente fabril pode ser entendido como *Função Inteligente (FI)*.

A implementação da FI em torneamento depende do conhecimento das características e grandezas envolvidas no processo, da qualidade desejada no produto final (seja ele ferramenta ou peça), e das técnicas disponíveis de monitoramento quanto às suas capacidades e limitações. O desenvolvimento deste sistema tem um caráter abrangente na compreensão de problemas e soluções, visando garantir uma melhoria na confiabilidade do processo, aliada a um aumento de qualidade e redução de custos. Isto pode ser possível, caso o sistema funcione como um operador que observa atentamente o ciclo de produção.

1.2. Objetivos

Baseando-se nos sistemas de monitoramento via técnicas de EA, e na aplicação de funções inteligentes em máquinas CNC, este trabalho tem por objetivo apresentar uma proposta para a solução de problemas específicos de processos de fabricação efetuados nestas máquinas, através de um sistema de controle dimensional da peça em processo, onde se pretende expor a viabilidade da aplicação deste sistema em favor da otimização do processo de determinação e correção das dimensões da peça torneada. Para tanto, este trabalho é dividido em doze partes:

- Capítulo 1 – *Introdução*: visão sucinta sobre as necessidades de melhoria contínua nas empresas a fim de atender a demanda com eficiência como meio de sobreviver à competitividade global.
- Capítulo 2 – *Problemas no Processo de Fabricação em Máquinas CNC*: estudo de alguns dos principais problemas enfrentados nas operações de torneamento, relacionados com a integração entre máquina/ferramenta/peça, descrevendo para cada um as causas e as conseqüências que podem proporcionar.

- Capítulo 3 – *Considerações Gerais sobre Sistemas de Monitoramento*: revisão da literatura sobre os conceitos e metodologias do monitoramento em torneamento.
- Capítulo 4 – *Proposta de Desenvolvimento de Funções Inteligentes num Torno CNC baseada em Técnicas de Emissão Acústica*: técnicas para a implementação prática das funções inteligentes, incluindo a análise da relação entre o sinal de EA e os fenômenos monitorados, e também estudos sobre o estabelecimento de critérios para a definição das operações de FI.
- Capítulo 5 – *Sistema de Detecção e Controle Dimensional de Peças em Processo via Emissão Acústica*: levantamento das características de aplicações em ciclos de funções inteligentes, apresentando as propostas de ensaios, e o sistema desenvolvido para este trabalho com uma descrição sucinta dos seus componentes.
- Capítulo 6 – *Análise do Comportamento da Emissão Acústica no Sistema de Detecção e Controle Dimensional de Peças em Processo*: testes preliminares, realizados para analisar o sinal da emissão acústica em diferentes situações de monitoramento, com o intuito de fornecer as bases para a implementação das funções inteligentes.
- Capítulo 7 – *Conceitos e Critérios para a Implementação de Procedimentos de Funções Inteligentes*: fundamentos necessários para a utilização prática das funções de monitoramento inteligentes, fornecendo informações sobre como proceder na implementação e aplicação destas técnicas.
- Capítulo 8 – *Avaliação Experimental das Funções Inteligentes em Ciclos de Torneamento*: experimentos realizados visando a verificação da integridade do sistema desenvolvido num torno CNC, através da análise dos ciclos de FI implementados.
- Capítulo 9 – *Comentários e Conclusões*: considerações finais baseadas no trabalho.
- Capítulo 10 – *Anexos*: suportes esclarecedores relativos ao conteúdo do trabalho, como tabelas de dados, cálculos efetuados e programas utilizados nos ensaios.
- *Referências Bibliográficas*: bibliografias utilizadas na elaboração deste trabalho, citadas em alguma parte do texto ou apenas consultadas para a obtenção de dados adicionais.
- *Apêndices*: revisão da literatura sobre o estudo e análise do delineamento e do controle estatístico no monitoramento da qualidade de produtos e processos.

2. PROBLEMAS NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO EM MÁQUINAS CNC

A tendência atual da usinagem dos metais está voltada para o aumento da taxa de remoção de material com alto grau de automação e a mínima intervenção humana. Isto requer processos altamente confiáveis. O processo de torneamento envolve um número muito grande de variáveis, que podem influir no desempenho de uma operação específica. Às vezes, basta que um único parâmetro apresente um desvio para comprometer todo o processo [DORNFELD (1994)]. O objetivo do monitoramento é justamente garantir tal confiabilidade ao processo, certificando que todas as variáveis estão dentro da faixa de trabalho. Caso não estejam, o monitoramento deve identificá-las e emitir uma ordem de correção. Esta correção pode ser feita, em alguns casos, durante a usinagem, garantindo a qualidade da peça em processo, e em outros, para avisar que tal peça está fora do especificado e que o processo deve ser interrompido para que as correções necessárias sejam feitas.

Antes de desenvolver sistemas de monitoramento para o torneamento, é necessário identificar exatamente quais são os problemas que precisam ser monitorados. De acordo com o objetivo do trabalho realizado, os problemas abaixo citados estão relacionados com a integridade da peça usinada, visto que sua qualidade superficial depende diretamente do estado da ferramenta de corte utilizada. Além disso, faz-se necessário um estudo sobre colisões, visto as possíveis consequências graves do impacto no sistema constituído de máquina, ferramenta e peça.

2.1. Colisão da Ferramenta com a Máquina

A colisão entre a ferramenta e a máquina pode resultar em um acidente bastante grave, gerando grande perigo para o operador e prejuízo para a empresa. A colisão pode provocar a ruptura da ferramenta ou da peça, que num eventual despedaçamento, podem

ser lançados estilhaços a altas velocidades. Além do custo da ferramenta, a colisão pode provocar estragos no barramento da máquina, no contraponto, na placa, no cabeçote, nos mancais, nos suportes, pinos de ajuste, parafusos de fixação, ou outros acessórios utilizados.

As colisões são provocadas principalmente por erros na programação das máquinas CNC, falta de referenciamento das coordenadas, ou erro humano na movimentação manual do carro porta-ferramentas durante o *setup* da operação. Para evitar este tipo de problema, o *setup* da máquina geralmente não é feito pelo operador, mas por um técnico experiente, que fica responsável por um determinado número de máquinas ou um setor específico do chão-de-fábrica.

No caso de uma colisão iminente, uma função inteligente implementada com auxílio de sistemas de monitoramento poderia minimizar os danos causados. Uma revisão sobre os sistemas geralmente utilizado na monitorização de processos de usinagem é descrita no capítulo 3 deste trabalho.

2.2. Avarias da Ferramenta

FERRARESI (1990) define as avarias da ferramenta com sendo as quebras, trincas, sulcos e as deformações plásticas, que ocorrem no gume cortante durante a usinagem. A ruptura da ponta ou da aresta cortante é originada pela ação das forças de usinagem que aumentam com o desgaste da ferramenta. Durante o processo, ocorrem desgastes originados na superfície de saída (desgastes de cratera C_p e C_d), na superfície de folga ou incidência (largura de desgaste I_L), e na cunha cortante (deslocamento da aresta cortante d). As trincas são originadas basicamente pelas variações bruscas de temperatura, já que durante a usinagem se desenvolve uma grande quantidade de calor, que é dissipada em parte pela ferramenta (a maior parte é dissipada pelo cavaco e pelo fluido refrigerante). Tal variação faz com que a mesma se dilate e se deforme desigualmente, gerando as trincas.

A figura 2.1 mostra as avarias convencionais na ferramenta de corte.

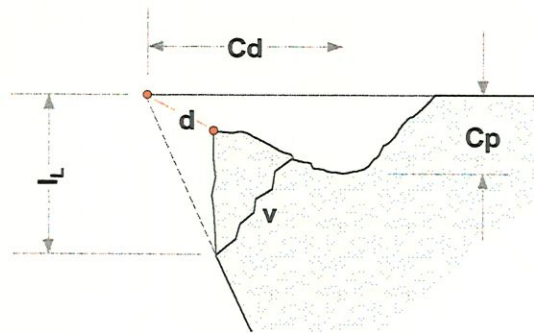


FIGURA 2.1 – DESGASTES CONVENCIONAIS DA FERRAMENTA DE CORTE.

Os fatores que determinam a fixação de um determinado desgaste, e consequentemente a vida da ferramenta, variam de acordo com as necessidades do processo. Na determinação da vida da ferramenta devem ser utilizados de um modo geral, os desgastes I_L e C_p . Em certos casos, quando o material é bastante conhecido e as relações entre tais desgastes são bem definidas, basta só I_L . Não se pode, porém estabelecer um critério único. Por conseguinte, os critérios recomendados pela ISO (*Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools* [BOOTHROYD & KNIGHT (1989)]) para definir a vida da ferramenta para ferramentas de aço rápido (HSS) e cerâmica são:

- Quebra do gume cortante em (v), ou
- Largura $I_L=0,3\text{mm}$, se o desgaste na superfície de folga apresenta-se regular na aresta de corte, ou
- $I_L=0,6\text{mm}$, se o desgaste na superfície de folga apresenta-se irregular, com riscos, trincas, fissuras, ou sulcos mal distribuídos na aresta de corte.

Para ferramentas de carbetto sinterizado, recomenda-se:

- Largura de desgaste $I_L=0,3\text{mm}$, ou
- $I_L=0,6\text{mm}$, se a cunha cortante está desgastada de forma irregular, ou
- $C_p=0,06+0,3 \cdot a$, onde a é o avanço.

Em operações de desbaste, o desgaste da ferramenta torna-se evidente, já que as condições severas de corte favorecem a redução drástica da vida da ferramenta. Monitorar o estado da ferramenta e indicar quando ela precisa ser substituída é um importante aspecto de operações desta ordem. Nos casos de operações de semi-acabamento, não importa se a ferramenta está desgastada ou não, a relevância está na qualidade final da peça-obra. Em acabamento, utilizando ferramentas de alto custo como PCD (*Polycrystalline Diamond*) e CBN (*Cubic Boron Nitride*), a condição de desgaste é tão importante quanto às tolerâncias e a textura superficial das peças finais.

Partindo de um controle efetivo das dimensões da ferramenta de corte a partir das compensações de desgaste (correções de *offset*: item 2.4), é possível saber o nível de desgaste da mesma, ao ponto de informar o momento de troca (fim de vida) por meio de uma FI específica.

2.3. Problemas no Acabamento Superficial da Peça

A qualidade superficial da peça usinada constitui uma característica de grande importância na usinabilidade dos metais. Verifica-se experimentalmente que materiais manufaturados nas mesmas condições de usinagem, com a mesma ferramenta e máquina operatriz, apresentam rugosidades superficiais diferentes. Daí a grande necessidade da sua avaliação. Em alguns casos, o torneamento pode efetuar tanto operações de desbaste quanto de semi-acabamento ou acabamento com grande precisão, dependendo da máquina ferramenta utilizada. Normalmente, esta operação de acabamento fornece a qualidade superficial da peça-obra e sua dimensão final. Por isso, a dimensão final a ser usinada é um dos pontos de partida para um controle efetivo das peças fabricadas.

A dimensão final da peça possui um valor nominal (D_N) e uma tolerância (t_L). Entretanto, na programação do torno CNC apenas um único valor pode ser fornecido à máquina. A este valor dá-se o nome de dimensão final (D_F). A tolerância representa a variação admissível da dimensão da peça, dada pela diferença entre os limites dimensionais superior (LSE) e inferior (LIE) especificados no desenho enviado ao programador [NOVASKI (1994)].

$$\text{Exemplo: } 30,00 \begin{matrix} +0,02 \\ -0,03 \end{matrix} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} D_N = 30,00\text{mm} \\ \text{LSE} = 30,02\text{mm} \\ \text{LIE} = 29,97\text{mm} \end{array} \right\} \Rightarrow t_L = \text{LSE} - \text{LIE} = 50\mu\text{m}$$

Geralmente, o valor D_F é definido como a dimensão média $(\text{LSE} + \text{LIE})/2$. Nos casos de máquina com boa precisão, o valor de D_F é aproximado do valor LIE para que o eventual desgaste da ferramenta permita que a peça seja produzida dentro da faixa de tolerância definida². De modo a garantir que os valores e critérios determinados pelo programador sejam realmente corretos, sem a necessidade de ajustes pelo operador da máquina, é

² Dependendo das características envolvidas no processo, a regulagem da máquina no limite inferior é uma outra estratégia de controle dimensional, mas não é usual.

preciso que hajam critérios específicos para se determinar o valor ideal de D_f na fase de programação.

Assim, propõe-se um controle em processo das dimensões da peça-obra (e por conseguinte, da ferramenta), com o intuito de se controlar as tolerâncias especificadas no projeto com auxílio das funções de automação inteligentes.

2.4. *Offset* da Ferramenta

As correções de compensação de desgaste da ferramenta devem ser feitas regularmente através da atualização dos parâmetros de *offset* no CNC da máquina, obtidos geralmente pela medição periódica das dimensões finais da peça em intervalos de tempo regulares (Controle Estatístico do Processo - CEP). Este procedimento, por mais importante que seja, gera um certo desperdício de tempo com as paradas do processo para as medições das peças e posteriores correções, tanto dos parâmetros quanto da própria peça usinada (retrabalho).

O trabalho de MOURA & BANZATO (1996) cita que a inspeção realizada em departamentos de controle de qualidade chegou a desempenhar um papel de fundamental importância na fabricação. Hoje se reconhece que a prevenção é o melhor caminho para a garantia da qualidade, além de reduzir sensivelmente o tempo de inspeção. O CEP bem empregado pode ajudar a reduzir o número de inspeções, fazendo com que ela se torne uma ferramenta vital na busca de uma qualidade total almejada por grandes companhias. O apêndice 2 mostra uma descrição geral sobre Controle Estatístico do Processo.

Desta forma, uma redução neste tempo de inspeção é fundamental na busca por maiores índices de qualidade e produtividade. Partindo deste princípio, propõe-se uma correção automática dos parâmetros de *offset* a partir do controle dimensional da peça-obra em processo (tomado como base as tolerâncias especificadas no projeto).

3. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE SISTEMAS DE MONITORAMENTO

Os sistemas de usinagem convencionais dependem bastante da intervenção humana para detectar anomalias, inspecionar a qualidade do produto e controlar o processo. Em suma, a tomada de decisões e ações cabíveis ainda depende da habilidade do operador nesse tipo de usinagem. Quando as máquinas ferramentas são utilizadas em condições isoladas, o operador se faz presente, com o principal objetivo de monitorar as ferramentas e outras funções durante o processo de manufatura. Tipicamente, o operador irá se assegurar de que todos os sistemas estão operando satisfatoriamente.

O emprego de centros de usinagem mais automatizados tem aumentado consideravelmente a partir da década de 60, principalmente com o advento do comando numérico nas máquinas ferramentas em decorrência das mudanças dos sistemas de fabricação, exigindo cada vez mais um tempo menor de fabricação, lotes pequenos e diversificados, inventários reduzidos ou nulos e uma busca incessante pela garantia da qualidade total [LUBBEN (1988)]. Então é natural que, acompanhando essa evolução, os sistemas de controle de processos de usinagem tenham evoluído para sistemas compatíveis com as novas necessidades. Além disso, o surgimento de novos materiais de difícil usinagem e de novos e caros materiais de ferramentas exigem uma otimização maior, não se admitindo que trocas de ferramentas sejam feitas antes do momento adequado, gerando gastos com ferramentas e tempos com máquinas paradas [BLACK (1998)].

Por conseguinte, quando se utilizam tecnologias modernas em sistemas de manufatura, deseja-se que as operações contem com o mínimo de assistência humana. Com isso, a ausência, mesmo que parcial, de um operador acarretará um número considerável de problemas que deverão ser resolvidos para que o sistema opere satisfatoriamente. Neste caso, o sistema de monitoramento deve ser provido de técnicas de análise de sinal necessárias para suprir tal ausência, através da emissão de informações e instruções ao operador ou à máquina sobre o processo. A figura 3.1 mostra os três tipos de monitoramento mais comuns com seus diversos adicionais: (a) monitoramento da peça, (b) monitoramento da ferramenta e (c) monitoramento da máquina [GRAHAM (1989)].

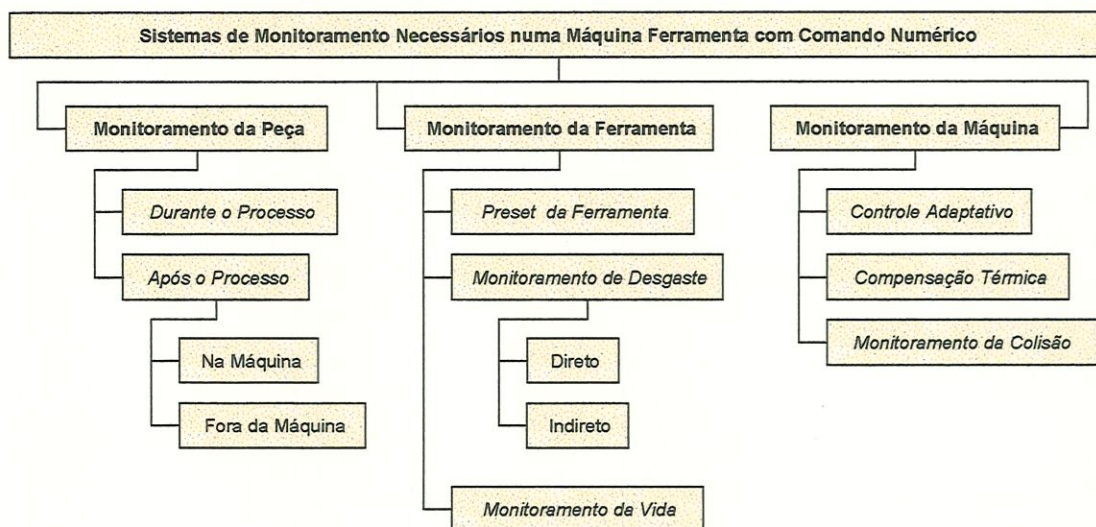


FIGURA 3.1 – SISTEMAS DE MONITORAMENTO [GRAHAM (1989)].

Algumas aplicações típicas destes sistemas são:

- (a) Monitorar o correto carregamento da peça, corrigir qualquer desalinhamento do ajuste inicial e verificar a qualidade da peça.
- (b) Verificar o uso correto da ferramenta, identificando e ajustando seu *preset* (aferições iniciais), justamente com o controle do desgaste, lascamento, trinca e quebra da ferramenta, substituindo a ferramenta quando necessário.
- (c) Ajustar velocidades e avanços na máquina quando necessários; promover a compensação para os efeitos do desgaste da ferramenta (correção dos parâmetros de *offset*) e da formação de cavacos; corrigir erros devidos à efeitos térmicos, falhas no programa e na operação (retrabalho).

Os sistemas de monitoramento de processo provocaram uma alteração nas relações entre os subsistemas que compõem a usinagem automatizada. A figura 3.2 mostra a evolução da automação dos processos de usinagem com o advento do CNC e dos sistemas de monitoramento, mostrando as relações entre os subsistemas humano (H), controle CNC (C) e máquina (M).

Antes do CNC, só havia relação direta entre homem e máquina. Com o CNC, a relação entre homem e controle passou a ser a mais forte. Com os sistemas de monitoramento, a tendência é de que haja relação forte somente entre controle e máquina. Esta independência do elemento humano para as tomadas de decisões é objetivo da Função Inteligente (FI).

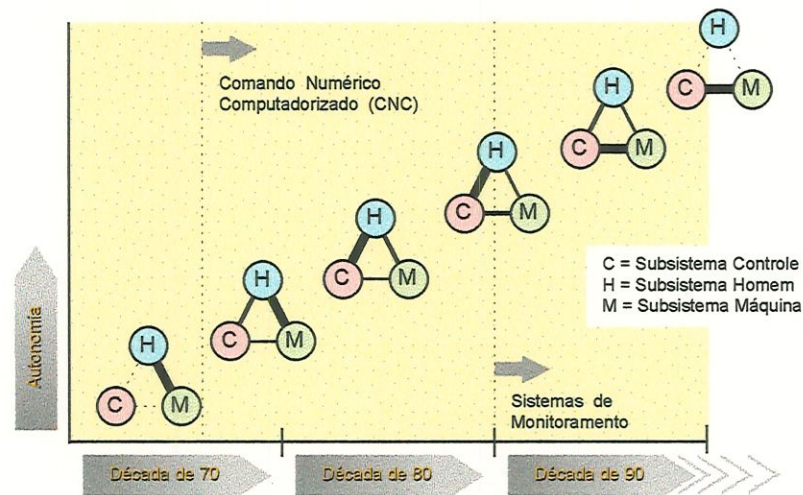


FIGURA 3.2 – EVOLUÇÃO DA AUTOMAÇÃO DOS PROCESSOS DE USINAGEM [OLIVEIRA³ apud FELIPE Jr. (1996)].

Assim, o monitoramento na usinagem de materiais, baseado fortemente no sensoramento inteligente, e que permite diminuir a intervenção do operador e substituir algumas das funções do homem na produção de bens manufaturados, é hoje uma fonte de pesquisas crescente, tendo-se chegado em alguns casos a ser utilizado em ambientes reais de trabalho na indústria. Muitas das operações realizadas pelo homem já estão sendo realizadas pelas máquinas automatizadas (CNC por exemplo), mas aquelas que envolvem a tomada de decisão (estabelecimento do momento de troca da ferramenta, bem como a própria troca, por exemplo) ainda permanecem fortemente sob dependência da experiência e bom senso do operador.

Existem diversos métodos que podem ser utilizados nos processos de usinagem [BYRNE et al.(1995); DU et al. (1995a)]. Dependendo do que se deseja monitorar, pode-se escolher qual o melhor método disponível ou qual o mais adequado às condições particulares de cada problema e de cada empresa. Para determinar qual o método de monitoramento a ser utilizado, deve-se primeiro fazer uma análise do problema a ser enfrentado. Depois de identificado o problema, é feita então a escolha dos meios físicos de propagação de sinal e técnicas a serem utilizados no monitoramento.

O monitoramento do processo pode ser dependente do tempo, ocorrendo em tempo real (simultaneamente ao processo), ou independente do tempo de execução. Outra

³ OLIVEIRA, J. F. G. (1995). Monitoramento do processo de retificação CNC por emissão acústica. /Apresentado ao 2. Congresso Anual da SOBACOM, São Paulo, 1995/ apud FELIPE Jr., J. (1996). *Contribuição para implementação de funções de retificação inteligentes (R.I.) utilizando técnicas de monitoramento por emissão acústica*. São Carlos. 138p. Tese (Doutorado) - EESC, USP.

classificação de monitoramento, segundo BLUM et al.(1988), está relacionada com o método de medição do estado da ferramenta e das grandezas de usinagem: **direto** (*off-line*) ou **indireto** (*on-line*). O primeiro método interrompe o processo e então mede diretamente, por exemplo, o atual desgaste da ferramenta de corte. O segundo supervisiona um sinal indireto mensurável em tempo real correlacionado aos processos de corte durante a usinagem. Ambos possuem vantagens e desvantagens, levando-se em conta as características requeridas como confiabilidade, custo, repetibilidade em ambientes reais, e insensibilidade a fatores externos. A tabela 3.1 apresenta os principais métodos de medida do estado da ferramenta de corte em torneamento, classificados nos grupos de medida direta e indireta [MATHEW & DAN (1990)].

TABELA 3.1 – CLASSIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS SENSORES DE DETECÇÃO DO ESTADO DA FERRAMENTA DE CORTE [MATHEW & DAN (1990)].

MÉTODO	PROCEDIMENTO	MEDIDA	SENSOR
Direto	Óptico	Forma ou posição da borda	Câmera de TV, sensor óptico, espectrofotômetro, cintilador
	Partículas do desgaste e radioatividade	Tamanho da partícula de concentração	Medidor de radioatividade
	Resistência peça – ferramenta	Alteração na resistência elétrica da junção	Ohmímetro
	Tamanho da peça	Dimensão da peça sendo usinada	Apalpador, sensor: eletromagnético, ultrassônico, óptico
	Distância peça – ferramenta	Distância entre ferramenta ou suporte à peça	Micrômetro, medidor de deslocamento (LVDT)
Indireto	Força de corte	Alterações na força	Dinamômetro, <i>strain gage</i>
	Emissão acústica	Energia das ondas de deformação ou <i>stress</i>	Transdutor piezelétrico
	Som	Ondas acústicas	Microfone
	Vibração	Vibração da ferramenta - porta-ferramenta	Acelerômetro
	Temperatura	Variação da temperatura no ponto de corte	Pirômetro, Termopar
	Potência	Corrente ou consumo de potência do motor de acionamento	Amperímetro, sensor de corrente
	Rugosidade	Rugosidade da peça	Agulha mecânica, sensor ótico, laser

3.1. Métodos Diretos de Monitoramento

Nos métodos diretos de sensoreamento do estado da ferramenta de corte, a medição do desgaste é feita diretamente na ferramenta. A séria restrição a esses tipos de sistemas é que a medida direta, por limitações tecnológicas e funcionais, não pode ser realizada em tempo real, ou seja, o processo de usinagem é interrompido, somando um tempo de consumo ao tempo de produção. A vantagem principal sobre os métodos indiretos é que geralmente os tipos diretos têm maior confiabilidade pois só dependem do parâmetro medido.

Os principais métodos diretos conhecidos levam em consideração as medidas de forma ou posição da ponta da ferramenta (óptico), tamanho de partículas (radioatividade), variação da resistência da junção peça/ferramenta (resistência elétrica) e dimensões da peça e da ferramenta (contato) [TLUSTY & ANDREWS (1983)].

Os sensores nestes tipos descritos são em geral mais caros que os sensores dos métodos indiretos e compõem-se por exemplo de voltímetros, câmeras de TV, transdutores e micrômetros, medidores de radioatividade, etc.

3.1.1. Sensores Ópticos

Os sistemas ópticos (refletores de luz, fibras ópticas, câmeras de TV) analisam a imagem da zona de desgaste iluminada quando a ferramenta de corte não está continuamente em contato com a peça-obra. A taxa de desgaste da ferramenta durante a usinagem, visualizada através de um microscópio de baixa potência, aparece inteiramente clara devido à alta reflexividade da região de desgaste comparada com a superfície não desgastada. A figura 3.3 ilustra um sistema óptico para medição direta do desgaste da ferramenta onde um feixe de luz (L) atinge a aresta de corte na região de desgaste e é refletido para o fototransistor (FT). O sinal gerado no FT apresenta uma excelente correlação com a largura da região de desgaste em ferramentas com aresta definida [MICHELETTI et al. (1976)].

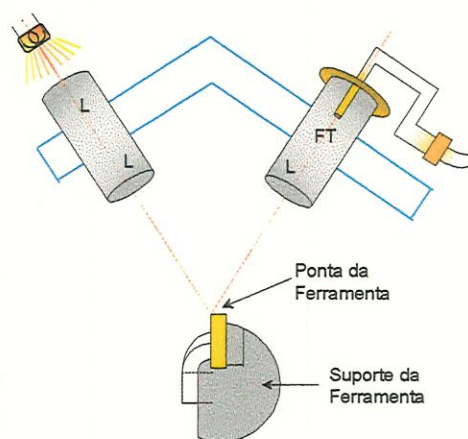


FIGURA 3.3 – SISTEMA DE DETECÇÃO ÓPTICA PARA A MEDIÇÃO DIRETA DO DESGASTE DA FERRAMENTA [MICHELETTI et al. (1976)].

Outros exemplos podem ser vistos nos trabalhos de MATHEW & DAN (1990), SAWAI et al. (1995) onde o monitoramento *off-line* do desgaste do flanco da ferramenta de corte é feito a partir de sistemas ópticos de aumento e iluminação, e o uso de fibras ópticas na captura de imagens do corte efetuado.

A principal desvantagem desta técnica é a necessidade de retirada da ferramenta (ou pastilha) da área de trabalho para a medição do flanco (a medida não é realizada em tempo real), correndo o risco de uma eventual deposição de material sobre a ferramenta ter encoberto o desgaste real ocorrido durante a usinagem, dificultando a detecção.

3.1.2. Sensores de Resistência Elétrica

Os sensores de resistência elétrica podem detectar o desgaste de flanco em ferramentas de torneamento pela transmissão de um sinal elétrico. O sistema baseia-se na medição da resistência elétrica através da junção ferramenta/peça, a qual se reduz com o aumento do desgaste de flanco (a área de contato da ferramenta com a peça aumenta).

A figura 3.4 mostra um resistor elétrico sensível, impresso na superfície de folga da ferramenta de corte, e isolado por uma fina camada de tinta resistente ao calor (revestimento isolante). O comprimento do resistor diminui com o aumento progressivo do desgaste da ferramenta e o valor deste decréscimo é obtido pela mudança da resistência e, conseqüentemente, do sinal elétrico captado pelo osciloscópio (tensão) [MICHELETTI et al. (1976)].

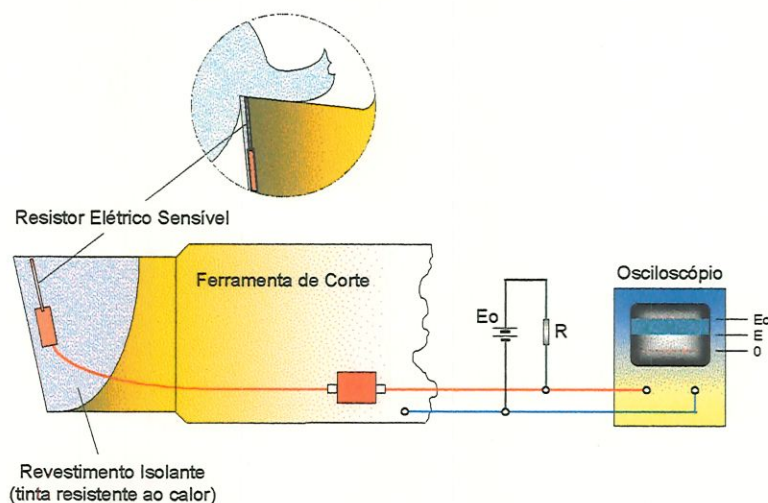


FIGURA 3.4 – SISTEMA DE MEDIÇÃO COM SENSOR DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA (RESISTÊNCIA 10~30K Ω , VOLTAGEM 5~10V) [MICHELETTI et al. (1976)].

Segundo MATHEW & DAN (1990), a resistência é influenciada por diversos fatores ligados ao contato ferramenta/peça, tornando o método mais conveniente quando utilizado sistemas com multisensores. Com isso, a utilização da resistência elétrica foi praticamente abandonada nas pesquisas mais recentes, em favor de outras metodologias que se apresentaram mais eficientes.

3.1.3. Sensor de Radioatividade

Este tipo de sensor é usado para medir a perda volumétrica global da ferramenta. A ferramenta de corte é ativada (tornada radioativa) com nêutrons ou com partículas carregadas, e durante o corte, uma pequena quantidade de material ativado da ferramenta perde-se junto ao cavaco. As partículas radioativas de desgaste são transportadas por um fluxo contínuo de óleo, onde a atividade é detectada e então gravada com um sistema apropriado [COOK.⁴ apud MICHELETTI(1976)]. O dispositivo de medição consiste de um cintilador Na-I cercado por uma câmara de fluxo que bombeia o óleo carregado com as partículas de desgaste. A intensidade de radioatividade detectada nos cavacos é

⁴ COOK, N. H.; SUBRAMANIAN, K.; BASILE, S. (1975). Microisotope tool wear sensing method. *Report MIT I* apud MICHELETTI, G. F.; KÖENIG, W.; VICTOR, H. R. (1976). In process tool wear sensors for cutting operations. *Annals of the CIRP*, v.25, n.2, p.483-96.

correlacionada com o volume do material da ferramenta aderente ao cavaco determinando, portanto, seu desgaste total. Os problemas de radiação e a necessidade de coletar os cavacos não permitem aplicações de sensoriamento contínuo em chão-de-fábrica.

3.1.4. Sensor de Contato

As dimensões da peça em usinagem são modificadas à medida que ocorre o desgaste da ferramenta (e com isso, as dimensões da ferramenta também se alteram). Neste caso, a distância entre a referência do suporte da ferramenta e a peça decresce. Os monitoramentos *off-line* das dimensões da peça e da ferramenta podem ser realizados respectivamente com auxílio de apalpadores e sensores do tipo *probe* (ou sonda).

O trabalho de TLUSTY & ANDREWS (1983) apresenta dois sistemas desenvolvidos pela RENISHAW (vide item 3.3 – Exemplos de Aplicações Industriais). O primeiro baseia-se num sistema de posicionamento e alinhamento da peça medida, inspeção das dimensões da primeira peça usinada diretamente na máquina, e medição em ciclo de operação para acompanhar o tamanho e a posição da peça com correção automática das referências no sistema controlador. O segundo faz a medição automática por contato do diâmetro e comprimento de todas as ferramentas (*preset*), corrigindo nos dados do controle as medidas obtidas (parâmetros de *offset*), e detecta em ciclo a quebra da mesma. Em ambos, a transmissão dos dados obtidos pelo sensoriamento podem ser feita via cablagem, luz infravermelha ou por rádio transmissão (este último em máquinas de grande porte). A figura 3.5 ilustra tais sistemas da RENISHAW.

3.2. Métodos Indiretos de Monitoramento

Nos métodos indiretos, onde um ou mais parâmetros são controlados e monitorados em tempo real e, posteriormente, correlacionados com os parâmetros que realmente influem no desgaste da ferramenta, eles partem do princípio de que as medidas são influenciadas por fatores alheios ao desgaste, como variações no material de trabalho, geometria da ferramenta de corte, vibrações do sistema MFDP (máquina ferramenta - dispositivo de fixação - peça), etc.

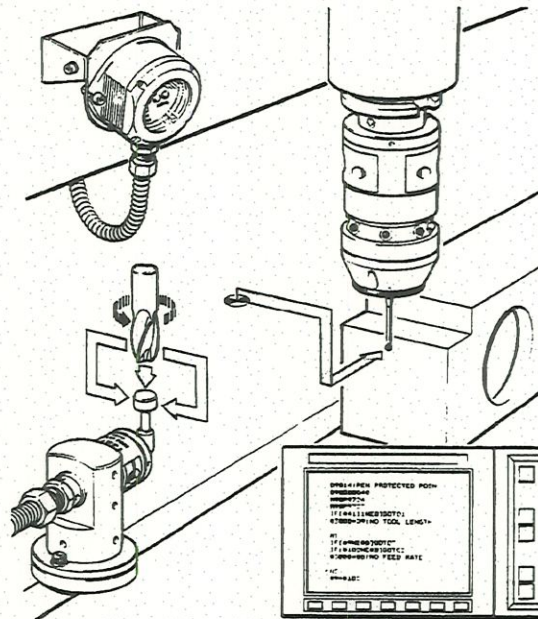


FIGURA 3.5 – SISTEMA DE CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DO DIÂMETRO E COMPENSAÇÃO DA FERRAMENTA, E UM SISTEMA APALPADOR DE INSPEÇÃO DA PEÇA COM COMUNICAÇÃO INFRAVERMELHA, NUMA MÁQUINA CNC [CATÁLOGO RENISHAW].

Devido às dificuldades mencionadas nos métodos diretos de monitoramento, especialmente na medição em processo ligadas ao chão-de-fábrica, muitas pesquisas foram conduzidas tentando encontrar as possibilidades de mensurar outros parâmetros correlacionados diretamente com o desgaste da ferramenta. Os parâmetros propostos são: temperatura de corte (termopares e sistemas de detecção por infravermelho) e rugosidade superficial (detecção a laser) [MICHELETTI et al. (1976)]; vibração (acelerômetros piezelétricos com detecção de baixa frequência), corrente do motor de acionamento (sensores de corrente) e torque (sensores de torque) [BYRNE et al. (1995)]; dimensões da peça (sistemas pneumáticos, hidráulicos, eletromagnéticos ou por ultra-som) [BLUM et al. (1988); MICHELETTI et al. (1976)]. Contudo, associados aos métodos citados, duas técnicas diferentes para detectar o estado da ferramenta de corte se destacam: forças de corte e emissão acústica.

3.2.1. Forças de Corte

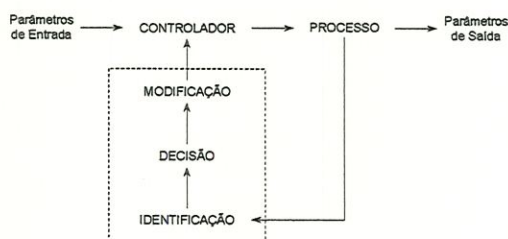
As pesquisas para determinar a correlação entre as forças de corte e o desgaste da ferramenta iniciou-se em meados da década de 60 por considerar que as mesmas eram

preferíveis na medição em processo. Como a usinabilidade do material da peça-obra era muito afetada pela taxa de desgaste da ferramenta, medida continuamente através da medição das forças de corte, estas puderam fornecer um conveniente sinal de entrada para um efetivo Controle Adaptativo⁵ [MICHELETTI et al. (1976)].

Com o intuito de se usar estas relações como um método para mensurar tanto o “desgaste equivalente” da ferramenta a partir da variação da força de corte no tempo quanto os parâmetros de corte para determinados materiais da ferramenta e da peça-obra, muitos trabalhos foram desenvolvidos. LAN & DORNFELD (1984) relatam que as forças tangencial e de avanço são sensíveis à fratura da ferramenta, mas somente a força tangencial diminui sensivelmente quando a ferramenta está quebrada. SANTOCHI & BEGHINI (1997) desenvolveram um sistema de monitoramento de ferramentas de corte visando prever o desgaste e a quebra da mesma, a qualidade superficial das peças, a temperatura e a potência de corte, usando extensômetros (*strain-gages*) para medir as forças de corte em operações de torneamento; o sinal de força é detectado pelo sensor posicionado dentro da haste da ferramenta, amplificado e enviado ao sistema de aquisição de dados externo por transmissão infravermelha. SHIRAIISHI (1988) descreve o estado da arte da técnica de medição em processo de avarias na ferramenta, onde a detecção da força é o método mais promissor enquanto o método de emissão acústica (item 3.2.2) é o que apresenta maior potencial industrial na detecção de falhas na ferramenta.

Mesmo que o monitoramento da variação da força de corte apresente bons argumentos na detecção de avarias na ferramenta, este é muitas vezes incerto devido à forte dependência das condições de corte tais como taxa de avanço, velocidade de corte e profundidade de corte. Além disso, as forças de corte mudam de maneira significativa durante a entrada e a saída da peça.

⁵ Segundo MASORY & KOREN (1980), o controle adaptativo de processos de usinagem é uma extensão lógica dos sistemas de controle numérico computadorizado (CNC). Nestes, os parâmetros de entrada como a velocidade de corte e o avanço são pré determinados pelo programador e conseqüentemente, dependem da sua experiência e conhecimento. Por outro lado, o controle adaptativo promove o monitoramento contínuo *on-line* dos processos de corte e ajusta as variáveis do sistema com o intuito de promover a seleção dos parâmetros ótimos de operação sujeitos a restrições de usinagem. EL GOMAYEL & BREGGER (1986) estruturam um sistema de controle adaptativo através de três funções: identificação, tomada de decisão (cálculos de escolha), e modificação.



Inúmeras pesquisas, baseadas na medição da força de corte com auxílio de dinamômetros, não puderam ser aplicadas em meios de produção efetivos devido às alterações dinâmicas na máquina ferramenta, além das mesmas não serem economicamente viáveis. A fim de superar tais dificuldades, o trabalho de LEE et al. (1994) mostra a utilização de um sensor de força piezoeletrico embutido no cabeçote-revólver de um torno CN para medir a força de corte durante o torneamento. Uma vez que o sensor possa ser instalado longe da ferramenta de corte, não somente alterações dinâmicas na máquina ferramenta puderam ser evitadas, mas também efeitos prejudiciais do cavaco, do lubrificante, etc.

3.2.2. Emissão Acústica

A emissão acústica (EA)⁶ tem sido utilizada desde os anos 50, quando foi descoberta na Alemanha, no monitoramento de processos de conformação. Com o decorrer dos anos vários trabalhos de pesquisa mostraram a eficiência desta técnica no monitoramento do desempenho de máquinas ferramentas de usinagem e na análise de processos de fabricação, sendo que hoje muitas das aplicações industriais são altamente complexas e atendem as mais diversas áreas [DORNFELD (1994)].

Uma das principais vantagens do método direto baseado em técnicas de EA está na sua aplicabilidade no monitoramento de diversos fenômenos ocorridos durante as operações de usinagem (sem a interferência no processo) utilizando um único sensor, já que o sistema coleta os sinais de EA de alta frequência (entre 50kHz e 1MHz) gerados no processo, através de um transdutor de cristal piezoeletrico fixado em um ponto conveniente na estrutura da máquina. Após amplificado, este sinal pode ser transmitido a diferentes equipamentos: osciloscópio, contador, voltímetro RMS, gravador ou analisador de espectros, dependendo do tipo de análise requerida. Geralmente utilizam-se transdutores com elemento cerâmico, sensíveis na faixa de 100kHz à 1MHz, e avaliados de acordo com o custo e tamanho ideais à montagem na maioria das máquinas ferramentas [MORIWAKI (1983)]. Financeiramente, o custo dos sensores e da aparelhagem para o tratamento do

⁶ A emissão acústica pode ser entendida como sendo ondas de tensão geradas por atuações dinâmicas sobre os materiais [VIEIRA Jr. (1996)]. Conforme o material é submetido a um estímulo externo qualquer (formação do cavaco, por exemplo), o atrito entre a ferramenta e a peça ou mesmo o simples contato, ocorre a deformação e o rearranjo da sua estrutura cristalina. Isto libera uma quantidade de energia suficiente para produzir ondas de tensão que provocam mais deslocamentos sobre a superfície do material. O sinal é geralmente detectado por cristais piezoeletricos que, quando estimulados pelas ondas de tensão, transformam a excitação mecânica em sinal elétrico.

sinal é baixo, e possibilita um manuseio fácil. Além disso, com o auxílio de um filtro de altas frequências (FPA: filtro passa-altas), é possível eliminar contaminações que o sinal pode sofrer.

A figura 3.6 mostra uma comparação entre as frequências dos sinais de EA e outros tipos de onda de rádio ou luminosas.

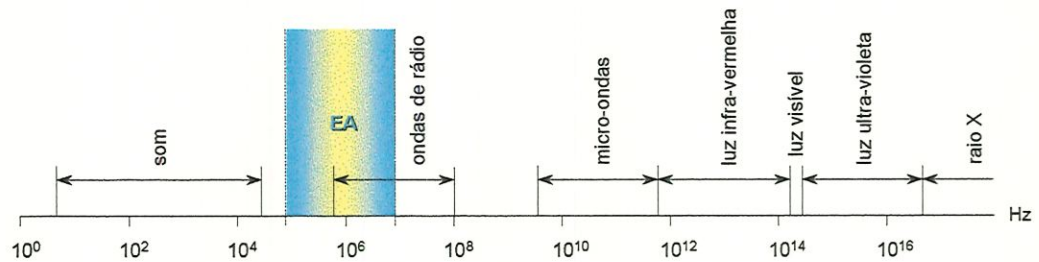


FIGURA 3.6 – COMPARAÇÃO DAS FAIXAS DE FREQUÊNCIA DE EA E OUTROS TIPOS DE ONDA [VIEIRA JR. (1996)].

Diversos são os trabalhos que empregam técnicas de EA no monitoramento de processos de usinagem. IWATA & MORIWAKI (1978) propõem um método de detecção de avarias da ferramenta usando sinais de EA: os experimentos mostraram a detecção de sinais com grande amplitude quando se observou quebra (*cracking*), lascamento (*chipping*) e fratura (*fracture*) na ferramenta de corte. KANNATEY-ASIBU Jr. & DORNFELD (1981) determinaram a relação teórica (quantitativa) entre a EA e os parâmetros de usinagem envolvidos⁷.

BLUM & INASAKI (1990) resumem a relação entre o sinal de EA e os parâmetros de usinagem. Um novo parâmetro que descreve as características dos processos de corte foi proposto por INASAKI et al. (1987) para eliminar os efeitos interferentes dos sinais de pico de EA que ocorrem aleatoriamente: relatou que o sinal de EA aumenta ou diminui abruptamente dependendo do tamanho do cavaco.

O trabalho de KLAIBER et al. (1990) mostra as quatro principais áreas de interesse com relação à geração do sinal de EA durante a usinagem dos metais: (a) Zona Primária, à frente da ferramenta, onde ocorre a deformação plástica inicial durante a formação do cavaco; (b) Zona Secundária de deformação, que ocorre ao longo da superfície de saída da

⁷ Uma das primeiras técnicas de análise do sinal de EA aplicadas que apresentou grande sucesso foi a medida através de níveis de "Voltagem RMS". O tratamento do sinal é feito pela retificação do sinal e cálculo da média quadrática em intervalos de tempo determinados. De acordo com a definição dos níveis de voltagem RMS do sinal de EA, a energia E contida na deformação pode ser expressa por: $\Delta E \propto (\text{RMS})^2 \cdot \Delta t$ onde (ΔE) é o gasto de energia durante o intervalo de tempo (Δt) [KANNATEY-ASIBU Jr. & DORNFELD (1981)].

ferramenta, onde a maior parte da deformação e do atrito ocorrem; (c) Zona Ternária, na superfície de folga da ferramenta. (d) Região associada à fratura dos cavacos durante a formação de cavacos descontínuos.

LAN & DORNFELD (1984) reportam que o sinal de pico de EA é gerado devido a fraturas na ferramenta e a amplitude do valor RMS do sinal é proporcional à área fraturada. O trabalho de WASCHKIES et al. (1994) mostra as possíveis causas da geração de sinais de emissão acústica no processo de corte em torneamento (figura 3.7).

- Sinais Contínuos:
 - contato ferramenta-peça;
 - contato cavaco-ferramenta;
 - deformação plástica.
- Sinais de Pico:
 - colisão cavaco-ferramenta;
 - quebra do cavaco;
 - trinca ou lascamento da ferramenta.

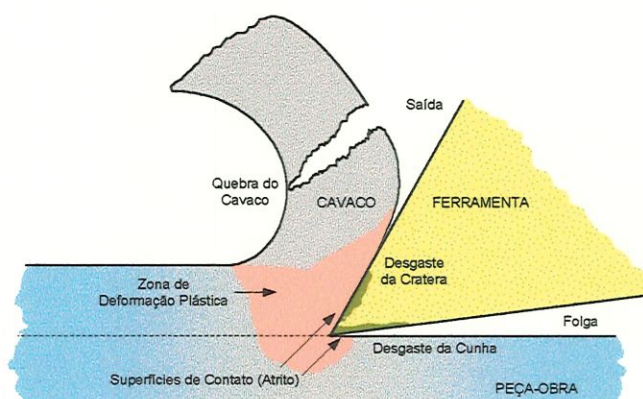


FIGURA 3.7 – EA GERADA NO PROCESSO DE CORTE [WASCHKIES et al. (1994)].

Em operações de torneamento, um modelo de processo de usinagem ortogonal pode ser usado na determinação da energia do sinal de EA com um alto grau de acuracidade devido à simplicidade da geometria e também à formação do cavaco bidimensional [DORNFELD (1994)].

EMEL & KANNATEY-ASIBU Jr. (1988) desenvolveram uma metodologia para detectar a quebra da ferramenta usando o espectro dos sinais de EA baseado no reconhecimento de padrões⁸.

⁸ Segundo FELIPE Jr. (1996), o método de reconhecimento de padrões utiliza-se de multisensores para fazer um modelo do comportamento do processo, o qual relaciona as saídas (ou estados) do processo aos valores de entrada (sinais tratados). O trabalho de DU et al. (1995a) apresenta dois métodos de reconhecimento: estatístico (ou de padrões não-deterministas) e distribuição livre (ou de padrões deterministas). Através destes tipos de análise é possível associar o estado de um conjunto de variáveis com um fenômeno a ser monitorado.

3.3. Exemplos de Aplicações Industriais

Abaixo tem-se uma descrição sucinta de alguns sistemas automatizados de controle da ferramenta e da peça em processo utilizados por empresas fabricantes de máquinas ferramentas de alta precisão.

3.3.1. RENISHAW

O grupo RENISHAW está na vanguarda do setor de metrologia de automação. Seus produtos oferecem aos construtores a possibilidade de operar peças de maneira exata já na primeira vez. Os sistemas de medição para máquinas ferramentas com comando numérico permitem o reconhecimento rápido da posição real de uma ferramenta ou de uma peça e sua correção de posicionamento dos eixos X e Z (ou também Y). Um dos sistemas de *preset* da ferramenta em torno CNC oferecido pelo grupo pode ser visto pela figura 3.8.

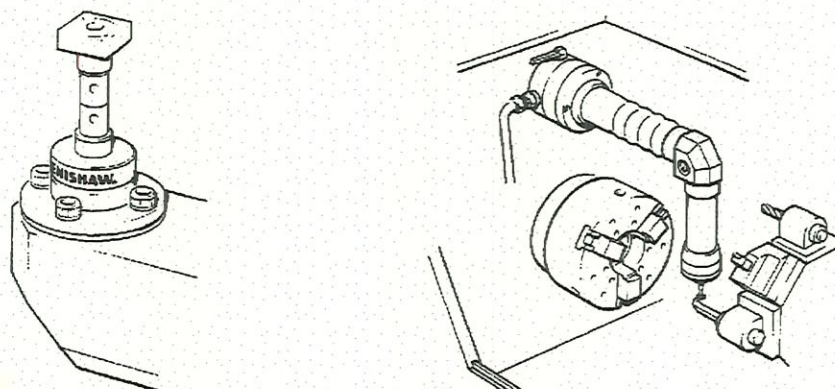


FIGURA 3.8 – PRESET DA FERRAMENTA NUM TORNO CNC, MOSTRANDO UM SENSOR TS20, EM CONJUNTO COM UM BRAÇO REMOVÍVEL HPA [CATÁLOGO RENISHAW].

Durante a rotina de *setup*, cada ferramenta montada no revólver do torno é conduzida em direção a um apalpador de ponta cúbica. Quando o contato é feito, um sinal de disparo é gerado e os valores de *offset* das ferramentas são automaticamente gravados nos registradores do CNC da máquina. O *probe* modelo TS20 pode ser montado num braço automático, o qual é retraído para fora da área de trabalho protegendo o sensor por um invólucro. Alternativamente, o *probe* pode ser montado num braço de alta precisão (HPA) que pode ser facilmente colocado e retirado quando necessário.

A INDEX Tornos Automáticos usufrui desse sistema, como opção a seus clientes, para a determinação do *preset* automático da ferramenta.

3.3.2. MAZAK

YAMAZAKI MAZAK CORPORATION, fabricante japonesa de equipamentos para um nível elevado de automação fabril apresentam diversas opções de equipamentos e acessórios opcionais para sistemas flexíveis e células de manufatura. Seu grande potencial está no desenvolvimento de centros de usinagem verticais e horizontais com alta velocidade, alta acuracidade e fácil operação.

O sistema de *preset* automático das ferramentas desenvolvido pelos mesmos nestas máquinas é feito com um sistema de contato tipo *probe* localizado numa posição segura. A ferramenta é conduzida até o sensor em formato cilíndrico e o toca em duas posições. Os sinais das coordenadas X e Z da ponta da ferramenta são comparadas com os pré-programados, e o CNC calcula o ajuste necessário de *offset* da ferramenta. O *probe* pode ser alojado, ou facilmente colocado e retirado da máquina.

3.3.3. OKUMA

O fabricante de máquinas ferramentas OKUMA & HOWA oferece a possibilidade de sistemas manuais, semi-automáticos e automáticos nos processos de *preset* da ferramenta e detecção do desgaste e correção da peça usinada. Os processos resumem-se na medição da peça pós-processo (fora da máquina) ou na própria máquina com auxílio de micrômetro a laser, medição e controle das dimensões da peça em processo feita com apalpadores⁹, controle da vida da ferramenta a partir do tempo de corte gravado¹⁰, e controle do desgaste da ferramenta com auxílio de sensores de corrente (motor de acionamento) e de força (piezelétricos).

⁹ O sistema de medição de peças em processo apresenta um apalpador convencional fixado junto à ferramenta onde, à medida que o corte é feito, o valor da dimensão obtida *on-line* é comparada com o outro determinado anteriormente nas condições ideais. Se as dimensões se alteram, as correções são feitas automaticamente, e um novo passe é efetuado. A confiabilidade da medição está associada diretamente à máquina CNC utilizada.

¹⁰ O tempo de corte de cada ferramenta é gravado, comparado com o limite pré programado da vida da ferramenta (baseado nos dados da vida média da ferramenta menos o fator de segurança), e o sinal para a troca de ferramenta é gerado quando o limite é alcançado [MASON & FREEMAN (1985)].

4. PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO DE FUNÇÕES INTELIGENTES NUM TORNO CNC BASEADA EM TÉCNICAS DE EMISSÃO ACÚSTICA

O objetivo deste trabalho é propor o desenvolvimento de funções de automação num torno CNC e para isso, são apresentadas neste item as propostas do trabalho. Tais propostas têm como objetivo verificar experimentalmente os parâmetros ligados aos problemas de usinagem a serem monitorados e, a partir de tal verificação, definir um critério de utilização para a técnica de monitoramento dos diferentes parâmetros utilizando um único sensor de emissão acústica (EA), visando a melhor forma de implementação e uso das Funções Inteligentes.

A tabela 4.1 mostra, para ambas funções de torneamento inteligente propostas, o estado da arte do procedimento e a contribuição que poderá ser fornecida por este trabalho.

TABELA 4.1 – CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO.

Função Inteligente	Estado da Arte	Contribuição deste Trabalho
Detecção de Colisão	Estudos mostram o sinal de pico de EA gerado na colisão da ferramenta contra a peça ou qualquer outra estrutura da máquina.	Minimizar ou até evitar qualquer dano provocado por uma eventual colisão da ferramenta.
Controle Dimensional da Peça Torneada	Diversos trabalhos mostram o sinal de EA gerado no contato da ferramenta com a peça.	Redução no tempo improdutivo, pois o operador não precisará parar o processo para medir e retrabalhar as peças que ficaram fora do dimensional especificado.

As propostas do trabalho estão divididas em dois grupos. No primeiro grupo pretende-se buscar a relação entre o sinal de EA e os fenômenos decorrentes do processo de medição e correção das dimensões da peça. Esta relação permite o monitoramento destes fenômenos e, conseqüentemente, dos processos e procedimentos envolvidos.

No segundo grupo são estabelecidos critérios para a implementação destes processos e procedimentos de torneamento visando o monitoramento da operação por técnicas acústicas e a definição das Funções Inteligentes.

4.1. Relação entre o Sinal de EA e os Fenômenos Decorrentes do Processo

A primeira parte desta proposta é investigar a relação entre os sinais de EA e os fenômenos ocorridos durante as operações de controle dimensional da ferramenta e da peça em processo, com o intuito de verificar se esta relação obedece algum critério que possa ser compreendido e utilizado na prática. Desta forma, uma vez estabelecida, esta relação poderá ser utilizada no monitoramento do processo, visando a sua automatização completa com a implementação de FI.

Para investigar a relação entre EA e as operações que se deseja monitorar, diversos ensaios foram propostos, todos com o objetivo de relacionar o sinal captado por um único sensor de EA (embutido no cabeçote-revólver da máquina CNC) ou com uma operação específica dentro do processo automatizado em questão, ou com possíveis acontecimentos e fenômenos ocorridos durante a operação. Devido à fixação do sensor e à sua localização na máquina, o sinal obtido pode conter ruídos, os quais podem ser sinais indesejáveis produzidos por outros elementos do monitoramento, ou característicos do processo ou da máquina. Estes ruídos podem ser eliminados ou minimizados através da retificação do sinal e cálculo da média quadrática em intervalos de tempo regulares (tensão RMS do sinal de EA – Figura 4.1).

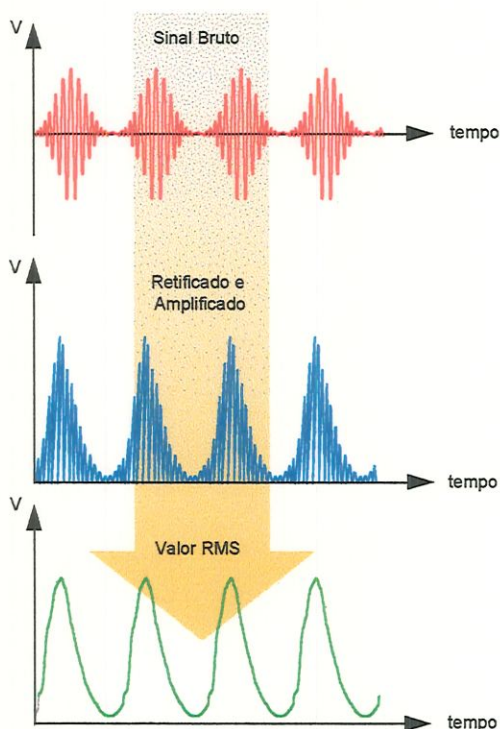


FIGURA 4.1 - SINAL BRUTO E VALOR RMS DE EA [FELIPE JR. (1996)].

Tais propostas de ensaios para a obtenção das correlações serão descritas com maiores detalhes no Capítulo 6.

4.1.1. Detecção dos Sinais de Emissão Acústica

O objetivo deste procedimento é fornecer à máquina um sistema de detecção de sinais de pico de EA com o intuito de fornecer bases para a implementação das detecções de colisão, e determinação das dimensões da peça usinada, simultaneamente ao ciclo de operações no torneamento. Conforme a amplitude do sinal de EA captado pelo sistema, a máquina deverá tomar as decisões cabíveis quanto às reações que serão executadas. No caso do choque da ferramenta contra a peça, o torno precisará parar imediatamente, abortar o programa, e informar ao operador de uma "possível colisão". Para o controle dimensional, a máquina deverá "medir" as dimensões usinadas para efetuar ou não uma possível correção, baseada na tolerância especificada pelo projeto.

Normalmente, os tornos CNC modernos são equipados com sensores de limite de potência, que provocam o desligamento da placa e afastamento da ferramenta quando a colisão provoca o travamento do eixo árvore, exigindo muita potência do motor. Este recurso, porém, só é acionado quando a potência atinge níveis muito altos, o que significa que até entrar em ação, a ferramenta já pode ter provocado estragos irreparáveis à peça e aos elementos do torno, como placas ou contrapontos. O sistema de detecção de colisão terá que apresentar uma sensibilidade maior que os limites de potência tradicionais, e deverá ser capaz de interromper o processo antes que os danos sejam causados ao torno e suas partes, ou ao operador.

O sistema de controle de medidas da peça deverá verificar como o comportamento da amplitude de sinal de EA pode ser utilizado para detectar possíveis falhas dimensionais nesta durante o torneamento, eliminando operações posteriores de verificação. Uma vez obtida tal relação, é preciso ainda verificar se este procedimento pode danificar a peça-obra, de forma a afetar o comportamento do processo, interferindo na qualidade superficial obtida na peça final. Deverão ser testadas várias condições de aproximação da ferramenta para investigar os danos que a detecção de contato pode causar na superfície de diferentes materiais da peça-obra usados no processo.

4.2. Estabelecimento de Critérios para a Definição das Funções Inteligentes

A partir dos dados que serão obtidos nos ensaios propostos do Capítulo 6, far-se-á a discussão dos critérios para a utilização dos procedimentos de FI. O objetivo é fornecer ao programador de tornos CNC ou ao técnico responsável pela preparação do processo, informações detalhadas a respeito da implementação dos procedimentos e técnicas de monitoramento utilizando EA.

Embora os ensaios possibilitem comprovar as possibilidades de aplicação e as limitações da técnica de monitoramento utilizada, isto não será suficiente para implementá-la com sucesso. É preciso também estabelecer roteiros de implementação, mostrando como determinar distâncias, limites de nível do sinal de EA e velocidades de avanço do dispositivo de medição. Os roteiros de implementação apresentados no trabalho são descritos a seguir. Maiores detalhes serão discutidos no Capítulo 7.

4.2.1. Detecção de Colisão

A detecção de colisão é um fator de segurança que pode evitar acidentes sérios com a máquina ferramenta ou com o operador. Neste item é feita a descrição deste processo, mostrando em que momentos ele deve ser acionado, bem como os procedimentos necessários para a sua implementação.

4.2.2. Controle Dimensional da Peça Torneada

Este controle permite mensurar automaticamente dimensões específicas da peça-obra logo após a operação de torneamento, fazendo com que sejam garantidas as tolerâncias especificadas, sem a necessidade de parada da máquina e participação do operador na medição. O ciclo garante a correção das dimensões automaticamente, caso haja necessidade. Neste item é proposto um roteiro para a implementação do sistema, relacionando os procedimentos envolvidos e as informações necessárias.

5. SISTEMA DE DETECÇÃO E CONTROLE DIMENSIONAL DE PEÇAS EM PROCESSO VIA EMISSÃO ACÚSTICA

O sistema de controle dimensional implementado num torno CNC usando técnicas de monitoramento por emissão acústica é capaz de avaliar o sinal de EA em situações distintas, permitindo assim controlar de maneira inteligente diversos procedimentos e funções da operação de torneamento. Tais situações e suas possibilidades são mostradas na tabela 5.1.

TABELA 5.1 – SITUAÇÕES DE MONITORAMENTO VIA EMISSÃO ACÚSTICA.

Situações	Útil para monitorar
Contato ferramenta / peça	Detecção de colisão
Contato ferramenta / máquina	Detecção de colisão
Contato dispositivo de medição / peça	Controle dimensional da peça torneada Determinação do momento de troca da aresta cortante da ferramenta Controle de fim de vida da ferramenta Detecção de colisão

Para estudar estas possibilidades, diversos ensaios foram propostos utilizando o sistema implementado. As possibilidades de monitoramento listadas na tabela 5.1 referem-se a procedimentos de torneamento utilizando funções inteligentes. Os procedimentos de FI e os detalhes sobre a especificação dos ciclos são apresentados no Capítulo 7.

Os objetivos dos ensaios a serem realizados são:

- avaliar a capacidade de monitorar colisão ferramenta / peça;
- avaliar a interação dispositivo de medição / peça.

A seguir, tem-se a descrição do banco de ensaios utilizado nos experimentos. A diferença entre este banco e o sistema usado para o controle dimensional está na presença do microcomputador (PC) com a placa de aquisição de dados, já que o PC é usado somente para a aferição inicial do conjunto, dispensável no funcionamento em ciclo de FI.

5.1. Montagem do Banco de Ensaios

O esquema da montagem do banco de ensaios utilizado para a detecção de contato do dispositivo de medição (apalpador) com a peça via emissão acústica pode ser visto pela figura 5.1. O mesmo esquema pode ser usado para representar a detecção de colisão de uma ferramenta contra a peça, visto que pelo sensor estar embutido no carro porta-ferramentas, ele pode atuar em todas as ferramentas de maneira conjunta.

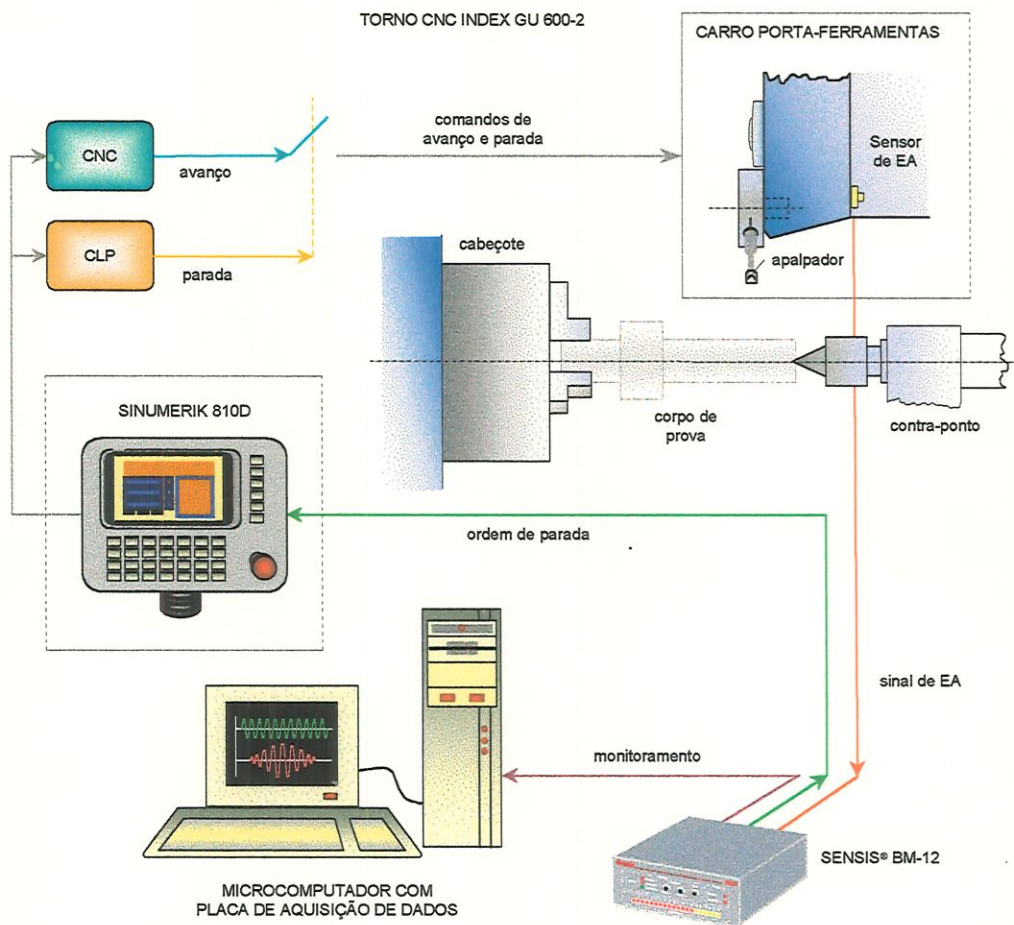


FIGURA 5.1 – ESQUEMA DE MONTAGEM DO BANCO DE ENSAIOS UTILIZADO NA DETECÇÃO DO APALPADOR COM A PEÇA.

O banco de ensaios foi proposto a fim de determinar os parâmetros necessários ao sistema implementado em ciclos de FI, e monitorar os estados da peça e da ferramenta na colisão de ambos. Os ensaios efetuados para a aferição do sistema são descritos no Capítulo 6. Segue-se a descrição dos elementos que compõe o sistema de detecção e controle dimensional de peças em processo.

5.1.1. Máquina Ferramenta

Para a realização dos ensaios utilizou-se um torno automático CNC INDEX modelo GU600-2 que apresenta alta performance, alta precisão e alta rigidez (o erro de posicionamento em X é da ordem de 0,5 μ m e em Z, de 1,0 μ m). O cabeçote-revólver possui capacidade para 12 ferramentas. Seu comando numérico, o SIEMENS SINUMERIK 810D, permite programação em paralelo com a usinagem; possibilita diálogo com o operador; memória de usinagem de até 1Mb, um PC486 com HD de 120Mb, CPU de 32bits, simulação gráfica e monitor colorido.

Um comando especial do CNC chamado MEAS será utilizado para efetuar a medição no contato, onde o valor obtido é transferido para um registrador temporário no momento do toque. No exemplo que se segue, o valor encontrado no instante do toque será transferido para o registrador R01 pelo canal 1. Caso não haja toque, R01 armazena o valor X=97.45 (limitante do comando):

```
.....  
N50 MEAS = 1 G1 X97.45 F10  
N60 R01 = $ AA_MM [X]  
.....
```

Se for necessário avaliar no programa se o sensor foi acionado ou não, a variável de estado \$ AC_MEA [n] (n = canal) pode ser questionada, onde o registrador exemplificado R01 armazenará 1 ou 0 respectivamente.

5.1.2. Sensor de Emissão Acústica

O sensor de emissão acústica utilizado foi desenvolvido pela SENSIS[®], com tecnologia própria, inspirado numa tecnologia desenvolvida pelo Grupo de Cerâmicas da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Os sensores de vibração e de EA para aplicação industrial em processos de usinagem nunca foram fabricados no Brasil antes, e hoje a empresa produz três modelos de acelerômetros piezelétricos diferentes, sendo dois de emissão acústica e um de vibração mecânica.

Os trabalhos associados com o monitoramento de processos de torneamento usando técnicas de emissão acústica mostram a fixação do sensor piezelétrico na haste da ferramenta de corte (ou até mesmo inserido nela), fazendo com que o sinal captado pela vibração gerada seja nítido e intenso, já que a mesma se propaga através da haste (da

pastilha ao sensor). O principal inconveniente desta instalação está no giro do cabeçote-revólver, pois o sinal de EA é recebido pelo módulo de processamento via cabo coaxial. Desta forma, o sensor deveria ser posicionado para a medição e retirado após a conclusão do experimento, não fazendo assim parte do conjunto.

No trabalho em questão, a localização do sensor na máquina foi amplamente estudada, até se chegar à conclusão de que a melhor posição para fixá-lo seria no interior do carro porta-ferramentas (figura 5.2). Com isso, todas as ferramentas alojadas poderiam ser monitoradas por um único sensor quando fossem utilizadas (detecção de colisão ou mesmo trabalhos na análise de desgaste da ferramenta).

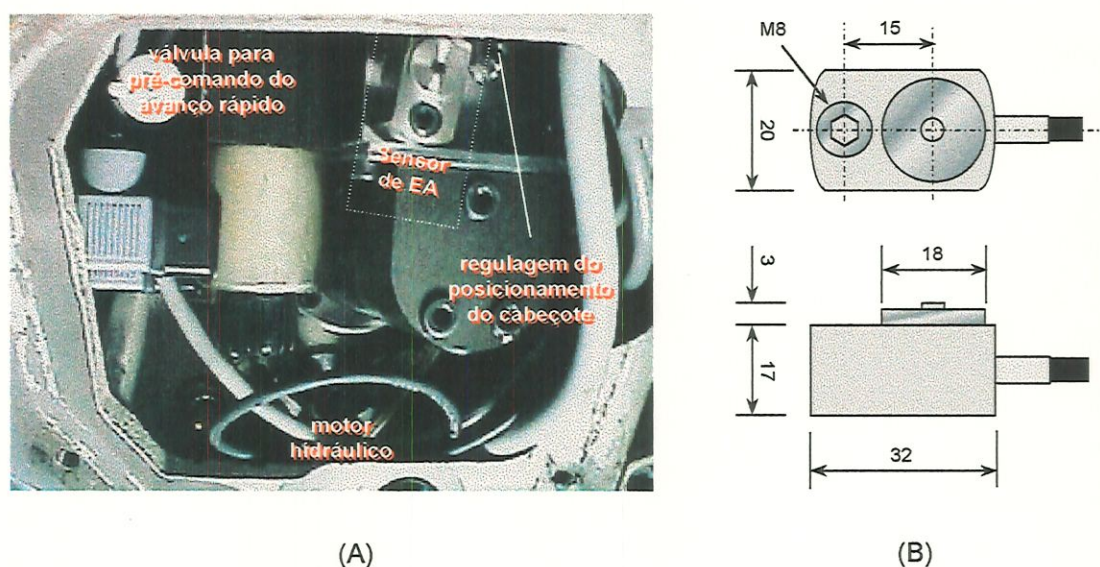


FIGURA 5.2 – SENSOR DE EMISSÃO ACÚSTICA: (A) LOCALIZAÇÃO NA MÁQUINA (EMBUTIDO NO CARRO PORTA-FERRAMENTAS). (B) DIMENSÕES.

Para se definir o local a ser fixado o sensor, levou-se em consideração o risco de redução da amplitude e da nitidez do sinal detectado, pois a vibração da ponta da ferramenta se propaga através de diversas interfaces até alcançar o sensor. Fazendo uma combinação “ideal” entre amplificação e filtragem através do módulo de processamento SENSIS® BM-12 (item 5.1.3), foi possível monitorar o sinal.

5.1.3. Sistema de Monitoramento e Aquisição de Dados

O sistema utilizado para amplificação, filtragem e retificação do sinal de EA nos ensaios é o equipamento SENSIS® BM-12, mostrado pela figura 5.3.



FIGURA 5.3 – SENSIS® BM-12.

O BM-12 apresenta (a) ajuste de ganho, utilizado para regular o nível do sinal gerado para diferentes situações, dependendo da máquina utilizada, da fixação do sensor e da operação monitorada, (b) ajustes do nível de limite estático¹¹ de acordo com a operação em dois canais independentes, podendo monitorar duas situações distintas, (c) possibilidade de troca simples do filtro de freqüências, permitindo alteração na faixa de trabalho do sistema. Possui dois canais de comunicação com o CNC da máquina, que alimentam uma saída de 24Vcc cada, de acordo com uma lógica preestabelecida (canal 1: *medição* e canal 2: *colisão*).

O esquema de ligações elétricas feitas entre o SENSIS e a máquina é esquematizado pela figura 5.4.

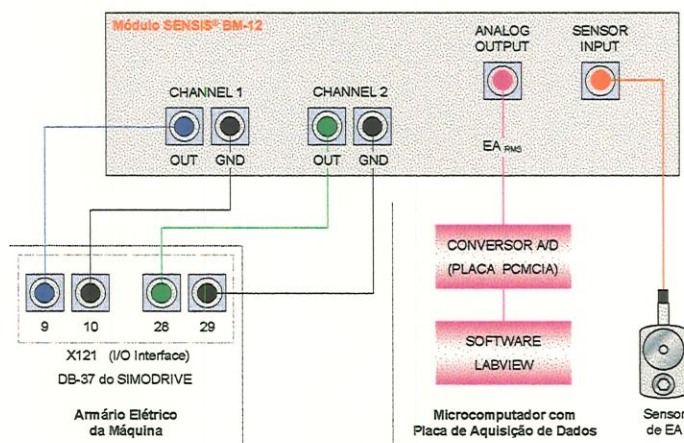


FIGURA 5.4 – LIGAÇÕES ELÉTRICAS DO SISTEMA.

¹¹ O nível de limite estático faz a avaliação do sinal captado por um único sensor e tratado em um intervalo de tempo (janela) fixo, em relação a um limite estático (*threshold*) [FELIPE Jr. (1996)].

Cada um dos dois canais podem ser acionados se o sinal de EA ultrapassar o nível de limite estático determinado em cada um deles. Assim, se durante o ciclo de usinagem ocorrer por exemplo uma colisão, o pico de sinal de EA gerado ultrapassará o limite estático pré-definido, alimentando a saída (canal 2) com 24Vcc. Esta informação deverá ativar o CNC (SIEMENS SINUMERIK 810D), indicando que houve choque e que este deve abortar a operação. Para que isto seja possível, o torno deve estar preparado para receber esta mensagem e interpretá-la, de maneira a encontrar a melhor solução possível para o problema.

5.1.4. Dispositivo de Medição por Contato

O dispositivo apalpador foi desenvolvido a partir da idéia do sensor de contato tipo *probe* utilizado na medição de peças (item 3.1.4). A haste é feita de aço-prata 1100 trefilado o qual apresenta, ao mesmo tempo, a rigidez necessária para uma boa precisão e a elasticidade adequada para não sofrer ruptura no contato.

A haste é fixada no castelo porta-ferramentas da máquina através do dispositivo de fixação construído especialmente para ela. Em conjunto com as outras ferramentas, o apalpador é utilizado no processo contínuo de fabricação e medição das peças torneadas.

A figura 5.5 mostra a foto do sistema apalpador instalado no torno CNC INDEX GU600-2. A vista corresponde ao esquema ilustrado pela figura 5.1.

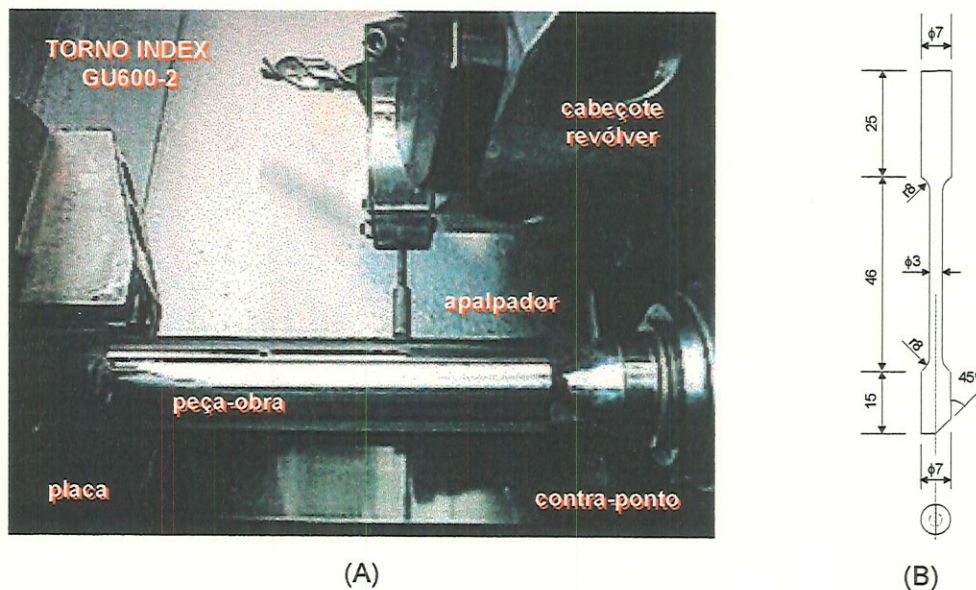


FIGURA 5.5 – APALPADOR UTILIZADO NO TRABALHO: (A) LOCALIZAÇÃO NA MÁQUINA (INSERIDO NO CARRO PORTA-FERRAMENTAS). (B) DIMENSÕES.

5.1.5. Interface de Monitoramento

O software LabView® permite programar interfaces para monitoramento (*Virtual Instrument*, ou VI) de um sinal recebido pelo microcomputador através de uma placa de aquisição de dados. Os dados de saída analógicos do SENSIS® BM-12 passam por um conversor A/D (analógico-digital) padrão PCMCIA (*Personal Computer Memory Card International Association*) antes de serem devidamente monitorados.

Uma VI foi especialmente desenvolvida para uso específico nos ensaios. Ela mostra na tela do computador um gráfico ilustrando a intensidade do sinal de EA (tensão RMS) em função do tempo, e também salva os pontos deste gráfico em um arquivo para análise posterior. A partir dos valores obtidos, determinam-se os níveis de limite estático (tensões de *trigger* ou disparo) necessários.

A figura 5.6 mostra o esquema da VI desenvolvida para o monitoramento.

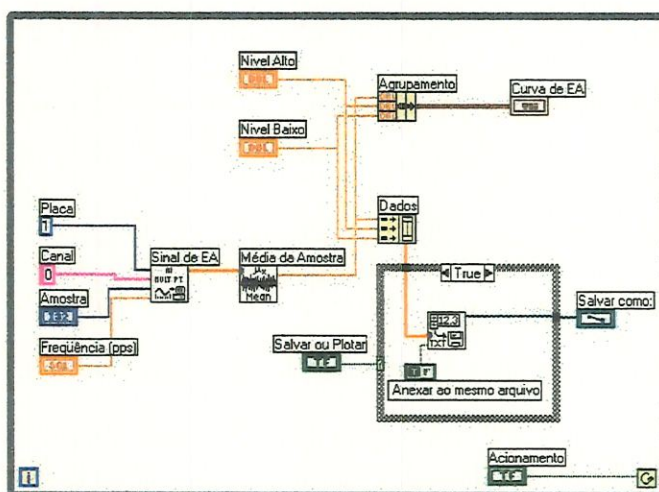


FIGURA 5.6 – DIAGRAMA DE BLOCOS DA VI.

Acionado o sistema, a VI faz primeiro a aquisição de dados do sinal proveniente do sistema SENSIS® BM-12, e em seguida, efetua a média da amostra selecionada. Dois sinais contínuos (nível alto e nível baixo) são gerados simultaneamente com os valores de entrada da média dos pontos obtidos, e os três sinais são agrupados para que o gráfico seja gerado. Ao mesmo tempo, os dados são lidos e armazenados em um banco de dados para serem posteriormente gravados ou não em disco num arquivo apropriado. Os dados seguintes podem ou não serem anexados ao arquivo anterior.

A figura 5.7 ilustra a interface gráfica exibida na tela do microcomputador.

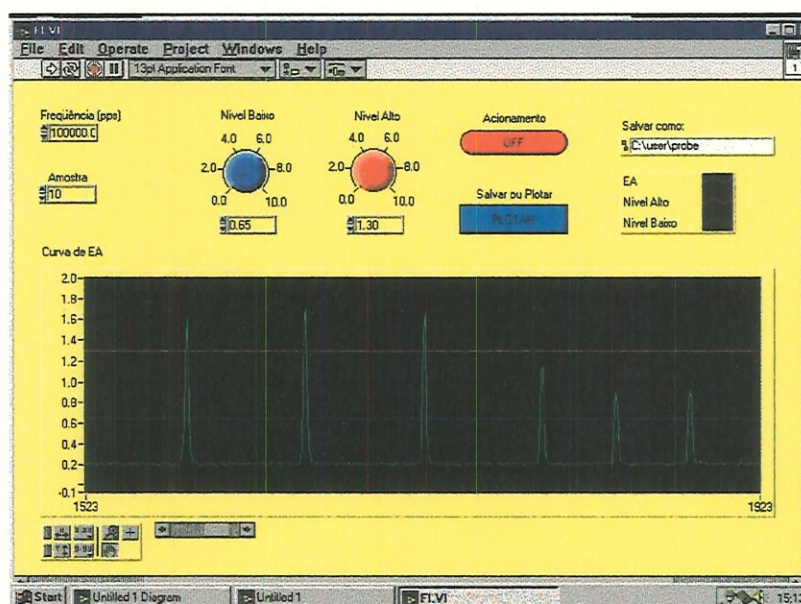


FIGURA 5.7 – INTERFACE DA VI PARA O MONITORAMENTO.

A tela de apresentação da VI mostra os ajustes possíveis, como o ajuste nos níveis de tensão de disparo para o monitoramento, o número de pontos de cada amostra, a frequência de aquisição do sinal em *pps* (pontos por segundo), e a opção de salvar os dados num arquivo específico. Mostra ainda a plotagem do sinal *on-line*.

5.1.6. Peça Obra

Para todos os ensaios foram utilizados eixos de $\phi 1\frac{1}{4}$ " (31,75mm) usinados de modo que o seu diâmetro mantivesse uma tolerância dimensional de $50\mu\text{m}$ (variando de 29,97mm até 30,02mm) e uma rugosidade média (R_a) inferior a $3,2\mu\text{m}$ (Classe da Rugosidade N8). A tolerância foi escolhida baseando-se na Norma Brasileira de Ajustes e Tolerâncias (Tolerância = $35i \cdot IT9$)¹² [NOVASKI (1994)].

Dependendo do que se queria avaliar, utilizou-se diferentes materiais para a peça obra. O aço 1020, por apresentar maior viabilidade (custo/benefício) nas aplicações em indústrias do setor metal-mecânico, foi mais intensamente utilizado. Os outros materiais foram: alumínio, ferro fundido, aço 1030 endurecido ($65R_B$), e aço temperado 8640 ($56R_C$).

¹² A unidade de tolerância é dada por: $i = 0,45 \cdot \sqrt[3]{D} + 0,001 \cdot D$ onde $D = \sqrt{LSE \times LIE}$.

6. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA EMISSÃO ACÚSTICA NO SISTEMA DE DETECÇÃO E CONTROLE DIMENSIONAL DE PEÇAS EM PROCESSO

Os ensaios aqui propostos visam analisar o comportamento da emissão acústica nas diferentes situações de monitoramento citadas no Capítulo 5. Os mesmos foram divididos em quatro etapas:

1. A preocupação inicial está na seleção dos parâmetros a serem utilizados nos experimentos, objetivando comprovar a funcionalidade do sistema de monitoramento por emissão acústica.
2. Em seguida, efetua-se uma análise minuciosa sobre os erros de posicionamento, associados tanto com a colisão em casos extremos de movimentação em X e Z de uma ferramenta de metal duro contra um eixo de aço 1020, quanto com a detecção de contato do apalpador contra a peça para diferentes velocidades de avanço em X.
3. Depois, a escolha adequada dos níveis de tensão estáticos do BM-12 (canais 1 e 2) que serão utilizadas, baseando-se nos níveis de sinal de emissão acústica detectados em situações críticas de ruído.
4. Finalmente, a avaliação da precisão de medição associada ao acabamento final de cada peça medida no contato com o apalpador para diferentes situações, relacionadas com o material da peça-obra, com a velocidade de avanço e com a rotação utilizados.

Pretende-se assim uma aferição preliminar do sistema, a partir dos resultados alcançados nos ensaios.

6.1. Escolha dos Parâmetros

Antes de qualquer análise relativa à funcionalidade do sistema (ou banco de ensaios), faz-se necessária uma breve discussão sobre a escolha dos parâmetros usados.

Por se tratar de disponibilidade e custo no mercado, o **aço 1020** apresenta-se com mais frequência nas aplicações em usinagem de metais e assim, resolveu-se utilizá-lo. Primeiramente, foi aplicada uma rotação de 100rpm, e o sistema de detecção do sinal de emissão acústica não captou a baixa vibração gerada no contato do apalpador contra a peça para um avanço de 20mm/min. Para a situação oposta, numa rotação de 5000rpm, o próprio ruído gerado no giro do eixo-árvore fez com que a detecção acontecesse antes mesmo que houvesse o contato! Assim, descobriu-se que seria possível ler o sinal para rotações entre 400 e 2000rpm. Adotou-se **800rpm**, já que a vibração provocada nesta velocidade de rotação é excelente, possibilitando uma medição clara (ruído reduzido).

Fixando a rotação em 800rpm, a preocupação agora era definir a melhor velocidade de avanço, já que o apalpador não poderia danificar o acabamento superficial da peça e a medição deveria ter uma precisão considerável. Para um avanço lento como F1 (1mm/min), os valores obtidos eram excelentes, mas o tempo despendido na tarefa era excessivo. Para um avanço rápido como F100 (100mm/min), as medições não eram tão precisas, já que o erro de posicionamento é proporcional ao avanço do carro porta-ferramenta (como pode ser constatado no item 6.2.1). Adotou-se assim **F10** (10mm/min).

6.2. Erros de Posicionamento

Para a detecção de parada da máquina no contato da ferramenta com a peça em movimento, um sensor piezelétrico capta o sinal de EA e o envia ao módulo de filtragem e processamento (BM-12). Este módulo analisa se o sinal de entrada ultrapassa um certo limite preestabelecido e, se isto for verdadeiro, um pulso de 24Vcc é enviado ao controlador lógico programável (CLP) da máquina para configurar a parada (vide figura 5.1). Porém, entre a ocorrência do contato e o recebimento do sinal pelo CLP, decorre um tempo $[t_2-t_1]$, como mostra a figura 6.1) em que a máquina permanece em movimento. Assim, a máquina detecta a peça um tanto além de onde ela realmente se encontra e armazena esta medida no registrador R. A diferença entre o diâmetro real da peça e o diâmetro detectado será chamado **Erro de Parâmetro**.

Porém, mesmo depois de ter sido reconhecido o sinal de parada pelo CLP, a máquina continua em movimento por algum tempo $[t_3-t_1]$ devido à sua inércia. Este é o fator limitante para a utilização deste método em altas velocidades de aproximação. A diferença entre o diâmetro real da peça e o diâmetro de parada será chamado **Erro de Posição**. É importante frisar que mesmo que o erro de posição seja um problema, é perfeitamente

possível corrigir a posição da máquina para a posição assinalada em R mediante uma simples alteração no programa CNC. O único problema relativo a este erro é que o contato promove uma “marcação” na peça, indesejável para algumas aplicações de usinagem de acabamento.

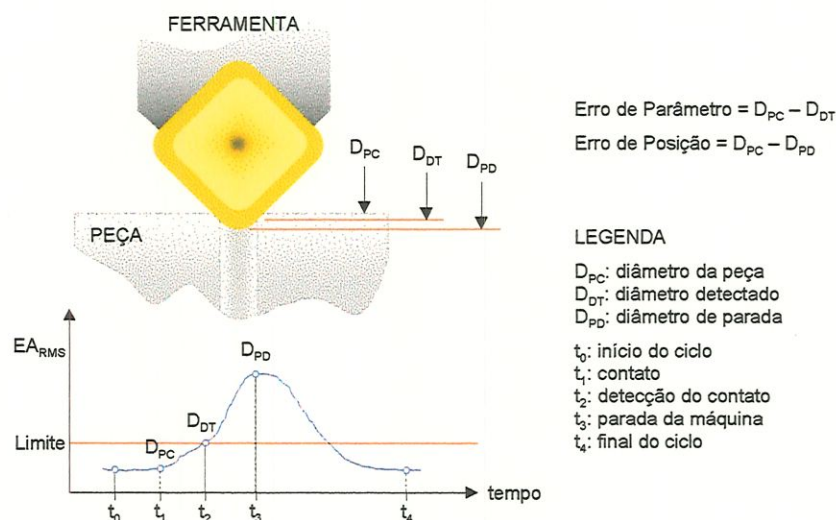


FIGURA 6.1 – DEFINIÇÃO DOS ERROS DE PARÂMETRO E POSIÇÃO.

À medida em que a ferramenta penetra na peça, a área de contato com a peça aumenta, fazendo com que o nível do sinal de emissão acústica cresça proporcionalmente.

Os itens que se seguem pretendem analisar os erros de posicionamento nas detecções de colisão (ferramenta) e de contato (apalpador) com a peça para diferentes velocidades de avanço.

6.2.1. Detecção de Colisão

Os ensaios foram realizados com o intuito de verificar os erros de posicionamento do sistema nas direções X, Z+ e Z-, desde o início de detecção do contato de uma ferramenta de metal duro contra a peça pelo sensor de EA até a parada do carro porta-ferramentas. Os valores obtidos nos ensaios estão representados no Anexo A em forma de tabelas.

6.2.1.1. Análise em X

Utilizando aço 1020 e mantendo a rotação em 2000rpm, variou-se a velocidade de avanço de 100 a 1000mm/min (10 pontos em 10 amostras). A figura 6.2 mostra um esboço do ensaio e do seu resultado em uma amostra.

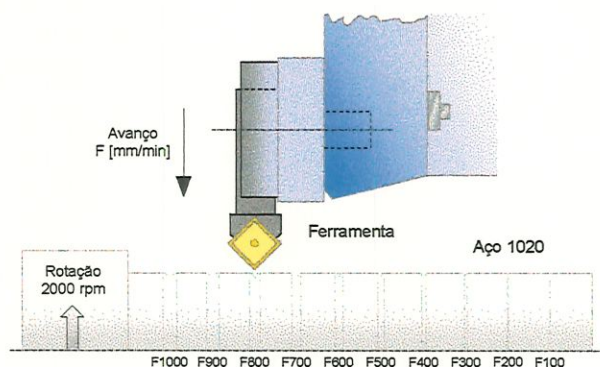


FIGURA 6.2 – MARCAS NA PEÇA PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE AVANÇO RÁPIDO EM X.

O gráfico dos erros de posicionamento em função da velocidade de avanço pode ser visualizado pela figura 6.3, associado com os erros de parâmetro e posição, onde $D_{PC} = 30,00^{+0,02}_{-0,03}$ mm. Analisando o gráfico, pode-se observar para ambos os casos uma correlação linear (ρ^2) excelente dos resultados (praticamente 100%).

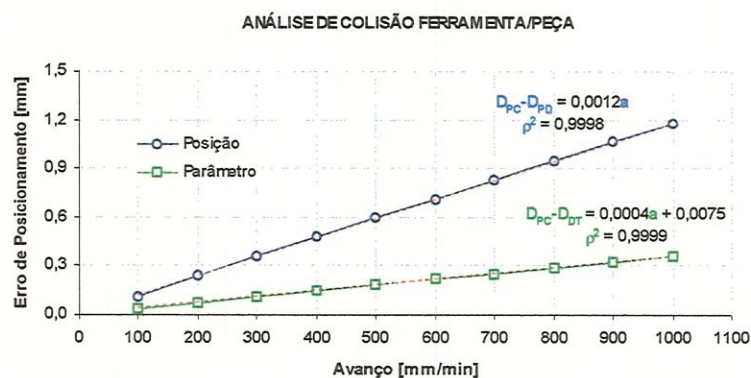


FIGURA 6.3 – GRÁFICO DO ERRO DE POSICIONAMENTO EM FUNÇÃO DO AVANÇO EM X DA FERRAMENTA PARA UMA MÉDIA DE 10 ENSAIOS DE COLISÃO (TABELA 10.1).

Apesar do sensor detectar o contato após um tempo $[t_2 - t_1]$, o carro porta-ferramentas pára somente depois de um determinado período de tempo $[t_3 - t_1]$ (item 6.1).

Este erro de posicionamento é uma característica da inércia do conjunto, o qual é praticamente impossível de ser reduzido. A fórmula simplificada fica:

$$t_3 - t_1 = \frac{\text{Erro de Posição}}{2a} \text{ [min]} \quad (6.1)$$

onde (a) é o avanço em mm/min. Vale salientar que a profundidade de penetração na peça equivale à metade do erro detectado no seu diâmetro (daí a divisão por 2).

O tempo de parada é igual a 36ms. Assim, para um avanço G00 (15000mm/min), este tempo poderia gerar uma profundidade de penetração de aproximadamente 9mm ($D_{PC}-D_{PD}=18\text{mm}$), totalmente inaceitável para qualquer análise. Tal inconveniente mostra que o sistema de monitoramento em questão não apresenta uma velocidade de resposta apropriada, já que uma profundidade considerada coerente para qualquer análise de colisão em G00 não deve ultrapassar 2mm (para isso, o tempo $[t_3-t_1]$ deveria estar na ordem de 8ms). Nestas condições, a velocidade de avanço máxima permitida é de 3300mm/min.

O tempo de detecção ou de resposta do sistema $[t_2-t_1]$ pode ser calculado simplifiadamente da seguinte forma:

$$t_2 - t_1 = \frac{\text{Erro de Parâmetro}}{2a} \text{ [min]} \quad (6.2)$$

Avaliando o tempo de detecção, o que se vê é uma nítida relação com a velocidade de avanço, já que à medida que ela aumenta, a profundidade de penetração cresce, e consequentemente, incrementa a área de contato da ferramenta com a peça. Assim, o tempo para se atingir o limite estipulado é praticamente constante e igual a 12ms.

6.2.1.2. Análise em Z

Considerou-se para este caso uma peça de aço 1020, usinada apropriadamente para os ensaios. Mantendo a rotação em 2000rpm, variou-se a velocidade de avanço de 100 a 1000mm/min (10 pontos em 10 amostras), usinando a face de contato com excelente acabamento ($R_a=3,2\mu\text{m}$) para cada um dos avanços usados. A figura 6.4 mostra um esboço do ensaio.

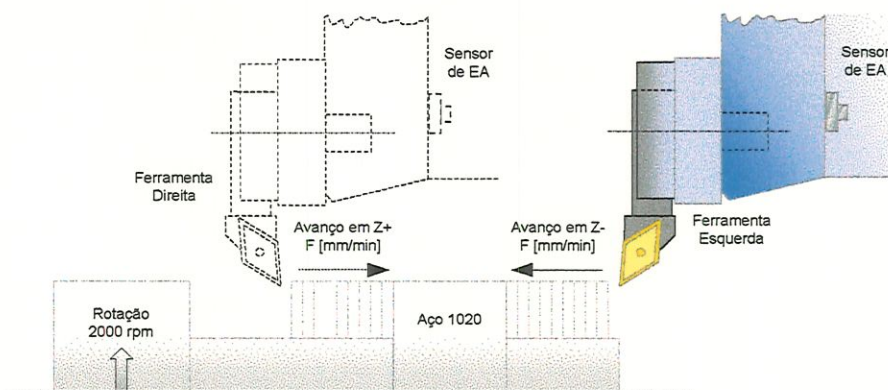


FIGURA 6.4 – ENSAIO PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE AVANÇO RÁPIDO EM Z.

Análise em Z-

O gráfico dos erros de posicionamento em função da velocidade de avanço pode ser visualizado pela figura 6.5, onde se pode observar uma excelente correlação linear dos resultados ($\rho^2 > 99,8\%$).

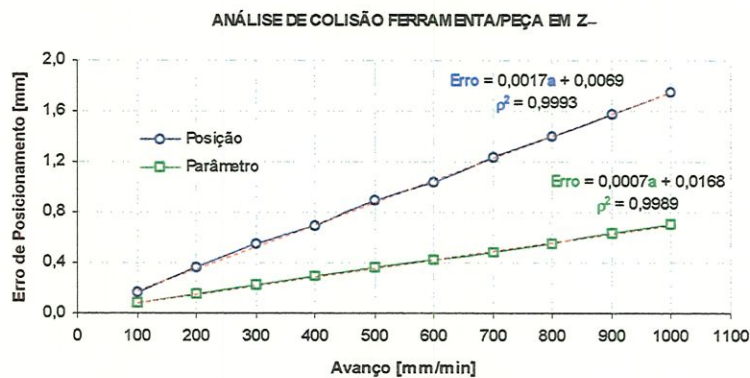


FIGURA 6.5 – GRÁFICO DO ERRO DE POSICIONAMENTO EM FUNÇÃO DO AVANÇO EM Z- DA FERRAMENTA PARA UMA MÉDIA DE 10 ENSAIOS DE COLISÃO (TABELA 10.2).

O tempo de parada da máquina $[t_3 - t_1]$ é de aproximadamente 0,10s (0,0017min). Este tempo de parada é excessivamente alto se for considerado um avanço G00. A profundidade de penetração gerada seria de aproximadamente:

$$\text{Erro} = a(t_3 - t_1) = 15000 \cdot 0,0017 = 25,5\text{mm} \text{ ! (totalmente inconcebível)}$$

Foi citado anteriormente (avanço em X) que uma profundidade considerada coerente para qualquer análise de colisão em G00 não deve ultrapassar 2mm. Para isso, a velocidade de avanço em Z- máxima permitida é de 1200mm/min.

O tempo para se atingir o limite estipulado $[t_2-t_1]$ é de aproximadamente 42ms.

Análise em Z+

O gráfico dos erros de posicionamento em função da velocidade de avanço pode ser visualizado pela figura 6.6. Analisando o gráfico, pode-se observar para ambos os erros uma excelente correlação linear (ρ^2) dos resultados (superior a 99,8%).

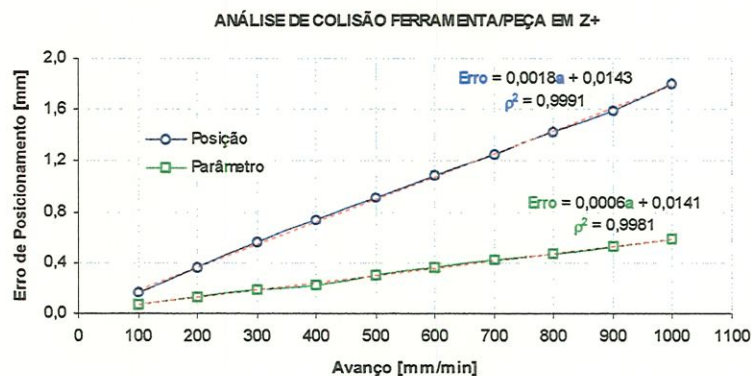


FIGURA 6.6 – GRÁFICO DO ERRO DE POSICIONAMENTO EM FUNÇÃO DO AVANÇO EM Z+ DA FERRAMENTA PARA UMA MÉDIA DE 10 ENSAIOS DE COLISÃO (TABELA 10.3).

Como no caso anterior, o tempo de parada da máquina $[t_3-t_1]$ é excessivamente alto (0,11s) se for considerado um avanço G00. A profundidade de penetração gerada seria de aproximadamente 26mm, inaceitável! Considerando uma profundidade de 2mm, a velocidade de avanço em Z+ máxima permitida é de 1100mm/min.

No caso da detecção, o tempo para se atingir o limite estipulado é de aproximadamente 40ms.

6.2.2. Detecção de Contato

Neste ensaio, verificou-se o avanço do apalpador contra a peça, utilizando aço 1020 e mantendo a rotação em 800rpm. Variou-se a velocidade de avanço de 10 a 100mm/min

(10 pontos em 10 amostras). A figura 6.7 mostra o gráfico dos erros de posicionamento em função da velocidade de avanço associados com os erros de parâmetro e posição para $D_{PC} = 30,00^{+0,02}_{-0,03}$ mm.

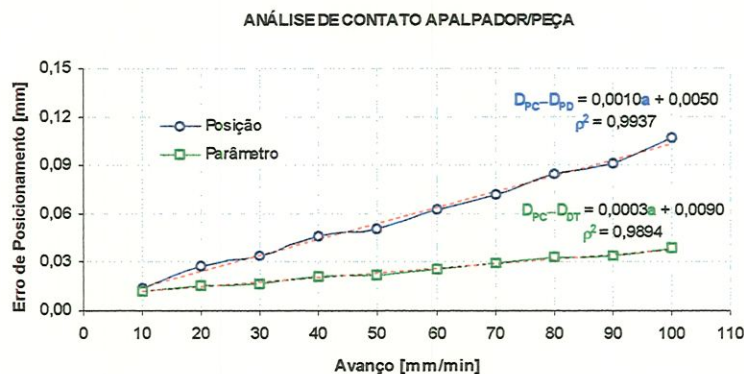


FIGURA 6.7 – GRÁFICO DO ERRO DE POSICIONAMENTO EM FUNÇÃO DO AVANÇO EM X DO APALPADOR PARA UMA MÉDIA DE 10 ENSAIOS DE CONTATO (TABELA 10.4).

Em todos os casos, o apalpador não deixou marcas na peça, visto que a flexibilidade do mesmo impede a sua penetração.

Analisando o gráfico pôde-se observar uma boa correlação linear (ρ^2) entre a profundidade e avanço, tanto para o erro de parâmetro (98,94%) quanto para o erro de posição (99,37%). Novamente, o erro de posicionamento associado à inércia do conjunto faz com que a precisão dos resultados seja dificultada.

Considerando o avanço de **10mm/min** e a equação característica da linearização dos pontos marcados no gráfico, o erro de posição é cerca de $15\mu\text{m}$, onde o erro de parâmetro para eventuais correções de programação em ciclos de FI é de $12\mu\text{m}$ (o que é um bom resultado). Para confirmar o resultado, foram efetuadas 60 medições do erro de parâmetro, mostradas pela tabela 10.5 (anexo A).

Para a velocidade de avanço escolhida para a medição (10mm/min), os tempos aproximados de parada da máquina [t_3-t_1] e de resposta do sistema [t_2-t_1] são respectivamente 90 e 70ms.

Observou-se que o tempo de detecção apresenta uma clara relação com a velocidade de avanço. À medida que a velocidade cresce, a profundidade de penetração aumenta, incrementando a área de contato da ferramenta com a peça. Desta forma, o tempo para se atingir o limite estipulado diminui (de 70ms para 23ms) à medida que a velocidade aumenta (de 10mm/min para 100mm/min).

6.3. Ajuste dos Limites Estáticos

Os ensaios foram realizados para se ajustar os níveis de limite estático necessários para a ordem de parada da máquina. Conforme a amplitude do sinal, o CNC reage de uma forma, dependendo da função inteligente a qual se precisa desempenhar (canal 1: *medição* e canal 2: *colisão*). A correlação do sinal obtido de EA com o contato é feita pela VI implementada para auxiliar no monitoramento do sinal (item 5.1.5).

Tomando uma rotação de 800rpm, com deslocamento do apalpador contra a peça de aço 1020 a uma velocidade de avanço de 10mm/min, o nível de ruído detectado foi de $0,28 \pm 0,17V_{cc}$. Com isso, a tensão de *trigger* para o canal 1 foi ajustada para $0,50 \pm 0,05V_{cc}$, fazendo com que o sensor dispare no mínimo contato para sinais acima deste limite.

As rotações de trabalho, freqüentemente utilizadas em torneamento, ficam entre 800 e 2000rpm. Dentro destas condições, o valor máximo atingido no monitoramento da colisão via LabView® foi de $4,6 \pm 0,2V_{cc}$ para 2000rpm, no contato da ferramenta com avanço em 30mm/min, o que garante para uma margem segura, que qualquer sinal acima de $6,0 \pm 0,5V_{cc}$ detectado pelo canal 2 do BM-12 no posicionamento pode ter havido colisão. A figura 6.8 mostra o gráfico da tensão RMS do sinal de EA, e da entrada do CLP no toque da ferramenta nas condições citadas.

Os dados de aquisição via LabView relacionados com a figura 6.8 podem ser vistos pela tabela 10.6 (anexo B).

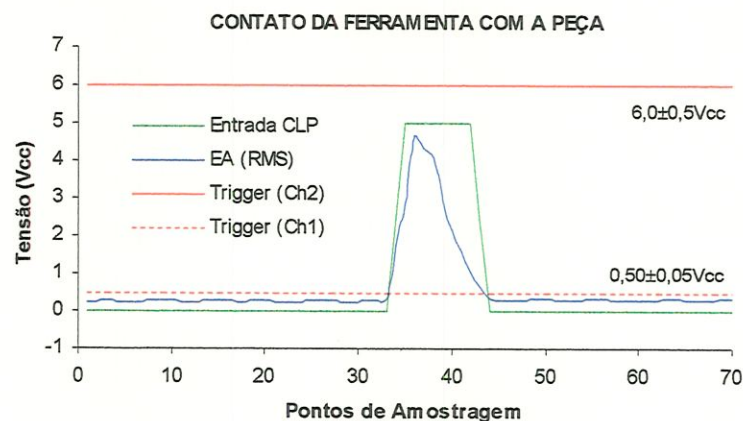


FIGURA 6.8 – TENSÃO EA_{RMS} E ENTRADA DO CLP NO CONTATO DA FERRAMENTA CONTRA A PEÇA A 30mm/min, COM ROTAÇÃO DE 2000rpm (TABELA 10.6).

6.4. Análise da Detecção de Contato Apalpador/Peça para Diferentes Parâmetros de Medição

Aqui pretende-se discutir os resultados obtidos na detecção de contato do apalpador com a peça para diferentes parâmetros de medição, relacionados com o material da peça-obra, com a velocidade de avanço do apalpador contra a peça, e com a rotação do eixo árvore. Primeiro, apresentar-se-á a análise da relação simultânea dos diferentes parâmetros utilizados (Análise de Variância), e em seguida, a avaliação do contato do apalpador em diferentes materiais.

6.4.1. Análise de Variância (ANOVA)

Os ensaios aqui realizados basearam-se no comportamento do sistema no contato do apalpador contra peças de cinco materiais diferentes (alumínio, ferro fundido, aço 1020, aço 1030 endurecido, e aço 8640 temperado), usinadas com $\phi 30,00_{-0,03}^{+0,02}$ mm de diâmetro. Para cada uma das cinco velocidades de avanço [mm/min] escolhidas (F1, F10, F20, F50, F100), efetuou-se a medição do diâmetro da peça através da função MEAS em 30 pontos distintos (parâmetro R). Iniciando com uma rotação de 400rpm, alterou-se as rotações para 800rpm e, em seguida, para 1600rpm, a cada 10 medidas efetuadas. A tabela 10.7 (anexo C) mostra os valores medidos nas diferentes situações.

A figura 6.9 representa a situação em questão. Nos gráficos, foram marcados os pontos referentes a cada um dos materiais acima especificados, verificando a variação da medida do apalpador para as diferentes velocidades de avanço. A rotação do eixo-árvore também foi levada em consideração.

Não foi possível constatar a influência do contato do apalpador com a peça de **ferro fundido**, pois a mesma cria uma película de grafite após sua usinagem (lubrificante), fazendo com que o apalpador deslize sobre a peça, impedindo que o sinal de emissão acústica necessário para a medição seja gerado, impossibilitando a medição pelo sensor.

Seguem-se os gráficos com uma breve descrição dos resultados.

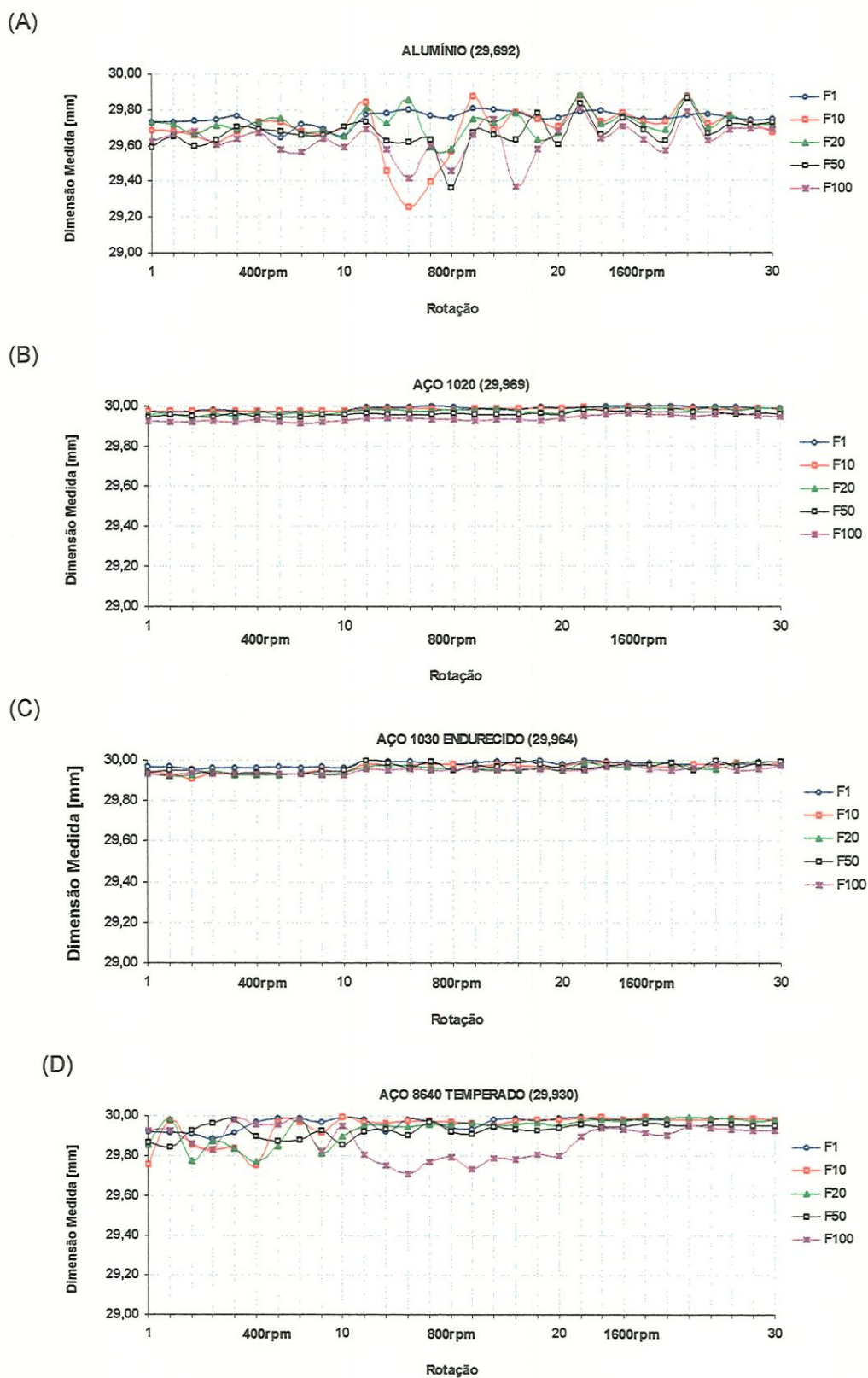


FIGURA 6.9 – GRÁFICOS DA VARIAÇÃO DO DIÂMETRO COM A VELOCIDADE DE AVANÇO PARA DIFERENTES MATERIAIS DA PEÇA-OBRA: (A) ALUMÍNIO, (B) 1020, (C) 1030, (D) 8640 (TABELA 10.7).

(A) **Alumínio**: percebe-se uma pequena estabilidade para a rotação de 400rpm nas diferentes velocidades de avanço consideradas. A variação do diâmetro medido com F1 é pequena (perto das demais). O valor médio encontrado para o diâmetro foi de 29,692mm, o pior resultado encontrado. As marcas na peça ficaram bem evidentes.

(B) **Aço 1020**: sem dúvida, os melhores resultados. O valor médio obtido é de 29,969mm, e só não foi maior graças às medidas efetuadas com F20, F50 e F100 (erros de parâmetro).

(C) **Aço 1030 Endurecido (65R_B)**: os resultados foram bons, com média de 29,964mm. Se não houvesse uma redução da dimensão em 400rpm, certamente o valor médio subiria.

(D) **Aço 8640 Temperado (56R_C)**: percebe-se uma grande variação dos valores em 400rpm para todas as velocidades de avanço. Em 800rpm, somente F100 apresenta grande variação. Para a rotação de 1600rpm, os valores tendem a ser constantes. Tais variações comprometeram a média dos valores: 29,930mm.

O delineamento dos experimentos (anexo C) realizado pôde mostrar que os três fatores associados à geração do sinal de emissão acústica no contato do apalpador com a peça (material, avanço e rotação) afetam de modo significativo a precisão na medição, já que os *Pontos Percentuais da Distribuição F* mostram a influência dos parâmetros com uma variância superior a 99,99% [HINES & MONTGOMERY (1990)]. A maior influência relativa está ligada ao material da peça-obra, seguida pela rotação do eixo árvore e só depois pela velocidade de avanço. Os resultados da ANOVA constatarem o que se viu através dos gráficos (figura 6.9), mas com uma confiabilidade maior. Maiores detalhes podem ser vistos no apêndice 1 – Delineamento de Experimentos.

6.4.2. Avaliação do Comportamento dos Parâmetros em Materiais Diferentes

Foram mensurados 30 pontos para cada um dos materiais, tomando 6 amostras com 5 pontos cada. Os materiais (alumínio, aço 1020, aço 1030 endurecido e aço 8640 temperado) foram comparados entre si, com relação ao comportamento do apalpador na medição dos 5 eixos com $\phi 30,00^{+0,02}_{-0,03}$ mm de diâmetro. A figura 6.10 esquematiza as diferentes situações do contato (penetração e/ou deformação) do apalpador com os eixos dos materiais citados, num avanço de 10mm/min e rotação de 800rpm.

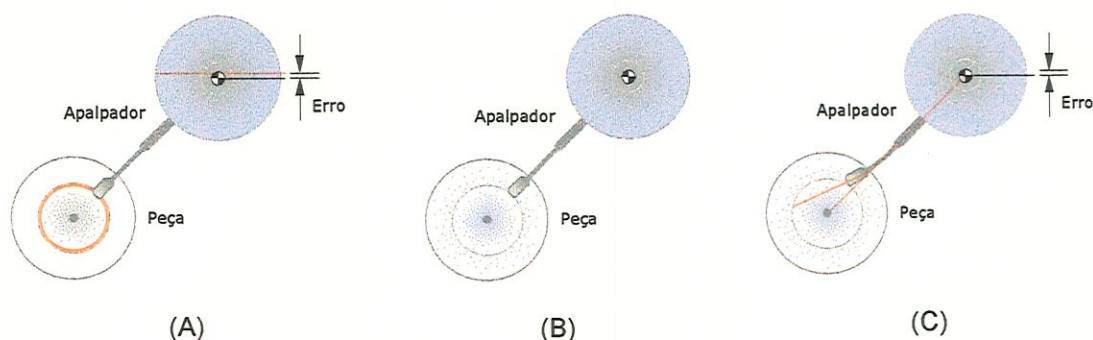


FIGURA 6.10 – AÇÃO DO APALPADOR SOBRE DIFERENTES MATERIAIS DA PEÇA: (A) ALUMÍNIO; (B) AÇOS 1020 E 1030 ENDURECIDO; (C) AÇO 8640 TEMPERADO.

- (A) Com uma média \bar{X} de 30 pontos medidos igual a 29,716mm e desvio padrão S_x de 0,205mm (muito alto), o erro de parâmetro correspondente na medição em **alumínio** fica em torno de 0,284mm no diâmetro da peça. A precisão não é possível, já que a rigidez do material da haste é maior que do material da peça, fazendo com que haja *penetração*.
- (B) Para o **1020**, $\bar{X} = 29,988$ mm com $S_x = 0,0052$ mm e para o **1030 endurecido**, $\bar{X} = 29,977$ mm e $S_x = 0,014$ mm nos 30 pontos medidos. O que foi observado em ambos os casos foi uma combinação da *flexão* da haste do apalpador no contato com uma ligeira *penetração* na peça, a qual não comprometeu o acabamento final da peça. O sinal de EA se propaga da peça e através da haste com boa intensidade.
- (C) Avaliando o **8640 temperado**, observou-se uma média \bar{X} igual a 29,958mm e desvio padrão S_x de 0,033mm e o erro de parâmetro na medição fica em torno de 0,042mm no diâmetro da peça. A medida aqui deixa de ser precisa, já que o material da haste é bem menos rígido que o material da peça, fazendo com que haja *deformação por flexão* antes mesmo que o sinal de EA ultrapasse o *trigger* ajustado para o canal 1.

A tabela 10.9 referente a estes ensaios é mostrada no anexo C.

7. CONCEITOS E CRITÉRIOS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE FUNÇÕES INTELIGENTES

De uma forma geral, as máquinas ferramentas CNC são limitadas no que se refere à solução de problemas específicos de processos de fabricação nela efetuados. Assim, o projeto visa tornar esta máquina "inteligente", fazendo com que a mesma identifique tais problemas e tome decisões lógicas sobre como solucioná-los através de funções de automação implementados com o auxílio de técnicas apropriadas, correlacionando os sinais dos sensores de monitoramento com as ações corretivas da máquina. Estas funções de automação são denominadas no presente trabalho de Funções Inteligentes.

Diversos sistemas de monitoramento e modernos CNC estão hoje disponíveis no mercado; entretanto, a utilização integrada destes recursos tem sido dificultada pela falta de estratégias eficientes na sua implementação, as quais estão associadas às grandezas intrínsecas ao torneamento inteligente, uma vez que neste novo contexto a prática da programação da máquina deve ser diferente da usual. Neste caso, é necessário o conhecimento dos valores das grandezas relacionadas aos sistemas de monitoramento durante a fase de programação, já que a supervisão será mínima.

Com isso, faz-se necessária uma descrição dos fundamentos necessários para a utilização prática das funções de automação inteligentes baseadas em técnicas de monitoramento por EA, fornecendo informações sobre como se proceder na implementação e aplicação destas técnicas. As funções propostas anteriormente (tabela 4.1) são:

1. Detecção de Colisão
2. Controle Dimensional da Peça Torneada

7.1. Detecção de Colisão

A abordagem na detecção da colisão é referente a qualquer operação que envolva a movimentação do revólver na máquina. Ela é importante para a prevenção de acidentes

graves no processo, bem como para proteger a máquina contra erros de programação e operação que podem destruir partes desta, já que os sensores de limite de potência presentes nas máquinas CNC mais modernas não são suficientemente seguros contra tais acidentes, pois só são ativados com o travamento do eixo árvore.

Durante a movimentação de posicionamento da ferramenta, nenhum sinal acima do limite estático estabelecido ($6,0 \pm 0,5V_{cc}$) deve ser registrado pelo sensor. Assim, qualquer sinal gerado sob tais condições deve ser considerado anormal, indicando que a ferramenta entrou em contato com alguma parte da máquina ou da peça de forma inesperada.

O sistema de monitoramento pode ser regulado para verificar possíveis sinais durante estas movimentações e, se algum sinal de EA ultrapassar o nível de *trigger* ajustado no canal 2 do SENSIS®, o sistema emitirá um aviso (**possível colisão**), abortará o programa, desligará a placa e afastará a ferramenta, para evitar problemas à máquina e maiores danos na fabricação das peças.

Para utilizar este dispositivo, é preciso estabelecer as janelas de monitoramento, indicando ao sistema quando o sinal gerado pela ferramenta pode ou não ser detectado. Este sistema tem que trabalhar em conjunto com o CNC do torno, de forma que ele possa ordenar o afastamento da ferramenta e desligamento da placa no caso do sinal detectado. Com isso, o sistema terá condições de receber instruções do CNC para detectar a colisão toda vez que este ordenar (via programa ou manualmente) a movimentação inicial de posicionamento de determinada ferramenta. Desta forma, este sistema de detecção passa a integrar o CNC da máquina.

7.2. Controle Dimensional da Peça Torneada

As informações de qual medida necessita ser controlada (posicionamento final do apalpador), as dimensões LSE e LIE especificadas na carta de controle do processo, e a frequência de verificação dimensional (medição de uma em NF peças fabricadas) devem ser fornecidas antes do início do ciclo de produção.

Após o número NF de peças confeccionadas, a rotina de medição da peça é acionada a fim de verificar se as dimensões da mesma se encontram de acordo com o especificado. Ao tocar a peça, o sistema de controle dimensional verifica se a medida obtida no contato (armazenada no registrador temporário R) está dentro da tolerância especificada. Se o diâmetro estiver abaixo do limite inferior LIE, a máquina é informada que a peça está

morta (*scrap* ou refugo), e o sistema faz com que tal notícia seja repassada ao operador para que ele verifique a peça e reveja o programa. Se a dimensão mensurada estiver acima do limite superior LSE, a compensação de desgaste da ferramenta se faz necessária, informando à máquina que é preciso efetuar o ajuste de *offset* na ferramenta de corte.

Caso o ajuste de *offset* seja necessário, a máquina efetuará primeiramente a compensação de desgaste automaticamente, pela diferença entre o valor obtido na leitura e o valor médio entre os limites LSE e LIE. Em seguida, fará um retrabalho de acabamento e depois, realizará uma nova medição para conferir se as dimensões estão de acordo. Se após esta verificação a peça ainda estiver fora da tolerância, a compensação de desgaste não pôde corrigir a ferramenta. Com isso, o sistema emitirá um aviso de **troca da aresta cortante** da ferramenta por razões de fim de vida.

Precisa-se também fornecer ao sistema informações de quando pode ou não haver sinal gerado pelo apalpador, já que este sistema tem que trabalhar *on-line* à operação de torneamento. O sistema deve ser integrado ao CNC do torno, de forma que ele possa coordenar os movimentos do revólver e da placa no caso dos sinais de EA detectados. Com isso, o sistema terá condições de receber instruções do CNC para controlar as dimensões da peça e da ferramenta toda vez que este ordenar (via programa ou manualmente) cada uma das rotinas especificadas na programação.

7.3. Funções Inteligentes

Através do acionamento por comandos específicos do CNC SIEMENS SINUMERIK 810-D que podem ser inseridos nos programas, é possível ordenar ao sistema de monitoramento SENSIS® BM-12 o início e o fim das janelas de monitoramento.

Também é possível inserir nos programas CN rotinas de verificação de estado, normalmente utilizados para controlar partes móveis da máquina, ou fazer detecção de situações que ocorrem durante o torneamento. Através destas rotinas, o CNC pode verificar o estado das saídas do BM-12 e então, tomar decisões de acordo com este estado.

A proposta de implementação das funções inteligentes no torno CNC INDEX com auxílio de técnicas de monitoramento por emissão acústica pode ser visualizada pelo diagrama representado na figura 7.1. Observe a interação entre as diferentes funções implementadas na máquina no ciclo de torneamento proposto.

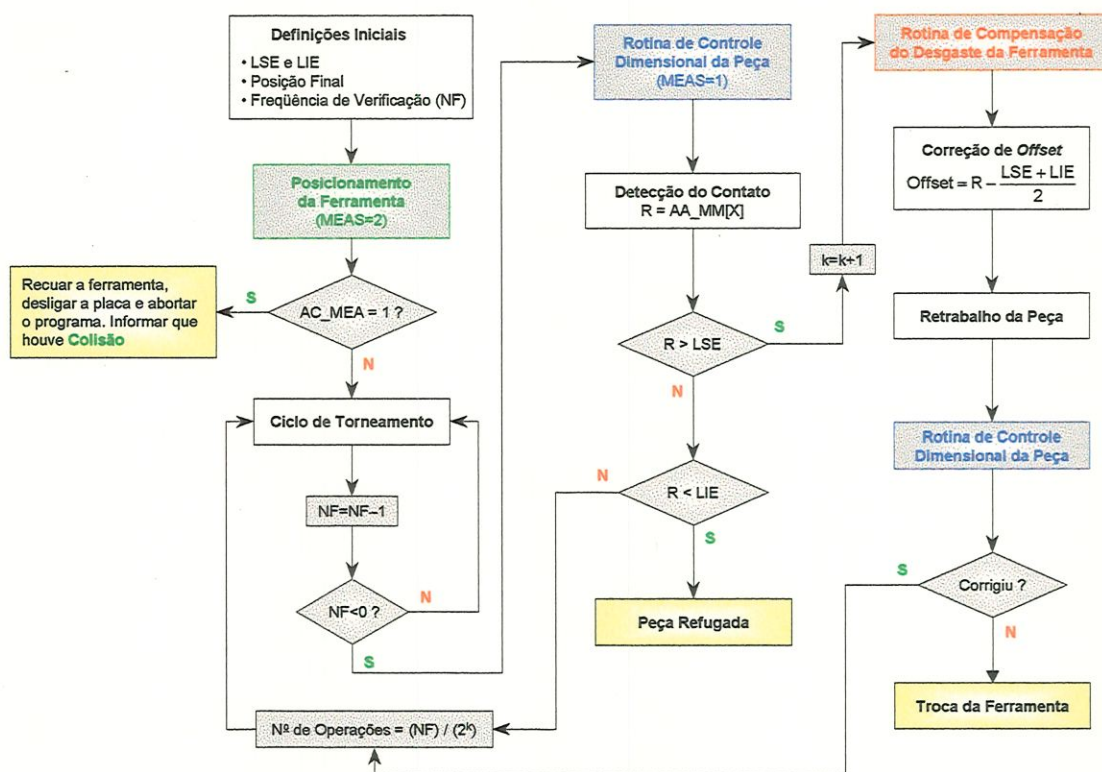


FIGURA 7.1 – FUNÇÕES DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTES IMPLEMENTADAS NO TORNO CNC UTILIZANDO TÉCNICAS DE MONITORAMENTO POR EMISSÃO ACÚSTICA.

As definições iniciais são fornecidas no começo do programa, conforme as especificações do projeto. Durante a movimentação da ferramenta no **posicionamento** inicial, a função **MEAS=2** (canal 2 do BM-12) verifica através da variável de estado **AC_MEA[2]** se o sinal ultrapassa o *trigger* estabelecido. Se ultrapassar, o registrador **R₁₃** correspondente armazena o valor “1”, indicando que houve colisão. Caso contrário, **R₁₃** = 0 (vide anexo D – programas).

Inicia-se o ciclo de torneamento. A medição será feita pela rotina de **controle dimensional** após um número pré-definido de peças usinadas **NF**, o qual varia de acordo com a confiabilidade do processo e da máquina, aliados com o controle mais rígido da qualidade da peça final. O sistema efetua a medição em dois pontos da superfície definida para o controle dimensional através da função **MEAS=1**, onde a variável de estado **AA_MM[X]** faz com que os valores medidos em **X** (diâmetros) sejam armazenados nos registradores **R₁₀** e **R₁₁**. O subprograma calcula a média, corrige o erro (12µm definido no item 6.2.2) e armazena o valor correto em **R₁₂**. Realiza-se então a comparação do valor medido (**R₁₂**) com a tolerância especificada. Se **R₁₂** < **LIE**, a peça está refugada. Se **R₁₂** > **LSE**, faz-se necessária a **compensação do desgaste** da ferramenta, corrigindo seu comprimento em **TC_DPn[t,d]**, onde **n** é a dimensão da ferramenta na tela de *offset*, **t** é a

ferramenta e d é o número do *offset*¹³. Por motivo de segurança, adotou-se a constante k , que faz com que o número de verificações aumente à medida que cada compensação é efetuada.

Um novo passe de acabamento é feito visando corrigir as dimensões. Em seguida, a rotina de **controle dimensional** é acionada novamente com o intuito de verificar se o retrabalho teve êxito na correção. Se a resposta for “sim”, um novo ciclo de torneamento se inicia. Caso contrário, o operador é informado de que a vida da ferramenta possivelmente chegou ao fim, pois a compensação não foi suficiente.

A tabela 7.1 resume as decisões tomadas de acordo com as funções inteligentes implementadas no torno automático CNC INDEX GU600-2.

TABELA 7.1 – TABELA DE DECISÕES EM FUNÇÃO DO SINAL DE EMISSÃO ACÚSTICA.

Evento Monitorado	Comando	Sinal de EA	Resultado	Tomada de Decisão
Posicionamento da ferramenta	MEAS=2 R=AC_MEA[2]	Ausente (R=0)	Normal	Não atuar.
		Presente (R=1)	Colisão	Recuar a ferramenta, desligar a placa e abortar o programa. Informar que houve colisão
Rotina de controle dimensional da peça torneada	MEAS=1 R=AA_MM[X]	Presente “contato do apalpador com a peça”	Peça dentro da tolerância	Não atuar
			Peça com dimensão abaixo do limite inferior (LIE)	Informar que a peça está fora do limite especificado e que não é possível retrabalhá-la (peça refugada)
			Peça com dimensão acima do limite superior (LSE)	Efetuar a rotina de compensação de desgaste da ferramenta . Informa que a ferramenta deve ser trocada, caso a compensação não seja suficiente para garantir a tolerância especificada
Rotina de compensação do desgaste da ferramenta	TC_DPn [t,d]	Independente do sinal de EA		Determinar o quanto a dimensão da ferramenta deverá ser alterada. A diferença entre o valor obtido na rotina de controle dimensional da peça torneada e a média entre LSE e LIE é o valor a ser corrigido nos parâmetros de <i>offset</i>

¹³ O torno INDEX GU600-2, juntamente com o CNC S810-D, dispõem de 12 ferramentas (T1 a T12), com 9 *offsets* (D1 a D9) possíveis para cada uma delas.

8. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS FUNÇÕES INTELIGENTES EM CICLOS DE TORNEAMENTO

Aqui serão mostrados os experimentos realizados, relativos à análise da detecção de colisão e da medição da peça em processo num ciclo completo de torneamento, desde a operação de desbaste até o controle das dimensões finais da peça acabada. O programa, incluindo as subrotinas de colisão, correção dos parâmetros de *offset* e verificação dimensional, está detalhado no anexo D.

Os experimentos foram realizados com o intuito de comprovar a eficácia do sistema, baseando-se nas funções inteligentes implementadas na máquina (descritas no Capítulo 7).

8.1. Detecção de Colisão

Na utilização de FI em torneamento, o sistema de monitoramento poderá verificar a presença de EA durante a movimentação do carro porta-ferramentas para o posicionamento, normalmente executado em altas velocidades. Neste caso, nenhum sinal de emissão acústica acima do limite estabelecido deve ser registrado pelo sensor, já que a ferramenta não estará em operação. Somente ruídos provocados no deslocamento, que ficam bem abaixo do *trigger* ajustado para o canal 2 ($6,0 \pm 0,5V_{cc}$) previamente definido, deverão ser captados por ele.

O ensaio referente à colisão da ferramenta contra a peça para diferentes velocidades de avanço (item 6.2.1) mostrou que a mesma se afasta ao tocar a peça, após um tempo de atraso [t_3-t_1]. A subrotina referente (anexo D) se encarrega de afastar a ferramenta, abortar o programa, e informar ao operador pela tela do CNC que houve colisão, no caso dela ocorrer. Dentro das limitações do sistema, usou-se para o posicionamento da ferramenta uma velocidade de avanço F2000, (lembrando que os avanços máximos permitidos em X, Z+ e Z- para uma profundidade de penetração de 2mm são respectivamente 3300, 1100 e 1200mm/min).

Nos experimentos realizados, efetuou-se a movimentação de posicionamento da ferramenta em vazio (sem a peça, por questão de segurança) nos dois eixos, tocando-a durante a movimentação para se saber a reação do sistema. O que se viu foi um perfeito sincronismo do sistema de monitoramento com o CNC da máquina, constatando a eficácia da função inteligente implementada para tal.

O inconveniente permanece na diferença entre os momentos de detecção e de parada, causando os erros de posicionamento anteriormente discutidos no Capítulo 6. Como a colisão foi amplamente estudada neste capítulo, poupou-se a máquina, a ferramenta e a peça de maiores estragos.

8.2. Sistema de Controle Dimensional da Peça em Processo

Quando as peças torneadas começam a apresentar erros de tolerância ou problemas no acabamento superficial, normalmente a compensação de desgaste ou a troca da ferramenta são efetuadas respectivamente. Normalmente, esta decisão é tomada pelo operador, baseada na verificação de algumas peças em intervalos regulares (Controle Estatístico de Processos – CEP). Através da medição e controle dimensional de peças em processo por emissão acústica, esta decisão pode ser repassada ao sistema nos casos citados. Maiores detalhes podem ser vistos no apêndice 2.

A medição é feita através do apalpador preso convenientemente ao revólver do torno CNC. Ele é posicionado e, em seguida, avança de encontro a peça nas posições em X e Z referentes à dimensão controlada e especificada pelo projeto, e inseridas no início do ciclo de usinagem. (vide anexo D – programas). Os valores assim obtidos com o processo foram comparados a medida especificada.

Verificou-se a funcionalidade do ciclo a partir do CEP, através da análise da estabilidade e da capacidade do processo de medição. Maiores detalhes podem ser obtidos no apêndice 2. O ciclo efetua o torneamento de acabamento em 30 peças de aço 1020, com diâmetro inicial de $\phi 1\frac{1}{4}$ " (31,75mm), verificando 15 peças usinadas (frequência de verificação NF=1), com quatro pontos de medição em cada peça.

As dimensões finais podem ser vistas a partir do desenho da peça acabada representado pela figura 8.1. Pode-se observar que o diâmetro a ser controlado, especificado no desenho, é de $\phi 30,00_{-0,03}^{+0,02}$ mm (com LSE=30,02mm e LIE=29,97mm), para a peça acabada com uma rugosidade inferior a $3,2\mu\text{m}$.

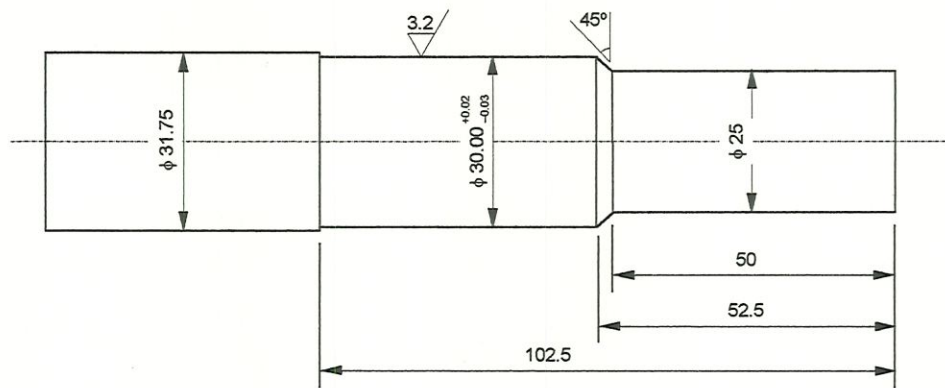


FIGURA 8.1 – DESENHO DA PEÇA FINAL COM AS DIMENSÕES CONTROLADAS PARA VERIFICAÇÃO.

Por definição, a estabilidade de um processo não tem nenhuma relação com a capacidade do mesmo em atender às especificações, normalmente criadas pela Engenharia de Produto. Um processo estável não implica em um processo capaz e vice-versa. Assim, os limites de controle (LSC e LIC) não devem ser confundidos com os limites de especificação (LSE e LIE). Com isso, as medidas foram efetuadas para se constatar se o sistema está estável (sob controle) e capaz.

Os dados obtidos para a análise da estabilidade e da capacidade do processo estão representados na tabela 10.10 (anexo E), onde os valores são os registrados em R com as correções de erro de parâmetro devidamente consideradas. Efetuando-se 4 medidas em 15 peças confeccionadas em ciclo, foram obtidos os seguintes resultados:

- Média das médias das amostras: $\bar{\bar{X}} = 29,9959$
- Amplitude média das amostras: $\bar{T}_A = 0,0104$
- Desvio Padrão: $S_X = 0,00464$
- Variância: $S_X^2 = 0,00002$

8.2.1. Estabilidade do Processo

Segundo NOVASKI (1994), um sistema geralmente está sob controle quando caracteriza-se por uma distribuição Normal com 99,73% dos pontos dentro da faixa limitada pelos limites superior (LSC) e inferior de controle (LIC), onde:

$$\bar{\bar{X}} + A_2 \cdot \bar{T}_A = LSC \tag{8.1}$$

$$e \quad \bar{\bar{X}} - A_2 \cdot \bar{T}_A = LIC \tag{8.2}$$

onde A_2 é a constante em função do tamanho da amostra n .

Para $n = 4$: $A_2 = 0,73$ [tabela A2.2 (apêndice 2)].

Dessa forma, tem-se:

- $LSC = 29,9959 + 0,73 \cdot 0,0104 = \mathbf{30,0035} < 30,010 (\bar{\bar{X}} + 3 \cdot S_X)$
- $LIC = 29,9959 - 0,73 \cdot 0,0104 = \mathbf{29,9883} > 29,982 (\bar{\bar{X}} - 3 \cdot S_X)$

A partir daí, é possível definir a carta de controle, esquematizada pela figura 8.2.

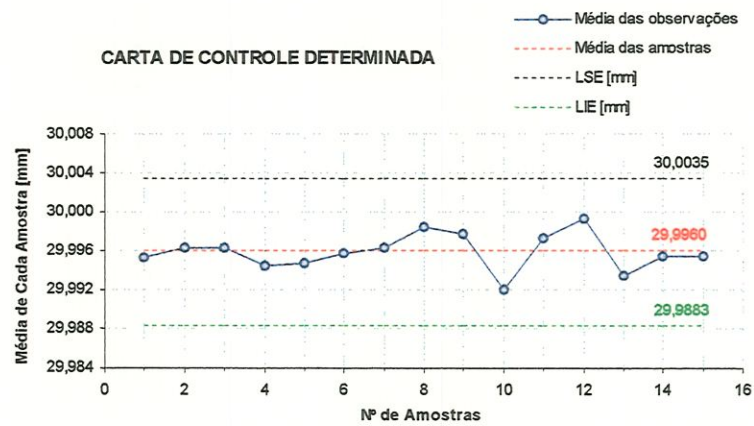


FIGURA 8.2 – CARTA DE CONTROLE PARA OS VALORES OBSERVADOS (TABELA 10.10).

Pode-se dizer que o processo está sob controle, pois os valores médios medidos em cada uma das 15 amostras se encontram dentro do intervalo de confiança limitado por 29,982 e 30,010mm (99,73%).

8.2.2. Capacidade do Processo

Para que a medição esteja dentro dos padrões aceitáveis, a medida não deve apresentar tolerância superior a 50µm (item 2.3). Assim, o processo de medição pode ser considerado capaz ($Cpk \geq 1,33$) quando:

$$\bar{X} + 4 \cdot S_x \leq LSE \tag{8.3}$$

e

$$\bar{X} - 4 \cdot S_x \geq LIE \tag{8.4}$$

Daí, tem-se:

- $29,9959 + 4 \times 0,00464 = \mathbf{30,0145} < 30,020$ (LSE)
- $29,9959 - 4 \times 0,00464 = \mathbf{29,9773} > 29,970$ (LIE)

Os resultados confirmam que o processo de medição é capaz de mensurar as peças dentro de um intervalo de confiança de 99,73%, limitado entre 29,982 e 30,010mm.

Calculando o Cpk:

$$Cpk = \text{menor} \left(\frac{\bar{X} - LIE}{3 \cdot S_x}; \frac{LSE - \bar{X}}{3 \cdot S_x} \right) \Rightarrow \left\langle \begin{array}{l} Cpk_1 = \frac{29,9959 - 29,970}{3 \cdot 0,00464} = 1,86 \\ Cpk_2 = \frac{30,020 - 29,9959}{3 \cdot 0,00464} = 1,73 \end{array} \right\rangle \therefore Cpk = \mathbf{1,73}$$

O Cpk encontrado mostra que os valores medidos estão localizados em torno da média, onde o processo está operando dentro de $1/1,73 = 57,8\%$ da tolerância.

O histograma dos dados mensurados no processo, relativo à totalidade dos pontos da tabela 10.10 pode ser conferido pela figura 8.3.

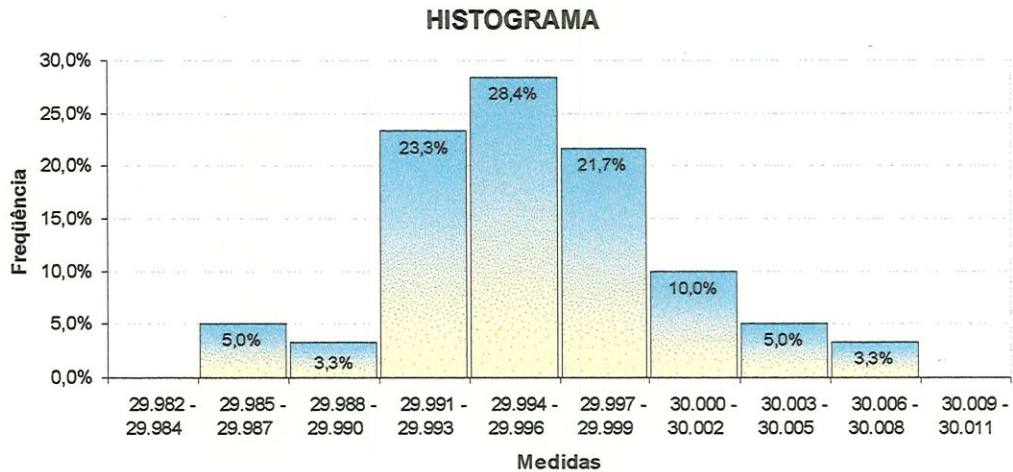


FIGURA 8.3 – HISTOGRAMA PARA OS VALORES LEVANTADOS (TABELA 10.10).

9. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

A proposta do trabalho foi desenvolver um sistema de controle dimensional da peça e da ferramenta em processo, através de técnicas de monitoramento por emissão acústica, partindo do princípio de que a partir de um controle efetivo das dimensões das peças fabricadas, poder-se-ia controlar indiretamente as dimensões da ferramenta. Assim, baseando-se tanto na inspeção automatizada por apalpador desenvolvida pela RENISHAW (item 3.1.4) quanto pelos conceitos de CEP (Apêndice 2), foi possível desenvolver e implementar o sistema.

O intuito do trabalho foi reduzir a interferência do operador num ciclo de torneamento, eliminando a etapa da medição das peças acabadas fora da máquina como parte do CEP, o qual é geralmente efetuado para a aferição do processo e da máquina. O sistema proposto apresenta alguns ciclos de funções inteligentes que visam garantir com que as medidas das peças usinadas mantenham-se dentro dos padrões estabelecidos pelo projeto. Se alguma coisa não estiver de acordo, o processo é interrompido para que as devidas correções sejam executadas automaticamente.

Limitações do Sistema

A funcionalidade do sistema implementado tornou-se limitada por alguns fatores importantes:

1. O material usado para a confecção do apalpador, mesmo após uma infinidade de estudos para a escolha do mesmo, ainda não foi ideal, visando uma flexibilidade de medições numa gama de durezas entre o alumínio e o aço temperado. Usando a velocidade de avanço definida em F10 (10mm/min), para uma rotação ótima à propagação do sinal de emissão acústica de 800rpm, o apalpador penetra consideravelmente no alumínio e flexiona sensivelmente perante o aço temperado, fazendo com que o deslocamento da referência em X da ferramenta localizada no suporte seja excessivo, gerando erros demasiadamente inadequados (item 6.4.2). No

caso do ferro fundido, uma película de grafite é gerada na usinagem, fazendo com que o apalpador deslize sobre a peça, impedindo a geração do sinal de EA por contato.

2. A posição do sensor, mesmo sabendo que a ideal deveria ser o mais próximo possível da ferramenta, foi escolhida de acordo com a versatilidade, para que um único sensor pudesse ser usado para monitorar todas as 12 ferramentas do cabeçote-revólver do torno GU600-2. O sinal de emissão acústica tornar-se-ia muito mais claro e limpo no caso da posição ideal (item 5.1.2).
3. A resposta do sistema de monitoramento e aquisição de dados SENSIS[®] BM12 é lenta em demasia. O torno CNC GU600-2 não foi projetado com o intuito de se detectar a colisão por um sensor diferente do tradicionalmente usado (sensor de potência no eixo árvore). Para avanços rápidos, os danos provocados ao conjunto MFDP, por este atraso (relativos ao erro de posicionamento do sistema – item 6.2) podem ser catastróficos.

Estabilidade e Capacidade do Sistema

Os ensaios preliminares realizados no capítulo 6 possibilitaram verificar e calcular o erro na medição da peça pelo apalpador, visto que o mesmo está associado com o tempo de resposta do sistema de monitoramento e controle dimensional da peça. Tal erro (0,012mm) foi corrigido posteriormente nas funções inteligentes, fazendo com que a precisão nas medidas efetuadas nos experimentos finais (item 8.2.1) aumentasse consideravelmente (de $\phi 29,988\text{mm}$ para $\phi 29,996\text{mm}$).

A aplicação das funções inteligentes mostrou que é possível monitorar acontecimentos imprevistos associados aos processos de torneamento em máquinas CNC, visando a tomada de decisões sem uma participação efetiva do operador.

A detecção de colisão mostrou-se eficiente dentro das limitações que o sistema de monitoramento apresenta, já que o tempo de parada para um avanço em G00, após a detecção de choque pelo sensor e a ordenação de parada ao CLP, poderia gerar danos graves.

O ciclo implementado apresentou uma regularidade excelente, onde as peças mensuradas após cada processo de usinagem (15 no total) apresentaram-se com as dimensões equivalentes àquelas obtidas com a função MEAS no registrador R₁₂, com erro inferior a 5 μm .

Constatou-se através do Controle Estatístico do Processo que o sistema de medição das peças em processo implementado é estável e capaz. Deve-se sempre lembrar que a confiabilidade do sistema está diretamente ligada à qualidade da máquina utilizada, já

que o erro no processo de medição está agregado à operação de corte. Do que depender da máquina, a repetibilidade e a precisão das operações estão garantidas.

1. A Carta de Controle (figura 8.2) traçada a partir dos valores mensurados pôde confirmar a estabilidade do processo de medição, visto que os dados obtidos ao longo do tempo apresentaram-se dentro dos limites de controle (LSC e LIC) calculados estatisticamente.
2. Os valores especificados (LSE e LIE) estão dentro dos limites naturais do processo ($\bar{X} \pm 3 \cdot S_x$). Isto mostra que 99,73% das peças medidas estão dentro das especificações.
3. O processo de medição mostrou-se efetivamente capaz, já que o mesmo atuou dentro de uma faixa interior a 75% da tolerância (57,8%), indicando que não há necessidade de se ajustar a média do processo ou se reduzir o desvio padrão.

Propostas para Trabalhos Futuros

1. Desenvolvimento de um dispositivo que, agregado à máquina INDEX, possibilite uma resposta do CLP ao sinal captado pelo sensor de EA com uma velocidade 10 vezes maior que o sistema aqui avaliado, para que assim a detecção de colisão possa ser implementada com precisão e aplicabilidade adequadas.
2. Automatização do controle estatístico do processo. Os valores medidos pelo apalpador ao longo de um ciclo de usinagem seriam armazenados numa memória (CNC), para que a máquina possa, a partir destes dados, determinar os limites de controle do processo, identificar os problemas dimensionais e fazer as correções necessárias de maneira inteligente, de acordo com a capacidade efetiva ($C_{pk} \geq 1,33$).
3. Substituição do modo tradicional de transmissão do sinal de EA captado pelo sensor até o equipamento usado para a amplificação, filtragem e retificação (cabo coaxial) por outro tipo de comunicação, como por ultra-som ou infravermelho, por exemplo. Isto possibilitaria ao sensor um posicionamento "ideal" para a captação do sinal, sem o inconveniente do giro do cabeçote-revólver.
4. Avaliação do sistema em questão para a medição em processo, considerando peças com relações L/D excessivas (grandes comprimentos). Os experimentos devem considerar a influência da flexão da peça integrado aos diferentes fatores avaliados: material, velocidade de avanço e rotação.

10. ANEXOS

Os anexos referem-se a suportes e complementos esclarecedores de algumas partes do trabalho, representados por tabelas, ou por cálculos numéricos, ou até mesmo do programa implementado para análise das funções de automação inteligentes para aplicação num ciclo de torneamento. Eles correspondem a partes dos capítulos abaixo relacionados:

Cap. 6 – Análise do Comportamento da Emissão Acústica no sistema de Detecção e Controle Dimensional de Peças em Processo

- A. Erros de Posicionamento
- B. Ajuste dos Limites Estáticos
- C. Análise da Detecção de Contato Apalpador/Peça para Diferentes Parâmetros de Medição.

Cap. 7 – Conceitos e Critérios para Aplicação de Procedimentos de FI

- D. Programas

Cap. 8 – Avaliação Experimental das Funções Inteligentes em Ciclos de Torneamento

- E. Sistema de Controle Dimensional da Peça em Processo

Anexo A – Erros de Posicionamento

As tabelas que se seguem (10.1 a 10.5) referem-se aos dados obtidos nos ensaios visando avaliar o erro de posicionamento no contato da ferramenta com a peça no monitoramento da colisão em X e em Z, e no monitoramento do contato do apalpador com a peça em X.

TABELA 10.1 – DADOS OBTIDOS NA COLISÃO DA FERRAMENTA CONTRA A PEÇA EM X

ANÁLISE DE COLISÃO COM A FERRAMENTA EM X										
ERRO DE POSIÇÃO										
Nº Peça	F100	F200	F300	F400	F500	F600	F700	F800	F900	F1000
1	0,105	0,235	0,357	0,473	0,595	0,706	0,823	0,942	1,061	1,178
2	0,108	0,237	0,360	0,475	0,597	0,709	0,825	0,944	1,063	1,179
3	0,113	0,240	0,363	0,479	0,600	0,711	0,826	0,946	1,065	1,182
4	0,107	0,237	0,360	0,475	0,596	0,709	0,824	0,944	1,063	1,179
5	0,115	0,242	0,363	0,482	0,601	0,711	0,828	0,947	1,066	1,183
6	0,106	0,236	0,360	0,474	0,596	0,709	0,824	0,943	1,061	1,179
7	0,105	0,229	0,355	0,473	0,593	0,705	0,823	0,940	1,061	1,178
8	0,110	0,238	0,361	0,476	0,597	0,710	0,825	0,945	1,064	1,181
9	0,110	0,237	0,361	0,476	0,597	0,710	0,825	0,944	1,063	1,180
10	0,111	0,240	0,362	0,477	0,598	0,711	0,826	0,945	1,064	1,182
Média:	0,109	0,237	0,360	0,476	0,597	0,709	0,825	0,944	1,063	1,180
ERRO DE PARÂMETRO										
Nº Peça	F100	F200	F300	F400	F500	F600	F700	F800	F900	F1000
1	0,040	0,077	0,113	0,148	0,184	0,219	0,252	0,287	0,323	0,358
2	0,039	0,078	0,114	0,149	0,185	0,217	0,253	0,288	0,323	0,358
3	0,041	0,079	0,115	0,150	0,186	0,218	0,251	0,288	0,324	0,358
4	0,039	0,078	0,114	0,148	0,185	0,218	0,252	0,289	0,323	0,359
5	0,042	0,079	0,115	0,151	0,186	0,219	0,253	0,288	0,324	0,358
6	0,040	0,077	0,114	0,148	0,184	0,218	0,251	0,287	0,323	0,358
7	0,039	0,076	0,113	0,148	0,184	0,217	0,252	0,288	0,321	0,357
8	0,040	0,079	0,115	0,149	0,185	0,218	0,253	0,289	0,322	0,358
9	0,040	0,078	0,113	0,150	0,185	0,217	0,250	0,288	0,323	0,358
10	0,040	0,079	0,114	0,149	0,186	0,219	0,253	0,288	0,324	0,358
Média:	0,040	0,078	0,114	0,149	0,185	0,218	0,252	0,288	0,323	0,358

TABELA 10.2 – DADOS OBTIDOS NA COLISÃO DA FERRAMENTA CONTRA A PEÇA EM Z-

ANÁLISE DE COLISÃO COM A FERRAMENTA EM Z-										
ERRO DE POSIÇÃO										
Nº Peça	F100	F200	F300	F400	F500	F600	F700	F800	F900	F1000
1	0,158	0,357	0,549	0,696	0,893	1,031	1,232	1,399	1,572	1,755
2	0,164	0,359	0,551	0,698	0,898	1,032	1,234	1,401	1,575	1,758
3	0,156	0,354	0,548	0,693	0,890	1,030	1,228	1,397	1,571	1,752
4	0,165	0,362	0,552	0,701	0,900	1,035	1,238	1,403	1,579	1,760
5	0,166	0,362	0,552	0,702	0,901	1,035	1,240	1,404	1,580	1,761
6	0,155	0,354	0,547	0,692	0,888	1,029	1,225	1,395	1,568	1,750
7	0,163	0,358	0,551	0,698	0,897	1,032	1,233	1,401	1,574	1,756
8	0,160	0,358	0,550	0,697	0,893	1,032	1,232	1,400	1,573	1,755
9	0,165	0,360	0,551	0,699	0,899	1,033	1,237	1,402	1,577	1,759
10	0,158	0,356	0,549	0,694	0,891	1,031	1,231	1,398	1,571	1,754
Média:	0,161	0,358	0,550	0,697	0,895	1,032	1,233	1,400	1,574	1,756
ERRO DE PARÂMETRO										
Nº Peça	F100	F200	F300	F400	F500	F600	F700	F800	F900	F1000
1	0,084	0,155	0,224	0,289	0,362	0,421	0,485	0,551	0,633	0,710
2	0,088	0,157	0,226	0,293	0,365	0,423	0,489	0,552	0,636	0,713
3	0,085	0,156	0,224	0,290	0,364	0,422	0,487	0,552	0,634	0,712
4	0,082	0,155	0,222	0,288	0,360	0,421	0,483	0,549	0,632	0,709
5	0,083	0,155	0,222	0,288	0,362	0,421	0,484	0,550	0,633	0,710
6	0,087	0,157	0,225	0,292	0,364	0,423	0,487	0,552	0,635	0,713
7	0,086	0,157	0,225	0,291	0,364	0,422	0,487	0,552	0,635	0,712
8	0,088	0,158	0,226	0,293	0,366	0,424	0,490	0,553	0,637	0,713
9	0,085	0,156	0,224	0,289	0,363	0,422	0,486	0,551	0,634	0,710
10	0,082	0,154	0,222	0,287	0,360	0,421	0,482	0,548	0,631	0,708
Média:	0,0850	0,1560	0,2240	0,2900	0,3630	0,4220	0,4860	0,5510	0,6340	0,7110

TABELA 10.3 – DADOS OBTIDOS NA COLISÃO DA FERRAMENTA CONTRA A PEÇA EM Z+

ANÁLISE DE COLISÃO COM A FERRAMENTA EM Z+										
ERRO DE POSIÇÃO										
Nº Peça	F100	F200	F300	F400	F500	F600	F700	F800	F900	F1000
1	0,165	0,361	0,553	0,735	0,911	1,089	1,245	1,421	1,584	1,796
2	0,171	0,366	0,564	0,744	0,918	1,096	1,247	1,429	1,591	1,806
3	0,172	0,369	0,565	0,746	0,920	1,098	1,252	1,430	1,593	1,807
4	0,167	0,362	0,559	0,740	0,915	1,091	1,246	1,423	1,586	1,799
5	0,164	0,358	0,553	0,734	0,910	1,087	1,244	1,421	1,582	1,795
6	0,171	0,364	0,561	0,742	0,917	1,092	1,246	1,425	1,588	1,804
7	0,166	0,362	0,555	0,739	0,915	1,091	1,245	1,422	1,585	1,796
8	0,174	0,371	0,568	0,747	0,921	1,101	1,253	1,430	1,595	1,810
9	0,171	0,365	0,562	0,743	0,917	1,093	1,246	1,425	1,589	1,805
10	0,169	0,362	0,560	0,740	0,916	1,092	1,246	1,424	1,587	1,802
Média:	0,169	0,364	0,560	0,741	0,916	1,093	1,247	1,425	1,588	1,802
ERRO DE PARÂMETRO										
Nº Peça	F100	F200	F300	F400	F500	F600	F700	F800	F900	F1000
1	0,069	0,131	0,186	0,222	0,303	0,359	0,416	0,463	0,520	0,583
2	0,070	0,133	0,187	0,223	0,305	0,362	0,418	0,466	0,523	0,584
3	0,072	0,135	0,189	0,225	0,307	0,364	0,421	0,470	0,524	0,586
4	0,068	0,131	0,185	0,221	0,302	0,358	0,416	0,463	0,519	0,581
5	0,071	0,134	0,188	0,224	0,306	0,362	0,419	0,467	0,524	0,585
6	0,073	0,137	0,191	0,226	0,309	0,364	0,421	0,470	0,525	0,588
7	0,069	0,132	0,186	0,222	0,305	0,360	0,417	0,464	0,521	0,583
8	0,067	0,129	0,184	0,220	0,301	0,357	0,415	0,463	0,518	0,580
9	0,070	0,133	0,186	0,223	0,305	0,361	0,417	0,465	0,522	0,584
10	0,071	0,135	0,188	0,224	0,307	0,363	0,420	0,469	0,524	0,586
Média:	0,070	0,133	0,187	0,223	0,305	0,361	0,418	0,466	0,522	0,584

TABELA 10.4 – DADOS OBTIDOS NO CONTATO DO APALPADOR COM A PEÇA EM X

ANÁLISE DE CONTATO COM O APALPADOR EM X										
ERRO DE POSIÇÃO										
Nº Peça	F10	F20	F30	F40	F50	F60	F70	F80	F90	F100
1	0,013	0,027	0,033	0,045	0,049	0,060	0,068	0,083	0,088	0,105
2	0,014	0,028	0,034	0,046	0,051	0,063	0,072	0,085	0,091	0,107
3	0,015	0,029	0,035	0,047	0,053	0,065	0,075	0,087	0,094	0,110
4	0,014	0,029	0,034	0,047	0,052	0,064	0,074	0,087	0,092	0,107
5	0,013	0,027	0,033	0,045	0,050	0,061	0,071	0,083	0,089	0,105
6	0,013	0,026	0,033	0,044	0,049	0,060	0,067	0,080	0,086	0,104
7	0,014	0,028	0,034	0,046	0,051	0,063	0,073	0,086	0,092	0,107
8	0,015	0,029	0,035	0,048	0,053	0,067	0,075	0,088	0,095	0,111
9	0,014	0,028	0,034	0,045	0,050	0,062	0,071	0,084	0,090	0,106
10	0,014	0,029	0,035	0,047	0,052	0,065	0,074	0,087	0,093	0,108
Média:	0,014	0,028	0,034	0,046	0,051	0,063	0,072	0,085	0,091	0,107
ERRO DE PARÂMETRO										
Nº Peça	F10	F20	F30	F40	F50	F60	F70	F80	F90	F100
1	0,011	0,015	0,017	0,021	0,022	0,025	0,029	0,034	0,033	0,039
2	0,012	0,017	0,017	0,020	0,023	0,026	0,029	0,032	0,034	0,038
3	0,012	0,016	0,017	0,022	0,021	0,027	0,030	0,033	0,035	0,040
4	0,012	0,016	0,018	0,021	0,023	0,025	0,029	0,033	0,035	0,039
5	0,013	0,015	0,017	0,021	0,022	0,026	0,028	0,032	0,033	0,039
6	0,011	0,016	0,017	0,020	0,022	0,025	0,029	0,033	0,033	0,038
7	0,012	0,016	0,016	0,021	0,021	0,026	0,029	0,033	0,035	0,039
8	0,012	0,016	0,018	0,022	0,023	0,027	0,030	0,034	0,033	0,040
9	0,013	0,017	0,017	0,021	0,022	0,027	0,028	0,032	0,034	0,039
10	0,012	0,016	0,016	0,021	0,021	0,026	0,029	0,034	0,035	0,039
Média:	0,012	0,016	0,017	0,021	0,022	0,026	0,029	0,033	0,034	0,039

TABELA 10.5 – LEITURA NO REGISTRADOR R COM A FUNÇÃO MEAS DOS DADOS OBTIDOS NO CONTATO DO APALPADOR COM A PEÇA

Leitura	Valor Lido	Erro de Parâmetro	Leitura	Valor Lido	Erro de Parâmetro	Leitura	Valor Lido	Erro de Parâmetro	Leitura	Valor Lido	Erro de Parâmetro
1	29,988	0,012	16	29,989	0,011	31	29,991	0,009	46	29,983	0,017
2	29,998	0,002	17	29,989	0,011	32	29,993	0,007	47	29,990	0,010
3	29,984	0,016	18	29,988	0,012	33	29,994	0,006	48	29,992	0,008
4	29,992	0,008	19	29,986	0,014	34	29,993	0,007	49	29,982	0,018
5	29,990	0,010	20	29,981	0,019	35	29,988	0,012	50	29,981	0,019
6	29,990	0,010	21	29,991	0,009	36	29,991	0,009	51	29,962	0,038
7	29,982	0,018	22	29,985	0,015	37	29,994	0,006	52	29,984	0,016
8	29,995	0,005	23	29,986	0,014	38	29,994	0,006	53	29,978	0,022
9	29,982	0,018	24	29,986	0,014	39	29,995	0,005	54	29,977	0,023
10	29,982	0,018	25	30,000	0,000	40	29,990	0,010	55	29,997	0,003
11	29,991	0,009	26	29,983	0,017	41	29,984	0,016	56	29,989	0,011
12	29,986	0,014	27	29,977	0,023	42	29,991	0,009	57	29,990	0,010
13	29,986	0,014	28	29,985	0,015	43	29,998	0,002	58	29,996	0,004
14	29,971	0,029	29	29,989	0,011	44	29,997	0,003	59	29,989	0,011
15	29,997	0,003	30	29,988	0,012	45	29,990	0,010	60	29,993	0,007

Erro de Parâmetro ($D_{pc} - D_{D7}$) = 11,956 μm

Anexo B – Ajuste dos Limites Estáticos

A tabela 10.6 refere-se aos pontos de amostragem obtidos no ensaio de contato da ferramenta contra a peça na medição via LabView. A amostragem foi obtida a partir do toque a 30mm/min, com a peça girando a 2000rpm. A frequência de aquisição do sinal foi ajustada para 100 mil pontos por segundo, com amostras de 10 pontos. As 70 médias das amostras caracterizaram a visualização do pico de EA na tela do computador.

TABELA 10.6 – PONTOS DE AMOSTRAGEM ENCONTRADOS NA MEDIÇÃO VIA LABVIEW® DO TOQUE DA FERRAMENTA CONTRA A PEÇA A 30mm/min E 2000rpm.

Tensão RMS para 70 Pontos de Amostragem via LabView									
1	0,2493	15	0,2899	29	0,2507	43	0,6584	57	0,2893
2	0,2609	16	0,2682	30	0,2509	44	0,3188	58	0,2897
3	0,2626	17	0,2381	31	0,2838	45	0,3067	59	0,2889
4	0,2435	18	0,2377	32	0,2890	46	0,2891	60	0,2894
5	0,2452	19	0,2790	33	0,3188	47	0,2621	61	0,2896
6	0,2566	20	0,2903	34	1,7695	48	0,2894	62	0,2902
7	0,2545	21	0,2601	35	2,8406	49	0,3193	63	0,3408
8	0,2645	22	0,2526	36	4,5971	50	0,3176	64	0,3272
9	0,2754	23	0,2613	37	4,3394	51	0,3035	65	0,2931
10	0,2796	24	0,2598	38	4,0580	52	0,2957	66	0,2904
11	0,2437	25	0,2826	39	2,9275	53	0,2960	67	0,2895
12	0,2359	26	0,2898	40	2,1449	54	0,2951	68	0,2892
13	0,2607	27	0,2901	41	1,6232	55	0,3478	69	0,3101
14	0,2839	28	0,2544	42	1,0609	56	0,3175	70	0,3475

Anexo C – Análise da Detecção Apalpador/Peça para Diferentes Parâmetros de Medição

O anexo C é dividido em duas partes. A primeira mostra os cálculos relativos à Análise de Variância dos dados representados pela tabela 10.7 (diferentes parâmetros de medição), cujos resultados são resumidos pela tabela 10.8. A segunda parte representa os valores obtidos na comparação dos valores obtidos para diferentes materiais (tabela 10.9).

Análise de Variância

TABELA 10.7 – VALORES OBTIDOS NA MEDIÇÃO DO CONTATO DO APALPADOR CONTRA A PEÇA ATRAVÉS DA FUNÇÃO MEAS (DESPREZANDO O ERRO DE PARÂMETRO).

	400rpm					800rpm					1600rpm				
	F1	F10	F20	F50	F100	F1	F10	F20	F50	F100	F1	F10	F20	F50	F100
Alumínio	29,733	29,686	29,731	29,591	29,621	29,770	29,842	29,805	29,730	29,693	29,786	29,872	29,881	29,833	29,809
	29,734	29,680	29,718	29,653	29,666	29,777	29,459	29,725	29,627	29,576	29,790	29,731	29,716	29,658	29,640
	29,738	29,654	29,664	29,597	29,675	29,801	29,255	29,850	29,615	29,419	29,762	29,779	29,766	29,749	29,703
	29,746	29,617	29,708	29,634	29,602	29,766	29,394	29,588	29,630	29,595	29,744	29,733	29,714	29,686	29,634
	29,765	29,679	29,693	29,705	29,636	29,755	29,565	29,575	29,359	29,459	29,747	29,733	29,686	29,621	29,569
	29,699	29,731	29,729	29,693	29,673	29,803	29,874	29,747	29,672	29,660	29,766	29,876	29,870	29,861	29,786
	29,643	29,734	29,749	29,677	29,580	29,796	29,684	29,723	29,659	29,742	29,772	29,718	29,695	29,662	29,625
	29,718	29,680	29,673	29,658	29,563	29,788	29,786	29,781	29,628	29,368	29,749	29,764	29,762	29,716	29,684
	29,688	29,667	29,680	29,654	29,636	29,747	29,742	29,632	29,776	29,576	29,738	29,716	29,710	29,714	29,693
	29,649	29,703	29,651	29,707	29,593	29,749	29,703	29,673	29,605	29,680	29,744	29,669	29,714	29,725	29,682
1020	29,979	29,979	29,959	29,945	29,928	29,992	29,986	29,981	29,961	29,938	29,996	29,992	29,988	29,981	29,949
	29,973	29,974	29,965	29,955	29,922	29,996	29,988	29,981	29,956	29,938	29,999	29,982	29,994	29,977	29,955
	29,975	29,977	29,947	29,949	29,922	29,994	29,986	29,979	29,960	29,942	29,998	29,994	29,988	29,975	29,963
	29,981	29,975	29,961	29,943	29,925	29,998	29,988	29,977	29,955	29,932	29,998	29,988	29,988	29,971	29,959
	29,977	29,976	29,949	29,961	29,919	29,992	29,984	29,981	29,961	29,936	29,999	29,988	29,990	29,969	29,957
	29,977	29,977	29,969	29,947	29,933	29,990	29,990	29,981	29,958	29,929	29,996	29,986	29,979	29,967	29,945
	29,973	29,974	29,957	29,943	29,920	29,984	29,988	29,988	29,955	29,934	29,992	29,984	29,992	29,967	29,959
	29,979	29,974	29,969	29,948	29,918	29,982	29,990	29,967	29,959	29,931	29,992	29,982	29,975	29,959	29,961
	29,977	29,979	29,955	29,960	29,919	29,996	29,988	29,973	29,962	29,928	29,990	29,990	29,990	29,963	29,950
	29,977	29,974	29,971	29,956	29,927	29,989	29,988	29,962	29,957	29,937	29,988	29,982	29,988	29,955	29,947
1030	29,972	29,938	29,932	29,937	29,935	29,998	29,982	29,970	29,998	29,958	30,000	29,990	29,986	29,957	29,953
	29,972	29,936	29,924	29,953	29,929	29,992	29,978	29,974	29,990	29,953	29,994	29,986	29,974	29,975	29,972
	29,960	29,910	29,930	29,951	29,941	29,996	29,978	29,976	29,966	29,957	29,988	29,980	29,968	29,981	29,979
	29,966	29,938	29,946	29,933	29,932	29,988	29,980	29,962	29,991	29,952	29,986	29,974	29,988	29,973	29,960
	29,962	29,934	29,928	29,935	29,931	29,984	29,980	29,958	29,954	29,959	29,982	29,968	29,982	29,990	29,951
	29,962	29,938	29,928	29,939	29,933	29,986	29,970	29,958	29,974	29,955	29,980	29,979	29,964	29,952	29,966
	29,970	29,934	29,930	29,933	29,936	29,992	29,980	29,958	29,968	29,954	29,984	29,976	29,958	29,998	29,975
	29,964	29,934	29,932	29,935	29,934	29,986	29,978	29,954	29,998	29,958	29,980	29,990	29,989	29,970	29,952
	29,968	29,950	29,932	29,945	29,927	29,998	29,972	29,966	29,980	29,957	29,984	29,982	29,995	29,986	29,956
	29,962	29,946	29,938	29,949	29,930	29,982	29,970	29,952	29,961	29,953	29,978	29,986	29,992	29,993	29,977
8640	29,924	29,758	29,853	29,867	29,926	29,983	29,970	29,950	29,921	29,806	29,994	29,986	29,976	29,956	29,898
	29,917	29,975	29,981	29,844	29,928	29,919	29,961	29,953	29,933	29,749	29,983	29,991	29,983	29,946	29,941
	29,908	29,855	29,776	29,927	29,863	29,985	29,977	29,946	29,902	29,708	29,980	29,980	29,977	29,948	29,934
	29,885	29,832	29,872	29,965	29,830	29,976	29,974	29,959	29,969	29,769	29,981	29,992	29,988	29,961	29,917
	29,918	29,836	29,839	29,984	29,979	29,940	29,971	29,956	29,919	29,793	29,979	29,985	29,989	29,957	29,906
	29,968	29,751	29,769	29,894	29,959	29,935	29,964	29,963	29,910	29,730	29,982	29,979	29,991	29,949	29,953
	29,988	29,968	29,851	29,872	29,957	29,984	29,953	29,951	29,943	29,786	29,980	29,980	29,989	29,956	29,937
	29,986	29,971	29,983	29,879	29,982	29,986	29,976	29,955	29,932	29,784	29,990	29,986	29,987	29,959	29,934
	29,967	29,912	29,810	29,927	29,826	29,978	29,980	29,967	29,927	29,807	29,986	29,988	29,977	29,953	29,926
	29,992	29,995	29,896	29,855	29,953	29,990	29,984	29,953	29,940	29,799	29,983	29,983	29,979	29,949	29,927

O delineamento dos ensaios foi feito a partir das seguintes variáveis:

A. Material da peça-obra	a = 4 níveis	(Alumínio, 1020, 1030 e 8640)
B. Avanço [mm/min]	b = 5 níveis	(F1, F10, F20, F50 e F100)
C. Rotação [rpm]	c = 3 níveis	(400, 800 e 1600)
Tamanho da amostra	n = 10	

Fazendo a Análise de Variância (ANOVA) dos dados obtidos (tabela 10.7):

$$K = \frac{(\sum X)^2}{a \cdot b \cdot c \cdot n} = 535991,38$$

$$SS_{\text{Total}} = \sum X^2 - K = 536001,51 - 535991,38 = 10,13$$

$$SS_A = \sum \frac{X_A^2}{b \cdot c \cdot n} - K = 535999,27 - 535991,38 = 7,89$$

$$SS_B = \sum \frac{X_B^2}{a \cdot c \cdot n} - K = 535991,73 - 535991,38 = 0,35$$

$$SS_C = \sum \frac{X_C^2}{a \cdot b \cdot n} - K = 535991,60 - 535991,38 = 0,22$$

$$SS_{AB} = \sum \frac{X_{AB}^2}{c \cdot n} - K - SS_A - SS_B = 535999,73 - 535991,38 - 7,89 - 0,35 = 0,12$$

$$SS_{AC} = \sum \frac{X_{AC}^2}{b \cdot n} - K - SS_A - SS_C = 535999,57 - 535991,38 - 7,89 - 0,22 = 0,085$$

$$SS_{BC} = \sum \frac{X_{BC}^2}{a \cdot n} - K - SS_B - SS_C = 535992,05 - 535991,38 - 0,35 - 0,22 = 0,10$$

$$SS_{ABC} = \sum \frac{X_{ABC}^2}{n} - K - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} =$$

$$= 536000,32 - 535991,38 - 7,89 - 0,35 - 0,22 - 0,12 - 0,085 - 0,10 = 0,19$$

$$SS_{\text{Tratamento s}} = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} + SS_{AC} + SS_{BC} + SS_{ABC} =$$

$$= 7,89 + 0,35 + 0,22 + 0,12 + 0,085 + 0,10 + 0,19 = 8,94$$

$$SS_{\text{Resíduo}} = SS_{\text{Total}} - SS_{\text{Tratamento s}} = 10,13 - 8,94 = 1,19$$

A Análise de Variância (ANOVA) pode ser resumida pela tabela 10.8.

TABELA 10.8 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS ENSAIOS PRELIMINARES.

Causa de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ₀	F _α
Material (A)	7,89	3	2,630	1180	3,78
Avanço (B)	0,35	4	0,088	44	3,32
Rotação (C)	0,22	2	0,110	55	4,61
(AB)	0,12	12	0,010	5	2,18
(AC)	0,09	6	0,014	7	2,80
(BC)	0,10	8	0,012	6	2,54
(ABC)	0,19	24	0,008	4	1,79
Resíduo (Erro)	1,19	540	0,002		
Total	10,13	599			

Pela ANOVA, pode-se constatar que os três fatores associados à geração do sinal de emissão acústica no contato do apalpador com a peça (material, avanço e rotação) afetam de modo significativo (acima de 99,99%) a precisão na medição, com uma maior influência relativa ao material da peça-obra, seguida pela rotação do eixo árvore. Maiores detalhes podem ser vistos no apêndice 1.

Comportamento dos Parâmetros em Diferentes Materiais

TABELA 10.9 – VALORES OBTIDOS (PARÂMETRO R) PARA A COMPARAÇÃO DO EFEITO DO APALPADOR NO CONTATO COM DIFERENTES MATERIAIS.

	Amostras						II X	S ² X
	1	2	3	4	5	6		
Alumínio	29,973	29,777	29,945	29,764	29,941	29,660	29,716	0,205
	29,436	29,550	29,833	29,434	29,842	29,720		
	29,971	29,904	29,917	29,673	29,984	29,973		
	29,341	29,602	29,427	29,775	29,430	29,516		
	29,503	29,421	29,766	29,932	29,766	29,712		
1020	29,987	29,990	29,995	29,989	29,994	29,987	29,988	0,0052
	29,989	29,990	29,994	29,989	29,986	29,987		
	29,990	29,992	29,987	29,971	29,987	29,988		
	29,989	29,987	29,980	29,992	29,998	29,995		
	29,984	29,981	29,986	29,987	29,986	29,983		
1030	29,953	29,979	29,966	29,993	29,972	29,990	29,977	0,014
	29,999	29,981	29,959	29,965	29,980	29,968		
	29,997	29,972	29,999	29,957	29,971	29,993		
	29,973	29,995	29,987	29,974	29,984	29,979		
	29,986	29,965	29,984	29,968	29,956	29,953		
8640	29,989	29,988	29,996	29,930	29,990	29,949	29,956	0,033
	29,981	29,949	29,987	29,879	29,997	29,963		
	30,002	29,983	29,946	29,937	29,988	29,982		
	29,990	29,955	29,889	29,927	29,938	29,957		
	29,952	29,913	29,932	29,984	29,924	29,938		

Anexo D – Programas

A seguir, tem-se o ciclo de torneamento implementado exclusivamente para a verificação das funções de automação inteligentes.

(a) Programa Principal

N10 R00=? R02=29.97 R04=30.02	N280 IF R13==1 GOTOF FIM	MSG (“Posicionar Ferramenta”)
N20 R01=R00 R14=0	MSG (“Acabamento”)	N540 R08=150 R09=10
N30 R03=\$TC_DP3[8,1]+R02/2	N290 G94 M4 S2000	N550 COLISAO
N40 R05=\$TC_DP3[8,1]+R04/2	N300 T12 D1 M8	N560 IF R13==1 GOTOF FIM
N50 R06=30 R07=77.5	N310 G1 Z0.5 F2000	MSG (“Retrabalho”)
MSG (“Ciclo de Torneamento”)	N320 G1 X25 F500	N570 G94 M4 S2000
N60 G1 G53 X300 Z360 F2000	N330 G1 Z-50 F100	N580 T12 D1 M8
N70 TRANS Z303.470	N340 X30 Z-52.5	N590 G1 Z0.5 F2000
N80 R08=150 R09=10	N350 Z-102.5	N600 G1 X25 F500
N90 COLISAO	N360 G1 G53 X33 F2000	N610 G1 Z-50 F100
N100 IF R13==1 GOTOF FIM	N370 COLISAO	N620 X30 Z-52.5
N110 CICLO: G4 F1	N380 M9	N630 Z-102.5
MSG (“Desbaste”)	N390 M5	N640 G1 G53 X33 F2000
N120 G90 G94 M4 S1000	N400 IF R13==1 GOTOF FIM	N650 COLISAO
N130 T2 D1 M8	N410 R01=R01-1	N660 M9
N140 G1 X33 F2000	N420 IF R01<0 GOTOF	N670 M5
N150 Z0.5	CONTROLE	N680 IF R13==1 GOTOF FIM
N160 G1 X31 F500	N430 G4 F1	N690 DIMENSIONAL
N170 G1 Z-102.5 F200	MSG (“Retirar a Peça”)	N700 IF R12<R03 GOTOF FIM
N180 G1 X33 F2000	N440 M0	N710 IF R12>R05 GOTOF
N185 Z0.5	N450 GOTOB CICLO	TROCA
N190 G1 X28.5 F500	N460 M30	N720 R01=(R00)/(POT(R14))
N200 G1 Z-51.5 F200	N470 CONTROLE:	N730 GOTOB CICLO
N210 G1 X30 F2000	DIMENSIONAL	N740 M30
N215 Z0.5	N475 R14=R14+1	N750 TROCA: G4 F1
N220 G1 X26 F500	N480 IF R12<R03 GOTOF FIM	MSG (“Verificar Ferramenta”)
N230 G1 Z-49.8 F200	N490 IF R12>R05 GOTOF	N760 M05
N235 G1 X28 F2000	COMPENSA	N770 M09
N240 R08=150 R09=10	N500 R01=(R00)/(POT(R14))	N780 M00
N250 COLISAO	N510 GOTOB CICLO	N790 FIM: M30
N260 M5	N520 M30	
N270 M9	N530 COMPENSA: CORRIGE	

(b) Subrotina de Colisão

N10 PROC COLISAO	N60 R13=0	N110 STEP:
N20 R13=0	N70 MEAS=2 G1 Z=R09 F2000	MSG ("Avaria ou Colisao")
N30 MEAS=2 G1 X=R08 F2000	N80 R13=\$AC_MEA[2]	N120 M05
N40 R13=\$AC_MEA[2]	N90 IF R13<>0 GOTOF STEP	N130 M09
N50 IF R13<>0 GOTOF STEP	N100 M17	N140 M17

(c) Subrotina de Controle Dimensional da Peça

N10 PROC DIMENSIONAL	N90 MEAS=1 G1 X=R06-2.0 F10	N170 R12=(R10+R11)/2+0.012
MSG ("Controle Dimensional")	N100 R10=\$AA_MM[X]	N180 IF R12<R03 GOTOF
N30 G1 X150 F2000	N110 G1 X=R06+2.0 F500	REFUGO
N40 Z10	N120 Z=R07-4.0	N190 M17
N50 G94 M4 S800	N130 MEAS=1 G1 X=R06-2.0 F10	N120 REFUGO:
N60 T8 D1	N140 R11=\$AA_MM[X]	MSG ("Peca Refugada")
N70 G1 Z=R07+4.0 F2000	N150 G1 X150 F2000	N130 M00
N80 X=R06+2.0	N160 Z10	N140 M17

(d) Subrotina de Compensação de Desgaste da Ferramenta

N10 PROC CORRIGE
 N20 \$TC_DP3[12,1] = \$TC_DP3[12,1] - (R09 - (R01+R02))/2
 N30 M17

*(e) Legenda*Parâmetros R (Variáveis Globais)

- R00 = Armazena a Frequência de Verificação (NF) fornecida pelo programador.
- R01 = Frequência de Verificação (NF): variável de acordo com as operações do ciclo.
- R02 = Armazena o Limite Inferior Especificado (LIE) fornecido pelo programador.
- R03 = Limite Inferior Especificado (LIE) em coordenadas relativas ao zero da ferramenta.
- R04 = Armazena o Limite Superior Especificado (LSE) fornecido pelo programador.
- R05 = Limite Superior Especificado (LSE) em coordenadas relativas ao zero da ferramenta.
- R06 = Posição X para a medição (diâmetro nominal).

R07 = Posição Z para a medição.

R08 = Posição final X no posicionamento anti-colisão.

R09 = Posição final Z no posicionamento anti-colisão.

R10 = Valor obtido na medição 1 pelo apalpador.

R11 = Valor obtido na medição 2 pelo apalpador.

R12 = Valor médio das duas medições com correção de erro.

R13 = Flag relativo ao disparo (1) ou não (0) do sensor na detecção de colisão.

R14 = Constante k, referente ao aumento do número de verificações

Subrotinas de FI

COLISAO Monitoramento da Colisão.

DIMENSIONAL Controle Dimensional da Peça em Processo.

CORRIGE Correção do Parâmetro de *Offset* relativo ao desgaste da ferramenta em X.

Parâmetros Geométricos

\$TC_DP3[8,1] Representa o comprimento da ferramenta T8 (apalpador) em X (n = 3), para o *offset* D1 (vide item 7.3).

\$TC_DP3[12,1] Idem para a ferramenta T12 (acabamento).

Função Measure (MEAS)

MEAS=2 **\$AC_MEA[2]** verifica se houve choque nos avanços em X e Z. Se o sinal ultrapassar o nível de *trigger* ajustado no canal 2 ($6,0 \pm 0,5V_{cc}$), o registrador **R13** armazena o valor "1" (colisão). Caso contrário, mantém-se em "0".

MEAS=1 **\$AA_MM[X]** verifica se o sinal ultrapassa o nível de *trigger* ajustado no canal 1 ($0,50 \pm 0,5V_{cc}$), informando que houve contato do apalpador no avanço em [X] contra a peça. No instante do toque, o valor obtido é armazenado no registrador **R**.

Anexo E – Sistema de Controle Dimensional de Peças em Processo

Os dados abaixo representados (tabela 10.10) refletem os resultados obtidos na medição da peça em ciclos de FI com o sistema desenvolvido, para peças usinadas com $\phi 30,00^{+0,02}_{-0,03}$ mm e rugosidade inferior a $3,2\mu\text{m}$.

TABELA 10.10 – MEDIDA DA PEÇA EFETUADA AO LONGO DO TEMPO.

Peça	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média \bar{X}	Amplitude T_A
1	29,996	29,992	30,007	29,986	29,995	0,021
2	29,992	29,994	29,998	30,001	29,996	0,009
3	30,000	29,995	29,995	29,995	29,996	0,005
4	29,993	29,994	29,992	29,999	29,995	0,007
5	29,995	29,992	29,996	29,996	29,995	0,004
6	29,996	29,995	29,999	29,993	29,996	0,006
7	29,998	29,995	30,000	29,992	29,996	0,008
8	30,002	29,996	29,989	30,007	29,999	0,018
9	29,998	29,992	30,004	29,997	29,998	0,012
10	29,993	29,985	29,998	29,992	29,992	0,013
11	29,997	29,999	30,002	29,991	29,997	0,011
12	30,003	29,998	29,995	30,001	29,999	0,008
13	29,999	29,992	29,990	29,993	29,994	0,009
14	29,987	29,994	29,996	30,005	29,996	0,018
15	29,996	29,991	29,997	29,998	29,996	0,007
$S_X^2 = 0,00002$		$S_X = 0,00464$		$\bar{X} = 29,9959$		$\bar{T}_A = 0,0104$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A seguir, tem-se a relação da literatura utilizada na elaboração deste trabalho, citada em alguma parte do texto ou apenas consultada para a obtenção de informações adicionais.

Referências Citadas.

- AGOSTINHO, O. L. (1995). *Sistemas de Manufatura*. USP São Carlos. *l apostilal*
- BLACK, J. T. (1998). *O projeto da fábrica com futuro*. Porto Alegre. Bookman Companhia.
- BLUM, T.; SUZUKI, I.; INASAKI, I. (1988). Development of a condition monitoring system for cutting tools using an acoustic emission sensor. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, v.22, n.4, p.301-8.
- BLUM, T.; INASAKI, I. (1990). Study on acoustic emission from orthogonal cutting process. *ASME Journal of Engineering for Industry*, v.112, n.2, p.203-11.
- BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W. A. (1989). *Fundamentals of Machining and Machine Tools*. Marcel Dekker, Inc. 2nd. Edition. New York.
- BYRNE et al. (1995). Tool condition monitoring - the status of research and industrial application. *Annals of the CIRP*, v.44, n.2, p.541-67.
- DORNFELD, D. A. (1994). In-process recognition of cutting states. *JSME International Journal*, v.37, n.4, p.638-50.
- DU, R.; ELBESTAWI, M. A.; WU, S. M. (1995a). Automated monitoring of manufacturing process, part 1: monitoring methods. *ASME Journal of Engineering for Industry*, v.117, n.2, p.121-32.

- EL GOMAYEL, J. I.; BREGGER, K. D. (1986). On-line tool wear sensing for turning operations. *ASME Journal of Engineering for Industry*, v.108, n.1, p.44-7.
- EMEL, E. N.; KANNATEY-ASIBU Jr.; E. (1988). Tool fracture monitoring in turning by pattern recognition analysis of AE signals. *ASME Journal of Engineering for Industry*, v.110, p.137-45.
- FATOR QUALIDADE (1996). *Controle estatístico do processo*. Curso apostilado aplicado à empresa Multibrás S. A. Eletrodomésticos, Rio Claro, SP.
- FELIPE Jr., J. (1996). *Contribuição para implementação de funções de retificação inteligentes (RI) utilizando técnicas de monitoramento por emissão acústica*. São Carlos. 138p. Tese (Doutorado) - EESC, USP.
- FERRARESI, D. (1990). *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. 8.reimpressão. São Paulo, Edgard Blücher.
- GRAHAM, T. S. (1989). Monitoring the unmanned machining system. *FMS Magazine*, v.3, n.7, p.127-31.
- GROOVER, M. P. (1987a). *Automation, production systems, and computer integrated manufacturing*. New Jersey, Prentice-Hall Inc. Cap.14, p.462-84: Flexible Manufacturing Systems.
- HINES, W. W.; MONTGOMERY, D. C. (1990). *Probability and Statistics in Engineering and Management Science*. John Wiley & Sons, Inc. New York. 3rd Edition.
- INASAKI, I.; AIDA, S.; FUKUOKA, S. (1987). Monitoring system for cutting tool failure using an acoustic emission sensor. *JSME International Journal*, v.30, p.323-8.
- IWATA, K.; MORIWAKI, T. (1978). Cutting state identification and in-process tool wear sensing by acoustic emission analysis. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, v.12, n.4, p.213-4.
- KANNATEY-ASIBU Jr., E.; DORNFELD, D. A., (1981). Quantitative relationships for acoustic emission from orthogonal metal cutting. *ASME Journal of Engineering for Industry*, v.103, n.3, p.330-40.
- KLAIBER, J. R.; DORNFELD, D. A.; LIU, J. J. (1990). Acoustic emission feedback for diamond turning. *Transactions of the North American Research Institution of SME 1990 (NAMRC)*, p.113-19.

- LAN, M. S.; DORNFELD, D. A. (1984). In-process tool fracture detection. *ASME Journal of Engineering for Industry*, v.111, n.2, p.111-8.
- LEE et al. (1994). In-process tool breakage detection using a built-in force sensor and an AE sensor. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME*, v.12, p.91-7.
- LUBBEN, R. T. (1988). *Just in time: uma estratégia avançada de produção*. McGraw-Hill, Rio de Janeiro, p.3-29.
- MASON, F.; FREEMAN, N. B. (1985). Turning centers come of age. *American Machinist - Special Report*, p.97-116, Feb.
- MASORY, O.; KOREN, Y. (1980). Adaptive control system for turning. *Annals of the CIRP*, v.29, n.1, p.281-4.
- MATHEW, J.; DAN, L. (1990). Tool wear and failure monitoring techniques for turning: a review. *International Journal of Machine Tools Manufacturing*, v.30, n.4, p.579-98.
- MAZAK. System Integration. *Catálogos*.
- MICHELETTI, G. F.; KÖENIG, W.; VICTOR, H. R. (1976). In process tool wear sensor for cutting operations. *Annals of the CIRP*, v.25, n.2, p.483-96.
- MORIWAKI, T. (1983). Application of acoustic emission measurement to sensing of wear and breakage of cutting tool. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, v.17, n.3, p.154-60.
- MOURA, R. A.; BANZATO, E. (1996). *Redução de Tempo de Setup – Troca Rápida de Ferramentas e Ajustes de Máquinas*. Instituto IMAN. São Paulo.
- NOVASKI, O. (1994). *Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica*. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo.
- OKUMA. Machining Centers. *Catálogos*.
- RANGWALA, S.; DORNFELD, D. (1991a). A study of acoustic emission generated during orthogonal metal cutting-1: energy analysis. *International Journal of Mechanical Science*, v.33, n.6, p.471-87.
- RENISHAW. Soluções por apalpadores para máquinas operatrizes CNC. *Catálogos*.

- SAINI, D. P.; PARK, Y. J. (1996). A quantitative model of acoustic emissions in orthogonal cutting operations. *Journal of Materials Processing Technology*, v.58, n.4, p.343-50, Apr.
- SANTOCHI, M.; BEGHINI, M. (1997). A sensor-integrated tool for cutting force monitoring. *Annals of the CIRP*, v.46, n.1, p.49-52.
- SAWAI, N.; SONG, J.; HWAYOUNG, P. (1995). Automated measurements of tool wear using an image processing system. *Journal of Japan Society for Precision Engineering*, v.61, n.3, p.368-71.
- SHIRAISHI, M. (1988). Scope of in-process measurement, monitoring and control techniques in machining processes - part 1: in-process techniques for tools. *Precision Engineering*, v.10, n.4, p.179-89.
- TLUSTY, J.; ANDREWS, G. C. (1983). A critical review of sensors for unmanned machining. *Annals of the CIRP*, v.32, n.2, p.563-72.
- VIEIRA Jr.; M. (1996). *Avaliação da dureza de rebolos em trabalhos através do uso da emissão acústica na dressagem*. São Carlos. 134p. Tese (Doutorado) - EESC, USP.
- WASCHKIES, E.; SKLARCZYK, C.; HEPP, K. (1994). Tool wear monitoring at turning. *Journal of Engineering for Industry*, v.116, n.4, p.521-4.

Bibliografia Consultada.

- ALTINTAS, Y.; NEWELL, N.; ITO, M. (1996). Modular CNC design for intelligent machining, part 1: design of a hierarchical motion control module for CNC machine tools. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v.118, n.4, p.506-13.
- ALTINTAS, Y.; MUNASINGHE, W. K. (1996). Modular CNC design for intelligent machining, part 1: modular integration of sensor based milling process monitoring and control tasks. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v.118, n.4, p.514-21.
- ANDREASEN, J. L.; DE CHIFFE, L. (1993). Automatic chip-breaking detection in turning by frequency analysis of cutting force. *Annals of the CIRP*, v.42, n.1, p.45-8.

- ANSELMETTI, B. (1995). Automatic set-up of tool monitors by a CAM system. *Computers in Industry*, v.26, n.2, p.135-45.
- ASHLEY, S. (1997). Manufacturing firms face the future. *Mechanical Engineering*. V.119, n.6, p.70-4, June.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. (1978). *Statistics for Experimenters – An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building*. John Wiley & Sons, Inc. N.Y.
- CHO, S. S.; KOMVOPOULOS, K. (1997). Correlation between acoustic emission and wear of multi-layer ceramic coated carbide tools. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v.119, n.2, p.238-46.
- DIEI, E. N.; DORNFELD, D. A. (1987). A model of tool fracture generated acoustic emission during machining. *Asme Journal of Engineering for Industry*, v.109, n.3, p.227-33.
- DORNFELD, D. A.; KANNATEY-ASIBU Jr., E. (1980). Acoustic emission during orthogonal metal cutting. *International Journal of Mechanical Science*, v.22, n.5, p.285-96.
- DORNFELD, D. A. (1992). Application of acoustic emission techniques in manufacturing. *NDT & E International*, v.25, n.6, p.259-69.
- DU, R.; ELBESTAWI, M. A.; WU, S. M. (1995b). Automated monitoring of manufacturing process, part 2: applications. *ASME Journal of Engineering for Industry*, v.117, n.2, p.133-41.
- GROOVER, M. P. (1987b). *Automation, production systems, and computer integrated manufacturing*. New Jersey, Prentice-Hall Inc. Cap.10, p.279-298: DNC, CNC and Adaptive Control.
- HARA, C. M. (1995). *Utilização de redes neurais na análise de sinais de vibração de ferramenta de torneamento*. Campinas, 107p. Dissertação (Mestrado) - UNICAMP.
- INASAKI, I. (1996). Trends of the manufacturing technology development in Japan. *Proceedings of the International Manufacturing Engineering Conference*. Connecticut, USA, p.16-21. Aug.
- INDEX. Medição de peças e de ferramentas nos tornos CNC. *Apostila*.
- IWATA, K; MORIWAKI, T.; TAKENAKA. (1977). An application of acoustic emission measurements to in-process sensing of tool wear. *Annals of the CIRP*, v.25, n.1, p.21-6.

- JAWAHIR, I. S.; VAN LUTTERVELT, C. A. (1993). Recent developments in chip control research and applications. *Annals of the CIRP*, v.42, n.2, p.659-93.
- KANEEDA, T.; TSUWA, H. (1979). Detecting fracture phenomena in separation process at tool tip metal cutting by acoustic emission technique. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, v.13, n.3, p.159-60.
- KO, T. J.; CHO, D. W. (1994). Tool wear monitoring in diamond turning by fuzzy pattern recognition. *ASME Journal of Engineering for Industry*, v.116, n.2, p.225-32.
- KOHNO, T. (1993). In-process measurement and control for production process - a review. *Journal of Japan Society for Precision Engineering*, v.27, n.4, p.319-20.
- KOREN, Y. (1997). Control of machine tools. *ASME Journal of Manufacturing Science and Technology*, v.4, n.119, p.749-55.
- KRAMER, B. M. (1996). Challenges for next generation manufacturing. *Proceedings of the International Manufacturing Engineering Conference*. Connecticut, USA, p.562-7. Aug.
- KURADA, S.; BRADLEY, C. (1997). A review of machine vision sensors for tool condition monitoring. *Computers in Industry*, v.34, n.1, p.55-72.
- LABVIEW®. *Operation Guide*.
- LEEM, C. S.; DORNFELD, D. A.; DREYFUS, S. E. (1995). A customized neural network for sensor fusion in on-line monitoring of cutting tool wear. *ASME Journal of Engineering for Industry*, v.116, n.2, p.152-9.
- LIANG, S. Y.; DORNFELD, D. A. (1989). Tool wear detection using time series analysis of acoustic emission. *ASME Journal of Engineering for Industry*, v.111, n.2, p.199-205.
- LIU, J. J.; DORNFELD, D. A. (1996). Modeling and analysis of acoustic emission in diamond turning. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v.118, n.2, p.199-207.
- LU, S. C.-Y. (1990) Machine learning approaches to knowledge synthesis and integration tasks for advanced engineering automation. *Computers in Industry*, v.15, p.105-120.
- LUGGEN, W. W. (1988). *Fundamentals of numerical control*. New York. Delmar Publishers Inc. Cap.12, p.230: The future of numerical control.
- MANIPULAÇÃO de informação de controle de sensores de máquinas ferramentas (1993). *Máquinas e Metais*, p.60-1. Out.

- MENDIZABAL, R. O. A. (1991). *Monitoramento do processo de retificação através de técnicas acústicas*. São Carlos. 108p. Dissertação (Mestrado) - EESC, USP.
- MEREDITH, D. (1998). Practical tool condition monitoring. *SME Manufacturing Engineering*, v.120, n.1, p.34-9.
- MONOSTORI et al. (1996). Machine learning approaches to manufacturing. *Annals of the CIRP*, v.45, n.2, p.675-712.
- MORIWAKI, T. (1984). Sensing and prediction of cutting tool failure. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, v.18, n.2, p.90-6.
- NIU, Y. M.; WONG, Y. S.; HONG, G. S. (1998). An intelligent sensor system approach for reliable tool flank wear recognition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.14, n.2, p.77-84.
- NOORI-KHAJAVI, A.; KOMANDURI, R. (1993). On multisensor approach to drill wear monitoring. *Annals of the CIRP*, v.42, n.1, p.71-4.
- NOVAK, A.; WIKLUND, H. (1996). On-line prediction of the tool life. *Annals of the CIRP*, v.45, n.1, p.93-6.
- PETERS, J.; LEUVEN, K. U.; HEVERLEE, B. (1977). Metrology in design and manufacturing: facts and trends. *Annals of the CIRP*, v.26, n.2, p.415-21.
- RANGWALA, S.; DORNFELD, D. (1991b). A study of acoustic emission generated during orthogonal metal cutting-2: spectral analysis. *International Journal of Mechanical Science*, v.33, n.6, p.489-99.
- REVISTA POLITÉCNICA (1992). Dossiê automação: perspectivas e dilemas, São Paulo, n.210, jul./set.
- RYABOV, O.; MORI, K.; KASASHIMA, N. (1996). An in-process direct monitoring method for milling tool failures using a laser sensor. *Annals of the CIRP*, v.45, n.1, p.97-100.
- SAMPATH, A.; VAJPAYEE, S. (1987). Tool health monitoring using acoustic emission. *International Journal on Production Research*, v.25, n.5, p.703-19.
- SANTOS, J. P.; DUARTE, W. P. (1995). *Just in time*. Quality at Source: Consultoria, Assessoria e Treinamento Técnico Ltda., SEBRAE São Carlos. *l apostila*



SAWA et al. (1993). Development of an advanced tool-setting device for diamond turning. *Annals of the CIRP*, v.42, n.1, p.87-90.

SENSIS® BM-12. Manual do Fabricante.

SHINNO, H.; HASHIZUME, H. (1997). In-process monitoring method for machining environment based on simultaneous multi-phenomena sensing. *Annals of the CIRP*, v.46, n.1, p.53-6.

SIEMENS SINUMERIC 840C. Manual de Operações.

SIEMENS SINUMERIC 840C. Manual de Programação.

TAVARES Filho, R. F. (1996). *Análise multi-resolução na determinação do desgaste de ferramentas em torneamento*. Campinas. 180p. Tese (Doutorado) - UNICAMP.

TETI, R.; DORNFELD, D. A. (1989). Modeling and experimental analysis of acoustic emission from metal cutting. *ASME Journal of Engineering for Industry*, v.111, n.3, p.229-37.

TORNO CNC INDEX GU600-2. Manual de Manutenção Elétrica

TORNO CNC INDEX GU600-2. Manual de Operação

WANG et al. (1996). The global view of manufacturing and manufacturing system research. *Proceedings of the International Manufacturing Engineering Conference*. Connecticut, USA, p.113-15. Aug.

APÊNDICES

1. DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS

Este apêndice foi baseado na obra de HINES & MONTGOMERY (1990), intitulada *Probability and Statistics in Engineering and Management Science*.

A importância da estatística na engenharia tem sido salientada pelo seu envolvimento na melhoria da qualidade nas indústrias. Muitas companhias têm levado em conta que a baixa qualidade dos produtos gerada por falhas na manufatura e/ou insatisfação com o serviço de campo afetam drasticamente sua produtividade, sua participação e competitividade no mercado, e principalmente, sua lucratividade.

Um programa bem sucedido de melhoria de qualidade é capaz de eliminar desperdícios, reduzir refugos e retrabalhos, reduzir o número de inspeções e testes, aumentar os prazos de garantia, acentuar a satisfação do consumidor, e gerar produtos com alta qualidade e baixo custo. A estatística pode promover esta melhoria, já que as técnicas aplicadas podem ser utilizadas para descrever e entender a variabilidade do processo (vide Apêndice 2).

A análise, e a posterior tomada de decisão, relativas a um processo de fabricação de uma empresa visando a melhoria contínua de seus produtos e/ou serviços, só podem ser executados se forem baseados em dados experimentais. Diante deste fato, os experimentos passam a integrar naturalmente os procedimentos de decisão.

Um experimento (ou ensaio) nada mais é do que um teste ou uma série de testes. As conclusões que podem ser tiradas destes testes dependerão, em parte, de como o ensaio foi conduzido para que, só então, o **Delineamento dos Experimentos** possa determinar a melhor solução para o problema avaliado.

Com relação ao delineamento de experimentos, primeiramente, descrever-se-á sucintamente a distribuição de amostragem associada, que é a **Distribuição F**. Em seguida, falar-se-á um pouco sobre **Teste de Hipóteses**, como uma das ferramentas de análise estatística de inferência (ou dedução). Finalmente, discutir-se-á a **Análise de Variância**, que se utiliza de ambos para a tomada de decisão.

1.1. Distribuição F

A estatística é uma ferramenta constituída de métodos usados para descrever e modelar a variabilidade, tomando as decisões quando tal característica se faz presente. Normalmente, a avaliação é feita a partir de uma amostra significativa da população, generalizando-a em relação ao todo. Um importante método de seleção de uma amostra é a *amostragem aleatória*ⁱ. A maioria das técnicas estatísticas de análise de informações assumem amostras aleatórias de dados, usando diferentes distribuições de probabilidades.

Antes de definir a distribuição F, é necessário que se faça a descrição da distribuição qui-quadrada (χ^2). Define-se $\chi_{\alpha,k}^2$ como sendo os pontos percentuais, ou o valor da variável aleatória qui-quadrada com k graus de liberdade tal que a probabilidade que χ_k^2 excede este valor é α . Isto é:

$$P \{ \chi_k^2 \geq \chi_{\alpha,k}^2 \} = \int_{\chi_{\alpha,k}^2}^{\infty} f_{\chi^2}(u) du = \alpha$$

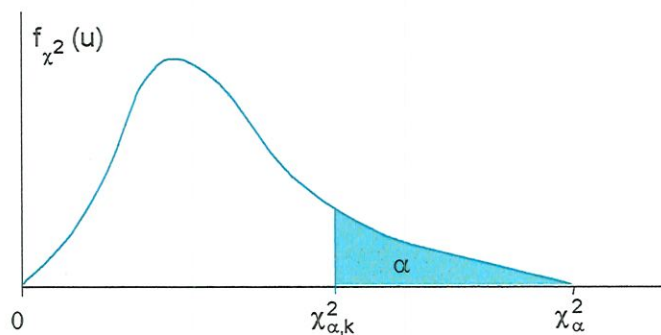


FIGURA A1.1 – PONTOS PERCENTUAIS $\chi_{\alpha,k}^2$ DA DISTRIBUIÇÃO QUI-QUADRADA.

Toma-se duas variáveis aleatórias independentes qui-quadradas A e B com u e v graus de liberdade, respectivamente. A distribuição com u graus de liberdade no numerador e v graus de liberdade no denominador é usualmente abreviada pela razão dada por:

$$F_{u,v} = \frac{A/u}{B/v}$$

ⁱ Uma amostra é considerada aleatória se todos os seus elementos observados (a) forem variáveis independentes escolhidas ao acaso e (b) tiverem a mesma distribuição de probabilidades.

Assim, define-se $F_{\alpha,u,v}$ como sendo os pontos percentuais, ou o valor da variável aleatória da **Distribuição F**, com u e v graus de liberdade tal que a probabilidade de que a variável aleatória $F_{u,v}$ exceda este valor é:

$$P \{ F_{u,v} \geq F_{\alpha,u,v} \} = \int_{F_{\alpha,u,v}}^{\infty} h(f) df = \alpha$$

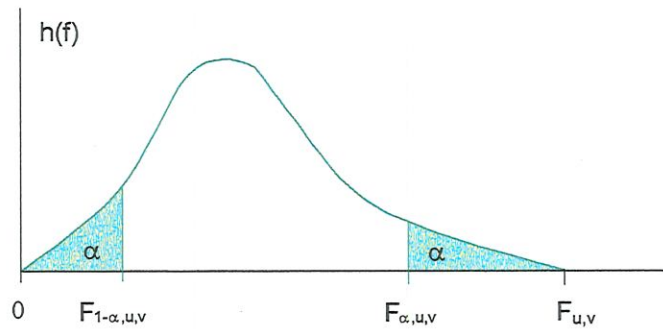


FIGURA A1.2 – PONTOS PERCENTUAIS SUPERIORES E INFERIORES DA DISTRIBUIÇÃO F.

No apêndice da obra referente a este capítulo, podem ser encontrados valores tabelados relacionados a pontos percentuais de α iguais a 25%, 10%, 5%, 2.5% e 1%.

Tomando $u = 5$ e $v = 10$, pode-se encontrar para $\alpha = 0.05$

$$P \{ F_{5,10} \geq F_{0.05,5,10} \} = P \{ F \geq 3,33 \} = 0.05$$

Isto é, existe uma probabilidade de 5% de que $F_{5,10}$ seja maior ou igual a 3,33. Encontrando a margem inferior:

$$P \{ F_{5,10} \leq F_{0.95,5,10} \} = P \{ F \leq 0,211 \} = 0.05$$

A probabilidade de que $F_{5,10}$ seja menor ou igual a 0,211 é de 5%. Note que:

$$F_{0.95,5,10} = \frac{1}{F_{0.05,10,5}} = \frac{1}{4,74} = 0,211$$

Supondo que se tenha duas populações com as variâncias σ_1^2 e σ_2^2 . Tomando amostras aleatórias independentes destas populações de tamanhos n_1 e n_2 respectivamente, e definindo as variâncias destas amostras por S_1^2 e S_2^2 . Então a razão:

$$F = \frac{S_1^2 / \sigma_1^2}{S_2^2 / \sigma_2^2}$$

tem uma distribuição com n_1-1 graus de liberdade no numerador e n_2-1 graus de liberdade no denominador, já que:

$$\frac{S_1^2}{\sigma_1^2}(n_1 - 1) \approx \chi_{n_1-1}^2 \quad \text{e} \quad \frac{S_2^2}{\sigma_2^2}(n_2 - 1) \approx \chi_{n_2-1}^2$$

A estatística na razão mostrada acima é a chave para o teste de hipóteses (item 1.2) com relação à comparação entre variâncias de duas populações independentes.

1.2. Teste de Hipóteses

Basicamente, a estatística trata da classificação, tabulação e estudo dos dados coletados e sua interpretação em termos matemáticos, usada freqüentemente para a resolução de problemas a partir dos cálculos efetuados. Visto que os engenheiros e cientistas em geral usualmente trabalham com a coleta e análise de dados, os conhecimentos em estatística tornaram-se vitais nestas áreas. Freqüentemente, a avaliação dos dados resulta da amostra, e muitas vezes objetiva-se utilizar a informação da amostra para tirar as conclusões (ou deduções) sobre a população da qual a média foi extraída. A classe usada neste caso é chamada de *Estatística de Inferência*ⁱⁱ.

Muitos problemas necessitam que se decida sobre a aceitação ou rejeição de uma certa afirmação ou hipótese sobre um determinado parâmetro analisado. A partir do momento em que o procedimento de tomada de decisão passou a envolver hipóteses, o chamado **Teste de Hipóteses** passou a ser uma das ferramentas mais usadas na Estatística de Inferência. Geralmente, o objetivo do teste é saber se houve qualquer alteração na situação analisada experimentalmente, através de afirmações verdadeiras ou falsas.

A hipótese estatística constitui numa afirmação sobre a distribuição de probabilidades de uma variável aleatória, envolvendo um ou mais parâmetros de uma distribuição. É importante saber que as hipóteses são sempre afirmações de uma população, não de uma amostra. Quando a decisão é tomada a partir de uma amostra aleatória, ela fica sujeita ao erro. Dois tipos de erro podem ser gerados no teste de hipóteses, representados na tabela A1.1. Se a hipótese nula é rejeitada quando ela é

ⁱⁱ A estatística de inferência ou dedutiva normalmente propõe uma hipótese nula e parte para contestá-la. Uma vez que não se pode garantir que nenhum exemplo seja merecedor de crédito, precisa-se indicar limites de confiança, usando cálculos de meios e variação.

verdadeira, o erro *tipo 1* foi gerado. Se a hipótese nula é aceita quando ela é falsa, gera-se o erro *tipo 2*.

TABELA A1.1 – DECISÕES NO TESTE DE HIPÓTESES

	H_0 é Verdadeiro	H_0 é Falso
Aceita-se H_0	Sem erro	Erro tipo 2
Rejeita-se H_0	Erro tipo 1	Sem erro

A partir dos dados obtidos, muitos testes podem ser realizados, dependendo-se de qual decisão é preciso ser tomada. Os testes podem ser feitos na média ou na variância. Para o delineamento de experimentos, far-se-á a análise da variância, comparando os fatores que possivelmente afetam o parâmetro avaliado.

1.2.1. Teste de Igualdade Entre Duas Variâncias

Considera-se duas populações independentes, $X_1 \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$ e $X_2 \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$ onde μ_1, σ_1^2, μ_2 e σ_2^2 são desconhecidas. Deseja-se testar a hipótese de igualdade entre as duas variâncias, isto é, $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$. Assume-se uma amostra da população normal 1 com tamanho n_1 e variância S_1^2 e outra da população normal 2 com tamanho n_2 e variância S_2^2 .

Para se testar ambas as alternativas de hipóteses, tem-se o seguinte:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

A hipótese nula H_0 é verdadeira se a razão $F_0 = \frac{S_1^2}{S_2^2}$

tiver Distribuição F, com n_1-1 e n_2-1 graus de liberdade. Por outro lado, rejeita-se H_0 se

$$F_0 > F_{\alpha/2, n_1-1, n_2-2} \quad \text{ou se} \quad F_0 < F_{1-\alpha/2, n_1-1, n_2-2}$$

onde $F_{\alpha/2, n_1-1, n_2-2}$ e $F_{1-\alpha/2, n_1-1, n_2-2}$ são os $\alpha/2$ pontos percentuais superior e inferior da distribuição F com n_1-1 e n_2-1 graus de liberdade.

O mesmo procedimento pode ser usado para testar uma só alternativa de hipótese. Partindo do princípio de que a notação para X_1 e X_2 é arbitrária, adota-se que X_1 tem a maior variância. Desta forma, analisa-se apenas uma hipótese:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1: \sigma_1^2 > \sigma_2^2$$

Se $F_0 > F_{\alpha, n_1-1, n_2-2}$, deve-se rejeitar H_0 .

Exemplo 1.1

X_1 e X_2 representam os produtos obtidos quando dois diferentes processos são usados. Deseja-se saber se o processo afeta de modo significativo a variância do produto. O número de produtos obtidos para as amostras de cada processo é $n_1 = n_2 = 8$, e a variância das amostras são respectivamente $S_1^2 = 3,89$ e $S_2^2 = 4,02$. Fazendo o teste:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

$$F_0 = \frac{S_1^2}{S_2^2} = \frac{3,89}{4,02} = 0,97$$

Se $\alpha = 0,05$, encontra-se na tabela:

- $F_{0,025,7,7} = 4,99 > 0,97$
- $F_{0,975,7,7} = (F_{0,025,7,7})^{-1} = 0,20 < 0,97$.

Com isso, não se pode rejeitar H_0 , e assim conclui-se que não há uma forte evidência de que a variância do produto é afetada pelo processo.

1.3. Análise de Variância

O nome **Análise de Variância** ou **ANOVA** resulta do desmembramento da variabilidade total de um fator em diferentes níveis ou tratamentos. Muitos experimentos envolvem dois ou mais fatores, o que conduz a uma análise de a níveis do fator A , b níveis do fator B , c níveis do fator C , e assim sucessivamente. No geral, haverá um total de $abc...n$ observações, se houver n repetições de um experimento completo.

Por exemplo, considere um experimento com três fatores, representado por um modelo estatístico linear:

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, c \\ l = 1, 2, \dots, n \end{array} \right. \quad \text{onde:}$$

- y_{ijkl} é a $ijkl$ -ésima observação (nota-se que y_{ijkl} representa tanto a variável aleatória quanto o seu efeito).
- μ é a média total do experimento.
- τ_i , β_j e γ_k são os parâmetros associados com os i , j e k -ésimos níveis dos fatores A, B e C respectivamente.
- $(\tau\beta)_{ij}$, $(\tau\gamma)_{ik}$, $(\beta\gamma)_{jk}$ e $(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ são os efeitos das interações entre os fatores A, B e C.
- ε_{ijkl} é o erro aleatório, usualmente considerado com sendo uma distribuição normal com média zero e variância constante $[NID(0, \sigma^2)]$ para todos os níveis dos fatores A, B e C.

Assumindo que A, B e C são fixos, a análise da variância é mostrada na tabela A1.2. Observa-se que os fatores devem ter no mínimo duas repetições ($n \geq 2$) para poder se calcular a soma dos quadrados relativa ao erro. O teste F nos efeitos e interações principais seguem diretamente da média quadráticaⁱⁱⁱ esperada (MS).

As fórmulas para se obter as somas dos quadrados da tabela A1.2 podem ser facilmente calculadas. A soma total (SS_{Total}) fica:

$$SS_{Total} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn}$$

A soma dos quadrados para os efeitos principais são calculados dos fatores A($y_{i\dots}$), B($y_{.j\dots}$) e C($y_{\dots k}$) como se segue:

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i\dots}^2}{bcn} - \frac{y_{\dots}^2}{abcn}$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j\dots}^2}{acn} - \frac{y_{\dots}^2}{abcn}$$

ⁱⁱⁱ A média quadrática indica a razão entre a soma dos quadrados de um tratamento e o número de graus de liberdade associado a este tratamento.

$$SS_C = \sum_{k=1}^c \frac{y_{..k}^2}{abn} - \frac{y_{....}^2}{abcn}$$

Para computar a soma dos quadrados relativa à interação entre dois fatores, os totais de AxB, AxC e BxC são necessários. Estes totais podem ser calculados se os dados da tabela original forem divididos em três tabelas distintas. As somas dos quadrados fica:

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij.}^2}{cn} - \frac{y_{....}^2}{abcn} - SS_A - SS_B$$

$$SS_{AC} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \frac{y_{i.k}^2}{bn} - \frac{y_{....}^2}{abcn} - SS_A - SS_C$$

$$SS_{BC} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y_{.jk}^2}{cn} - \frac{y_{....}^2}{abcn} - SS_B - SS_C$$

A soma dos quadrados da interação entre os três fatores AxBxC é calculado da tabela principal (y_{ijk}) como sendo:

$$SS_{ABC} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y_{ijk}^2}{n} - \frac{y_{....}^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC}$$

A soma dos quadrados relativa ao erro (ou resíduo) pode ser obtida pela diferença entre a soma total e a soma relativa a todos os tratamentos:

$$SS_{\text{Tratamento s}} = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} + SS_{AC} + SS_{BC} + SS_{ABC}$$

$$SS_{\text{Resíduo}} = SS_{\text{Total}} - SS_{\text{Tratamento s}}$$

Calculando a média quadrática para os tratamentos e para o resíduo:

$$MS_{\text{Tratamento s}} = \frac{SS_{\text{Tratamento s}}}{abc - 1}$$

$$MS_E = \frac{SS_{\text{Resíduo}}}{abc(n-1)}$$

Fazendo o teste estatístico:

$$F_0 = \frac{MS_{\text{Tratamento s}}}{MS_E}$$

deve-se rejeitar H_0 se:

$$F_0 > F_{\alpha, abc-1, abc(n-1)}$$

TABELA A1.2 – ANOVA PARA UM MODELO DE TRÊS FATORES FIXOS

Causa de Variação	Soma dos Quadrados SS	Graus de Liberdade G	Quadrado Médio $MS=SS/G$	F_0	F_α
A	SS_A	$a-1$	MS_A	MS_A / MS_E	$F_{\alpha, a-1, abc(n-1)}$
B	SS_B	$b-1$	MS_B	MS_B / MS_E	$F_{\alpha, b-1, abc(n-1)}$
C	SS_C	$c-1$	MS_C	MS_C / MS_E	$F_{\alpha, c-1, abc(n-1)}$
AB	SS_{AB}	$(a-1)(b-1)$	MS_{AB}	MS_{AB} / MS_E	$F_{\alpha, (a-1)(b-1), abc(n-1)}$
AC	SS_{AC}	$(a-1)(c-1)$	MS_{AC}	MS_{AC} / MS_E	$F_{\alpha, (a-1)(c-1), abc(n-1)}$
BC	SS_{BC}	$(b-1)(c-1)$	MS_{BC}	MS_{BC} / MS_E	$F_{\alpha, (b-1)(c-1), abc(n-1)}$
ABC	SS_{ABC}	$(a-1)(b-1)(c-1)$	MS_{ABC}	MS_{ABC} / MS_E	$F_{\alpha, (a-1)(b-1)(c-1), abc(n-1)}$
Resíduo (Erro)	$SS_{Residuo}$	$abc(n-1)$	MS_E		
Total	SS_{Total}	$abcn-1$			

Exemplo 1.2

Um engenheiro mecânico, no estudo da rugosidade superficial de componentes produzidos numa operação de corte em torneamento, deseja saber se os fatores observados: avanço (A), profundidade de corte (B) e ângulo da ferramenta (C). influem diretamente nos resultados. A rugosidade medida é representada pela tabela A1.3:

TABELA A1.3 – DADOS DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL RELATIVOS AO EXEMPLO 1.2.

Avanço (A)	Profundidade de Corte (B)			
	0,025inch		0,040inch	
	Ângulo da Ferramenta (C)		Ângulo da Ferramenta (C)	
	15°	25°	15°	25°
20inch/min	9	11	9	10
	7	10	11	8
30inch/min	10	10	12	16
	12	13	15	14

Os valores referentes a ANOVA são calculados através das equações representadas no texto. A análise de variância pode ser resumida pela tabela A1.4. Para que a influência seja constatada:

$$F_0 > F_{\alpha, u, v}$$

onde u indica os graus de liberdade do tratamento, e v os graus de liberdade do erro aleatório agregado ao experimento.

TABELA A1.4 – ANOVA PARA O EXEMPLO 1.2.

Causa de Variação	Soma dos Quadrados SS	Graus de Liberdade G	Quadrado Médio MS=SS/G	F ₀	F _α
Avanço (A)	45,5625	1	45,5625	18,69	11,26
Profundidade de Corte (B)	10,5625	1	10,5625	4,33	3,46~5,32
Ângulo da Ferramenta (C)	3,0625	1	3,0625	1,26	—
AB	7,5625	1	7,5625	3,10	1,54~3,46
AC	0,0625	1	0,0625	0,03	—
BC	1,5625	1	1,5625	0,64	—
ABC	5,0625	1	5,0625	2,08	1,54~3,46
Resíduo (Erro)	19,5000	8	2,4375		
Total	92,9375	15			

Tomando $u = 1$ e $v = 8$, pode-se encontrar α para a distribuição F:

- $P \{ F_0 \geq F_{\alpha,1,8} \} = P \{ F_0 \geq 11,26 \} = 0.01$
- $P \{ F_0 \geq F_{\alpha,1,8} \} = P \{ F_0 \geq 5,32 \} = 0.05$
- $P \{ F_0 \geq F_{\alpha,1,8} \} = P \{ F_0 \geq 3,46 \} = 0.10$
- $P \{ F_0 \geq F_{\alpha,1,8} \} = P \{ F_0 \geq 1,54 \} = 0.25$

Concluindo, observa-se que o avanço tem um efeito significativo sobre a rugosidade superficial ($\alpha < 0.01$), assim como a profundidade de corte ($0.05 < \alpha < 0.10$). Não há evidências concretas sobre a influência do ângulo da ferramenta. Existe uma suave indicação na interação dos fatores, tanto para AB quanto para ABC ($0.10 < \alpha < 0.25$).

2. FUNDAMENTOS DO CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO

Este apêndice foi baseado no curso apostilado Controle Estatístico do Processo, aplicado pela empresa de consultoria e treinamento FATOR QUALIDADE (1996) à Multibrás S/A Eletrodomésticos e na obra de NOVASKI (1994).

Para entender melhor o significado de Controle Estatístico do Processo (CEP), deve-se analisar o significado de cada palavra separadamente.

- *Controle*: significa acompanhar a performance de alguma característica e atuar sobre esta para que se mantenha dentro de padrões estabelecidos (figura A2.1).

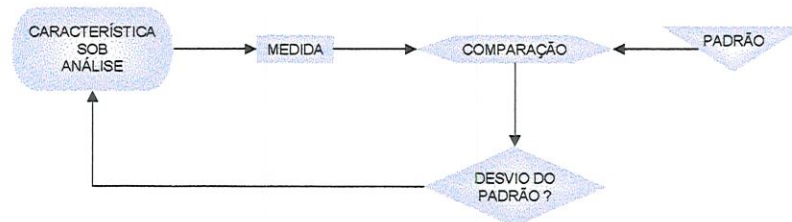


FIGURA A2.1 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DO CONCEITO DE CONTROLE.

- *Estatística*: é a arte da ciência de coletar, organizar, analisar e tirar conclusões a partir de dados, geralmente provenientes de amostras.
- *Processo*: é a maneira pela qual se realiza uma operação qualquer, através da interação de elementos, tais como mão de obra, matéria prima, máquina, método e meio ambiente, e apresenta como resultado um produto qualquer (figura A2.2).

Sendo assim, reunindo as idéias acima em uma definição formal, podemos dizer que CEP é uma técnica usada para manter o processo dentro de padrões estabelecidos através da análise estatística de dados, coletados no próprio processo. Ela discute

basicamente os tipos de variação que afetam um processo e se utiliza de ferramentas para a análise, tais como histogramas, gráficos de controle e avaliação de sistemas de medição.

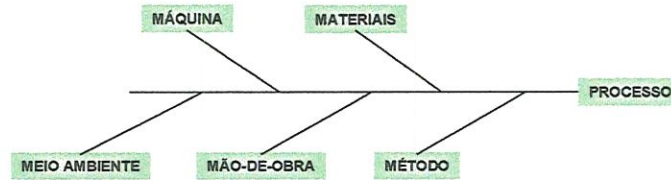


FIGURA A2.2 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DO CONCEITO DE PROCESSO.

Pelo fato de haver variação em tudo na natureza, o objetivo de se produzir itens “iguais” jamais poderá ser alcançado, pois por melhor que seja o processo produtivo, ele sempre apresentará variação, e por conseguinte, o produto final também. Todo o processo possui um certo grau de variabilidade, independente dos cuidados com a sua concepção e operação. Isto ocorre porque nenhum dos elementos ou fatores que compõem um processo é completamente estável ao longo do tempo. Mesmo sob condições ideais, os elementos e o produto final estão sujeitos à variações. Existem dois tipos de variações, que podem ser distinguidas por alterações **comuns** ou aleatórias (provocadas por causas naturais ao processo que determinam uma distribuição característica ou seguem um padrão típico), ou por alterações **especiais** ou anormais (provocadas por causas estranhas, imprevisíveis às variações naturais do processo).

Quando a distribuição característica de variação do processo se altera ao longo do tempo, fazendo com que o mesmo torne-se imprevisível, diz-se que ele está **fora do controle**. Com isso, não se consegue efetuar o planejamento com base nos resultados do mesmo e nem realizar análises mais sofisticadas sobre as causas comuns do processo, visando sua melhoria contínua, pois estas estão encobertas pelos efeitos das causas especiais. Por outro lado, tais causas podem ser facilmente detectáveis, desde que se saiba quando elas estarão presentes no processo, para que alguém experiente faça uma rápida investigação a fim de isolá-las do mesmo.

O processo estará **sob controle** quando for possível prever o seu comportamento, e portanto planejar com base nos resultados, pois sua distribuição característica de variação permanece inalterada ao longo do tempo. Porém, as causas comuns não são facilmente detectáveis. Se desejarmos melhorar o processo, isto só será possível se modificarmos sua própria natureza, o que depende de uma investigação profunda das causas comuns, combinando-se o conhecimento tecnológico com o uso de técnicas estatísticas mais sofisticadas.

A figura A2.3 ilustra tais comportamentos.

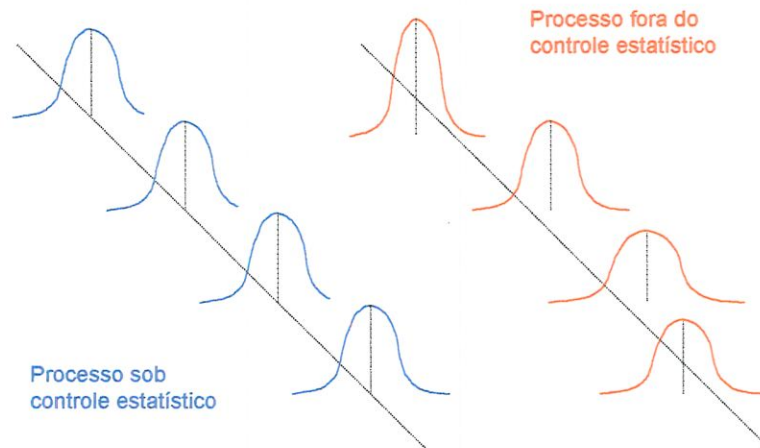


FIGURA A2.3 – COMPORTAMENTO DE UM PROCESSO SOB CONTROLE E FORA DE CONTROLE ESTATÍSTICO.

A tabela A2.1 resume os conceitos apresentados.

TABELA A2.1 – RESUMO DAS DIFERENÇAS ENTRE VARIAÇÃO COMUM E ESPECIAL.

Tipo de variação existente	Estado do processo	Causa da variação	Padrão do processo é previsível	Ação adequada	Estratégia de gerenciamento
Comum	Sob controle	Inúmeras, inerentes ao processo	Sim. Geralmente histograma Normal	Reduzir variação (em geral é mais complexo)	Manter o padrão e investigar como reduzir variação
Especial	Fora de controle	Específica, identificável	Não	Eliminar causa (em geral é solucionado no local)	Identificar e agir sobre as causas especiais para estabilizar o processo

2.1. Gráfico de Controle

Para que as ações corretivas no processo tenham sucesso, é necessário que toda vez que as medidas tiverem que ser encaminhadas, estas devem estar sempre dirigidas à causa e não ao sintoma, pois não sendo assim, as causas não desaparecerão, voltando a afetar o processo a curto prazo. Constatar problemas sem fazer nada gera perda de tempo e dinheiro. As ações devem ter como objetivo diminuir as variações comuns e/ou centrar o processo para torná-lo capaz de atender às especificações do projeto. Desta forma, a maneira mais eficaz de controlar um processo é agir primeiro nas causas **especiais** que

afetam seu padrão natural de desempenho, mantendo o processo sob controle estatístico. Feito isso, deve-se avaliar se a variação **natural** do processo satisfaz às especificações, buscando então ações corretivas para torná-lo capaz, caso o padrão do processo não consiga atendê-la.

O processo de fabricação é avaliado através da **aptidão** do processo ou da máquina em se fabricar determinados componentes dentro dos limites especificados. Convenciona-se que o processo ou o equipamento seja capaz de produzir peças, de tal forma que 99,73% das peças produzidas caiam dentro das especificações, ou seja, estejam dentro do intervalo de valores mais ou menos 3 vezes o desvio padrão^{iv}.

Assim, um processo é dito sob controle se a distribuição for Normal e estável (média e desvio padrão se manterem constantes ao longo do tempo), como mostra a figura A2.4.

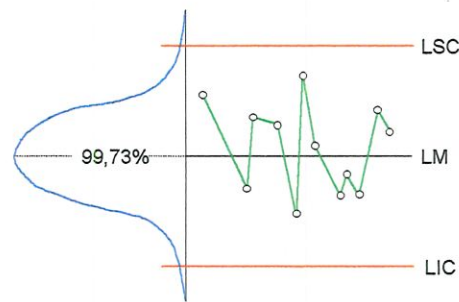


FIGURA A2.4 – PRINCÍPIO DO GRÁFICO DE CONTROLE

Na figura A2.4, a média do processo é indicada pela Linha Média (LM). Geralmente, a média mais 3 vezes o desvio padrão define o Limite Superior de Controle (LSC) e a média menos 3 vezes o desvio padrão define o Limite Inferior de Controle (LIC). A chance de um ponto cair fora desta faixa é 0,27% e se isto ocorrer, é provável que este ponto tenha vindo de uma outra distribuição, diferente do padrão do processo, indicando que o padrão original mudou e o processo está fora de controle. Assim, uma causa especial está agindo e deve ser investigada, identificada e eliminada. Além disso, ações preventivas devem ser tomadas no sentido de evitar nova ocorrência desta e com isto estaremos diminuindo a incidência de

^{iv} Em função do desvio padrão, outros valores podem ser obtidos, dependendo da porcentagem de peças dentro dos limites especificados [NOVASKI (1994)]:

Limites	% de Pontos	Limites	% de Pontos
$LM \pm 0,67 \cdot S_x$	50,00%	$LM \pm 2,57 \cdot S_x$	99,00%
$LM \pm 1,00 \cdot S_x$	68,26%	$LM \pm 3,00 \cdot S_x$	99,73%
$LM \pm 1,96 \cdot S_x$	95,00%	$LM \pm 3,09 \cdot S_x$	99,80%
$LM \pm 2,00 \cdot S_x$	95,46%	$LM \pm 4,00 \cdot S_x$	99,99%

causas especiais sobre o processo, de tal forma que estaremos trabalhando dentro da filosofia proposta de melhoria contínua.

Os limites de controle e especificação não devem ser confundidos. Os primeiros representam o padrão natural do comportamento do processo e são calculados a partir dos dados do próprio processo. Os outros representam o padrão desejado para o processo e são normalmente estipulados pela Engenharia de produto, normas técnicas, leis, etc.

Para a aplicação dos gráficos de controle, deve-se inicialmente determinar o *padrão natural do processo, definindo os limites de controle os quais ainda não são conhecidos*. A **Carta de Controle** (figura A2.5) ajuda a saber se o processo está sofrendo influências de causas especiais ou não, permitindo assim que se possa investigar o processo no momento em que estas estiverem agindo e então eliminá-las. Recomenda-se que isto seja feito com pelo menos 25 amostras (de 5 peças cada) do processo.

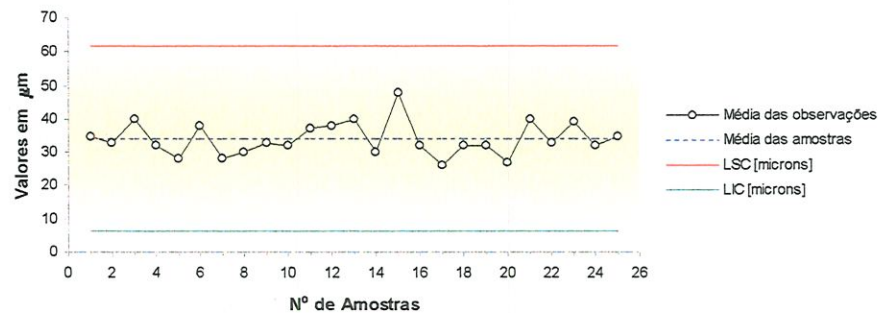


FIGURA A2.5 – CARTA DE CONTROLE

A partir da análise gráfica, identificar e eliminar as eventuais causas de falta de controle até obter os limites que representam um processo estável, sob controle. Estes limites deverão ser usados na manutenção do estado de controle do processo ao longo do tempo, e revisados se necessário.

O princípio da carta de controle baseia-se no fato de que num processo sob controle, os valores médios das dimensões das amostras se encontram na faixa entre os Limites Superior (LSC) e Inferior (LIC), *determinados a partir dos dados do processo e cálculos estatísticos simples*. Os limites são calculados como se segue:

$$LSC = \bar{\bar{X}} + A_2 \cdot \bar{T}_A \quad \text{e} \quad LIC = \bar{\bar{X}} - A_2 \cdot \bar{T}_A \quad \text{onde:}$$

$\bar{\bar{X}}$: média das médias das amostras (\bar{X} : média da amostra).

A_2 : valor tabelado, conforme tabela A2.2.

\bar{T}_A : valor médio das amplitudes das amostras.

TABELA A2.2 – CONSTANTES EM FUNÇÃO DO TAMANHO DAS AMOSTRAS

Tamanho das Amostras (n)	Constante A ₂	Tamanho das Amostras (n)	Constante A ₂
1	—	6	0,48
2	1,88	7	0,42
3	1,02	8	0,37
4	0,73	9	0,34
5	0,58	10	0,31

Os limites LSC e LIC calculados podem estar ou não dentro da faixa limitada pelo gráfico de controle ($\bar{X} \pm 3 \cdot S_x$), já que os valores alcançados estão relacionados diretamente com o comportamento do processo, a partir de amostras tomadas ao longo do tempo. Assim, a confiabilidade deve ser garantida para valores obtidos dentro destes limites.

A **aptidão** do processo anteriormente citada pode ser medida através dos Índices de Capacidade (Cp) e Capabilidade (Cpk)^v. Todavia, a avaliação da capacidade do processo (atender às especificações) é feita somente após o estado de controle ser atingido e pode ser exigido mudanças no processo visando manter o padrão deste em conformidade com as especificações. Caso isto seja feito, os limites de controle deverão ser revisados.

2.2. Análise da Aptidão do Processo

A avaliação da aptidão do processo é feita considerando a variação natural do mesmo comparada com a variação permitida pela especificação. A variação natural do processo é, normalmente definida como o tamanho da faixa correspondente à medida mais ou menos 3 desvios padrão ($\pm 3 \cdot S_x$) para uma confiabilidade de 99,73%, ou $6 \cdot S_x$ no total. Assim, a capacidade do processo (Cp) é a aptidão que o processo tem de produzir peças em que apenas 0,27% das peças sairão fora da tolerância ($t = LSE - LIE$), isto é:

$$Cp = t \geq 6 \cdot S_x \Rightarrow Cp = \frac{t}{6 \cdot S_x} \geq 1$$

^v Define-se capacidade do processo como a habilidade da máquina em executar de maneira eficiente um trabalho com um certo grau de exatidão, precisão (repetibilidade), reprodutibilidade, e estabilidade [BLACK (1998)].

Convenciona-se que um processo é totalmente capaz quando $LSE - LIE \geq 8 \cdot S_x$ (99,99%).

Assim: $C_p \geq 8/6 = 1,33$

Somente a determinação de C_p não é suficiente para se definir o processo, pois não informa se o mesmo está em torno da média. Assim, define-se o índice de Capacidade do Processo (C_{pk}) por:

$$C_{pk} = \min \left(\frac{LSE - \bar{X}}{3 \cdot S_x}; \frac{\bar{X} - LIE}{3 \cdot S_x} \right)$$

A classificação dos processos quanto ao índice de capacidade varia de empresa para empresa mas, em geral, os processos podem ser classificados da seguinte forma:

TABELA A2.3 – CLASSIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE CAPABILIDADE DO PROCESSO

Índice de Capacidade	Classificação
$C_{pk} < 1,0$	Incapaz
$1,0 \leq C_{pk} < 1,33$	Parcialmente capaz
$1,33 \leq C_{pk} < 2,0$	Capaz
$C_{pk} \geq 2,0$	Extremamente capaz

Seguindo o raciocínio anterior, o critério usado para se obter um processo confiável deve apresentar $C_{pk} \geq 1,33$. Isto significa dizer que o processo deve operar dentro de no máximo $1/1,33 = 75\%$ da tolerância. Então tem-se:

$$\bar{X} + 4 \cdot S_x \leq LSE \quad \text{e} \quad \bar{X} - 4 \cdot S_x \geq LIE$$

Resumindo:

Os *Limites Especificados* (LSE e LIE) representam aquilo que se exige no projeto, para que o produto possa atender à finalidade para a qual é desejado. Os *Limites de Controle* (LSC e LIC) resultam do processo de fabricação empregado e refletem aquilo que o processo é capaz de realizar. A *Capacidade do Processo* (C_p) nos indica que o processo é capaz de produzir as peças dentro da tolerância especificada. A *Capabilidade do Processo* (C_{pk}) indica se há necessidade de se ajustar a média do processo ou se reduzir o desvio padrão – indica se os valores estão concentrados em torno da média.

2.3. Análise do Sistema de Medição

Para que o estudo estatístico tenha resultados confiáveis, é necessário que a coleta de dados seja feita de forma adequada. Os dados devem refletir a realidade dos fatos, pois é a partir deles que se faz as análises e delineia-se as ações corretivas e/ou preventivas (Apêndice 1). A quantificação do nível de variabilidade do produto final é obtida com auxílio de sistemas de medição. Este geralmente é constituído pelo instrumento de medição, operador, método de medição, e meio ambiente.

Todos os meios de medição, por mais avançados que pareçam ser, estão sujeitos à variações. Mesmo assim, raramente são efetuadas análises destas e suas conseqüências nas operações às quais as medições, e seus respectivos sistemas, se destinam. As fontes possíveis de variação dentro de um sistema de medição podem ser esquematizadas através da figura A2.6.



FIGURA A2.6 – FONTES DE VARIAÇÃO DENTRO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO

É importante salientar que cada observação de um processo contém a variação do próprio processo e mais a variação do sistema de medição. Conseqüentemente, para que se possa trabalhar com dados confiáveis, o conhecimento do grau de variação introduzido pelo sistema de medição deve ser devidamente quantificado, e caso seja necessário, diminuído. Assim, a avaliação do sistema de medição torna-se de fundamental importância, pois é a partir desta que podemos decidir sobre sua utilização.

A seguir, serão apresentados alguns conceitos envolvidos nos métodos de análise do sistema de medição, de tal forma que a aplicação deste seja compreendida com maior facilidade.

2.3.1. Exatidão

Exatidão ou *Acuracidade* (*accuracy* em inglês) é a diferença entre a média observada de várias medidas numa mesma amostra para uma determinada característica, e o “valor real” desta. A amostra neste contexto significa por exemplo a mesma peça quando se estuda a característica de um produto, ou um mesmo ajuste quando se estuda um parâmetro do processo. Este “valor real” pode ser conhecido ou estimado através da média de várias medições nesta mesma amostra, feitas com o melhor instrumento disponível. Normalmente, baixas performances deste parâmetro estão relacionadas ao desgaste do instrumento, dispositivos de fixação inadequados, problemas de calibração, etc.

2.3.2. Precisão

Precisão representa o desvio padrão de valores medidos na mesma amostra, várias vezes, sob as mesmas condições (operador, instrumento, método, etc.). Assim, exatidão representa uma medida de posição e precisão representa uma medida de dispersão.

2.3.3. Repetibilidade

Repetibilidade é a capacidade de um sistema de medição para repetir uma medida na mesma amostra, diversas vezes (uma após a outra), usando as mesmas condições de medição, ou seja, é a variação obtida quando um mesmo operador usando um mesmo instrumento, mede a mesma característica de uma mesma amostra, várias vezes. Devemos observar que existe relação direta entre repetibilidade e precisão, pois ambos representam conceitos associados à dispersão do instrumento. Não há uma regra básica para a repetibilidade, visto que ela pode estar definida em diferentes intervalos de distribuição, como 99,7% ($6 \cdot S_x$), 99% ($5,15 \cdot S_x$), ou ainda 95% ($4 \cdot S_x$) por exemplo.

2.3.4. Reprodutibilidade

Reprodutibilidade é a variação adicional observada quando diversos operadores usam o mesmo instrumento para medir uma mesma amostra.

2.4. Evolução dos Métodos de Controle da Qualidade

Uma das formas comuns de monitoramento da qualidade é a inspeção do produto final ou mesmo em etapas intermediárias do processo. A tabela A2.4 mostra o quadro comparativo entre a inspeção tradicional, o CEP e a inspeção automatizada proposta por este trabalho.

TABELA A2.4 – QUADRO COMPARATIVO ENTRE CEP, INSPEÇÃO TRADICIONAL E AUTOMATIZADA.

	Inspeção Tradicional	CEP	Inspeção Automatizada
Sistema	Controle do produto	Controle do processo	Controle do produto e do processo
Objetivo do sistema	Detectar defeito	Evitar defeito	Detectar e evitar defeito
Quem controla	Inspetor de qualidade	Operador	Máquina
Padrão de controle	Especificação	Limites naturais do processo	Especificação
Análise da variação	Não tem	Técnicas estatísticas	Desgaste da ferramenta
Ação	Rejeitar ou retrabalhar	Corrigir o processo	Rejeitar ou retrabalhar e corrigir o processo
Responsabilidade pela qualidade	Departamento de controle de qualidade	Todos os envolvidos	Todos os envolvidos

O CEP fornece recursos no sentido de melhoria efetiva do processo, possibilitando um melhor conhecimento deste, de tal forma que permitirá uma sólida base para evolução em direção ao enfoque preventivo fornecido durante a fase de desenvolvimento do produto. Ele deve estar ligado a um planejamento estratégico para a qualidade e deve funcionar dentro da filosofia de melhoria contínua.

O trabalho em questão utiliza-se de ambas as técnicas como subsídios, visando a automatização completa do sistema de inspeção e controle do produto com auxílio de técnicas de monitoramento por emissão acústica, dispensando a análise estatística freqüente das peças confeccionadas numa máquina ferramenta CNC. Além disso, o controle efetivo do processo de medição é efetuado com auxílio das funções inteligentes.