

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial

Laboratório de Metrologia e Automatização

Departamento de Engenharia Mecânica

**“ESTAÇÃO DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS NA
PRODUÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS – METODOLOGIA DE
ESPECIFICAÇÃO”**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção o
Grau de Mestre em Engenharia

Luís Guilherme Gigo

Florianópolis, 03 de novembro de 1999

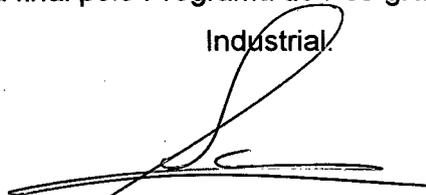
“ESTAÇÃO DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS NA PRODUÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS – METODOLOGIA DE ESPECIFICAÇÃO”

LUÍS GUILHERME GIGO

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de

“MESTRE EM METROLOGIA”

e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e
Industrial.



Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing.

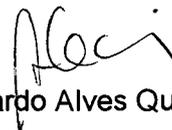
ORIENTADOR



Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.

COORDENADOR DO CURSO DE MESTRADO EM METROLOGIA INDUSTRIAL E CIENTÍFICA

Banca Examinadora:



Prof. Abelardo Alves Queiroz, Ph. D.



Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.



Prof. André Roberto de Sousa, M. Eng.

*Este trabalho é dedicado às pessoas que
amo e que me amparam, dia após dia,
para que alcance meus objetivos:
Wladya, Natasha e Igor*

AGRADECIMENTOS

- Ao maior **MESTRE** de todos - "**DEUS**".
- Ao CTA – Centro Técnico Aeroespacial, pela oportunidade em realizar este programa de mestrado.
- À UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, por propiciar a infra-estrutura e o corpo docente, imprescindíveis à consecução.
- À CAPES pelo financiamento e incentivo ao Programa de Mestrado de Metrologia Científica e Industrial da UFSC.
- À Wladya, esposa, companheira, paciente nas horas difíceis e mãe dedicada, que sempre está presente em todos os momentos de minha vida.
- Aos meus pais e irmão que sempre apoiaram minhas decisões.
- À Natasha e ao Igor, que tão compreensivos ao me ofertarem carinho e amor, foram capazes de me proporcionar forte incentivo para que eu nunca desistisse do meu objetivo maior: um futuro feliz para eles !
- A todos os familiares e amigos que sempre torceram pelo sucesso desta conquista.
- Aos colegas do Labmetro - Laboratório de Metrologia e Automatização, que juntos unidos por um mesmo objetivo, apoiaram e incentivaram a realização deste trabalho.
- Em especial, ao Orientador e Professor Carlos Alberto Schneider, pelo apoio, dedicação e incentivo durante os meses de execução do trabalho.
- Às empresas: Mercedes-Benz do Brasil S. A. e EMBRACO S. A. pela disponibilidade e apoio durante a execução deste trabalho.
- À Fundação CERTI pelo valoroso auxílio.
- A todos que direta ou indiretamente contribuíram para o sucesso deste trabalho.

RESUMO

A qualidade dos produtos fabricados está intrinsecamente relacionada com a qualidade dos resultados que são utilizados para se analisar um processo (relacionada com Controle Estatístico de Processo - CEP) e um produto (relacionada com inspeção 100%). O conceito moderno de garantia da qualidade pressupõe que qualidade não deve ser controlada, mas sim projetada. Se for aceito que o desenvolvimento de um produto e o processo de garantia da qualidade são análogos, esse dogma pode ser usado como regra das ações no campo da metrologia de chão de fábrica.

Através de evidências concretas, constatou-se que, hoje em dia, não existe uma regra clara e que definida os parâmetros a serem considerados na especificação de uma estação de medição por coordenadas a ser incorporada ao sistema de manufatura. Baseando-se nessa afirmação e no exposto no parágrafo anterior, esse trabalho propõe a aplicação de uma metodologia de especificação, que tem como principal diretriz a técnica de desdobramento da função qualidade (*Quality Function Deployment – QFD*).

Esse método viabiliza uma análise criteriosa do comportamento do processo de manufatura, das características do mensurando e dos custos envolvidos, indicando assim, a necessidade ou não de se incorporar um sofisticado sistema de medição à esse processo, além de defini-lo adequadamente.

A ferramenta mencionada contribui para que os critérios operacionais e econômicos, considerados importantes pelo sistema de manufatura, sejam explicitados de maneira clara, objetiva e concisa; e serve como base para a montagem de um caderno de encargos que será encaminhado aos fornecedores de sistemas de medição que se adequem àqueles critérios. Isso irá contribuir para que as incertezas do processo sejam minimizadas, bem como para a redução de custos, que podem variar de (0,5 a 5) MUS\$, dependendo do sistema de medição a ser adquirido.

Palavras-chaves:

CMM, especificação de sistemas de medição, análise de sistema de manufatura, QFD, critérios técnicos e econômicos, ambiente de manufatura, chão de fábrica.

ABSTRACT

The quality of manufactured products depends largely on the quality of the measurement results used to decide corrective actions on the process (typically those related to SPC) and actions on the product (typically separation of non-conforming units by 100% inspection). The modern concept of quality assurance prescribes that quality should not be controlled, but it has to be built *by design*. If it is accepted that product development and quality assurance system development are analogous processes, this dogma can be used to guide the actions in the field of production metrology.

Unfortunately, this is not the case in the selection of measuring devices for the production environment. Today, there are no systematic procedures to determine the values of the parameters that define the adequability of a measuring system for a given quality assurance task. Indeed, most of them are chosen applying subjective procedures or even by the “*rule of thumb*”. In this sense, the selection of a CMM constitutes a particularly hard-to-solve problem, because of the large number of parameters that determine its metrological and operational behaviour.

In this work, it is proposed the application of a methodology based on the Quality Function Deployment technique (QFD). It'll assure that all customer needs are considered in a proper priority level in the measurement system selection process. By means of the proposed method, the CMM can be compared with other measuring devices. The QFD-matrix provides all the quantitative information needed to design the system, respecting customer needs. It will inform also the correlation among parameters, essential to adjust the system. On the other hand, if it is shown that the CMM embodies the best solution for the problem, several existing machines can be compared quantitatively. Thus, a recognised product design tool is used in the metrological design to achieve a nearly optimum measurement system selection. It will contribute to reduce the uncertainties of the process, minimising modifications or costly compromises, that can oscilate among (0,5 to 5) MUS\$. As it encourages the discussion within a simultaneous engineering environment, the needs of all customers will be considered during the selection procedure.

Key-words: *CMM, QFD, manufacturing environment, production metrology, specification methodology, technical and economical criteria, shopfloor metrology.*

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
GLOSSÁRIO DE TERMOS E DE ABREVIATURAS.....	x
CAPÍTULO 1 – TECNOLOGIA DE MEDIÇÃO NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS.....	1
1.1 ENFOQUES NA FABRICAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS.....	2
1.2 CONTROLE DA QUALIDADE NA FABRICAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS....	3
1.2.1 Processo de Inspeção para Controle da Qualidade de Peças Complexas.	3
1.2.2 Tecnologia de Medição por Coordenadas na Inspeção de Peças Complexas.....	4
1.3 SELEÇÃO DE UMA CMM PARA INSPEÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS.....	5
1.4 TRABALHO DE ESTUDO/PESQUISA.....	6
1.4.1 Demanda por uma Metodologia.....	6
1.4.2 Objetivo e Diretrizes.....	6
1.4.3 Resultados a Gerar.....	7
CAPÍTULO 2 – ANÁLISE DE FATOS E TÉCNICAS A CONSIDERAR NO DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA.....	8
2.1 FONTES POSSÍVEIS DE ERROS ASSOCIADAS AO RESULTADO DA MEDIÇÃO REALIZADA POR CMM INCORPORADA AO CHÃO DE FÁBRICA.....	8
2.1.1 Sistema de Medição.....	9
2.1.2 Ambiente de Fabricação.....	11
2.1.3 Mensurando.....	13
2.1.4 Estratégia de Medição.....	14
2.1.5 Operador.....	14
2.1.6 Expressão da Incerteza de Medição.....	14
2.2 ASPECTOS RELATIVOS À LOCALIZAÇÃO DA CMM NO CHÃO DE FÁBRICA.....	15
2.2.1 Conjugada à Máquina-Ferramenta CNC.....	16
2.2.2 Integrada ao Processo de Fabricação.....	17
2.2.3 Próxima ao Processo de Fabricação.....	17
2.3 ASPECTOS DO PLANEJAMENTO DA QUALIDADE NA INSPEÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS.....	18
2.3.1 Planejamento e Controle do Processo.....	18
2.3.2 Metrologia na Fabricação.....	20
2.3.3 Calibração de uma Estação de Medição por Coordenadas Incorporada ao Sistema de Manufatura.....	23
2.4 QUESTIONÁRIO PARA SUBSIDIAR A ESPECIFICAÇÃO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO INCORPORADO AO CHÃO DE FÁBRICA (QSE – SMC)	24

2.5 FERRAMENTAS DE CONTROLE DA PRODUÇÃO E DE ESPECIFICAÇÃO DE SISTEMAS	26
2.5.1 Método para Solução de Problemas.....	26
2.5.2 Ciclo PDCA.....	27
2.5.3 Cartas de Controle para Variáveis.....	27
2.5.4 Capabilidade do Processo.....	28
2.5.5 Desdobramento da Função Qualidade – QFD	28
CAPÍTULO 3 – CUSTOS ASSOCIADOS À ESTAÇÃO DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS NA FABRICAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS...	30
3.1 CUSTOS OPERACIONAIS DA QUALIDADE.....	30
3.2 CATEGORIAS DE CUSTOS DA QUALIDADE E SEUS RELACIONAMENTOS.	31
3.2.1 Custos de Controle.....	31
3.2.2 Custos de Falha de Controle.....	31
3.2.3 Relações entre as Categorias de Custos.....	32
3.3 ELEMENTOS DE CUSTOS DE UMA ESTAÇÃO DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS INCORPORADA AO CHÃO DE FÁBRICA.....	33
3.3.1 Custos Fixos.....	34
3.3.2 Aspectos Econômicos a Serem Considerados.....	35
3.3.3 Custos Variáveis.....	36
3.3.4 Análise Comparativa de Custos: CMM x Sistema de Medição Dedicado....	36
3.4 BENEFÍCIOS CONSEQÜENTES DO CONTROLE DO PROCESSO.....	40
3.4.1 Benefícios ao Sistema de Manufatura.....	40
3.4.2 Cuidados na Seleção de CMM para Controle de Processo.....	42
3.4.3 Retorno do Investimento (ROI).....	42
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA DE ESPECIFICAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS.....	44
4.1 DIRETRIZES PARA ESTABELECIMENTO DA METODOLOGIA.....	44
4.2 PRÉ-AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	44
4.2.1 Processo de Fabricação Instalado.....	45
4.2.2 Processo de Fabricação em Projeto.....	46
4.3 METODOLOGIA DE ESPECIFICAÇÃO PROPOSTA.....	46
4.3.1 Fluxograma.....	46
4.3.2 Quadro de Atividades.....	46
4.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	48
4.5 PROBLEMA DA MEDIÇÃO.....	49
4.6 ELABORAÇÃO DO CADERNO DE ENCARGOS.....	49
4.6.1 Critérios Técnicos Obrigatórios.....	50
4.6.2 Critérios Técnicos Desejáveis.....	51
4.6.3 Critérios Econômicos.....	51
4.6.4 Consolidação Qualitativa e Quantitativa dos Critérios Técnicos e Econômicos.....	52
4.6.5 Caderno de Encargos.....	56
4.7 COLETA DE PROPOSTAS.....	58
4.8 SISTEMA DE MEDIÇÃO ADEQUADO AO PROCESSO.....	58

4.9 INCORPORAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO NO SISTEMA DE MANUFATURA.....	60
CAPÍTULO 5 – ESTUDO DE CASOS E VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA.....	61
5.1 FASES DO DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA.....	61
5.2 ESTUDO DE CASOS.....	62
5.2.1 Caso Simulado – CS.....	62
5.2.2 Caso EMBRACO – CE.....	65
5.2.3 Caso MBB – CMB.....	66
5.3 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA.....	68
5.3.1 Formulação do Problema.....	68
5.3.2 O Problema da Medição.....	69
5.3.3 Elaboração do Caderno de Encargos.....	70
5.3.4 Coleta das Propostas.....	74
5.3.5 Definição do Sistema de Medição.....	74
5.3.6 Implantação do Sistema de Medição no Sistema de Manufatura.....	75
5.4 ASPECTOS DA VALIDAÇÃO.....	76
CAPÍTULO 6 – CONTRIBUIÇÕES DA METODOLOGIA À SOLUÇÃO DO DESAFIO DA FABRICAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS.....	78
6.1 BENEFÍCIOS TECNOLÓGICOS DECORRETES DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	78
6.2 BENEFÍCIOS ECONÔMICOS DECORRETES DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	79
6.3 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS.....	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

GLOSSÁRIO DE TERMOS E DE ABREVIATURAS

Nº	TERMO	SIGNIFICADO
1	AHP	- Analytic Hierarchy Process – Processo Hierárquico Analítico;
2	CAA	- Computer Aided Accuracy – Exatidão assistida por computador;
3	CAD	- Computer Aided Design – Projeto assistido por computador;
4	Capabilidade	- Faixa total da variação inerente a um processo estável ($6\hat{\sigma}_{\bar{R}}/d_2$);
5	CEP	- Controle Estatístico de Processo;
6	CIM	- Computer Integrated Manufacturing – Manufatura integrada pelo computador;
7	CMM	- Coordinate Measuring Machine – Máquina de Medir por coordenadas;
8	CNC	- Computerized Numerical Control – Comando numérico computadorizado;
9	COQ	- Cost of Quality – Custo da Qualidade;
10	Conformidade	- Atendimento a requisitos específicos;
11	Cp	- Índice de capacidade de um processo estável, geralmente definido como: $\frac{LSE - LIE}{6\hat{\sigma}_{\bar{R}}/d_2}$;
12	Cp _K	- Índice de capacidade para um processo estável, geralmente definido como o mínimo entre CPU e CPL;
13	CPL	- Índice inferior de capacidade, geralmente definido como: $\frac{\bar{\bar{X}} - LIE}{6\hat{\sigma}_{\bar{R}}/d_2}$;
14	CPU	- Índice superior de capacidade, geralmente definido como: $\frac{LSE - \bar{\bar{X}}}{6\hat{\sigma}_{\bar{R}}/d_2}$;
15	Defeito	- Não atendimento de um requisito de uso pretendido ou de uma expectativa razoável, inclusive quanto à segurança;
16	d ₂	- Um divisor de \bar{R} utilizado para estimar o desvio padrão do processo;

- 17 FMC - Flexible Manufacturing Cell – Célula flexível de manufatura;
- 18 FMS - Flexible Manufacturing Systems – Sistema flexível de manufatura;
- 19 Lead time - Tempo destinado à execução de determinada tarefa;
- 20 LIE - Limite inferior de especificação de engenharia;
- 21 LSE - Limite superior de especificação de engenharia;
- 22 Pp - Índice de desempenho, geralmente definido como:

$$\frac{LSE - LIE}{6\hat{\sigma}_{\bar{R}}/d_2};$$
- 23 Ppk - Índice de desempenho, mínimo entre:

$$\frac{LSE - \bar{\bar{X}}}{6\hat{\sigma}_{\bar{R}}/d_2} \text{ e } \frac{\bar{\bar{X}} - LIE}{6\hat{\sigma}_{\bar{R}}/d_2};$$
- 24 Produtividade - Número de unidades produzidas por unidade de insumo;
- 25 PTB - Physikalisch-Technische Bundesanstalt – Instituto Nacional Técnico de Física
- 26 QFD - Quality Function Deployment – Desdobramento da função qualidade;
- 27 Retrabalho - Ação implementada sobre um produto não-conforme de modo que ele atenda as especificações;
- 28 ROI - Return Of Investment – Retorno do capital investido;
- 29 \bar{R} - A amplitude média de uma série de subgrupos de tamanhos constantes;
- 30 Set-up - Arranjo, tempo de troca ou mudança;
- 31 $\bar{\bar{X}}$ - Média dos valores de um subgrupo;
- 32 $\bar{\bar{\bar{X}}}$ - Média das médias dos valores de um subgrupo;
- 33 $\hat{\sigma}$ - Uma estimativa do desvio padrão de uma característica do processo.

CAPÍTULO 1

TECNOLOGIA DE MEDIÇÃO NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS

As inovações tecnológicas dos processos de fabricação, especialmente em células ou sistemas flexíveis de manufatura (FMC/FMS), viabilizaram significativamente o emprego de peças complexas em produtos de diferentes áreas, destacando-se os setores automotivo, aeronáutico e eletro-eletrônico /1/.

As peças complexas têm como principais características (o não atendimento a uma delas pode implicar em grandes prejuízos) a multiplicidade geométrica com suas múltiplas tolerâncias e a capacidade de agregarem funções de diversos componentes numa só estrutura, tomando-as de alto valor. Blocos de motores, caixas de câmbio, discos de freio, etc. (fig.1.1) são exemplos de peças complexas do setor automotivo.

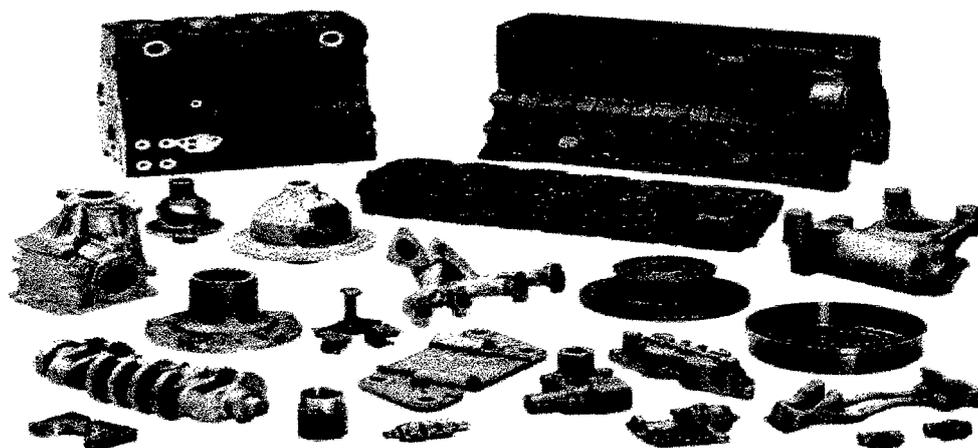


Figura 1.1 – Exemplos de peças complexas do setor automotivo /2/

No setor aeronáutico, peças complexas fazem parte da estrutura dos motores e dos equipamentos que compõem os sistemas das aeronaves, das espaçonaves e dos foguetes, agregando funções que propiciam, dentre outras vantagens, a diminuição de suas massas e o aumento do espaço disponível para transporte de passageiros e de cargas.

Segundo Bosch /2/,

“A automatização das máquinas-ferramenta alavancou a indústria de peças complexas e criou a necessidade de um sistema de medição mais rápido e flexível.”

A necessidade de adaptação à essa nova realidade tecnológica, colocou as organizações diante de um novo desafio, ou seja, garantir qualidade e produtividade desde o projeto até a entrega do produto ao cliente /3, 4/.

1.1 ENFOQUES NA FABRICAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS

Inovações tecnológicas estabelecem um conjunto de mudanças tanto nos sistemas de manufatura responsáveis pela fabricação, como na definição do foco das indústrias em busca da maior relação benefício-custo possível para seus produtos/serviços. O resultado de enquetes realizadas em grandes indústrias alemãs /5/ (fig. 1.2) indica a garantia da satisfação dos clientes, o aumento da qualidade e a redução de custos como principais diretrizes de seus novos projetos, refletindo sobre os aspectos de demanda na fabricação de peças complexas.

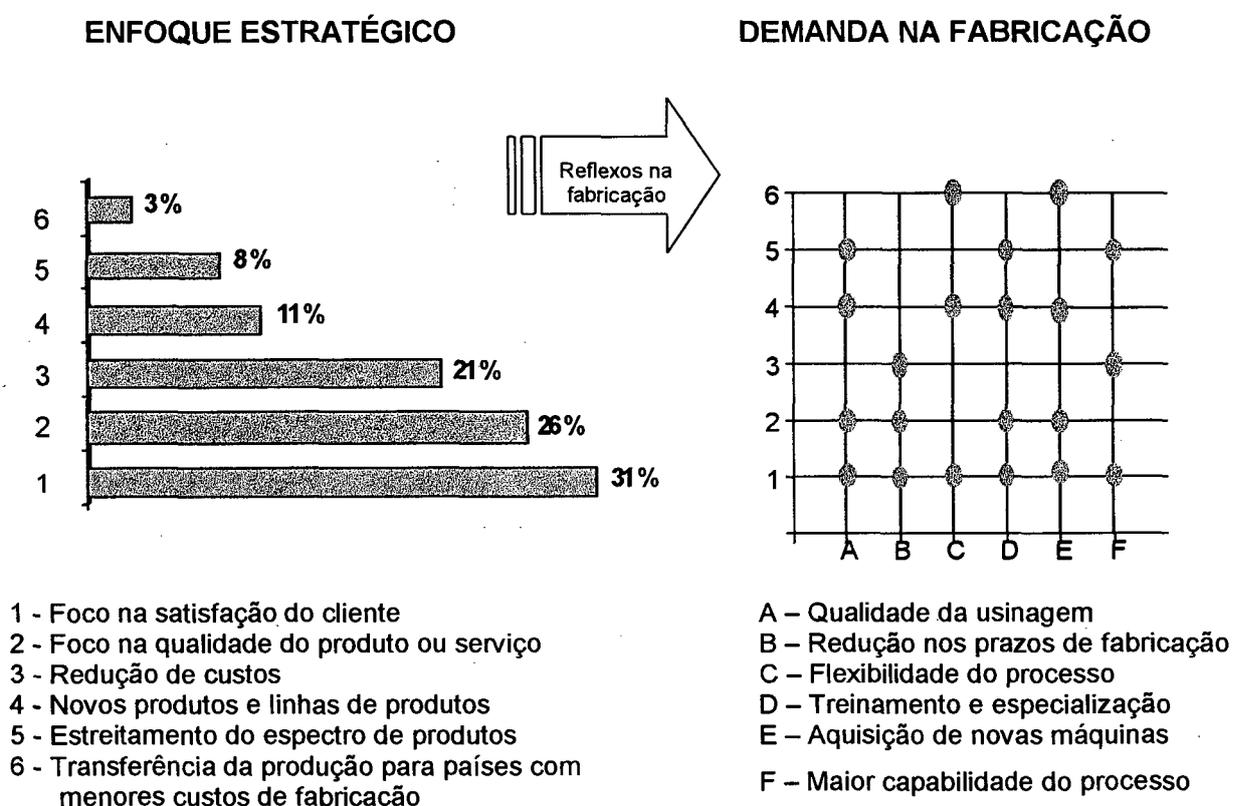


Figura 1.2 – Principais enfoques das indústrias alemãs /5/ e respectivos reflexos na fabricação

Analisando-se os valores relativos dos enfoques estratégicos e a abordagem feita pelas referências /3, 6, 7/, nota-se que, os reflexos na fabricação de peças complexas podem ser caracterizados por:

- Melhoria da qualidade das peças fabricadas, em função das novas tecnologias de usinagem;
- Melhor capacitação, propiciada aos colaboradores das empresas, através de treinamentos específicos;
- Automatização das máquinas, facilitando as operações e melhorando a capacidade do processo; e
- Controle do processo, propiciado pelo emprego de ferramentas estatísticas e equipamentos capazes de conduzirem à rápida análise e à interpretação dos dados.

1.2 CONTROLE DA QUALIDADE NA FABRICAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS

Os objetivos da qualidade devem ser mensuráveis, abrangentes e econômicos /4, 8/, buscando o ponto ideal entre o desempenho na fabricação das peças (maior quantidade, no menor intervalo de tempo com o mínimo de defeitos) e os custos associados à manutenção dos níveis de controle estabelecidos pela política da empresa. Tais aspectos, importantes na pré-avaliação de um processo, servirão como diretrizes à definição de como, quando, onde e porque será feita a inspeção das peças fabricadas.

O monitoramento da qualidade poderá depender das ferramentas utilizadas (carta de controle por variáveis /9 - 12/, por exemplo) e das tecnologias disponíveis nos sistemas de medição.

1.2.1 Processo de Inspeção para Controle da Qualidade de Peças Complexas

Os pontos críticos de uma peça (assim caracterizados em função de sua complexidade e funcionalidade) devem ser inspecionados segundo a estratégia de medição proposta pelo controle da qualidade da empresa. Se o processo possui adequados índices de capacidade e alterações esporádicas são detectadas, possivelmente, não serão necessárias mudanças no sistema de monitoramento. Porém, se a capacidade é baixa e/ou os requisitos de desempenho determinam um controle mais rigoroso sobre o produto, deve-se conhecer as adequadas condições de uso dos sistemas de medição disponíveis no mercado, antes de serem adquiridos /12/ e incorporados ao sistema de manufatura.

Segundo Juran /8/, a ação sobre o processo é, geralmente, mais econômica, pois é feita para prevenir que haja variação nas características críticas do produto, mantendo a estabilidade dos resultados; e a ação sobre peças/produto é menos econômica, pois se restringe à detecção e à correção de falhas dos produtos fora de especificação.

Assim sendo, a tarefa de controlar a qualidade na fabricação de peças complexas deve ser cuidadosamente planejada e estabelecida, a fim de que todos os fatores intervenientes

sejam considerados. Alguns, como as características de desempenho do processo, a quantidade de peças produzidas, os pontos críticos do sistema de manufatura, os custos com equipamentos e as condições do ambiente de produção (temperatura, umidade e vibração) devem ser analisados, antes de se decidir pelo sistema de medição, evitando-se um desperdício de capital e de esforços.

Se os efeitos dos fatores não são conhecidos, podem ocorrer erros nos resultados de medição. Esses, por sua vez, podem propagar para o estágio de pós-processamento (fig. 1.3), tomando imprevisíveis as ações corretivas (no processo ou no produto) e atingindo a qualidade do produto/serviço final /14/.

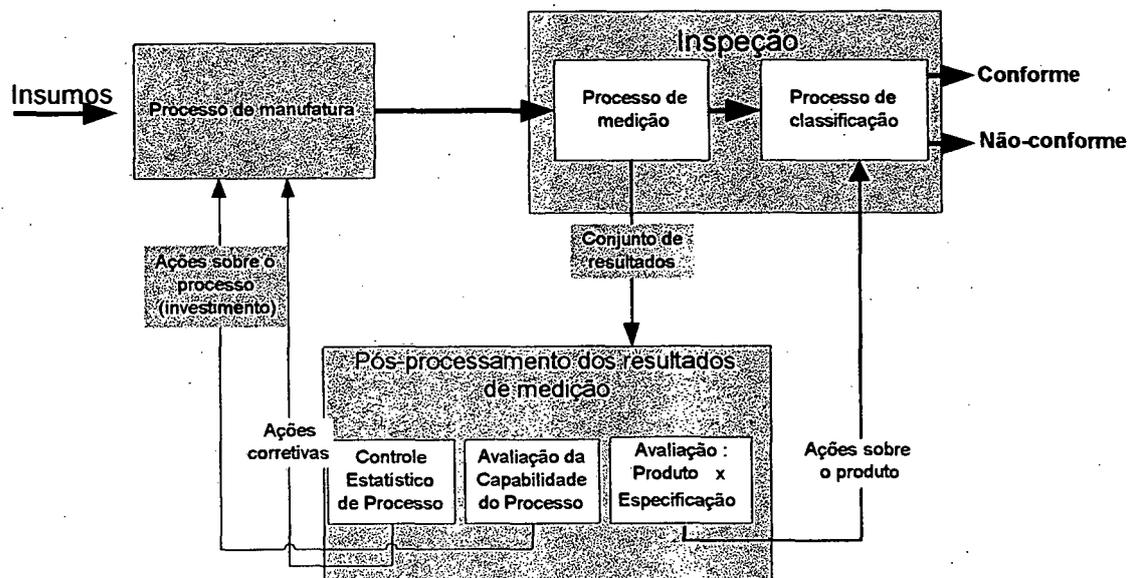


Figura 1.3 – Processo de inspeção para controle da qualidade na indústria /14/

Uma maneira de evitar os erros de pós-processamento é através de processos mais capazes; do uso de adequadas ferramentas de monitoramento; da substituição de sistemas convencionais de manufatura por sistemas flexíveis e com elevados níveis de produção, tais como Células Flexíveis de Manufatura (FMC), Linhas de Transferência ("Transfer Line"), Sistemas Flexíveis de Manufatura (FMS), dentre outros; e da utilização de sistemas de medição, quando necessários, que acompanhem esses avanços e sejam capazes de inspecionar o produto com eficiência, porém, mantendo a produtividade do processo /7, 15/.

1.2.2 Tecnologia de Medição por Coordenadas na Inspeção de Peças Complexas

As técnicas convencionais de inspeção dimensional não têm sido capazes de atender aos requisitos da qualidade exigidos por essas novas tecnologias de manufatura. Segundo Yau

e Menq /1/, exigem-se dispositivos que façam o controle dimensional com rapidez e com baixos e confiáveis níveis de erro, evitando “gargalos” na fabricação. A tecnologia de medição por coordenadas, vem sendo capaz de atender esses anseios, auferindo importantes benefícios /15/. Porém, constata-se que a seleção de um sistema de medição que incorpore tal tecnologia não é criteriosamente executada.

1.3 SELEÇÃO DE UMA CMM PARA INSPEÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS

Buscando desenvolver o tema proposto neste trabalho, voltando-o à realidade das empresas usuárias de Máquina de Medir por Coordenadas (CMM) no Brasil, foram feitas algumas constatações práticas da sistemática de especificação que vem sendo adotada por elas. Verificou-se que os requisitos de desempenho do sistema de medição, via de regra, são estabelecidos pelos próprios fornecedores ou pelas demandas prioritárias da indústria, sem que alguns parâmetros (do processo, do mensurando, etc.) tenham sido estudados e/ou determinados criteriosamente.

O fornecedor procura ressaltar aspectos positivos de seu produto, tais como velocidade de inspeção, incerteza de medição, vantagens sobre o concorrente direto, facilidades no pagamento, assistência técnica, etc., deixando de esclarecer as condições operacionais que deverão ser observadas para tanto, ou seja, aquelas capazes de garantir o desempenho previsto em catálogos (faixas de temperatura, de vibrações, etc.).

Já, na indústria, constatou-se que são estabelecidos “critérios”, muitas das vezes empíricos (fig.1.4) e sem abordar os aspectos técnicos e econômicos relevantes ao processo, onde o sistema de medição será incorporado.

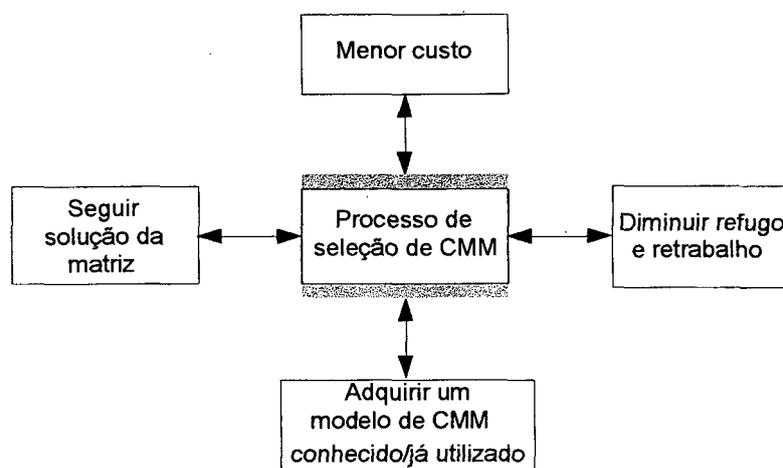


Figura 1.4 – “Critérios” de seleção de CMMs adotados por algumas indústrias brasileiras

1.4 TRABALHO DE ESTUDO/PESQUISA

A evolução dos sistemas de manufatura, fabricando peças complexas com tolerâncias mais estreitas de maneira rápida, exige, dependendo da capacidade do processo e de requisitos específicos, a incorporação de um sofisticado sistema de medição na inspeção daquelas. Esse último, deve ser rápido, ter boa exatidão e flexibilidade. A CMM, atualmente, é que melhor atende a esses requisitos, necessitando, no entanto, que seja adequadamente especificada, a fim de que os investimentos sejam efetivos.

Assim, a demanda por uma metodologia criteriosa e os custos para aquisição de um sistema de medição que incorpore a tecnologia de medição por coordenadas (pode variar de 0,5 a 5 MUS\$, dependendo do caso e da estrutura de apoio necessária) serviram como motivação para início das pesquisas e constatações deste trabalho, buscando gerar resultados proveitosos às indústrias brasileiras.

1.4.1 Demanda por uma Metodologia

Nos últimos anos, em função da instalação de indústrias multinacionais no parque brasileiro, sobretudo às pertencentes ao setor automobilístico (peças complexas), aumentou-se a demanda por processos de inspeção rápidos, flexíveis e eficientes. Sabendo-se que os investimentos relativos à incorporação de uma estação de medição por coordenadas ao sistema de manufatura, a qual garanta e possibilite a adequada inspeção das peças fabricadas /16 - 22/, são elevados, buscou-se desenvolver uma metodologia capaz de especificá-la, considerando os aspectos inerentes ao processo, ao mensurando, às condições do ambiente de fabricação, etc.

1.4.2 Objetivo e Diretrizes

Planejar, desenvolver e validar uma metodologia para especificar uma estação de medição por coordenadas adequada ao processo de fabricação de peças complexas. Para tanto, deverá ser capaz de adaptar-se ao caso analisado, ser de simples aplicação e fornecer os subsídios necessários a uma adequada decisão a ser tomada pelo setor responsável da empresa.

As diretrizes básicas à elaboração dessa metodologia são:

- Desenvolver uma seqüência lógica de atividades;
- Utilizar ferramentas da qualidade;
- Considerar critérios econômicos, operacionais e metrológicos;
- Contribuir com o desenvolvimento de um método criterioso de especificação; e
- Diminuir o tempo destinado à essa atividade.

1.4.3 Resultados a Gerar

Os resultados a serem gerados por este trabalho são:

- Metodologia criteriosa e adaptável ao processo analisado;
- “Checklist” para auxiliar a análise dos principais fatores intervenientes no processo;
- Estudo de casos em empresas que utilizam CMM para inspeção de peças complexas no chão de fábrica; e
- Material didático de consulta para o PósMCI.

Para isso, inicialmente, será apresentado um estudo dos principais aspectos metrológicos e operacionais a serem considerados na incorporação de uma estação de medição por coordenadas ao sistema de manufatura, seguido por uma análise dos fatores econômicos para, na seqüência, desenvolver-se a metodologia de especificação com sua respectiva validação.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DE FATOS E TÉCNICAS A CONSIDERAR NO DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA

A evolução da filosofia de controle da qualidade, passando da detecção de falhas à prevenção e à subsequente necessidade em se realimentar o processo de fabricação, tem impulsionado o uso das CMMs como sistemas de medição adequados à evolução das novas técnicas de fabricação e de inspeção. Essas máquinas podem ser incorporadas ao ambiente de manufatura, transferindo o controle da qualidade das salas de metrologia para o chão de fábrica /1, 23/. Nessa situação, ela inspeciona a peça, realimenta o processo e trata a informação para posterior interpretação e análise /17, 24/.

Esse capítulo analisa as fontes possíveis de erros a serem consideradas na inspeção realizada por CMM, define, para aplicação neste trabalho, as possíveis localizações do sistema de medição no chão de fábrica, aborda aspectos inerentes ao planejamento da qualidade e a algumas ferramentas importantes (CEP, método para solução de problemas, ciclo PDCA e função desdobramento da qualidade – QFD) para elaboração da metodologia de especificação.

2.1 FONTES POSSÍVEIS DE ERROS ASSOCIADAS AO RESULTADO DA MEDIÇÃO REALIZADA POR CMM INCORPORADA AO CHÃO DE FÁBRICA

A CMM possui diversos módulos e um elevado número de elementos móveis, que operando de forma integrada provocam erros no resultado da medição. Além dessas fontes de erros, inerentes ao sistema de medição, acrescentam-se outras (destacadas na figura 2.1), quando a máquina estiver incorporada ao sistema de manufatura /2, 24/.

Existe uma grande dificuldade em se quantificar, isoladamente, as contribuições de cada fonte de erro no processo de manufatura, em função de uma possível dependência entre elas. Porém, através da abordagem, feita na seqüência, das principais fontes de erros existentes no ambiente de fabricação, tem-se condições de conhecer alguns de seus efeitos e cuidados para minimizá-las durante a operação do sistema de medição.

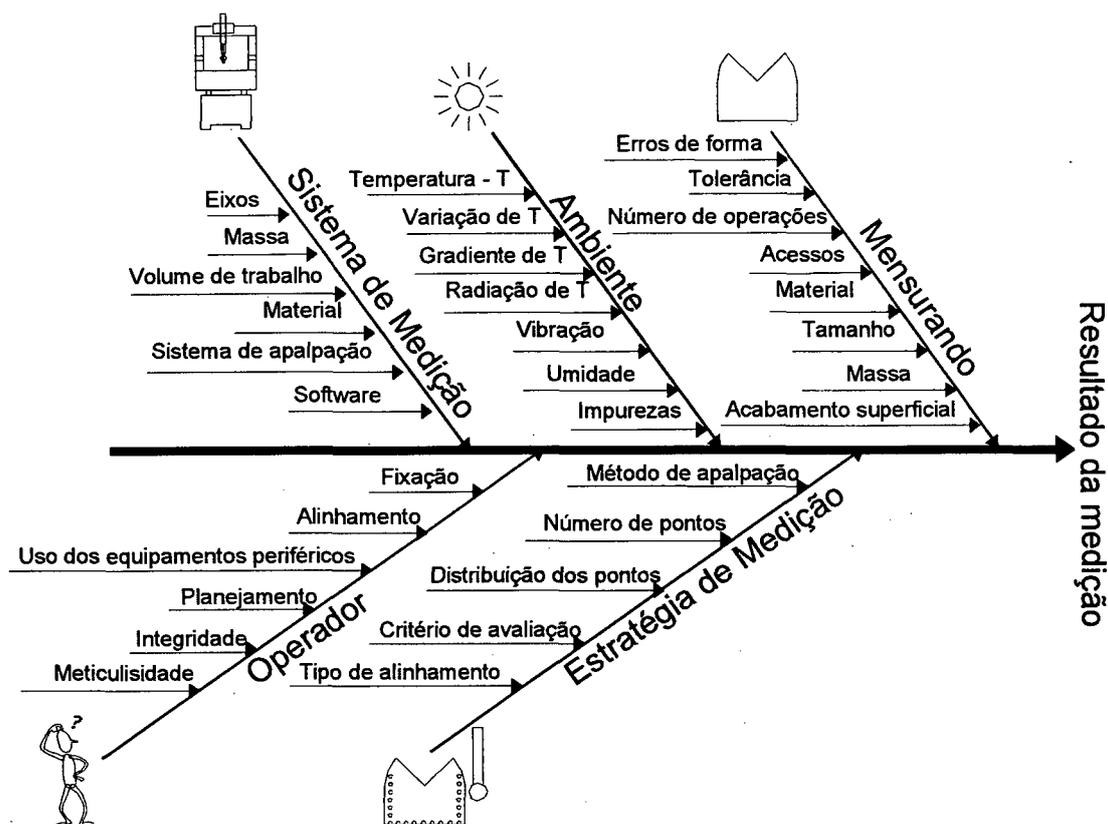


Figura 2.1 – Alguns fatores que influenciam nos resultados da medição por CMM /25, 26/

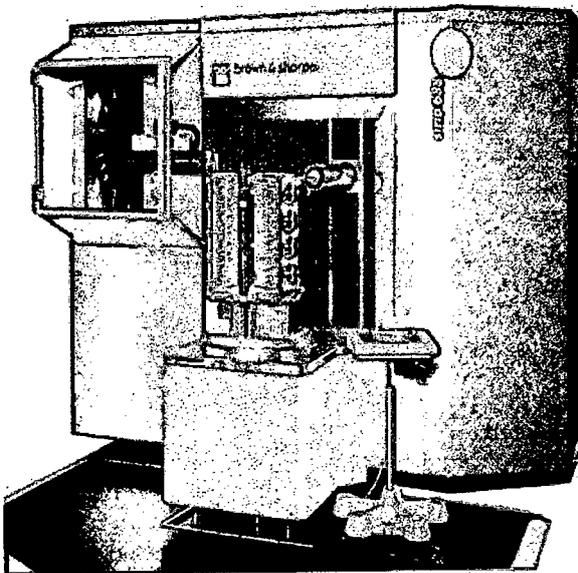
2.1.1 Sistema de Medição

Os investimentos em aquisição, em instalação, em operação, em calibração e em manutenção de um sistema de medição podem variar de acordo com a sua utilização e com as características de seus componentes básicos (sistema de suporte, sistema diretor, e sistema de controle).

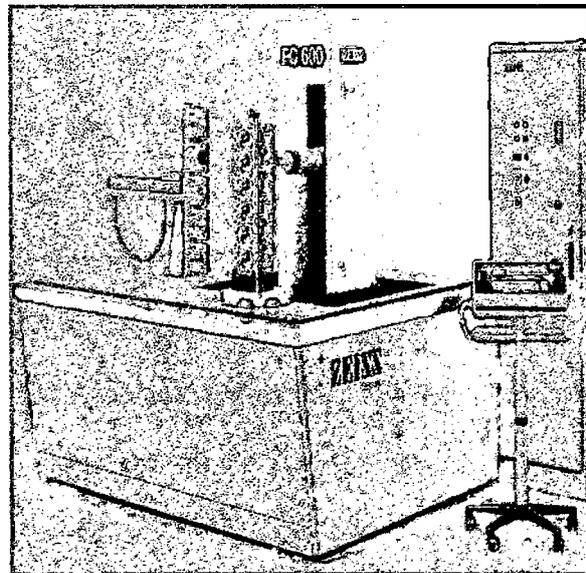
As principais fontes que provocam erros no resultado da medição são: características dos eixos, material das guias, imperfeições geométricas resultantes de sua fabricação, deformações elásticas e efeitos dinâmicos na definição dos elementos geométricos da CMM com seus vinte e um graus de liberdade (posição-1, retlineidade-2, rotacional-3 para cada eixo e outros 3 devido à perpendicularidade desses eixos), sistema para correção dos erros geométricos, deformação elástica dos componentes, quando a massa é deslocada, ajuste incorreto dos componentes e software de medição (“off-line”, aprendizado, CAD) /2/.

Para que as contribuições dessas fontes fossem as menores possíveis, as propriedades construtivas “ideais” de uma CMM seriam: elevada estabilidade dimensional, rigidez “infinita”, alta capacidade de amortecimento, menor massa possível, baixo coeficiente de expansão térmica e alta condutividade térmica. Sabendo-se que essas características construtivas, hoje, são “irreais”, ou seja, os atuais níveis tecnológicos não permitem que um sistema de medição possua rigidez “infinita” e massa “tendendo a zero”, procura-se amenizar os efeitos da “não idealidade construtiva” através de sistemas de compensação (utilizando-se softwares) /2/.

Existem poucas opções de sistemas de medição que satisfaçam os requisitos de desempenho impostos pelas condições do chão de fábrica. Como exemplos, para inspeção de peças prismáticas (blocos de motor), temos as máquinas apresentadas na figura 2.2.



Leitz Sirio 688



Zeiss FC 600

Figura 2.2 – Exemplos de sistemas de medição adequados às condições do chão de fábrica /27, 28/

Esses sistemas de medição possuem características construtivas compatíveis com as exigências do chão de fábrica, uma vez que seus componentes principais, tais como guias e escalas foram desenvolvidas com essa finalidade. Um gabinete, com temperatura controlada, aloja os equipamentos eletrônicos do sistema de medição, garantindo,

segundo o fabricante, o resultado da medição em locais onde as faixas, os gradientes e as variações de temperatura são superiores aos de um ambiente climatizado.

Sendo assim, algumas informações relativas ao desempenho e às características técnicas do sistema de medição são importantes de serem consideradas antes de qualquer aquisição, tais como /29 - 31/:

- Tendência – erro sistemático da indicação de um sistema de medição;
- Repetitividade – aptidão de um instrumento de medição em fornecer indicações muito próximas, em repetidas aplicações do mesmo mensurando, sob as mesmas condições de medição.

Obs.: Estas condições incluem: redução ao mínimo das variações devido ao observador; mesmo procedimento de medição; mesmo observador; mesmo sistema de medição, utilizado nas mesmas condições; mesmo local; repetições em um curto período de tempo;

- Reprodutibilidade – grau de concordância entre os resultados das medições de um mesmo mensurando, efetuadas em condições variadas de medição.

Obs.: Para que uma expressão de reprodutibilidade seja válida, é necessário que sejam especificadas as condições alteradas. As condições alteradas podem incluir: princípio de medição, método de medição, observador, sistema de medição, padrão de referência, local, condições de utilização e tempo; e

- Estabilidade – aptidão de um sistema de medição em conservar constantes suas características metrológicas ao longo do tempo.

No chão de fábrica, a estabilidade e a tendência são mais sensíveis às variações de temperatura e vibrações, influenciando as demais /29/.

2.1.2 Ambiente de Fabricação

O ambiente de fabricação é importante que seja considerado na seleção de um sistema de medição, visto que contribui com diversas fontes de erros, afetando o resultado da medição. As mais comuns são: desvios da temperatura de referência, flutuações de temperatura, gradientes de temperatura e vibrações no local onde é realizada a inspeção, provocando distorções mecânicas não só no sistema de medição como no mensurando.

Para entender-se os erros provocados pelas alterações do fluxo de calor, observa-se o diagrama de efeitos térmicos (fig. 2.3) que divide o problema em duas categorias: desvios e flutuações da temperatura em relação ao valor de referência /2/.

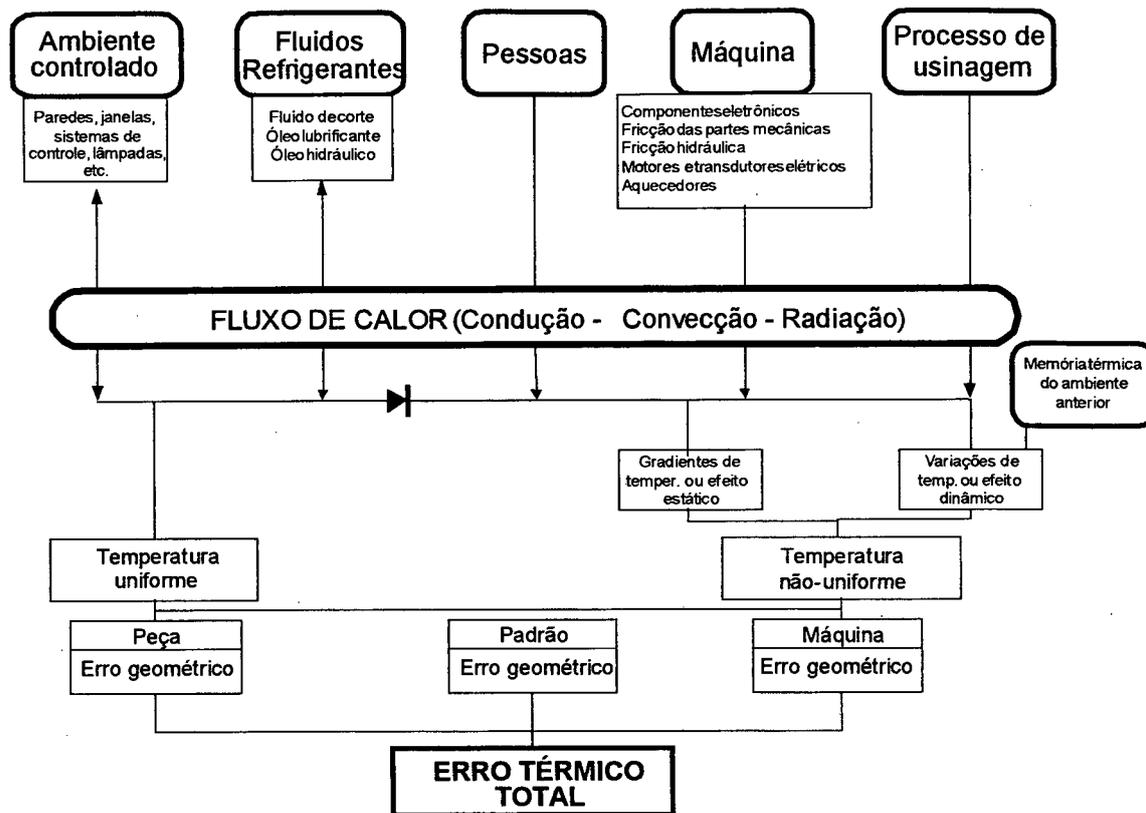


Figura 2.3 – Diagrama de efeitos térmicos /2/

Seis fontes térmicas são apresentadas no diagrama, sendo que apenas o ambiente controlado e os fluidos refrigerantes, se forem termicamente controlados, são capazes de manter a uniformidade da temperatura, conforme mostrado pelas setas unidirecionais. O restante das fontes de calor irão provocar um comportamento não uniforme da temperatura no local onde está sendo realizada a inspeção /2/.

Esse é o ambiente típico do chão de fábrica (sem controle de temperatura), onde a proximidade das máquinas-ferramenta CNC ao sistema de medição é uma realidade a ser considerada. Necessita-se então, de um sistema de controle que atue de maneira a corrigir os erros provocados pelas condições inerentes ao processo de fabricação. Estudos são realizados em importantes universidades européias, buscando a forma de incorporar o sistema de medição ao sistema de manufatura, de modo a identificar e a alterar os parâmetros que propiciarão a correção dos erros provocados pelas variações do ambiente e do processo de fabricação /40/.

Os efeitos dessas ocorrências podem ser minimizados utilizando-se CMMs com características construtivas adequadas às condições adversas do ambiente de fábrica, ou seja, bases com sistema de amortecimento (pads, molas ou sistema de amortecimento com ar comprimido capazes de manter a frequência de vibração dentro dos limites

aceitáveis, por exemplo: 30 Hz), cabines climatizadas, ambiente de fábrica com correção térmica, etc.

2.1.3 Mensurando

As principais fontes de erros originadas do mensurando são evidenciadas através da análise de sua massa e de seu tamanho, dos desvios geométricos e dimensionais críticos (paralelismo e concentricidade, por exemplo), das tolerâncias especificadas em projeto (fig. 2.4), da funcionalidade, de suas propriedades físicas e mecânicas, da rugosidade apresentada em função da qualidade da operação realizada e das várias interações com o sensor de apalpação /17, 32/.

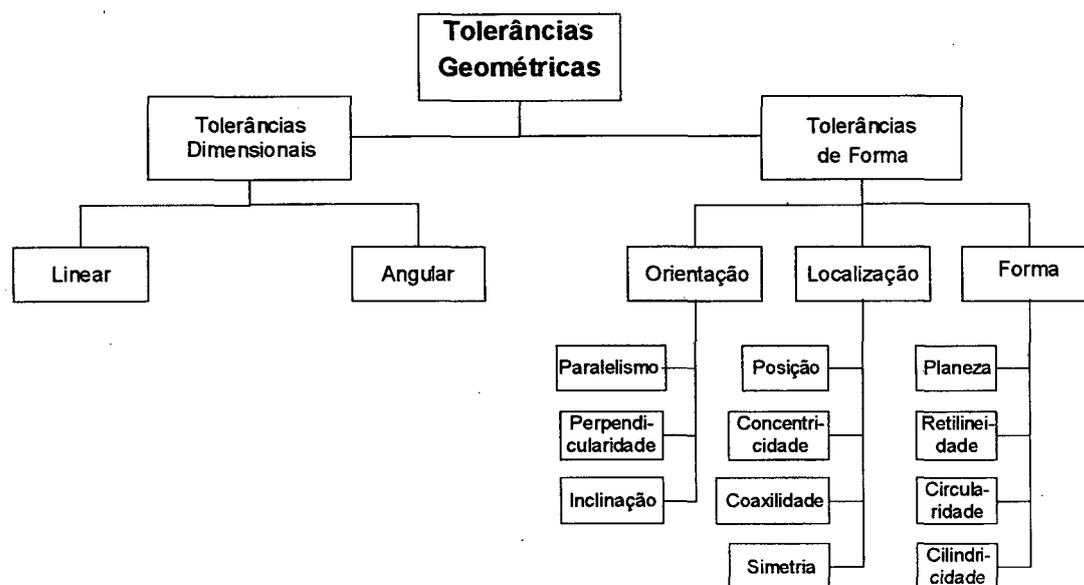


Figura 2.4 – Tolerâncias geométricas críticas na inspeção de peças complexas /32/

Observação importante relacionando as condições ambientais com as características do mensurando:

Muitos fabricantes de CMM oferecem softwares que “prometem” compensar os efeitos da temperatura no mensurando, ao expressar o resultado da medição efetuada. Esses, geralmente, são acompanhados por sensores de temperatura que devem ser montados no mensurando, fazendo as compensações baseadas na temperatura de 20° C. Cuidados devem ser tomados com essas “promessas”, pois existem dois fatores importantes a serem considerados. O primeiro, refere-se ao local de instalação dos sensores no mensurando, ou seja, apenas na região superficial próxima a ele é que a medição terá uma compensação de temperatura satisfatória. No interior do mensurando,

existem significativos gradientes de temperatura como consequência da espessura e do tamanho do mesmo. O segundo, o programa do software de compensação trabalha com os dados do coeficiente de expansão térmica do material especificado para o mensurando. Como as propriedades do material, geralmente, não são uniformemente distribuídas e nem sempre conhecidas, dificilmente será possível inserir seu adequado valor /2/.

Uma alternativa, nem sempre viável (razões técnicas e financeiras), seria aguardar a estabilização da temperatura do mensurando, antes de iniciar-se a inspeção.

2.1.4 Estratégia de Medição

A distribuição dos pontos de inspeção, considerando a forma como a peça foi fabricada, e os métodos de avaliação (ponto a ponto, varredura, etc.) podem ser responsáveis por diferentes resultados de medição, caso não sejam determinados com base nas especificações de projeto (distorcendo a forma e a geometria da peça) /24, 33/.

O número de pontos para avaliar os desvios de forma e de dimensão são importantes à funcionalidade da peça que, na maioria dos casos, é um problema de difícil resolução. CMMs com sistemas de apalpação com opção de "scanning" (varredura) reduzem essas dificuldades, porém aumentam significativamente o tempo de inspeção.

2.1.5 Operador

Responsável, na maioria das vezes, por posicionar, alinhar e fixar a peça, definindo a velocidade de apalpação, selecionando e configurando apalpadores e utilizando acessórios, tais como, mesa rotativa e magazine para troca automática de apalpadores, pode cometer erros ao interpretar ou ao executar esses procedimentos caso não os faça com a meticulosidade devida ou não receba o treinamento necessário.

Outro aspecto importante é o tratamento dos dados obtidos pelo operador após a realização da inspeção. Os softwares de medição e análise, atualmente existentes, permitem que esse procedimento seja rápido e fácil, diminuindo os erros que eram comuns ao se transcrever ou fazer a leitura dos resultados obtidos (constatação feita junto às indústrias).

2.1.6 Expressão da Incerteza de Medição

A expressão da incerteza do resultado de medição, bem como as contribuições das suas fontes possíveis de erros são, genericamente, destacadas na figura 2.5 /20/. Note-se que

existem duas parcelas, uma independente e outra dependente da dimensão do mensurando que está sendo inspecionado.

Essa expressão pode ser encontrada em catálogos disponibilizados pelos fornecedores de CMM. Como já mencionado anteriormente, é importante que se analise não só esses valores da incerteza de medição, mas também as condições de operação da máquina para que ela seja garantida.

Incerteza de medição	Parcela independente da dimensão inspecionada	Parcela dependente da dimensão inspecionada
$U_{95} =$	$K1$	$+ \quad L/K2$
	<ul style="list-style-type: none"> • Repetitividade • Histerese • Características dinâmicas do apalpador (recuo) • Resolução • Erros de longo período (escalas, guias) • Distorção dinâmica do sistema coordenado 	<ul style="list-style-type: none"> • Erros de curto período (escalas, guias) • Efeitos térmicos • Distorção do sistema coordenado (estática)

Figura 2.5 – Expressão e principais contribuições para o cálculo da incerteza de medição de uma CMM /20/

A parcela independente está associada às características intrínsecas ao sistema de medição, enquanto que a parcela dependente associa-se ao comportamento do mensurando e da máquina frente a possíveis variações que possam ocorrer sobre eles durante o procedimento de medição /20/.

Outro importante aspecto a ser considerado, em seguida, é a localização e a função do sistema de medição no sistema de manufatura.

2.2 ASPECTOS RELATIVOS À LOCALIZAÇÃO DA CMM NO CHÃO DE FÁBRICA

As máquinas-ferramenta CNC e os sistemas de medição utilizados no sistema de manufatura serão dispostos (layout de chão de fábrica) de tal forma que se obtenha a maior produtividade possível /12/.

A inspeção executada no chão de fábrica ou em suas proximidades é capaz de fornecer subsídios à realimentação do processo mais rapidamente, evitando que peças defeituosas sejam fabricadas sucessivamente /15/. Isso contribui à manutenção e à melhoria dos níveis de capacidade do processo. Porém, um importante aspecto a ser

considerado é a adequada localização da estação de inspeção no chão de fábrica. Para tanto, algumas perguntas, dentre outras, devem ser respondidas:

- Quais os pontos críticos do sistema de manufatura ?
- A localização mais aconselhável é próxima às operações mais críticas ?
- Qual o tempo máximo de inspeção ?

Nos próximos itens serão propostas três possíveis localizações do sistema de medição no chão de fábrica, sendo que a mais adequada ao processo considerado dependerá, em parte, das respostas às perguntas formuladas e das particularidades do sistema de manufatura da empresa considerada.

2.2.1 Conjugada à Máquina-Ferramenta CNC

Aqui, desenvolve-se uma interatividade entre as operações realizadas pela máquina ferramenta CNC e pelo sistema de medição a ela incorporado, ou seja, o sistema de medição está fisicamente unido à máquina e a realimenta com os resultados obtidos na inspeção que acontece imediatamente após a operação ser realizada, corrigindo as não-conformidades tão logo apareçam. A figura 2.5 apresenta um esboço de uma linha de fabricação com as características mencionadas.

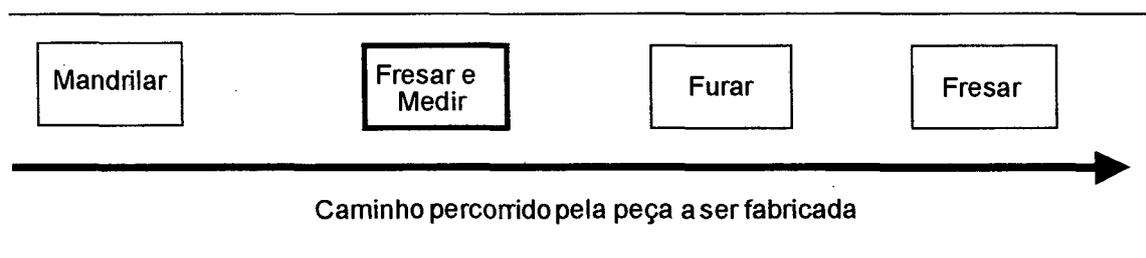


Figura 2.6 – Inspeção conjugada à máquina ferramenta no processo de fabricação

O adequado monitoramento do processo permite a sua pronta correção, assim que a operação não corresponda às expectativas de especificação do projeto. Segundo Bosch /2/, citando Hocken, existem dois tipos distintos de monitoramento. O primeiro, chamado de modo direto, onde as características críticas da peça são medidas, enquanto é fabricada, e utilizadas para realimentar o processo; o segundo, chamado "deterministic metrology", onde o processo é monitorado medindo-se outras variáveis (força de corte, níveis de vibração, variações de temperatura, etc.), diferentes das dimensões das peças, corrigindo-se o processo a partir desses parâmetros.

Esse sistema tem como vantagem a rápida realimentação do processo e a redução na demanda por um espaço físico no chão de fábrica, implicando em redução de custo da área ocupada. Como desvantagem, existe o alto custo de aquisição de um equipamento desse porte e com essas características e a baixa confiabilidade metrológica /2/.

2.2.2 Integrada ao Processo de Fabricação

Nessa configuração, o sistema de medição e seus periféricos estão fisicamente separados da máquina-ferramenta, mas permitem medir a peça e comparar os resultados de medição com as especificações e, se necessário, fazer os ajustes na máquina-ferramenta para que as não-conformidades sejam corrigidas (fig. 2.7).

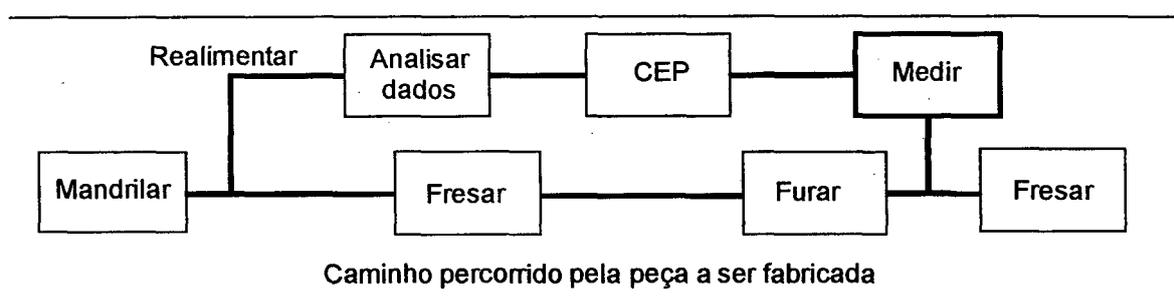


Figura 2.7 – Inspeção integrada ao processo de fabricação

As principais vantagens são: realimentação do processo com ajustes automáticos da máquina ferramenta CNC, acompanhamento do processo através do conhecimento da sua capacidade, aumento da qualidade, do controle e da produtividade, facilidade de "set-up"; e diminuição do "lead time" /16, 20, 34/.

As principais dificuldades são: reduzir o tempo gasto na criação de programas de inspeção; e diagnosticar, adequadamente, as causas dos erros durante o processo de usinagem /16, 17/.

2.2.3 Próxima ao Processo de Fabricação

O sistema de medição é usado para inspecionar as características críticas de amostras de peças definidas pelo controle da qualidade da empresa. Os resultados obtidos são interpretados para, na seqüência, introduzir-se as alterações necessárias ao processo de fabricação.

O quão próximo do processo de fabricação (fig. 2.8) pode ser um aspecto importante a ser estudado/analísado, uma vez que da rapidez da interpretação do resultado e da ação decorrente dependerão as correções que serão introduzidas no processo.

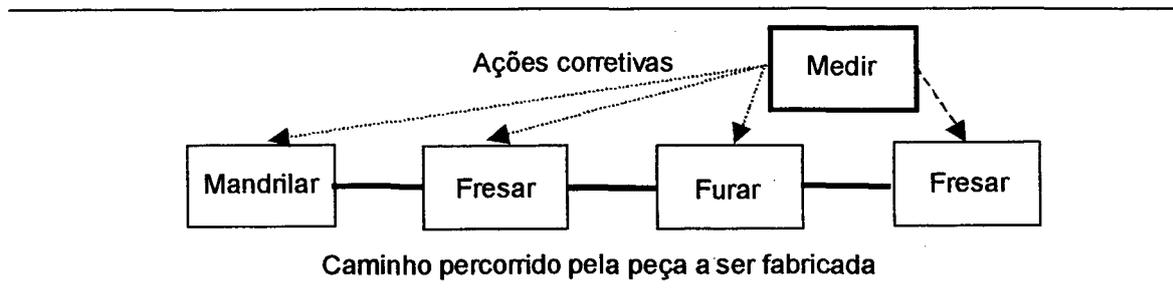


Figura 2.8 – Sistema de medição próximo ao processo de fabricação

A definição do momento que deve ser executada a inspeção dependerá da análise feita pelo controle da qualidade, da característica crítica do mensurando (tolerância, funcionalidade, requisito de segurança, etc.) e do cumprimento das especificações de projeto, a fim de se evitar a formação de “gargalo” ou queda no desempenho do processo de fabricação.

O sistema de medição e a sua localização no sistema de manufatura depende, basicamente, de um adequado planejamento /4/.

2.3 ASPECTOS DO PLANEJAMENTO DA QUALIDADE NA INSPEÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS

Os principais aspectos, segundo Juran /4/, são:

- Estabelecimento dos objetivos da qualidade;
- Desenvolvimento dos meios para realização desses objetivos; e
- Apresentação de medidas ou de um roteiro para o planejamento da qualidade, dentro do qual, tem-se como objetivo a satisfação do cliente, chegando-se a estabelecer os indicadores a serem adotados.

Como indicadores, podem ser consideradas a capacidade do processo (cartas de controle por variáveis, CEP, requisitos da QS – 9000), os custos com implantação, operação e manutenção do sistema de medição, as tolerâncias do mensurando (peça complexa), e os resultados obtidos através da aplicação das ferramentas da qualidade /4/.

A confiabilidade nesses indicadores depende de um adequado planejamento do controle do processo, da maneira que as operações de medição serão executadas e da garantia dos resultados, através da manutenção, da calibração e da rastreabilidade do sistema de medição incorporado ao chão de fábrica.

2.3.1 Planejamento e Controle do Processo

O resultado de um processo de manufatura estatisticamente estável (sob controle) pode ser descrito por sua distribuição, cujas características são utilizadas para avaliar o processo. O valor médio da distribuição, geralmente, é uma característica de interesse. Se a distribuição de um processo de manufatura não estiver controlada e adequadamente localizada, poderá ser incapaz de atender às necessidades propostas /9/.

Uma das maneiras de se manter o processo sob controle é através de sua análise, manutenção e melhoria contínua, onde perguntas e ações, como as apresentadas na seqüência, podem servir como diretrizes para a busca do melhor desempenho.

a) Análise do processo

- O que deveria estar fazendo ?
- O que pode estar errado ?
- Foi determinada a sua capacidade ?

b) Manutenção do processo

- Acompanhar o desempenho.
- Detectar a variação da causa especial e atuar sobre ela.

c) Melhorar o processo

- Mudar – entender a variação da causa comum.
- Reduzir sua variação.

Baseando-se nas respostas obtidas, procurando desenvolver um planejamento adequado à capacidade da organização e agregando funcionalidade ao produto, a aplicação dos conceitos e das técnicas de metrologia deverão orientar o controle da qualidade do processo, tendo como diretriz o compromisso entre os custos e a qualidade desejada (fig. 2.9), ao mesmo tempo que as seguintes confrontações são feitas:

- Tolerância da peça complexa “*versus*” incerteza do sistema de medição; e
- Processo com controle “*versus*” processo sem controle.

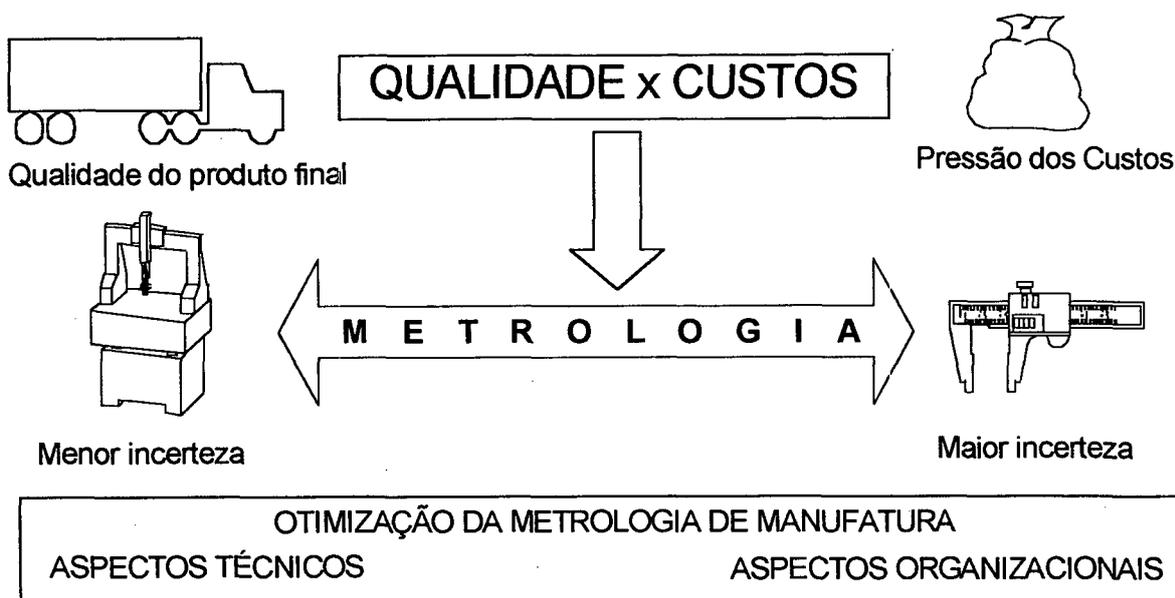


Figura 2.9 – Dilema da metrologia aplicada ao controle do sistema de manufatura /5/

A grande expectativa de lucros depositada por uma organização sobre seus produtos ao mesmo tempo que busca empregar novas tecnologias para conquistar novos clientes, faz com que o dilema entre qualidade e custos tome-se, cada vez mais, motivo de inquietação e reflexão por parte dos empresários. Os produtos devem ter preços competitivos, qualidade comprovada e um baixo custo de produção, para que se constituam num atrativo ao consumidor e à empresa.

Analisando-se o valor e a funcionalidade agregada ao produto durante o processo de fabricação, verifica-se que eles são implementados à medida que o produto avança no processo, tendo nas atividades de manutenção/suporte a ação necessária para que as máquinas-ferramenta não sejam interrompidas durante a execução de suas tarefas.

Nesse contexto, a operação de medição também atua como atividade suporte, pois apesar de não agregar funcionalidade ao produto como as outras operações o fazem, é capaz de garantir os subsídios necessários para que as correções no processo sejam realizadas no momento certo e que bons níveis de capacidade sejam atingidos, evitando-se a fabricação de peças defeituosas.

2.3.2 Metrologia na Fabricação

Com o objetivo de reduzir os custos causados pelo retrabalho e pela fabricação de peças defeituosas, o processo deve ser controlado durante as operações. Assim, os índices de capacidade de todos os equipamentos envolvidos no processo têm maior possibilidade de permanecerem estáveis e controlados.

Para tanto, um requisito essencial a qualquer estratégia de prevenção de falhas em produtos é a rápida realimentação do processo (fig. 2.10). O objetivo é estabilizar as características relevantes ao processo dentro das tolerâncias previstas na especificação, por meio de mecanismos de controle que monitorem o produto e suas características /35, 36/.

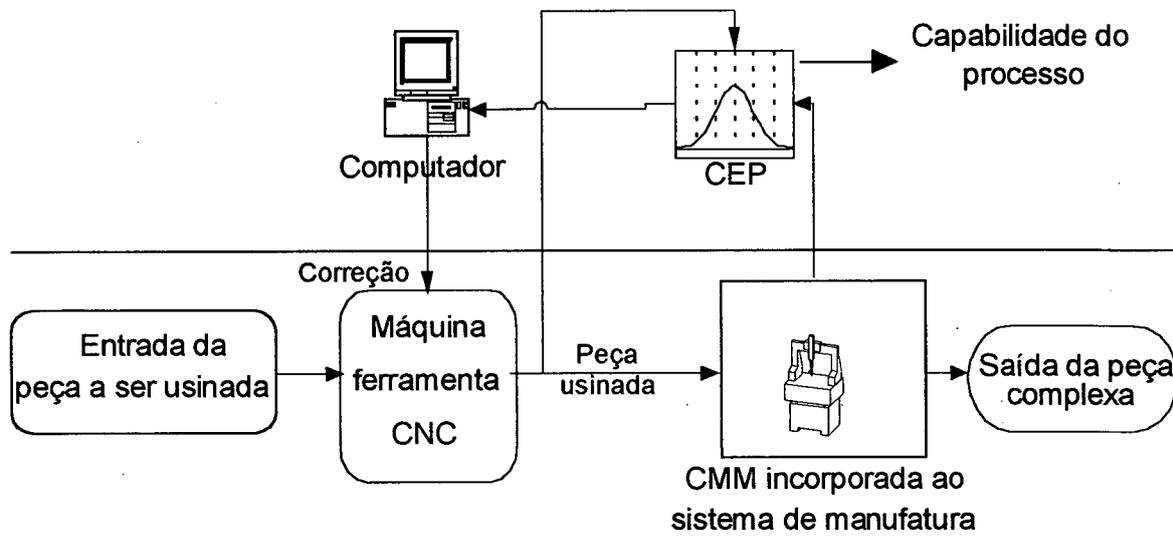


Figura 2.10 – Sistema de medição flexível incorporado ao Sistema de Manufatura de peças complexas /5/

No caso de um processo estatisticamente controlado e que dispõe informações relativas à sua capacidade, a correção nos parâmetros da máquina, baseando-se nos resultados obtidos junto à interface do sistema de medição (geralmente, gráficos e de fácil compreensão), é feita automaticamente ou via intervenção de um operador /5/.

Os requisitos genéricos do sistema de medição para que possa ser incorporado ao chão de fábrica são /22, 37, 38, 39/:

- Tempo de inspeção adequado à solicitação do sistema de manufatura (evitar “gargalos”);
- Confiabilidade de acordo com os requisitos do processo;
- Resultados de fácil interpretação e avaliação; e
- Incerteza de medição compatível com a menor tolerância da peça complexa fabricada /1, 14/.

O tipo de sistema de medição capaz de cumpri-los pode ser do tipo dedicado ou flexível, ou seja, executa apenas as inspeções para as quais foi projetado ou oferece a opção de defini-las de acordo com as características e complexidade do mensurando. Os principais

parâmetros /2/ de comparação (sujeitos a muitas incertezas) entre eles são explicitados na figura 2.11.

PARÂMETROS DE COMPARAÇÃO		Características do Sistema de Medição Flexível	Características do Sistema de Medição Dedicado
Custos	Investimento	Depende da incerteza e das condições de utilização	Depende da incerteza desejada e da complexidade da medição efetuada
	Operação	Médio	Alto
Solução Técnica	Velocidade	Rápida – depende do tipo e modelo	Rápida
	Flexibilidade	Alta	Baixa
	Quantidade peças inspecionadas	Média – amostragem	Alta – 100%
	Análise de resultados	Em geral, boa interface máquina – operador	De acordo com o projeto
Operacionalidade	Manutenção	Depende do sistema de medição	De acordo com a complexidade construtiva
	Fornecimento de peças	Depende do fabricante	De acordo com a complexidade construtiva e disponibilidade do fabricante
	Adaptação ao processo	Rápida	Rápida, desde que projetada adequadamente
	Facilidade de operação	Alta	Alta

Figura 2.11 – Parâmetros de comparação entre sistemas de medição automatizados utilizados para cumprimento de tarefas complexas no chão de fábrica

A definição à seleção de um ou de outro, dependerá, além dos requisitos já mencionados, dos seguintes aspectos /15/:

- Variáveis organizacionais (custos, metas, etc.);
- Aumento da qualidade, da produtividade e da confiabilidade do processo;
- Peça complexa a ser inspecionada: geometria, superfície, massa e volume;
- Máquina CNC: tecnologia, geometria e ferramenta a ser utilizada;
- Fluxo de produção, célula de manufatura e variáveis de medição;
- Tecnologia: força e velocidade de corte, temperatura, uso e sistema de alimentação;
- Geometria: maneira de se estabelecer os erros, variações na temperatura, no carregamento e no uso (máquina/ferramenta);
- Ambiente: irradiação térmica, circulação de ar, temperatura, umidade do ar e vibrações; etc.

Porém, seja qual for o sistema de medição escolhido, a confiança nos resultados só é garantida através da sua calibração periódica /21/.

2.3.3 Calibração de uma Estação de Medição por Coordenadas Incorporada ao Sistema de Manufatura

No âmbito das normas para sistema da qualidade, a indústria se defronta com requisitos que visam assegurar a rastreabilidade dos sistemas de medição. Por outro lado, critérios de aceitação passam a considerar a incerteza dos sistemas de medição, restringindo as tolerâncias do produto. Por isso, a correta avaliação da incerteza de medição tem importância cada vez maior nos processos de controle da qualidade. Porém, o conceito de calibração é mais difícil de ser coerentemente aplicado às CMMs que a outros sistemas de medição, devido a sua universalidade de funções e complexidade de seu comportamento geométrico /20/.

A calibração de uma CMM sujeita às condições do chão de fábrica, ainda é alvo de pesquisas em importantes centros /40/. Verificações simplificadas, utilizando-se placas de esferas (padrão para verificação das incertezas de medição no volume de trabalho das CMMs mantidas em ambientes controlados), são realizadas por algumas indústrias /22/.

O uso de uma peça-padrão (“testpiece”) como referência à peça que será inspecionada pela CMM, ou seja, que apresente características geométricas correspondentes às características críticas da peça a ser medida e que seja periodicamente calibrada, a fim de se conhecer sua incerteza de calibração, segundo Trapet e Wäldele /21/, é uma maneira de se manter a rastreabilidade do sistema de medição utilizado no chão de fábrica.

A rastreabilidade pode ser visualizada e entendida mais facilmente, quando disposta na forma de diagrama, formando a “cadeia de rastreabilidade”. Cada bloco, deve conter o nome do sistema de medição ou padrão e o nível de incerteza, de acordo com o certificado de calibração. A disposição em blocos auxilia a compreensão da rastreabilidade /41/.

Especificamente, construiu-se esse diagrama (fig. 2.12) baseado num exemplo real, no qual uma CMM está localizada em ambiente controlado próximo à célula de manufatura de blocos de motores para caminhões e foi “calibrada” pela Fundação CERTI, seguindo os procedimentos adotados pelo Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) - Alemanha.

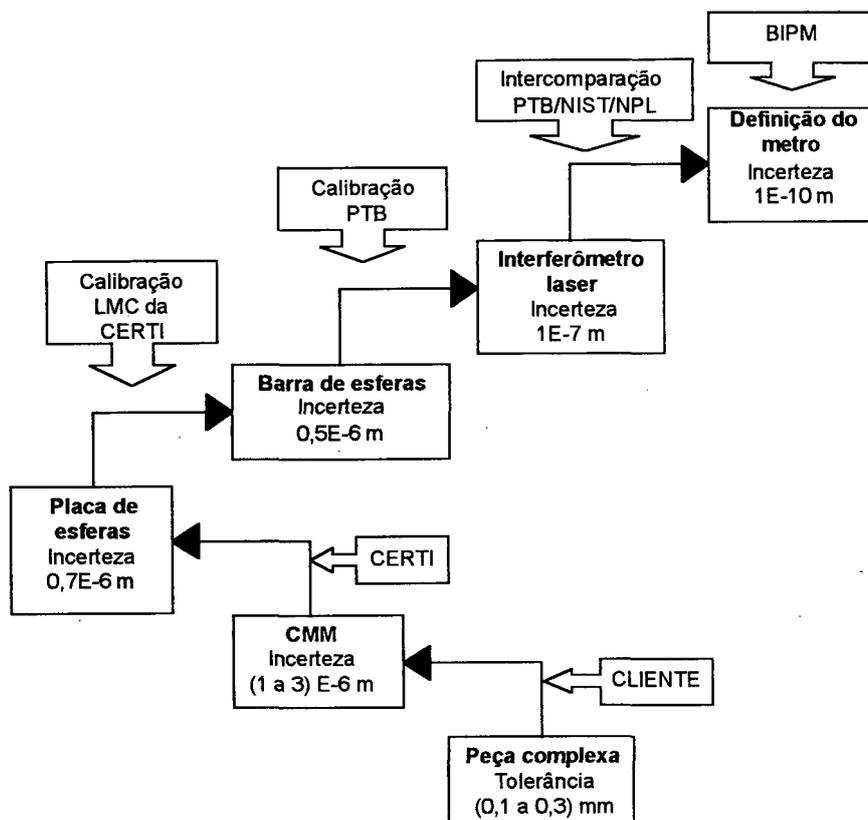


Figura 2.12 – Cadeia de rastreabilidade de uma CMM constituída no âmbito do acordo CERTI – PTB /41/

Esse diagrama de rastreabilidade mostra claramente os solicitantes do serviço de calibração e os níveis de incerteza atingidos em cada bloco, evidenciando a melhoria na incerteza de medição à medida que o nível superior é atingido.

Conhecendo-se todos os aspectos a serem considerados para um adequado planejamento do controle da qualidade no chão de fábrica, procura-se desenvolver um questionário que os considere e que facilite o processo de especificação do sistema de medição a ser incorporado.

2.4 QUESTIONÁRIO PARA SUBSIDIAR ESPECIFICAÇÃO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO INCORPORADO AO CHÃO DE FÁBRICA (QSE – SMC)

Baseando-se em informações contidas nas referências /2, 6, 37, 38, 39/, nos aspectos mencionados nos itens anteriores e em algumas ferramentas da qualidade e da engenharia simultânea /4, 8, 42, 43, 44/, foram elaboradas perguntas que analisam aspectos do processo, do mensurando, do chão de fábrica e dos custos envolvidos.

a) Processo

1. O processo é estável ?

2. O processo tem apresentado problemas com muita freqüência ? Quais ?
3. O que o processo deveria estar fazendo ?
4. Quais os parâmetros mais sensíveis a variações externas ?
5. Os custos com refugo e retrabalho foram estabelecidos ?
6. O processo produz um resultado estatisticamente controlado ?
7. Qual a sua capacidade ?
8. Existe um plano de melhorias contínuas ?
9. Existe a formação de "gargalo" no processo ? Qual o custo ? Onde ? Por que ?
10. Existe algum tipo de inspeção durante o processo ? Qual seu custo ? Qual a sua contribuição na redução dos limites de controle ?
11. Qual a freqüência de verificação dos equipamentos que compõem o processo ?
12. Existe um plano de manutenção preventiva e corretiva para evitar/corrigir irregularidades do processo ?
13. Foram levantadas as fontes possíveis de erro do processo ?

b) Mensurando

1. Qual o volume da peça a ser medida ?
2. Qual o número de peças/hora a serem inspecionadas ?
3. A geometria da peça exige cuidados na fixação, havendo necessidade de montagem de gabarito, etc. ?
4. Quais as características críticas da peça a ser inspecionada ?
5. Considerando a capacidade do processo, o tempo de operação para a fabricação do produto, os custos e o plano de inspeção, qual seria o sistema de medição mais adequado ? Dedicado ou flexível ?
6. Qual o custo da peça ?

c) Chão de fábrica

1. Quem, quando, como e onde deverá/deverão fazer as reclamações ?
2. Existe pessoal responsável pela triagem e destino das reclamações feitas ?
3. O local de segregação das peças que apresentaram problemas é adequado sob o ponto de vista técnico e econômico ?

d) Custos

1. Quais os custos para manter o processo como se encontra ?
2. A empresa possui clientes ou produtos que exijam algum tipo de controle específico do processo? (amostragem, 100 %).
3. Quais os custos de controle e de falhas ?

As informações obtidas com o emprego do questionário são essenciais à consecução da metodologia, como será visto em capítulo específico (4), porém para que fosse elaborada, de acordo com os preceitos discutidos anteriormente, algumas importantes ferramentas devem ser conhecidas.

2.5 FERRAMENTAS DE CONTROLE DA PRODUÇÃO E DE ESPECIFICAÇÃO DE SISTEMAS

Tendo-se o conhecimento do processo e sendo esse estável, pode-se estabelecer as atividades a serem observadas para incorporar a CMM ao sistema de manufatura. As ferramentas da qualidade e de controle de processo, descritas na seqüência e com as devidas adaptações, constituíram a base para o encadeamento dessas atividades.

2.5.1 Método para Solução de Problemas

O método foi utilizado para elaborar a seqüência de atividades da metodologia de especificação, sendo que algumas adaptações à referência /43/ foram necessárias para que seus estágios fossem constituídos conforme apresentado na figura 2.13.

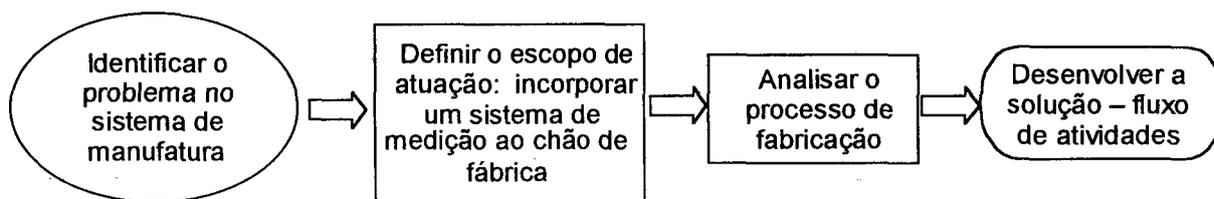


Figura 2.13 – Método para solução de problemas adaptado à especificação de uma estação de medição por coordenadas adequada ao chão de fábrica

Analisando-se as características do sistema de manufatura, identifica-se o problema. Em seguida, define-se o escopo de atuação, ou seja, verifica-se a necessidade ou não de incorporar um sistema de medição. O desenvolvimento das ações tomadas para solucionar o problema dependem de uma criteriosa análise das variáveis existentes no processo. Isso pode ocorrer, utilizando-se o questionário proposto no item 2.4.

2.5.2 Ciclo PDCA

Importante ferramenta da qualidade (fig. 2.14) útil em qualquer tipo de atividade, sendo adequada para manter o foco do trabalho na proposta de especificação da estação de medição por coordenadas /42/.



Figura 2.14 - Ciclo PDCA aplicado à metodologia de especificação /43/

O método de especificação deve ser dinâmico, ou seja, buscar sempre sua melhoria e adaptável a qualquer processo de fabricação de peças complexas.

2.5.3 Cartas de Controle para Variáveis

Esses tipos de cartas são úteis por diversas razões /9/, tais como:

- Apesar de mais oneroso, que um controle por atributos, um menor número de peças é necessário para se conhecer o comportamento do processo;
- O intervalo de tempo entre a produção das peças complexas e as ações corretivas necessárias para ajuste do processo é reduzido, devido à possibilidade de se analisar um menor número; e
- A melhoria pode ser quantificada.

As considerações e a metodologia de aplicação dessa ferramenta são detalhadas na referência /9/. Esses tipos de cartas têm como objetivo controlar e identificar qualquer evidência de que a variabilidade do processo ou a média do processo não está operando no nível estabelecido, indicando ao avaliador se ações locais (causas especiais) ou sobre o sistema de manufatura (causas comuns) deverão ser tomadas.

- Enfoca várias atividades da companhia, que serão orientadas para o objetivo do cliente; etc.

b) Facilidade no entendimento e no desenvolvimento.

Sendo uma ferramenta com uma estruturação e escopo de atuação semelhantes à abordagem feita durante a elaboração da especificação do sistema de medição (fig. 2.15), é de fácil adaptação às necessidades da metodologia.

ESTÁGIOS	PLANEJAMENTO	Definição do escopo	ATIVIDADES
		Formação do time	
		Determinação da casa da qualidade	
	CASA DA QUALIDADE	Identificação das necessidades, como atacá-las e como relacioná-las com as características da qualidade	
		Determinação de seus alvos e importância	
		Análise do valor total e respectiva importância	
	ANÁLISE E DIAGNÓSTICO	Análise da matriz QFD	

Figura 2.15 – Estágios e atividades para aplicar-se a ferramenta QFD /46/

Em suma, a ferramenta propicia o encadeamento das atividades, permitindo que sejam considerados todos os aspectos importantes (desde o atendimento às necessidades do sistema de manufatura até a especificação) e trata com objetividade os critérios técnicos e econômicos estabelecidos.

Além da análise técnica do processo, outra importante e relevante análise é a econômica, a qual deve ser bem conduzida, a fim de complementar os subsídios necessários à decisão de aquisição de um adequado sistema de medição com as adequadas características.

A análise de seus dados pode apontar:

- Mudanças no limite de controle;
- Mudança na dispersão da distribuição;
- Mudanças no sistema de medição ou de operador; etc.

2.5.4 Capabilidade do Processo

Reflete a variação de causas comuns e as conseqüentes ações gerenciais que são requeridas sobre o sistema. As técnicas para avaliar um processo sob controle estatístico são as mais variadas sendo que, na maioria das vezes, é assumida como normal a distribuição dos pontos amostrados /9/.

A capabilidade pode ser descrita em termos da distância da média do processo em relação aos limites de especificação e em unidades de desvio padrão.

Os índices Cp, Cpk, CPU, CPL, Pp e Ppk definem as medidas do processo /9/. Esses índices identificam o comportamento do processo. Quanto maior o valor de Cp, menores serão as chances do processo apresentar refugos ou retrabalhos. Para valores de Cp \geq 1,33 tem-se uma razão de rejeição próximo a 0,007 %, sendo uma estratégia efetiva para evitar-se itens não-conformes /13/.

Tais valores serão úteis, pois indicarão uma relação entre a necessidade de especificação de um sistema de medição e a baixa capabilidade do processo analisado (Cp \leq 1,33) /45/.

2.5.5 Desdobramento da Função Qualidade – QFD

É uma ferramenta da Engenharia Simultânea para garantir que as necessidades do consumidor dirijam o processo de projeto e de fabricação de um produto. Os seguintes aspectos foram considerados para sua aplicação neste trabalho /46 - 48/:

a) Vantagens de sua aplicação:

- Analisa, num ciclo menor, o sistema de medição adequado ao processo;
- Reduz os custos e aumenta a produtividade, através do planejamento e prevenção de problemas;
- Propicia maior satisfação ao cliente;
- Reduz o número de erros durante o processo de especificação;
- Reduz os custos com engenheiro, em função de sua objetividade;
- Proporciona melhoria no conhecimento de engenharia e disciplina a interação entre departamentos;

CAPÍTULO 3

CUSTOS ASSOCIADOS À ESTAÇÃO DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS NA FABRICAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS

O grande desafio enfrentado pelas indústrias é o de produzir de acordo com as expectativas de seus clientes ao mesmo tempo que procuram minimizar os custos com a produção. Os principais obstáculos são: a necessidade em melhorar a qualidade em confronto com os seus próprios custos e as dificuldades em mensurá-los adequadamente /8/. Na busca de minimizar esses custos, a indústria nacional de peças complexas depara-se com o seguinte impasse: manutenção dos métodos convencionais de inspeção ou investir em novas tecnologia ? Mesmo ao admitir a necessidade de investir em tecnologia, deverá fazer um estudo de viabilidade técnica e econômica, buscando adequar o tipo de sistema de medição ao processo considerado. A decisão pode não ser simples, em função das inúmeras opções disponíveis.

Diante dessa dificuldade, da complexidade em se especificar adequadamente uma estação de medição por coordenadas /49, 50/ e de sua importância no controle da qualidade, este capítulo tem como proposta fazer uma análise dos custos operacionais da qualidade, dos benefícios e custos de incorporação ao sistema de manufatura e do retorno do investimento proporcionado à indústria por esse sistema de medição.

3.1 CUSTOS OPERACIONAIS DA QUALIDADE

São os custos associados à definição, à criação e ao controle da qualidade /44/.

Podem ser considerados como uma das bases de sustentação da qualidade, pois serão responsáveis pelo custo final do produto, ou seja, quanto o cliente pagará pelo bem ou serviço adquirido /51/.

Esses aspectos são vistos com frequência no atual cenário mundial, onde a globalização de mercado eleva a competitividade entre as grandes empresas, sendo assim, os investimentos procuram garantir a estabilidade, a rapidez e a confiabilidade para que seja possível produzir mais e melhor num menor espaço de tempo.

Para facilitar a compreensão dos custos da qualidade, os mesmos são divididos em duas categorias distintas, conforme é mostrado na seqüência.

3.2 CATEGORIAS DE CUSTOS DA QUALIDADE E SEUS RELACIONAMENTOS

São divididas em dois grandes grupos: custos de controle (prevenção e avaliação) e custos de falha (interna e externa) /44/, existindo uma certa dependência/relacionamento entre eles.

3.2.1 Custos de Controle

Os custos com prevenção buscam garantir o “zero defeito” durante todo o processo de fabricação, enquanto que os custos de avaliação são os meios utilizados para aquela garantia /51/. Para o sistema de manufatura, as suas subcategorias são explicitadas na figura 3.1.

Prevenção	Avaliação
Planejamento da qualidade: plano global da qualidade e respectivos procedimentos	Testes e inspeções: sistema de medição a ser especificado (CMM)
Planejamento de processos: aptidão e planejamento de inspeção	Métodos e processos de inspeção: estratégia a ser usada na execução da inspeção
Controle de processo: inspeção e teste durante a fabricação	Manutenção e calibração dos sistemas de medição
	Depreciação dos sistemas de medição: perda anual no valor
Treinamento: preparação e realização de programas que busquem o aprimoramento individual e coletivo	Teste do ambiente de produção: conhecendo-se os fatores de influência, o sistema de medição é especificado de acordo com a realidade do chão de fábrica

Figura 3.1 – Subcategorias dos Custos de Controle da Qualidade /4/

Caso os custos de controle não sejam priorizados, a consequência, geralmente, é o aumento dos custos de falha de controle /4/.

3.2.2 Custos de Falha de Controle

A falha interna está associada aos defeitos encontrados antes da transferência do produto ao consumidor, enquanto que a falha externa está associada aos defeitos que são encontrados após o produto ter sido enviado ao cliente. Suas subcategorias são explicitadas na figura 3.2.

Falha Interna	Falha Externa
Retrabalho: correção de defeitos para torná-lo adequado ao uso	Refaturamento
Sucata: não pode ser reaproveitado	Multas
Reinspeção: inspeção em peças complexas retrabalhadas	Material devolvido: custos com recepção e substituição de produtos defeituosos
Inspeção 100% para classificação: custos para encontrar as unidades defeituosas em lotes de produtos que contenham níveis inaceitáveis de defeitos	Despesa com garantia: custos envolvidos na reposição ou consertos dos produtos ainda no período de garantia
Análise de falhas: custos para analisar os produtos não-conformes	Reposição para manutenção de imagem (bem intangível)

Figura 3.2 – Subcategorias dos Custos de Falha de Controle da Qualidade /4/

Essas falhas podem ocorrer devido a problemas no planejamento, sem uma participação consciente e efetiva de todos os integrantes do processo, ou na execução, provocado por um equipamento inadequado ou erro de interpretação e de realização de procedimento para atender às exigências da qualidade com segurança e com menor custo /44/.

Além de conhecer as categorias de custos é importante saber como se relacionam, a fim de procurar maximizar os resultados desse relacionamento.

3.2.3 Relações entre as Categorias de Custos

Através do estudo e da observação das categorias de Custos da Qualidade, procura-se inferir o ponto ótimo (fig. 3.3) de investimento em qualidade /51/. Outro propósito seria a descoberta da melhor relação benefício-custo, ou seja, aumentando-se os investimentos na prevenção de falhas, determinar-se-ia qual seria a redução de custos obtida em função da melhoria do produto. Isso pode significar um importante aumento nas vendas e sensível melhora na imagem da empresa frente ao consumidor.

O gráfico (fig. 3.3) mostra que para um nível baixo de gastos em prevenção e em avaliação o custo de falha é alto. Para um gasto zero de prevenção e de avaliação, o custo de falha retrata um produto de má qualidade (100% defeituoso). Busca-se, então, o ponto ótimo, onde os custos de um e de outro tem como diretriz a satisfação do cliente e não apenas a conformidade do produto de acordo com os requisitos de projeto /52/.

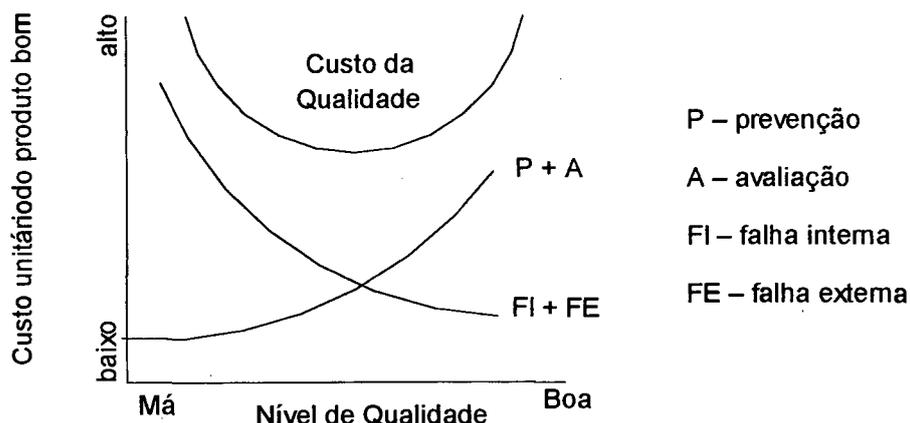


Figura 3.3 – Comportamento das categorias dos custos da qualidade /4/

Conforme metodologia elaborada por Donatelli /14/, para fabricar-se com “zero defeito”, procura-se considerar não só a relação entre as categorias de custos, mas também as capacidades em jogo, ou seja, do processo de manufatura e do sistema de medição a ser empregado, a fim de que os limites reais de controle sejam corretamente estabelecidos, reduzindo-se, assim, os riscos de rejeição de peça boa ou aceitação de peça de má qualidade.

Buscando valorizar os aspectos mencionados no parágrafo anterior, cabe considerar os elementos para uma adequada análise dos custos do sistema de medição a ser incorporado ao chão de fábrica.

3.3 ELEMENTOS DE CUSTOS DE UMA ESTAÇÃO DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS INCORPORADA AO CHÃO DE FÁBRICA

Para justificar a aquisição de uma estação de medição por coordenadas, as intenções deverão estar bem claras e definidas. Existem, pelo menos, quatro categorias de aplicações desse sistema de medição no chão de fábrica /2, 49/:

1. Auditoria – a medição é efetuada para checar se o produto está de acordo com as especificações. Geralmente, o cliente a faz no fornecedor que possui um processo estatisticamente controlado;
2. Medição analítica – é o processo de medição das características de saída da peça da fabricação, a fim de quantificar seus efeitos ou suas condições, correlacionando-as com sua funcionalidade. Usado para determinar quais os aspectos do processo são críticos;

3. Controle de Processo – é a medição incorporada ao sistema de manufatura, mantendo o processo controlado através de métodos estatísticos, de realimentação ou de procedimentos metrológicos. Esse tipo de controle melhora a capacidade do processo; e
4. Calibração – envolve comparações realizadas em salas de metrologia. Dispositivos de medição são comparados a seus respectivos padrões, utilizando-se uma CMM como meio.

O item de interesse será o número 3, pois o foco do trabalho está nas possíveis alternativas de incorporação (item 2.2) da CMM ao sistema de manufatura.

A vantagem em utilizá-la para controle do processo pode estar em seu menor custo e risco, quando comparada a um sistema de medição dedicado (detalhes no item 3.3.4) /2/, pois:

- Pode-se reprogramá-la, quando são introduzidas modificações de projeto;
- Os fornecedores disponibilizam uma grande variedade de opções e suportes técnicos /50/; e
- Incorpora alto grau de flexibilidade e de versatilidade.

A análise de custos a ser tratada na seqüência, consiste basicamente de duas partes. A primeira é procurar verificar se existe ou não a necessidade de incorporar um complexo sistema de medição ao sistema de manufatura. A segunda é analisar os benefícios que a CMM trará ao processo diante das outras alternativas.

As categorias e respectivas subcategorias de custos associadas à medição de peças complexas por CMM, incorporada ao sistema de manufatura, estão explicitadas na figura 3.4.

CUSTOS FIXOS	CUSTOS VARIÁVEIS
• Engenharia	• Reposição de apalpadores
• Sistema de medição e periféricos	• Grau de utilização
• Infra-estrutura necessária	• Manutenção periódica
	• Mão de obra
	• Treinamento

Figura 3.4 – Categorias e subcategoria de custos para incorporação de uma CMM ao sistema de manufatura /2/

3.3.1 Custos Fixos

São aqueles que independem da quantidade de peças fabricadas no período considerado /51/. Estão relacionados com os custos indiretos de fabricação. Ex.: Aluguel, depreciação, etc.

Elementos a considerar:

a) Engenharia

Aqueles relativos à formação do grupo para especificação da estação de medição por coordenadas; à programação de seu computador (de acordo com a estratégia de medição) e à adaptação ao processo a ser implantado /2/. O tempo de especificação e seus custos estarão "atrelados" ao montante de capital a ser investido, ou seja, quanto maior, maiores os custos de engenharia;

b) Sistema de Medição e Periféricos

Representa o capital investido no sistema de medição e nos periféricos (computadores, apalpadores, magazines, etc.) responsáveis por inspecionar a peça complexa. Exemplos /2/:

- CMM manual: pode variar de 20 a 100 kUS\$;
- CMM automatizada: pode variar de 60 a 600 kUS\$;
- Sistema de medição dedicado (específico para medição de uma peça complexa): pode variar de 80 a 300 kUS\$; e
- Rugosímetro, calibradores, blocos-padrão e outros equipamentos: pode variar de 20 a 40 kUS\$;

c) Infra-estrutura

Dependerá da qualidade do local onde será instalada a CMM. Pode variar de (25 a 50)% dos custos com aquisição do sistema de medição /53/.

No caso de um laboratório, segundo Bosh, citando P. Sideris /2/, tem-se que:

- Para manutenção de temperatura a $(23 \pm 2)^\circ \text{C}$ \Rightarrow Custo total de 1,35 kUS\$/m², sendo 1 kUS\$/m² destinados à construção e o restante aos equipamentos de manutenção das condições; ou
- Para manutenção de temperatura a $(20,0 \pm 0,2)^\circ \text{C}$ \Rightarrow Custo de 1 kUS\$/m² destinado à construção e de 0,8 kUS\$/m² destinado aos equipamentos para manutenção das condições ambientais.

3.3.2 Aspectos Econômicos a Serem Considerados

Representam os custos embutidos na forma e no prazo de pagamento, bem como no uso e no local de instalação do sistema de medição:

a) Menor investimento possível

Assegurar a função de inspeção de acordo com as possibilidades da indústria, desde que os benefícios sejam comprovados (depende de análise criteriosa) /23/;

b) **Comprovação dos lucros**

A integração de um sistema de medição ao chão de fábrica deverá ser analisada sob o ponto de vista de maior lucro por peça produzida em relação a outros sistemas de medição, quer sejam convencionais, onde a mão de obra humana é a mais utilizada, quer sejam automatizados /6, 49/.

c) **Depreciação**

Pode variar, porém, para bens de capital (máquinas) é de 7 ou 8 anos /2/;

d) **Juros anuais**

Depende dos juros vigentes. Pode variar de 6 a 12% ao ano /2/;

e) **Área ocupada no chão de fábrica**

No caso de CMM o custo tende a ser mais elevado, pois necessita-se controlar o ambiente (temperatura, vibrações e umidade) /2/.

3.3.3 Custos Variáveis

São aqueles que oscilam em função da quantidade de produtos inspecionados no período de um ano /51/.

a) **Reposição de acessórios e apalpadores**

Custos com reposição de acessórios e de apalpadores utilizados durante o processo de inspeção, sendo baseado no uso e na experiência de quem os controla (30% do valor inicial) /2/.

b) **Grau de utilização**

Disponibilidade do sistema de medição para executar a tarefa conhecida através dos seus índices de confiabilidade.

c) **Manutenção**

Valor relativo aos custos com a aquisição do sistema de medição (investimento inicial) – de (3 a 7)% /2/.

d) **Mão de obra**

Depende da empresa e da especialização do pessoal empregado.

3.3.4 Análise Comparativa de Custos: CMM x Sistema de Medição Dedicado

Mostra-se uma comparação da estimativa dos custos de incorporação de uma CMM e de um sistema de medição dedicado ao sistema de manufatura, sendo que ambos executam a mesma tarefa. Os dados são estabelecidos a partir das referências /2, 40/.

1. Custos fixos

a.1) Engenharia: grupo de engenheiros das seguintes áreas envolvidas: Processo, Produção, Controle da Qualidade e Finanças – tempo estimado em dois meses de trabalho para um investimento aproximado de 500 kUS\$.

- CMM (1): especificação, testes de recebimento e instalação.
15 kUS\$ para 5 ou 6 engenheiros;
- Dedicado – executa a mesma tarefa que a CMM, porém construído exclusivamente para tal (2): especificação, projeto, contratação do fornecedor/ execução própria, construção, testes de recebimento e instalação.
150 kUS\$ para um grupo de 8 a 12 engenheiros, computadores, periféricos e acessórios.

Comparação e interpretação:

- Os profissionais designados à aquisição da CMM, na maioria das vezes, já conhecem seu desempenho e sua capacidade, ou na pior das hipóteses, possuem bibliografia disponível para isso. Confrontando-se a necessidade do sistema de manufatura com as características da CMM e seguindo-se a metodologia elaborada neste trabalho, pode-se especificar aquela que cumpra os requisitos mais adequadamente;
- No caso do sistema de medição dedicado, pode-se necessitar de horas de pesquisas ou adaptações aos sistemas existentes; do desenvolvimento de softwares para seu funcionamento e cumprimento da tarefa proposta; de tempo para ensaios e validação; dentre outras.

b.1) Sistema de Medição (aquisição)

- (1) 280 kUS\$
- (2) 210 kUS\$

Comparação e interpretação para uma mesma tarefa de medição:

- A complexidade construtiva de ambos os sistemas de medição e da tarefa por eles executada, bem como a necessidade de uma significativa confiabilidade na expressão do resultado final da medição, independente das condições externas (desde que dentro das especificações técnicas do projeto), garantem aos dois sistemas de medição um elevado custo de aquisição.

c.1) Periféricos (apalpadores / sensores e acessórios)

- (1) 30 kUS\$
- (2) 54 kUS\$

Comparação e interpretação:

- A baixa flexibilidade, característica do sistema de medição dedicado, pode levar a aquisição de um número maior de periféricos na busca de suprir essa deficiência (caráter mais subjetivo que a CMM).

d.1) Infra-estrutura (40% do custo de aquisição)

- (1) 112 kUS\$
- (2) 84 kUS\$

Comparação e interpretação:

- Segundo informações /40/, pode variar de 25 a 40% do valor de aquisição do sistema de medição, dependendo da qualidade dos resultados e da disponibilidade de espaço físico no chão de fábrica, indicando um maior custo para a CMM, pois a mesma, neste caso, apresentou um maior custo de aquisição.

Total dos custos fixos

CMM:	437 kUS\$
Sistema de medição dedicado:	498 kUS\$

Interpretação do resultado final:

- Considerando-se que a tarefa de medição a ser executada é a mesma, que a complexidade construtiva é semelhante em ambos os sistemas de medição (mesma tecnologia), seria esperado que a CMM apresentasse um custo fixo ligeiramente menor (13% neste caso) em função do maior número de fornecedores e opções de compra disponíveis no mercado. Porém, uma avaliação técnica e econômica mais criteriosa deve ser feita antes de optar-se por uma ou por outra.

2. Aspectos econômicos a serem considerados

a.2) Depreciação (considerando-se que ocorra em 7 anos, e que os custos iniciais, específicos com o sistema de medição, são obtidos pela soma dos custos calculados nos tópicos "a.1", "b.1" e "c.1" anteriores);

b.2) Juros anuais (6% ao ano sobre o custo de aquisição mencionado no item anterior);

c.2) Área ocupada no chão de fábrica

Pode variar de (1 a 5) kUS\$ por ano.

Nesse exemplo, considerou-se: 4 kUS\$ para a CMM e 2 kUS\$ para o sistema de medição dedicado.

Total por ano

CMM:	70 kUS\$
Sistema de medição dedicado:	87 kUS\$

Interpretação do resultado final dos aspectos econômicos:

- Considerando-se que os custos de aquisição da CMM foram menores que os do sistema de medição dedicado e que as considerações econômicas são proporcionais a eles, era de se esperar um menor custo (cerca de 20%) à CMM.

3. Custos variáveis (anual)

- a.3) Reposição de apalpadores e acessórios (30% do custo de aquisição dos periféricos – item c.1)
- b.3) Manutenção e calibração: CMM ou Dedicado: 3 kUS\$ (depende do fornecedor do serviço);
- c.3) Mão de obra: CMM ou Dedicado: 2 operadores: 25 kUS\$ (custo anual aproximado);
- d.3) Treinamento: 2 a 4 operadores por ano, varia de (1 a 2) kUS\$ - aproximadamente.

Total dos custos variáveis por ano

CMM:	39 kUS\$
Dedicado:	46 kUS\$

Interpretação do resultado final dos custos variáveis:

- As considerações iniciais são semelhantes ao caso anterior (aspectos econômicos).
- Nos tópicos “a.3”, “b.3” e “c.3” os custos foram considerados iguais para ambos os sistemas, porém, pode existir uma variação dependendo do nível de sofisticação de um ou de outro e de aspectos particulares. Mais uma vez, os custos com a CMM apresentam-se menores (cerca de 17%).

O resumo dos resultados é apresentado na figura 3.5.

		(1)	(2)			(1)	(2)			(1)	(2)
CUSTOS FIXOS (kUS\$)	a ₁	15	150	ASPECTOS ECONÔMICOS (kUS\$/ano)	a ₂	46	60	CUSTOS VARIÁVEIS (kUS\$/ano)	a ₃	9	16
	b ₁	280	210		b ₂	20	25		b ₃	3	3
	c ₁	30	54		c ₂	4	2		c ₃	25	25
	d ₁	112	84						d ₃	2	2
	TOTAL	436	498		TOTAL	70	87		TOTAL	39	46

Legenda:

(1) – CMM

(2) – Sistema de medição dedicado

(a₁, b₁, etc.) - Tópicos alfa numéricos que correspondem aos mesmos do item 3.3.4.

Figura 3.5 – Distribuição dos custos fixos, variáveis e aspectos econômicos (CMM x Sistema de Medição Dedicado)

A comparação entre os resultados obtidos indica:

- Economia direta de 60 kUS\$ na aquisição da CMM;
- Economia anual de 25 kUS\$;
- Em sete anos, representará uma economia direta de 225 kUS\$, sendo que a economia indireta, apesar da dificuldade em estimá-la, aparenta ser bastante significativa, uma vez que a CMM poderá executar outras tarefas, em função de sua flexibilidade, enquanto que o sistema de medição dedicado ficará restrito à tarefa para a qual foi projetado;
- Uma estimativa grosseira de retorno do investimento pode ser feita, considerando-se uma economia anual de 25 kUS\$/ano, por não se adquirir um sistema de medição dedicado, mais o lucro propiciado pela CMM através da disponibilidade, da rapidez e da confiabilidade nas inspeções realizadas, que irá variar de acordo com o acréscimo do número de itens conformes. Supondo-se que esse valor seja de 25 kUS\$, em 10 anos, a CMM terá pago o investimento (437 kUS\$/ 50 kUS\$) . Isso representa um investimento de médio prazo, característico de uma CMM /2/.
- Num caso específico, diversas abordagens, propiciadas pela metodologia de especificação proposta, deverão ser feitas para que a estimativa seja mais criteriosa.

Após a comparação dos custos entre dois sistemas de medição, vale verificar se a incorporação de um ou de outro trás benefícios ao controle do processo.

3.4 BENEFÍCIOS CONSEQÜENTES DO CONTROLE DE PROCESSO

À primeira vista, um investimento para controlar rápida e eficientemente o processo parece ser a solução "ideal".

Razões como: o aumento na qualidade e na produtividade, a necessidade de inspeção completa (100%), a complexidade crescente das peças e o elevado grau de flexibilidade de uma CMM não são suficientes para justificar sua aquisição /49/. Necessita-se comparar benefícios e custos de maneira lógica e bem amparada por argumentos técnicos e financeiros.

3.4.1 Benefícios ao Sistema de Manufatura

Um número crescente de indústrias utiliza máquinas CNC na fabricação de seus produtos /3/. Procurando evitar que fiquem ociosas por um longo período de tempo, enquanto executa-se uma operação de inspeção do tipo convencional (medidores diferenciais, calibradores, etc.) nas amostras selecionadas, adquire-se uma CMM, que é teoricamente

capaz de acelerar o processo de inspeção, tendo como conseqüência uma redução na ociosidade das máquinas CNC /17, 49/.

Se a CMM estiver adequadamente incorporada ao sistema de manufatura, tem-se, além da redução do tempo de inspeção e da possibilidade de aumento no número de características críticas inspecionadas, uma redução nos custos com refugo e retrabalho, uma vez que os erros de usinagem são detectados e corrigidos prontamente /54/.

Ainda, de acordo com as pesquisas realizadas por Pfeifer (fig. 3.6) /15/ e também verificadas nas referências /17, 22/, se o sistema de medição fizer uso da tecnologia de medição por coordenadas, propicia os seguintes benefícios:

- Aumenta o nível de automatização do processo;
- Controla e interfere no processo, comparando os resultados de medição com os requisitos de projeto (dimensionais e geométricos);
- Aumenta a segurança, a produtividade e a confiabilidade;
- Realimenta o processo, ajustando automaticamente máquinas (CNC) a cada peça complexa fabricada; e
- Usa softwares mais amigáveis, exibindo resultados na forma de gráficos ou de tabelas (facilitando a interpretação do operador).

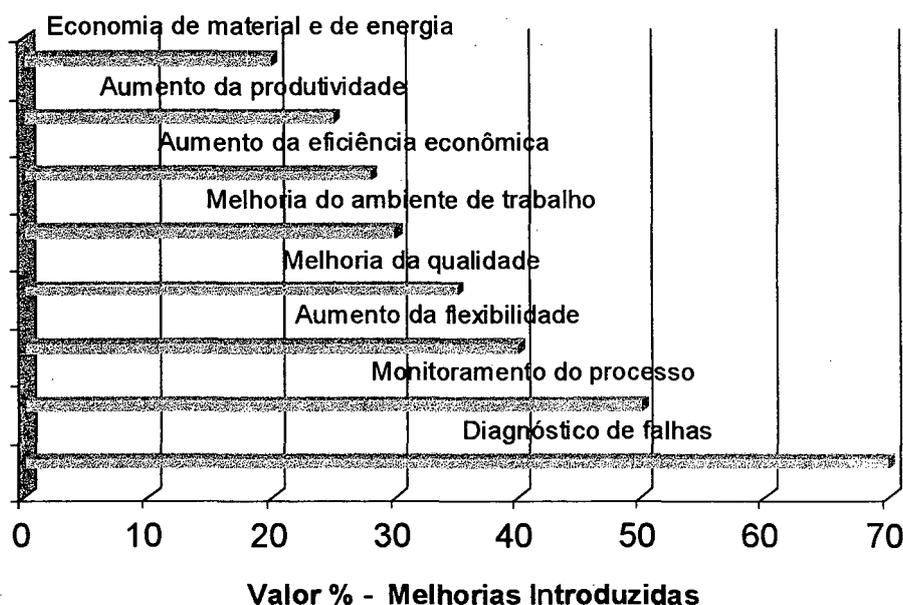


Figura 3.6 – Melhorias constatadas com a introdução da tecnologia de medição por coordenadas ao sistema de manufatura /15/

Verificando-se os resultados obtidos, a principal melhoria propiciada pela introdução da tecnologia de medição por coordenadas no chão de fábrica foi a prevenção de se fabricar peças defeituosas, uma vez que o diagnóstico de falhas e o monitoramento do processo foram os tópicos que mais apresentaram melhorias. Isso representa a diminuição de custos com peças retrabalhadas e refugadas, bem como uma maior confiabilidade nas inspeções realizadas, refletindo direta ou indiretamente nos outros fatores abordados.

Porém, deve-se considerar algumas possíveis perdas, em função da capacidade do próprio sistema de medição.

3.4.2 Cuidados na Seleção da CMM para Controle do Processo

A CMM pode causar um grande impacto ao sucesso financeiro de um negócio. Hoje, mais que nunca, procuram-se fabricar produtos de boa qualidade com baixo custo e manter o processo sob controle, tendo como consequência, uma redução no refugo e no retrabalho das peças fabricadas /2, 55/.

Sendo assim, a incorporação de um sistema de medição a um sistema de manufatura deverá considerar a sua própria contribuição na incerteza do processo como um todo, ou seja, sua capacidade torna-se parte da capacidade do processo /2, 14/, sendo válida a expressão:

$$C_p^2(\text{processo} + \text{sistema de medição}) = [C_p^2 \text{ processo} + C_p^2 \text{ sistema de medição}] \quad (3.1)$$

Analisando essa expressão, verifica-se que, para obter a capacidade de um processo específico, basta conhecer a capacidade total (com sistema de medição) e a capacidade do sistema de medição que está sendo utilizado.

3.4.3 Retorno de Investimento (ROI)

Esse tipo de análise ajuda na especificação do sistema de medição, uma vez que faz uma projeção dos custos para curto, médio ou longo prazo e compara as possíveis alternativas existentes /2, 53/.

As maiores considerações para o cálculo do retorno do investimento são /2/:

- Redução / eliminação de peças refugadas; e
- Redução / eliminação de peças retrabalhadas e reinspeccionadas.

O tempo para retorno do investimento pode variar da seguinte maneira /49/:

- Curto prazo: 5 anos;
- Médio prazo: 5 a 10 anos;
- Longo prazo: acima de 10 anos.

No caso de CMM incorporada ao chão de fábrica usam-se 7 anos /2/.

As metodologias existentes para cálculo do ROI /56/ são:

- a) Taxa de retorno (Tr) – oportunidades alternativas de investimento para determinar sua importância relativa.

$$Tr = \frac{\text{Média anual da economia ou lucro}}{\text{Investimento inicial total}}$$

Ex.: Considerando-se que com a aquisição de uma CMM houve uma economia anual de 100 kUS\$ e a mesma custou 280 kUS\$, teremos:

$$Tr = \frac{100}{280} \times 100\% = 35\%$$

- b) Payback (Pb) – cálculo da quantidade de tempo necessário para um investimento retornar seu preço de compra através da redução de custos ou aumento de lucro.

$$Pb = \frac{\text{Custo total de uma unidade}}{\text{Economia ou lucro anual}}$$

Ex.: Para o mesmo caso do exemplo anterior teremos:

$$Pb = \frac{280}{100} = 2,8 \text{ anos}$$

- c) Fluxo de caixa - retornos são expressos em termos de fluxo de caixa, sendo que o fluxo futuro é considerado.

$$\Theta = \frac{L_1}{(1+r)} + \frac{L_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{L_n}{(1+r)^n}$$

Onde: Θ = investimento inicial;

L = influência anual no caixa; e

r = taxa de retorno.

- d) Valor presente líquido - utilizando-se o método anterior, faz-se a comparação entre o valor atual e a sua projeção futura.

Valor inicial \leq valor presente das entradas futuras \Rightarrow investimento é viável.

Conhecendo-se os aspectos técnicos e econômicos à adequada especificação do sistema de medição para o chão de fábrica, desenvolve-se uma metodologia capaz de considerá-los.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA DE ESPECIFICAÇÃO DE UM A ESTAÇÃO DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Neste capítulo, será apresentada a metodologia de especificação desenvolvida, considerando os aspectos abordados nos capítulos anteriores.

Inicialmente, as diretrizes básicas e a necessidade de uma pré-avaliação do sistema de manufatura serão analisadas para, na seqüência, estabelecer-se a metodologia elaborada, cuja aplicação busca resultados como:

- Caderno de encargos, contendo os critérios técnicos e econômicos à comparação dos sistemas de medição; e
- Crítica às soluções encontradas, fornecendo subsídios ao setor responsável à adequada decisão.

4.1 DIRETRIZES PARA ESTABELECIMENTO DA METODOLOGIA

As diretrizes básicas são: objetividade; simplicidade; e adequabilidade.

A metodologia deve analisar aspectos inerentes ao processo, ao mensurando e ao sistema de medição; deve ser de simples aplicação, a fim de ser útil aos propósitos; e aplicável no âmbito pretendido pela empresa. Para tanto, uma pré-avaliação deve ocorrer.

4.2 PRÉ-AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Um processo de fabricação adequadamente controlado e com um comportamento estável dispensa o uso de sistemas de medição que inspecionem as peças fabricadas. Porém, existem casos que isso não ocorre, devido às restrições do mesmo, aos requisitos de projeto do produto, etc.

O processo pode ser classificado de acordo com o volume de peças fabricadas:

- a) Alto volume de produção – produção seriada
 - Meios de produção conforme
Sistema estabilizado, onde a inspeção torna-se desnecessária;
 - Meios de produção não-conforme
Estabilidade é alcançada através de uma inspeção sistemática;
- b) Produção em lotes e segmentada
 - Meios de produção conforme

Período de implantação. Necessita-se inspecionar as peças fabricadas, buscando atingir os níveis adequados de estabilidade (cartas de controle podem ser utilizadas). Atingida a estabilidade, torna-se desnecessária a inspeção.

- Meios de produção não-conforme

Períodos de instabilidade numa planta já instalada – inspeção eventual.

c) Produção quase unitária

Nesse caso, a produção não consegue sair de um transiente, necessitando de uma interatividade entre fabricação e inspeção.

Após a classificação do sistema de manufatura, sendo evidente a necessidade de inspeção, uma pré-avaliação, pode evidenciar dois casos distintos. O primeiro relativo a um processo de fabricação já instalado, onde foi constatada a necessidade de incorporar um sistema de medição automatizado e, o segundo, relativo a um processo de fabricação em projeto, que necessita de uma criteriosa especificação.

Seja qual for o caso a ser analisado, devem ser conhecidas as características técnicas e econômicas do sistema de manufatura, seu nível de controle da qualidade implantado ou pretendido, seus pontos críticos, suas não-conformidades, etc /2, 49/.

4.2.1 Processo de Fabricação Instalado

Inicialmente, uma comparação do atual desempenho do processo de fabricação (custos de peças refugadas e retrabalhadas) com os custos em aperfeiçoá-lo, deverá ser feita. Uma proposta para se fazer esse tipo de avaliação é explicitada no item 2.4, onde são considerados aspectos do processo, do mensurando e do próprio sistema de medição.

O resultado poderá indicar que o processo:

- Está apresentando um comportamento incompatível/irregular, quando comparado àquele estabelecido como meta;
- Em determinado ponto, executa a tarefa de inspeção de maneira lenta, ou seja, propiciando a formação de “gargalo” e contribuindo com a ociosidade de algumas máquinas;
- Tem, mediante comprovação técnica, operações de fabricação mais críticas que demandem um sistema de medição flexível e ágil para inspecionar as tarefas complexas executadas; e
- Possui boa estabilidade e com algumas modificações, conclui-se que não se justifica a aquisição e a instalação de um sofisticado sistema de medição.

4.2.2 Processo de Fabricação em Projeto

Com o intuito de acompanhar as inovações tecnológicas de uma nova célula de manufatura (FMC) a ser instalada, necessita-se incorporar um sistema de medição que apresente características compatíveis. Algumas considerações iniciais, como as apresentadas na seqüência, e adaptações ao questionário do item 2.4 auxiliam o processo de estudo e a análise, antes de se aplicar a metodologia. São elas:

- O nível de confiabilidade demandado pelo processo;
- O tempo estimado de retorno do investimento;
- A estabilidade prevista para o processo justifica a aquisição de um sofisticado sistema de medição ?

4.3 METODOLOGIA DE ESPECIFICAÇÃO PROPOSTA

As informações obtidas junto à CERTI/CMCQ e às empresas parceiras – MERCEDES-BENZ DO BRASIL S. A. e EMBRACO S. A. foram significativas para se conhecer, na prática, a aplicação de um sistema de medição incorporado ao sistema de manufatura, bem como a maneira de especificá-lo.

A metodologia, proposta neste trabalho, foi desenvolvida seguindo-se as diretrizes mencionadas no item 4.1 e baseada em algumas ferramentas como fluxograma e quadro de atividades.

4.3.1 Fluxograma

Cada bloco proposto no fluxograma (fig. 4.1), apresenta questões ou ações a serem elaboradas/executadas de acordo com a necessidade do processo. As ferramentas utilizadas durante a elaboração e o planejamento das questões/ações previstas foram: método para solução de problemas – estabelecendo a seqüência de idéias /57/, ciclo PDCA e 5W / 1H – elaborando e gerenciando as ações e os resultados /43/.

4.3.2 Quadro de Atividades

Com o objetivo de conduzir a metodologia de maneira sistemática e coerente com os conceitos e com os modelos existentes /53, 57/, montou-se um quadro, onde são destacados os meios e os resultados esperados. Esse foi dividido em seis fases: formulação do problema; o problema da medição; elaboração do caderno de encargos; coleta das propostas; sistema de medição adequado ao processo; e incorporação do sistema de medição ao sistema de manufatura (comentadas na seqüência).

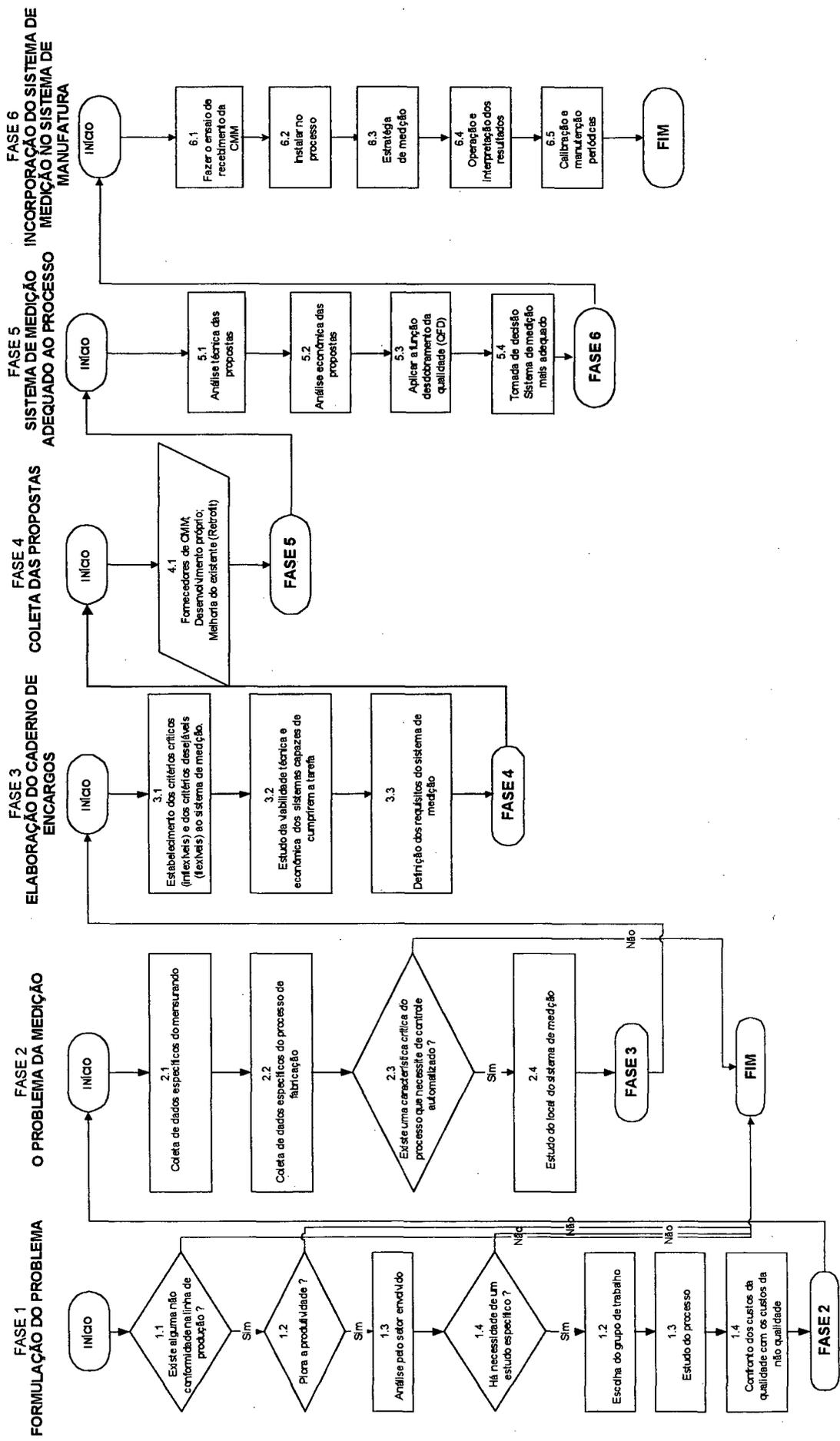


Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia de especificação

4.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Nessa fase, deve-se conhecer os detalhes do processo instalado ou em fase de projeto. Para tal, é importante que seja estabelecido o grupo de trabalho responsável pela definição da demanda do processo, a fim de que sejam levantadas as características técnicas e econômicas. A definição desse grupo pode ser motivada pelas manifestações da chefia de planejamento do processo que propõe a aquisição de um sistema de medição rápido, flexível e mais próximo ao sistema de manufatura. À primeira vista, um sistema com essas características pode parecer a solução “ideal”, porém somente uma análise criteriosa será capaz de identificar as reais necessidades.

A ferramenta elaborada com o propósito de dar subsídios ao grupo de trabalho durante a análise é o questionário proposto no item 2.4. Esse, se adequadamente aplicado, tem condições, de fornecer resultados como:

- Existência de pontos críticos/desvios do processo que necessitem de controle metrológico;
- Comportamento do processo;
- Pré-avaliação dos custos: com e sem a integração do sistema de medição ao sistema de manufatura; e
- Necessidade ou não de inspeção.

A figura 4.2 destaca as perguntas, as atividades, as principais ferramentas e os resultados esperados dessa fase. O modelo é o mesmo para as fases seguintes, mudando-se apenas o conteúdo.

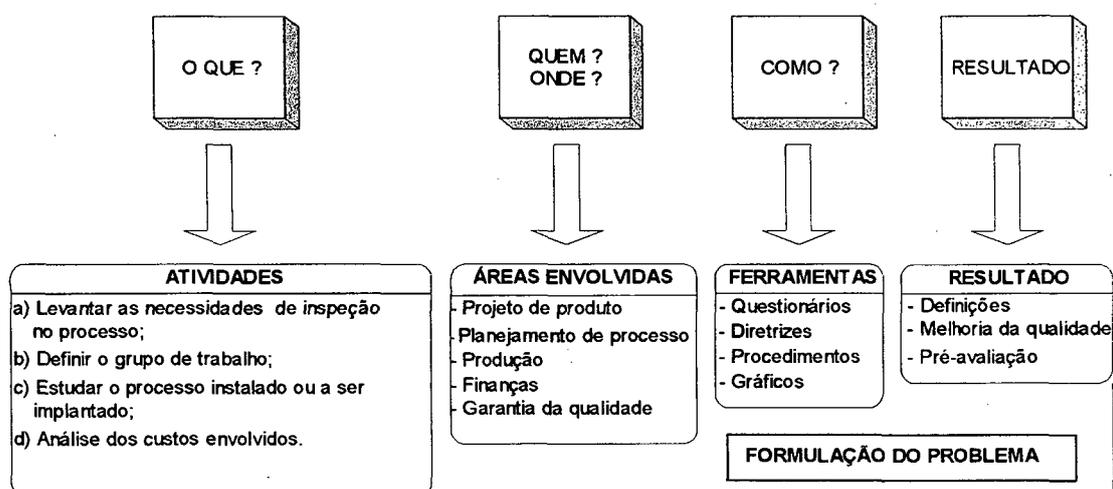


Figura 4.2 – Formulação do problema (Fase 1)

O não cumprimento do proposto nessa primeira fase, pode vir a prejudicar a futura incorporação de um sistema de medição ao sistema de manufatura, pois os indicadores do processo podem não ser conhecidos para que sejam propostas as adequadas correções.

Na seqüência, propõe-se uma análise mais específica do mensurando e do próprio processo que o fabrica.

4.5 PROBLEMA DA MEDIÇÃO

Nessa fase, deve-se conhecer as características da peça complexa a ser inspecionada e do processo de fabricação, fornecendo alguns subsídios à localização do sistema de medição no sistema de manufatura.

A peça pode ser caracterizada conhecendo-se sua massa, seu volume, sua funcionalidade, sua geometria, suas tolerâncias, etc.

O processo de fabricação pode ser caracterizado, através das cartas de controle, dos procedimentos existentes, do tempo de operação consumido por cada máquina-ferramenta, do layout do processo, de ferramentas da qualidade e da análise de custos. O disposto no item 2.4 também auxilia na execução dessa fase.

Após estudo das características do processo e do mensurando, deve-se ter uma idéia dos custos envolvidos na incorporação de um sistema de medição automatizado ao sistema de manufatura, analisando-se o "layout" do processo, as condições ambientais e os custos do espaço físico no chão de fábrica. Para tanto, podem ser empregadas ferramentas como: diagrama causa-efeito, análise de Pareto, análise de custos da qualidade (COQ), etc.

Esse estudo dará subsídios à proposta de definição do local de instalação do sistema de medição, de acordo com o proposto no item 2.2; e início à elaboração do caderno de encargos.

4.6 ELABORAÇÃO DO CADERNO DE ENCARGOS

Essa fase tem como proposta explicitar os critérios técnicos e econômicos, a fim de se comparar os sistemas de medição existentes de uma forma simples, objetiva e de fácil interpretação. Para tanto, uma maneira concisa será proposta (usando a matriz QFD), para, em seguida, serem dispostos num caderno de encargos e encaminhados aos fornecedores de sistemas de medição. O cumprimento dos critérios irá credenciar ou não fornecedores à próxima fase do método de especificação elaborado.

Para que os critérios técnicos e econômicos possam ser dispostos num caderno de encargos, como propõe essa fase, necessita-se, inicialmente, discriminá-los.

Os critérios técnicos foram divididos em dois grupos (fig. 4.3): obrigatórios ou inflexíveis e desejáveis ou flexíveis. O não atendimento àqueles, pertencentes ao primeiro grupo, desqualifica o fornecedor de sistemas de medição a participar das fases seguintes.

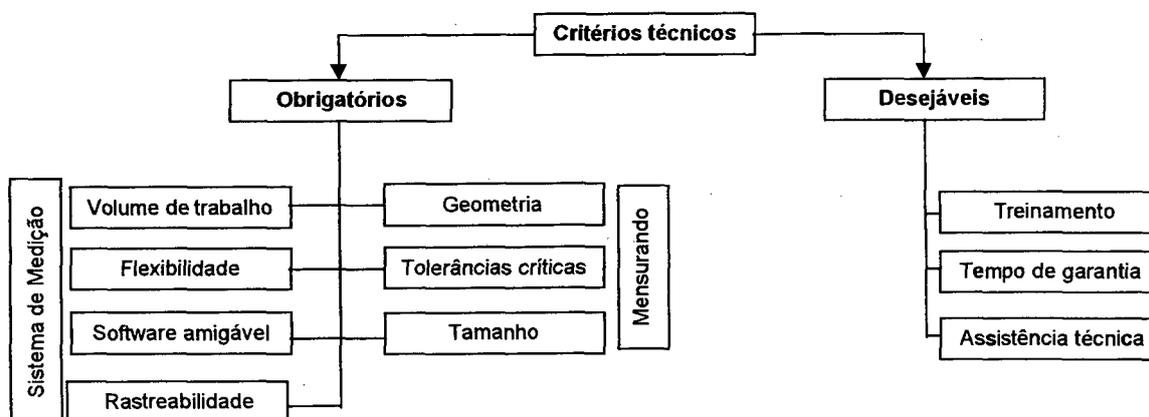


Figura 4.3 – Grupos de critérios técnicos a serem cumpridos pelo sistema de medição

Esses critérios não podem ser considerados como regra à especificação de um sistema de medição, pois cada caso analisado tem sua particularidade. Porém, esses foram alguns dos mais mencionados durante a enquête realizada junto às empresas parceiras. Todos os critérios considerados importantes nas referências /2, 6, 17, 37, 58, 59, 60/, analisadas durante as pesquisas de embasamento deste trabalho, são vislumbrados na seqüência.

4.6.1 Critérios Técnicos Obrigatórios

São aqueles que estabelecem as bases iniciais de comparação à especificação. Referem-se, geralmente, ao mensurando, ao sistema de medição e à estratégia de medição, conforme explicitado:

- Mensurando
 - Tolerância e funcionalidade (complexidade);
 - Material;
 - Tamanho e massa;
 - Rugosidade superficial;
- Sistema de Medição
 - Volume de trabalho;
 - Rastreabilidade a laboratórios pertencentes à Rede Brasileira de Calibração (RBC);
 - Grau de flexibilidade (adaptação às modificações do produto / processo);
 - Linearidade, repetitividade, histerese, reprodutibilidade (troca de apalpadores);

- Tempo de medição;
- Velocidade e aceleração do apalpador;
- Posicionamento e força de apalpação;
- Estratégia de medição
 - Software – alguns dos critérios para sua avaliação são explicitados na figura 4.4.

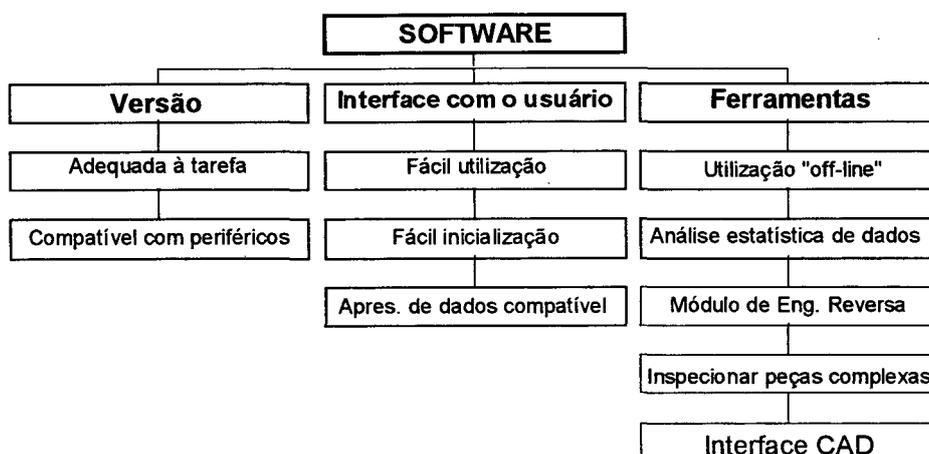


Figura 4.4 – Características do software a ser utilizado na CMM incorporada ao sistema de manufatura /2/

Após análise dos critérios obrigatórios, faz-se o mesmo procedimento com o outro grupo de critérios.

4.6.2 Critérios Técnicos Desejáveis

São aqueles que contribuem com os níveis de confiança da inspeção a ser realizada, ou seja, propiciam a segurança nas medições que serão executadas:

- Treinamento de operadores;
- Manutenção preventiva periódica e corretiva, assim que necessária; e
- Garantia de equipamentos e peças

Após análise dos critérios técnicos, devem ser estabelecidos os critérios econômicos à aquisição do sistema de medição, uma vez que esses indicarão os custos com o processo de implantação do sistema de medição.

4.6.3 Critérios Econômicos

São aqueles responsáveis pela análise financeira. Isso ocorre através da consideração dos seguintes aspectos:

- Levantamento dos custos de operação do sistema de manufatura implantado;
- Comparação do montante de capital necessário à aquisição, à operação e à manutenção dos possíveis sistemas de medição a serem adquiridos. Devem estar de acordo com as características técnicas; e
- Estimativa do tempo de retorno do investimento.

O elenco de critérios econômicos propostos a seguir não esgota todas as possibilidades existentes, dependendo, mais uma vez, de uma adequação ao caso analisado e do proposto em todo o capítulo 3:

- Custos do sistema implantado;
- Custos de aquisição, de instalação, de manutenção, de operação, de calibração e de transporte do sistema de medição até o local de sua instalação;
- Tempo de retorno do investimento;
- Custos de aquisição de acessórios (apalpadores, sistema de transporte de peças, mesa giratória, computadores, etc.) e periféricos;
- Custos com treinamento de operadores; e
- Custos com infra-estrutura e apoio.

Após a discriminação dos critérios, a fase propõe que seja utilizada a ferramenta de desdobramento da função qualidade (QFD).

4.6.4 Consolidação Qualitativa e Quantitativa dos Critérios Técnicos e Econômicos

Através da montagem da matriz QFD, pode-se estabelecer um relacionamento entre as necessidades do sistema de manufatura (qualidades exigidas) e as características da qualidade (critérios de desempenho do sistema de medição).

Sabendo-se que o emprego desse tipo de ferramenta preconiza um complexo estudo das várias fases de fabricação de um produto, desde o projeto até a venda, optou-se por simplificá-la e utilizá-la apenas com o intuito de dar a objetividade necessária ao método de especificação.

1. Seqüência para aplicação da ferramenta QFD.

O fluxo de atividades proposto na figura 4.5 orienta, genericamente, a aplicação da ferramenta à especificação do sistema de medição destinado ao sistema de manufatura, sendo que detalhes específicos à construção da casa da qualidade, com reflexos diretos na metodologia elaborada, são apresentados no item subsequente.

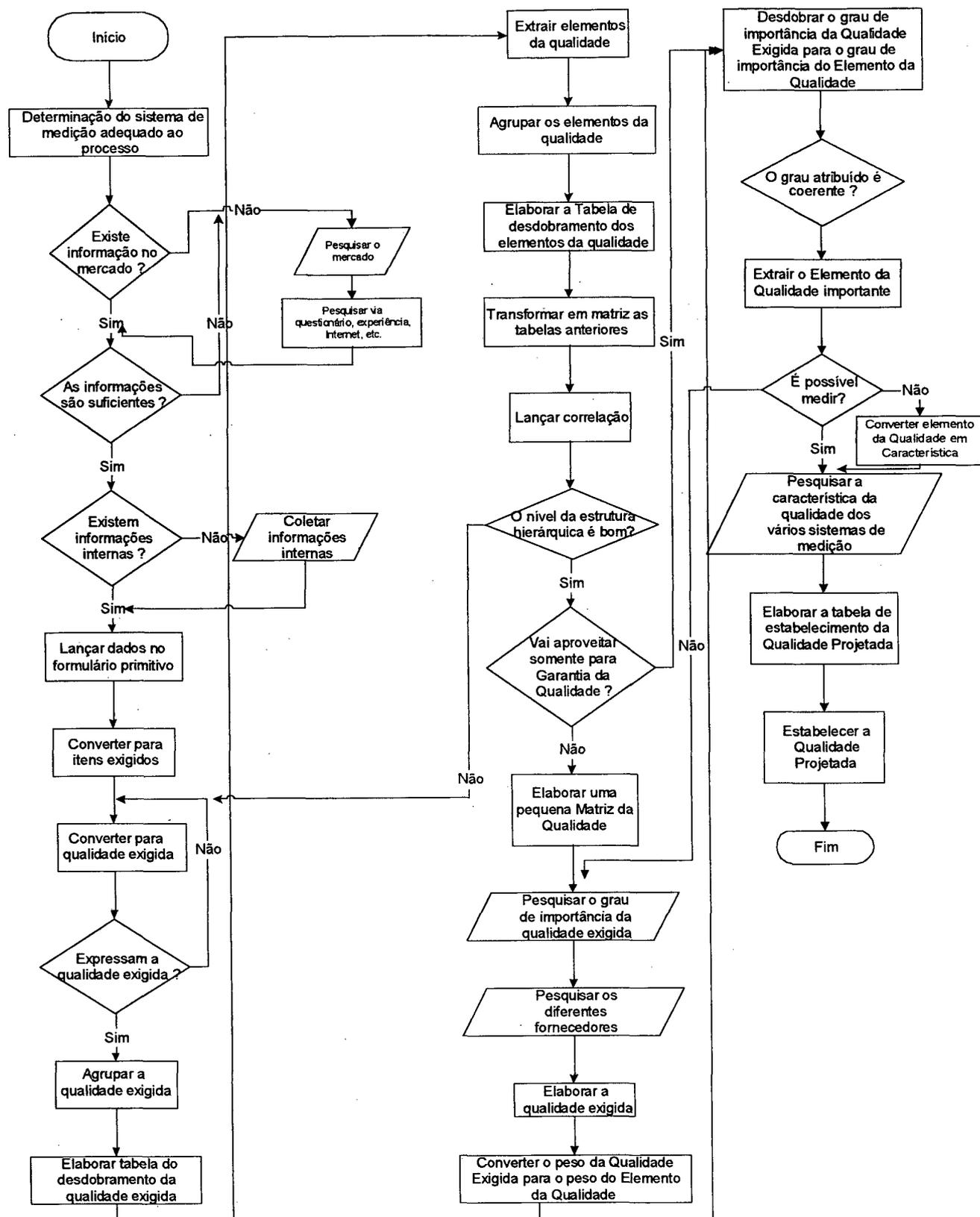


Figura 4.5 – Fluxo de tarefas para montagem da matriz QFD /46/

2. Casa da qualidade.

Neste ponto, deve-se observar atentamente a seqüência das atividades a serem executadas, buscando adequá-las à situação do sistema de manufatura analisado. Isso significa tratá-lo com objetividade e particularidade.

A figura 4.6 indica os passos seguidos na montagem da casa da qualidade, sendo detalhados na seqüência.

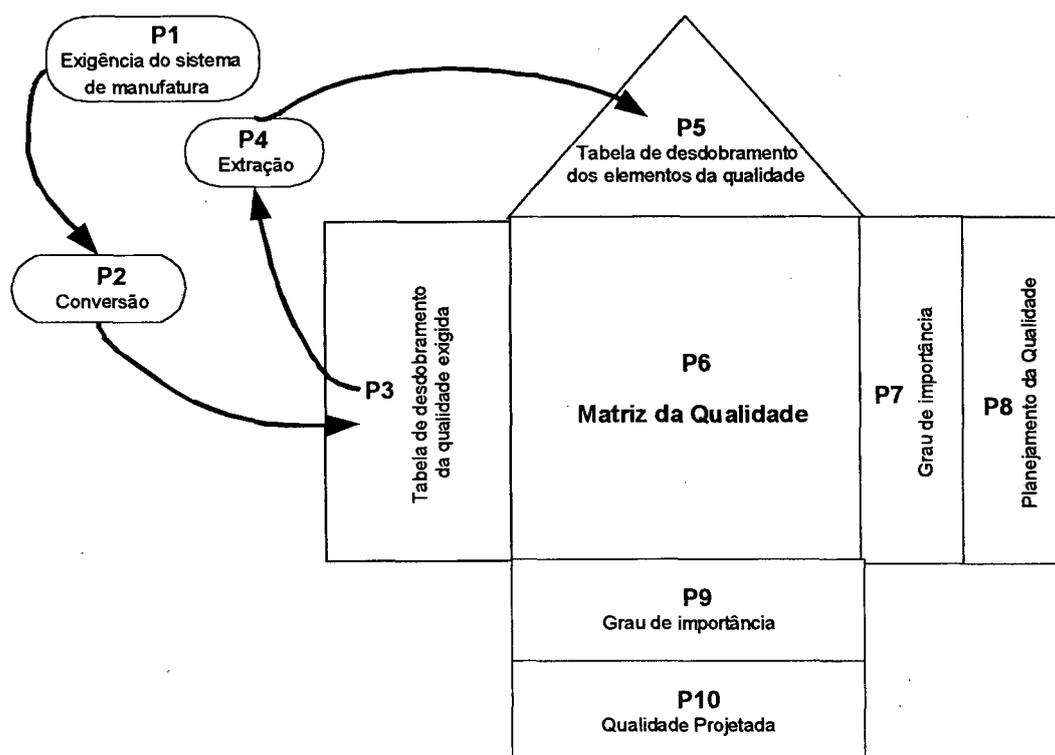


Figura 4.6 – Casa da Qualidade – passos para sua montagem /46/

P1) Exigência do cliente – a necessidade do sistema de manufatura é verificada.

Aspectos genéricos, vistos como necessidade do sistema de manufatura, devem ser considerados. Como exemplo prático, tem-se:

O sistema de medição a ser incorporado ao sistema de manufatura deve:

- Ser adequado às condições ambientais do chão de fábrica;
- Ser de fácil operação.

P2) Conversão para qualidade exigida – itens exigidos pelos clientes são transformados em qualidades exigidas (procurar extrair o maior número).

As necessidades são verificadas e tratadas de maneira clara e objetiva, evitando-se pontos contraditórios e podendo-se ter várias qualidades exigidas para um só item exigido pelo cliente.

Voltando ao exemplo do passo anterior, pode-se converter aquelas necessidades dos clientes, nas seguintes qualidades exigidas:

- Possuir sistema para isolamento de vibrações e compensação de temperatura (referentes à primeira necessidade do cliente); e
- Trocar apalpadores automaticamente e apresentar interface amigável (referentes à segunda necessidade do cliente).

P3) Elaboração da tabela de desdobramento das qualidades exigidas – as qualidades exigidas são agrupadas e uma hierarquia, interna a cada grupo, é estabelecida. A tabela de desdobramento da qualidade é montada;

P4) Extração do elemento da qualidade – dentre estes, os que são mensuráveis serão transformados em características da qualidade. Conversão daquilo que o sistema de manufatura necessita para a tecnologia disponível ao cumprimento dessa necessidade (solução de engenharia para satisfazer as exigências da qualidade). A figura 4.7 mostra os elementos da qualidade referentes às necessidades de controle de processo, por uma CMM, de um sistema de manufatura genérico.

ELEMENTO FÍSICO	ELEMENTO DE TEMPO
<ul style="list-style-type: none"> • Características da estrutura da CMM (tamanho, massa, etc.); • Característica dinâmica (velocidade de apalpação, aproximação, etc.); • Característica física (temperatura de trabalho, umidade permitida, considerações para manutenção da incerteza de medição, etc.); 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistência ao meio ambiente (calor, umidade, poeira, etc.); • Tempo (continuidade da eficácia, rapidez na inspeção, etc.); • Durabilidade e preservação (resistência aos anos de uso, taxa de defeitos, facilidade de reparos, calibração, etc.);
ELEMENTO FUNCIONAL	ELEMENTO ECONÔMICO
<ul style="list-style-type: none"> • Taxa de eficiência (energia, facilidade de manuseio, automatização, integração ao sistema de manufatura, controle da máquina CNC, etc.); • Nível de segurança no resultado da medição (confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade, etc.); 	<ul style="list-style-type: none"> • Custos (manutenção, equipamento, infraestrutura, calibração, especificação, etc.); • Permutabilidade (troca de peças, "up grade");
ELEMENTO HUMANO	ELEMENTO DE PRODUTIVIDADE
<ul style="list-style-type: none"> • Interface homem-máquina (software amigável, nível de conhecimento, etc.); • Grau de aprimoramento (treinamento necessário, etc.); 	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiência de operação (menor número de homem-hora (dia), menor retrabalho, técnica especializada desnecessária, troca de apalpadores, etc.); • Matéria-prima (variabilidade, facilidade no armazenamento, facilidade na inspeção, adaptação à capacidade do processo); • Ganho (ganho significativo, facilidade no retrabalho, facilidade de conversão para outro tipo de produto).

Figura 4.7 – Elementos da qualidade a serem considerados para uma CMM

- P5) Elaboração da tabela de desdobramento de elementos da qualidade – devem ser feitos agrupamentos, considerando-se: objetivos de medição (dimensão, forma); características do sistema de medição (velocidade de medição e de aproximação, volume de trabalho); etc. Não devem ser feitas suposições;
- P6) Matriz da qualidade – relaciona as exigências dos clientes com as características da qualidade (elementos da qualidade mensuráveis). Valores e símbolos usados para o estabelecimento do nível de correlação:
- Forte (9):  Médio (3):  Fraco (1):  ;
- P7) Grau de importância da qualidade exigida – pode ser feito através de enquête ou aplicando-se o Processo Hierárquico Analítico (AHP – Analytic Hierarchy Process), onde as qualidades exigidas pelo cliente são comparadas duas a duas /46/ e as notas (1, 3 ou 5) são estabelecidas;
- P8) Estabelecimento da qualidade planejada – compara-se os atributos dos fornecedores de sistemas de medição pré-selecionados;
- P9) Conversão dos pesos – grau de importância estabelecido no passo 7 é multiplicado pelos valores das correlações estabelecidos no passo 6;
- P10) Qualidade projetada – comparação tecnológica: os dados reais das características da qualidade de cada fornecedor são explicitados, bem como aqueles pretendidos pelo sistema de manufatura.

Estabelecida a casa da qualidade, onde os elementos da qualidade propostos para a especificação do sistema de medição são os critérios técnicos e econômicos, elabora-se o caderno de encargos.

4.6.5 Caderno de Encargos

O caderno de encargos é a maneira encontrada para organizar-se os critérios técnicos e econômicos, antes de serem remetidos aos fornecedores de sistemas de medição.

A figura 4.8 é uma proposta de caderno de encargos, adaptada a partir da referência /53/, das constatações junto às empresas parceiras e dos contatos realizados com importantes fornecedores de CMM via Internet /61/.

<p>GENERALIDADES</p> <ol style="list-style-type: none"> Classificação da Máquina: Ponte, portal, coluna, lança, etc. Massa total do sistema de medição (kg) Tamanho da máquina (X, Y, Z) Modos e princípio de operação Tipos de apalpadores Parâmetros de operação <ul style="list-style-type: none"> Razão de aproximação do sistema de apalpador – mm/s Distância de aproximação do sistema de apalpação – mm Velocidade de movimentação do sistema de apalpação (X, Y, Z) – mm/s Aceleração máxima (X, Y, Z) – mm/s² Velocidade em scanning Velocidade de toque Força de apalpação <p>DADOS GERAIS</p> <ol style="list-style-type: none"> Linha de Produção <ul style="list-style-type: none"> Local Número de peças / dia a serem inspecionadas Tolerância do mensurando Condições do ambiente de produção / inspeção Suprimento de energia Manutenibilidade Programa de treinamento dos operadores Documentação requerida <ul style="list-style-type: none"> Manual de treinamento Manual de referência (dados técnicos) Manual de manutenção 	<ul style="list-style-type: none"> Manual de utilização do software Lista de partes a serem recolocadas <p>CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO</p> <ol style="list-style-type: none"> Faixa de temperatura Coefficiente de dilatação térmica das escalas Fornecimento de energia elétrica Vibração Ar comprimido <ul style="list-style-type: none"> Pressão Tratamento Fluxo <p>DESEMPENHO</p> <ol style="list-style-type: none"> Modo de operação Repetitividade Faixa de medição (X, Y, Z) Resolução Reprodutibilidade Incerteza do sistema de medição Temperatura nominal Variação de T em 24 h Gradiente de temperatura <ul style="list-style-type: none"> Vertical Horizontal <p>ACESSÓRIOS</p> <ol style="list-style-type: none"> Sistema anti-vibração Sistema de injeção de ar comprimido Kit/magazine de apalpação Manutenção do sistema de medição Mesa rotativa Gabaritos de fixação <p>SOFTWARE</p> <p>Dependerá do sistema de medição a ser escolhido, porém deve-se estabelecer quais são seus principais aspectos.</p>									
<p>COMPUTADOR</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tbody> <tr> <td style="width: 33%;">1. Processador</td> <td style="width: 33%;">4. Monitor</td> <td style="width: 33%;">7. Modem</td> </tr> <tr> <td>2. Memórias RAM Disc Drive</td> <td>5. Teclado</td> <td>8. Mouse</td> </tr> <tr> <td>3. CD-Rom</td> <td>6. Impressora</td> <td>9. Interface gráfica</td> </tr> </tbody> </table>		1. Processador	4. Monitor	7. Modem	2. Memórias RAM Disc Drive	5. Teclado	8. Mouse	3. CD-Rom	6. Impressora	9. Interface gráfica
1. Processador	4. Monitor	7. Modem								
2. Memórias RAM Disc Drive	5. Teclado	8. Mouse								
3. CD-Rom	6. Impressora	9. Interface gráfica								

Figura 4.8 – Caderno de encargos para especificação de CMM

Com o recebimento das propostas, o grupo pode iniciar o processo de indicação do sistema de medição.

4.7 COLETA DAS PROPOSTAS

Nessa fase, são coletadas todas as propostas recebidas: da própria empresa (através do projeto e da construção de um sistema de medição dedicado; do uso de CMM disponível da própria indústria, etc.); dos fornecedores de sistemas de medição ou dos que possam vir a projetá-los; e da proposta de melhoria do sistema de medição já existente na fábrica ("retrofit").

Através de reuniões/brainstorming, do uso de ferramentas da qualidade e das análises metrológicas e benefício-custo, faz-se uma pré-avaliação das propostas recebidas, eliminando-se aquelas que não atendam aos critérios técnicos obrigatórios (item 4.6.1) e passando-se à fase decisiva do processo.

4.8 SISTEMA DE MEDIÇÃO ADEQUADO AO PROCESSO

Através da análise técnica e econômica das propostas coletadas, baseadas nos resultados da função desdobramento da qualidade – QFD, algumas soluções são propostas e, na seqüência, submetidas à análise APA (Adequabilidade, Praticabilidade e Aceitabilidade) /62/. Para tanto, devem atender aos critérios críticos e desejáveis, ser da mesma natureza da tarefa (especificação de CMM para o sistema de manufatura) e ao "quando" da tarefa.

Os próximos itens são conseqüência de adaptações feitas na referência /62/.

a) Adequabilidade da Solução

Os seguintes fatores intervenientes deverão ser observados:

- Afinidade – a solução deverá ser da mesma natureza do problema.

Ex.: Problema: especificar a CMM;

Solução: aplicar uma metodologia coerente e indicar o fornecedor mais adequado;

- Integridade – grau em que é atendido "o que" deseja-se realizar.

Ex.: totalmente, parcialmente, etc.;

- Âmbito – solução incide sobre o "onde" da tarefa.

Ex.: incorporada ao sistema de manufatura;

- Oportunidade – "quando" da tarefa.

Ex.: essa semana, esse mês, etc.

b) Praticabilidade da Solução

Devem ser considerados os meios disponíveis em confronto com os óbices para implementá-la: analisa-se a experiência do pessoal envolvido e os obstáculos a serem transpostos dentro dos prazos estabelecidos, considerando-se:

- Disponibilidade – recursos disponíveis (humanos e financeiros), respondendo-se às seguintes perguntas:

Os meios necessários estão disponíveis na quantidade suficiente ?

As dificuldades são superáveis ou impedem o atendimento dos prazos ?

- Qualidade – perguntas a serem respondidas:

A qualidade do equipamento satisfaz ?

A experiência dos operadores satisfaz ?

O suporte atual / oferecido pelo fornecedor do sistema de medição satisfaz ?

- Ambiente – referente à utilização da área no sistema de manufatura, deve-se perguntar:

O espaço é suficiente ?

As condições são adequadas ?

As dificuldades são superáveis ?

c) Aceitabilidade da Solução

Uma solução, dentre duas ou três, pode ser considerada aceitável, ao comparar-se as relações benefício-custo de cada uma. Assim, obtém-se uma classificação entre os sistemas de medição que participaram da fase final de especificação. Para tanto, as seguintes perguntas deverão ser respondidas:

- Os resultados obtidos na especificação compensam seus custos ?
- Os resultados obtidos compensam os riscos assumidos ?
- A solução convém ?
- Há necessidade de uma análise mais crítica junto ao fornecedor ?
 - Intercomparação,
 - Experimentação, etc.

d) Vantagens e Desvantagens das Soluções

Exemplo no caso da especificação de uma CMM: análise dos fornecedores que cumpram os critérios previstos em 4.6.1 e 4.6.2:

- Como vantagem pode-se ter: atendimento a todos os critérios obrigatórios e desejáveis;
- Desvantagens: depende de hipóteses, ou seja, o fornecedor precisa fazer ajustes em seu produto para atingir as necessidades de seu cliente;

- A comparação entre as vantagens e as desvantagens apontará a CMM mais adequada ao sistema de manufatura.

Após a decisão e posterior aquisição do sistema de medição, é adequado acompanhar sua instalação e desempenho, conforme proposto na última fase.

4.9 INCORPORAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO NO SISTEMA DE MANUFATURA

Nessa fase, busca-se, fisicamente, incorporar o sistema de medição ao sistema de manufatura. O local de instalação, a infra-estrutura, e os demais aspectos inerentes ao fato deverão ser estabelecidos e cumpridos no desenvolvimento dessa fase.

Como exemplo das providências a serem tomadas nessa fase temos:

- Ensaio de recebimento de todo o equipamento;
- Instalação do sistema de medição no local determinado (fase 2);
- Consolidação dos meios para uma adequada operação do sistema de medição (procedimentos e treinamento), elaborando a estratégia de medição;
- Elaboração da planilha para cálculo da incerteza de medição;
- Calibração periódica do sistema de medição; e
- Elaboração de um plano prevendo a execução da manutenção preventiva e corretiva.

Desenvolvida a metodologia, resta, agora, sua validação, ou seja, a comprovação de sua contribuição à fabricação de peças complexas, através de estudos de casos específicos.

CAPÍTULO 5

ESTUDO DE CASOS E VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA

A proposta deste capítulo é validar a metodologia desenvolvida. Para tanto, são estudados três casos distintos de incorporação de uma CMM ao sistema de manufatura.

O primeiro caso é uma simulação concernente à fabricação de blocos de motor para caminhões. Aqui, é importante que se defina adequadamente o sistema de medição, a fim de agilizar o processo de inspeção e diminuir o tempo ocioso das máquinas-ferramenta.

No segundo caso, compara-se a metodologia desenvolvida com a adotada por uma indústria.

O terceiro caso trata da incorporação de um sistema de medição a uma célula flexível de manufatura, com a finalidade de executar inspeção em todas as peças fabricadas (100 %).

Vale observar, que as críticas e conclusões formuladas no capítulo são genéricas, não deixando explícito a qual caso ou empresa se referem.

5.1 FASES DO DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA

A validação da metodologia foi precedida por um trabalho de desenvolvimento da mesma. Este, foi subsidiado por informações obtidas junto às empresas parceiras da Fundação CERTI e dividido em 3 fases:

c) Coleta de informações – após a elaboração de um primeiro esboço da metodologia de especificação, baseada em adaptações feitas a algumas ferramentas existentes (PDCA /42/, Método para solução de problemas /43/, etc.), foram realizados os contatos iniciais com as empresas. O resultado foi a elaboração de um cronograma de visitas e de observações às mesmas, buscando informações a respeito da seleção dos sistemas de medição que são utilizados na inspeção dos produtos fabricados;

d) Aplicação das informações à metodologia – constituiu-se uma segunda proposta, agora mais detalhada e com o foco na indústria de peças complexas.

Na seqüência, retomou-se a algumas empresas interessadas no trabalho, buscando mais informações e detalhes. Nessas, os responsáveis pela especificação de sistemas de medição foram disponibilizados e contribuíram com a evolução da proposta, ao repassarem suas experiências; e

- e) Validação da metodologia – a última fase do cronograma compreendeu o desenvolvimento e a implementação da metodologia com os dados da fase anterior. Após, aplicou-se em três casos, a fim de validá-la.

5.2 ESTUDO DE CASOS

O objetivo do estudo de casos é procurar colocar em prática os preceitos deste trabalho. Sendo assim, primeiramente, serão descritos os casos, para, em seguida, criticá-los genericamente (sem identificá-los).

Outras empresas, além das explicitadas nos itens 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3, contribuíram, indiretamente, com o desenvolvimento da metodologia, e que, além dessas, houve colaboração de importantes especialistas nacionais (CERTI/CMCQ) e internacionais /40/.

5.2.1 Caso Simulado – CS

O caso descrito utiliza dados cedidos por uma das empresas parceiras – MERCEDES-BENZ DO BRASIL S. A.

Considerando-se que um sistema de manufatura, composto por diferentes máquinas que executam operações como: mandrilagem, fresagem, etc. em blocos de motores, cuja inspeção é executada por uma CMM localizada próxima ao mesmo, em “sala climatizada”, não apresenta características compatíveis com as exigências do processo, tem-se:

a) Sistema de Manufatura

As operações envolvidas no processo de manufatura do bloco de motor são, esquematicamente, representadas na figura 5.1.

A intenção é mostrar, mediante condições, supostamente, vigentes na empresa, a adequabilidade da metodologia desenvolvida.

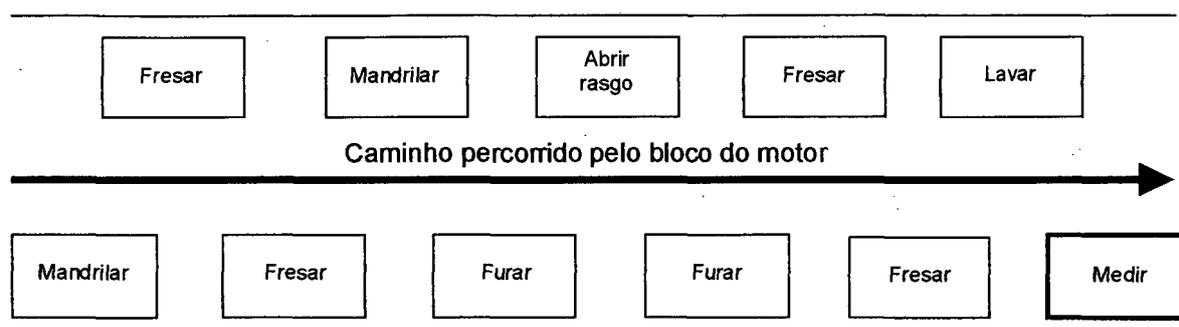


Figura 5.1 – Representação esquemática do processo de fabricação do bloco do motor

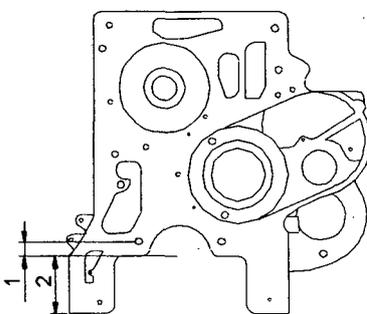
Após a peça passar pela operação de lavagem, é conduzida à sala de inspeção. Observou-se em ambos, sala e sistema de medição, alguns aspectos, que merecem destaque, em função da contribuição no resultado da medição:

- Existe apenas um sensor de temperatura no interior de uma sala de aproximadamente 40 m², cuja localização, afastada da CMM, não indica as condições da temperatura próxima à máquina;
- O sistema de ar condicionado, na maior parte do tempo, permanece desligado;
- A CMM, de acordo com suas especificações, deveria ser mantida em ambiente controlado, a fim de garantir a incerteza de medição prevista;
- Notou-se que a variação da temperatura entre dois pontos extremos da peça, no momento da inspeção, é bastante significativa (por volta de 5° C), uma vez que não se aguarda a estabilização de temperatura da mesma após a usinagem; e
- O sistema de compensação de temperatura conta com um sensor em cada eixo da máquina e dois a serem instalados no mensurando.

O sistema de medição, responsável pela inspeção do bloco do motor, deve ser capaz de fornecer resultados confiáveis e com incerteza de medição compatível.

b) Características da Peça

Uma peça complexa, como o bloco de um motor, apresenta múltiplas tolerâncias que influenciam seu funcionamento. Ao analisá-las, verificou-se que a distância entre os furos-guia e o centro do mancai, na parte inferior do bloco (conforme fig. 5.2), apresenta o menor valor: $\pm 0,02$ mm.



Legenda

Nº	Denominação da característica	Tolerância (mm)
1	Distância dos furos-guia ao centro do mancai	$\pm 0,02$
2	Distância da face do cárter ao centro do mancai	$\pm 0,05$

Figura 5.2 – Algumas características críticas que influenciam o funcionamento do motor

A complexidade de um bloco de motor, nesse caso específico (didático), irá demandar por um sistema de medição flexível. E ainda, para que a inspeção seja executada no chão de fábrica, é adequado que o sistema de medição possua características compatíveis com as do ambiente de produção. Outro aspecto a ser considerado, sem influência direta no funcionamento do motor, mas importante à determinação do custo final do produto, são os custos das operações realizadas na célula de manufatura após a fundição do bloco, conforme ilustrado na figura 5.3.

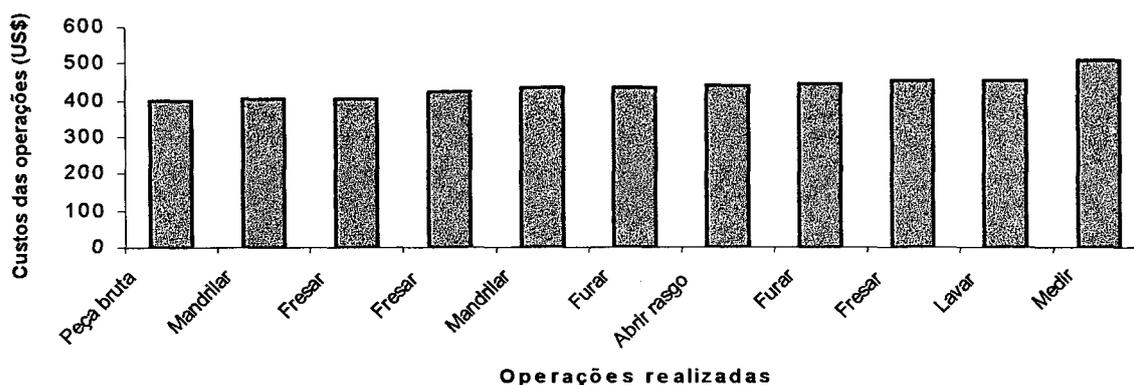


Figura 5.3 – Custos cumulativos das operações realizadas durante a fabricação do bloco do motor

A análise dos custos cumulativos das operações realizadas durante a fabricação do bloco do motor revela que a de medição é responsável por, aproximadamente, 50% do acréscimo ao custo final da peça, após ser adquirida na forma bruta. O custo cresce com a operação de medição significativamente, porém não se agrega função à peça /19/.

c) Características do Sistema de Medição Adequado ao Processo

Para que o sistema de medição execute as tarefas a ele atribuídas, deve ser capaz de:

- Ser compatível com as condições do chão de fábrica;
- Possuir incerteza de medição compatível com a menor tolerância crítica, constatando-se através de uma criteriosa análise metrológica; e
- Ser flexível, a fim de inspecionar as diversas características do bloco do motor.

A contribuição da metodologia ao caso será explicitada no item 5.3.

5.2.2 Caso EMBRACO - CE

A contribuição dessa empresa foi fundamental, sobretudo, aos conhecimentos adquiridos em processo de fabricação, em inspeção realizada próxima à produção e, principalmente, em especificação de CMM.

No contexto mundial, a empresa destaca-se pela qualidade e pela quantidade de compressores para aparelhos de ar condicionado, para geladeiras, etc. que são fabricados diariamente.

Para calibrar alguns dispositivos mecânicos e controlar a qualidade das peças fabricadas, são utilizadas CMMs. Particularmente, existe uma DEA MISTRAL – FDG 1000, localizada próxima ao sistema de manufatura que foi especificada, segundo metodologia da própria empresa.

a) Seleção de Sistemas de Medição Adotada pela Empresa

O processo de especificação dos equipamentos adquiridos pela empresa segue a metodologia para solução de problemas /43/ e propõe diversas atividades complementares, a fim de selecionar o adequado sistema de medição à necessidade da empresa.

Especificamente, para aquisição da CMM, o processo foi iniciado com a análise de catálogos das máquinas que, teoricamente, seriam adequadas. Em seguida, duas foram indicadas, mediante aplicação da metodologia (baseada em pesos e escores atribuídos de acordo com as características técnicas de cada máquina). Após, verificou-se junto aos fabricantes das CMMs selecionadas e junto a seus usuários do exterior, se o desempenho previsto em catálogos correspondia à “realidade” e eram compatíveis com as necessidades da empresa.

b) Características da Peça

Algumas peças possuem características consideradas críticas, pois influenciam no funcionamento dos compressores e, portanto, devem ser inspecionadas criteriosamente.

A tolerância, segundo especificações técnicas, pode variar de ($\pm 0,2$ a ± 2) mm, dependendo da dimensão da peça.

c) Características do Sistema de Medição Adequadas ao Processo

Considerando-se que o sistema de medição está instalado, as principais características à sua aquisição, segundo informações, foram:

- Reduzir os custos de inspeção;
- Eliminar o maior número possível de dispositivos mecânicos; e
- Descentralizar as inspeções feitas em salas de metrologia.

Para tanto, os critérios explicitados na figura 5.4 serviram como base de comparação entre as CMMs disponíveis no mercado.

Critérios técnicos obrigatórios	
<ul style="list-style-type: none"> • Possuir incerteza de medição de 5 μm; • Ser Adequada ao chão de fábrica; • Ter software com versão em português • Evidenciar experiência anterior em sistemas similares; 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzir os custos de inspeção; e • Garantir um prazo de entrega menor ou igual a 3 meses.
Critérios técnicos desejáveis	
<ul style="list-style-type: none"> • Apresentar facilidade de programação ; • Ter operação em multitarefa; • Ser de fácil inicialização e seleção de programas; • Ter ambiente operacional confiável; • Possuir softwares que contribuam com a tarefa de medição, tais como o controle estatístico de processo; • Possuir boas referências; • Possuir certificação – ISO 9001; • Constatar domínio da tecnologia – capacitação técnico-científica; • Garantir prazo e confiabilidade no funcionamento; • Ser compatível com sistema já existente na empresa; • Possuir magazine para troca automática de apalpadores; 	<ul style="list-style-type: none"> • Ser um fornecedor experiente; • Não ter pendências técnicas e/ou financeiras com a empresa; • Ter velocidade de inspeção adequada; • Ter boa repetitividade • Ter boa reprodutibilidade; • Possuir painel de controle de fácil operação; • Trabalhar dentro dos gradientes térmicos previstos no chão de fábrica da empresa; • Trabalhar com sistema de Pallets para troca de peças a serem inspecionadas; • Ter área de medição compatível com a da maior peça a ser inspecionada; e • Possuir sistema de compensação automática de temperatura.

Figura 5.4 – Critérios para especificação da CMM

d) Custos Envolvidos no Processo de Inspeção

Os custos de aquisição da CMM, bem como sua contribuição à redução do custo final do produto foram estabelecidas pela empresa. Porém, pôde-se ter acesso apenas ao valor global desse último. A adequada aquisição de uma CMM, segundo a empresa, propiciaria uma redução nos custos de fabricação e de inspeção do produto da ordem de 300 kUS\$/ano, em função de sua flexibilidade e rapidez na execução da tarefa.

5.2.3 Caso MBB - CMB

A empresa destaca-se pela qualidade dos veículos fabricados e pela confiança que seus clientes depositam na marca Mercedes-Benz.

Em função da recente implantação de uma célula de fabricação de discos de freio em uma de suas fábricas, o sistema de inspeção dessas peças necessitou ser especificado.

Seguindo orientações da matriz e a sua própria experiência na aquisição de sistemas de medição, o grupo designado fez o levantamento das necessidades de acordo com as características da peça e com a sua funcionalidade.

a) Metodologia de Especificação Adotada pela Empresa

Formou-se um grupo responsável pela especificação, composto por elementos do controle da qualidade, do planejamento de processos, etc. A abordagem vislumbrou atender aos requisitos determinados pela matriz. Porém, a idéia do grupo foi de especificar um equipamento que atendesse àqueles anseios e que também, possuísse a flexibilidade necessária para, no futuro, executar outras tarefas.

As considerações técnicas para aquisição da CMM foram as seguintes:

- Capacidade de inspecionar 100 % das peças fabricadas; e
- Tempo de inspeção compatível com as operações realizadas pelas máquinas-ferramenta, evitando-se a ociosidade das mesmas e o acúmulo de peças a serem inspecionadas.

Feitas as devidas considerações técnicas, análises e visitas aos fornecedores de CMM, o grupo constatou que apenas dois sistemas de medição cumpriam os critérios técnicos propostos. Tal informação, serviu como subsídio para que a alta administração tomasse a decisão de aquisição.

b) Características da Peça e do Sistema de Manufatura

O levantamento das características técnicas da peça e do sistema de manufatura contribuem com a especificação do sistema de medição. São elas:

- Produção atual: 6400 discos de freio/mês;
- Tolerância da peça: varia de ($\pm 0,01$ até $\pm 0,04$) mm;
- Custos de fabricação: 4,50 R\$/peça bruta e 10,00 R\$/peça acabada;

c) Características do Sistema de Medição Adequado ao Processo

Buscando atender às necessidades do sistema de manufatura na fabricação da peça complexa, alguns critérios técnicos deverão ser observados:

- Ter velocidade de medição de 5 mm/s;
- Ter velocidade de aproximação 200 mm/s;
- Ter aceleração (sistema de apalpação) de 1000 mm/s²;
- Ter um tempo máximo de apalpação de 90 s para inspeção das características do disco de freio;
- Possuir um software adequado à inspeção 100 % e com capacidade de inspeção por varredura ("scanning");

- Efetuar inspeção de planeza e retilineidade nas faces do disco; e
- Oferecer treinamento e assistência técnica.

5.3 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA

A troca de informações junto às empresas indicou três nichos para aplicação da metodologia:

1. Sistema de medição incorporado ao sistema de manufatura, porém necessitando constatar se o mesmo e a infra-estrutura de apoio são adequados à tarefa;
2. Metodologia praticada pela empresa confrontada com a desenvolvida neste trabalho, a fim de se verificar os aspectos positivos e negativos de uma e de outra; e
3. Análise completa do processo e do mensurando, a fim de fornecer os subsídios necessários à aquisição do sistema de medição que será incorporado ao chão de fábrica.

Cada caso analisado representa um desses nichos, porém as críticas serão genéricas, procurando-se preservar a identidade das empresas parceiras.

5.3.1 Formulação do Problema

De maneira geral, notou-se uma forte motivação (descentralização do processo de medição, redução no tempo de inspeção das peças fabricadas, requisitos de segurança, redução de custos com o controle da qualidade, necessidade de especificar um sistema de medição flexível, etc.) para que um sistema de medição fosse adquirido e que buscasse atender à necessidade da indústria. Porém, alguns detalhes como: o levantamento das necessidades do processo (conforme previsto na metodologia descrita em 4.3), a comparação entre o custo do processo já implantado e o proposto com inspeção automatizada, evitando-se desperdício de tempo e de capital, não ficaram evidentes.

A formação de um grupo de trabalho compatível à complexidade do caso e à disponibilidade de capital para implantação do sistema de medição, deixou de ser claramente definida no início das atividades.

A responsabilidade do grupo seria de analisar; de interpretar: cartas de controle, índice de capacidade, etc.; e de definir ou desaconselhar a aquisição de um sistema de medição/CMM, uma vez que um investimento dessa natureza pode variar de 0.5 a 5 MUS\$, dependendo das características do sistema de medição e da infra-estrutura de apoio.

Ao iniciar os trabalhos, o grupo buscaria criticar as diretrizes gerais da área de trabalho, os procedimentos utilizados no chão de fábrica, etc., resultando num cronograma para resolver

os possíveis problemas apresentados pela fabricação. Uma ferramenta útil seria o diagrama causa-efeito, conforme exemplo apresentado na figura 5.5.

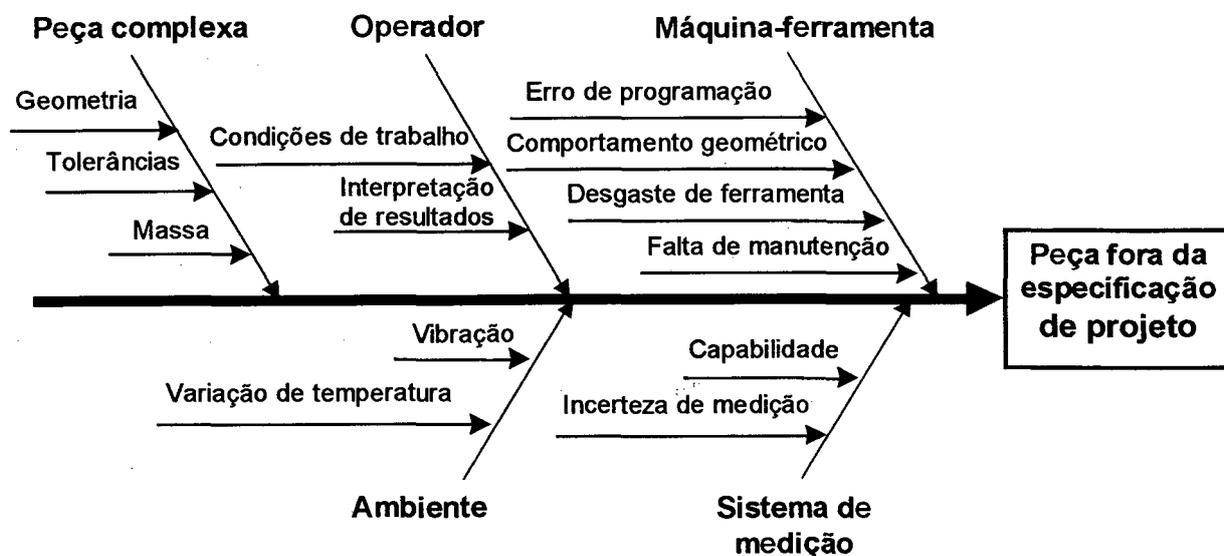


Figura 5.5 - Diagrama causa-efeito do problema da fabricação

O diagrama causa-efeito deixa explícito as principais causas do problema – peça fora da especificação de projeto – permitindo que medidas efetivas sejam tomadas.

As influências do ambiente de manufatura, do sistema de medição, da máquina-ferramenta, do operador e da própria peça são analisadas. Propostas de melhorias, baseadas nas possíveis contribuições de cada uma das influências e de seus respectivos custos, devem ser incentivadas e criticadas.

5.3.2 O Problema da Medição

Para essa fase, o checklist desenvolvido no item 2.4 auxilia a análise do mensurando, evidenciando aspectos de sua produção, funcionalidade, geometria e tolerâncias, não observados nos casos estudados. Esse tipo de análise oferece subsídios à definição do local de instalação do sistema de medição, em função do conhecimento das operações de manufatura, mais críticas, realizadas na peça fabricada.

Em função do exposto no parágrafo anterior, o processo também deve ser criteriosamente estudado, buscando identificar os seus pontos críticos (condições do ambiente, custos do espaço físico, layout do processo, etc.).

Em um dos casos, soube-se que mesmo dispondo das informações de capacidade do processo (superior a 1,33, segundo as cartas de controle por variáveis), dos baixos índices de ações locais /9/, quando comparado ao número de peças produzidas, esses dados não foram levados em conta. Essa atitude poderia desaconselhar a instalação de um sistema de medição do porte que foi adquirido, evitando-se os altos custos decorrentes (por volta de 0,5 MUS\$).

5.3.3 Elaboração do Caderno de Encargos

Por se tratar da fase em que, praticamente, todo o trabalho desenvolvido anteriormente é resumido e apresentado de forma concisa, não foi, efetivamente, vislumbrado em nenhum dos casos estudados.

A viabilidade econômica, um "importante" aspecto a ser considerado, foi observada em todos os casos, porém não ficaram evidentes os critérios de análise (se de maneira adequada ao caso ou como previsto no capítulo 3) em função do sigilo das informações.

Através dos critérios técnicos definidos em cada caso, evidenciou-se a preocupação em se viabilizar tecnicamente o sistema de medição. Porém, a objetividade e a importância de cada um ficam mais compreensíveis caso sejam estabelecidos progressivamente, ou seja, desde as qualidades exigidas pelos clientes (sistema de manufatura) até as características da qualidade. Isso é possível com a adaptação feita à ferramenta QFD.

A fim de conhecer a contribuição da matriz QFD à especificação de sistemas de medição, segue-se um exemplo didático baseado no caso simulado - CS.

Inicialmente, considera-se o disposto nas figuras 4.6 e 5.4 como ponto de partida à seqüência de montagem da casa da qualidade:

a) Exigências do sistema de manufatura ao sistema de medição.

São apresentadas as necessidades do sistema de manufatura que, mais tarde, serão transformadas em critérios de comparação entre as possíveis opções disponíveis de sistemas de medição. Todos os fatores que motivaram a implementação do sistema de manufatura, usando-se a inspeção automatizada, devem ser listados, conforme mostra a figura 5.6.

Deve-se lembrar que ao se pesquisar o fato é preciso considerar as condições do processo, do ambiente, do produto fabricado e dos operadores, através de enquêtes, entrevistas e análise dos indicadores;

b) Conversão para as qualidades exigidas.

Os dados coletados no item anterior precisam ser classificados e ordenados devidamente. Após isso, para cada exigência do sistema de manufatura ao sistema de

medição, podem ser estabelecidas várias qualidades exigidas, conforme apresentado na figura 5.7.

Deve-se encontrar informações relativas à qualidade, usando-se expressões simples, afirmativas e com baixo grau de abstração, evitando-se pontos contraditórios e frases explicativas /46/;

c) **Elaboração da tabela de desdobramento das qualidades exigidas.**

Baseando-se nos resultados do item anterior, define-se a tabela de desdobramento das qualidades exigidas, conforme mostra a figura 5.8;

d) **Extração dos elementos da qualidade.**

Esse é o primeiro passo para conversão do “mundo do cliente” para o “mundo técnico”, ou seja, deve-se pensar em qual seria a escala capaz de quantificar a qualidade exigida. No caso de um sistema de medição, seus critérios técnicos e econômicos, cumprem total ou parcialmente esse papel, conforme mostrado na figura 5.9;

e) **Matriz da qualidade**

Estabelecendo-se o grau de importância, as correlações, os valores alvos pretendidos, conforme figura 5.10, tem-se condições de elaborar o caderno de encargos e remete-lo aos possíveis fornecedores do sistema de medição, quer sejam internos ou externos. O restante do preenchimento da casa da qualidade (notas atribuídas ao desempenho dos sistemas de medição selecionáveis), bem como a análise de seu resultado, pela seqüência da metodologia, deve ocorrer no item 5.3.5.

EXIGÊNCIAS AO SISTEMA DE MEDIÇÃO	
1. Ter funcionamento prolongado;	5. Ser de fácil operação;
2. Apresentar bons resultados;	6. Oferecer garantia e assistência técnica;
3. Operar nas condições do chão de fábrica ;	7. Possuir características compatíveis com as necessidades da empresa.
4. Ser uma marca reconhecida no mercado;	

Figura 5.6 – Exigências do sistema de medição adequado ao chão de fábrica

CONVERSÃO PARA AS QUALIDADES EXIGIDAS	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Ter funcionamento prolongado <ul style="list-style-type: none"> • Ter baixo consumo de ar comprimido; • Apresentar garantia superior a um ano; • Ser de construção confiável (material); 2. Apresentar bons resultados <ul style="list-style-type: none"> • Apresentar baixa dispersão nos resultados • Ter boa resolução; 3. Ser uma marca reconhecida pelo mercado <ul style="list-style-type: none"> • Possuir certificação ISO 9001; • Ser um fornecedor experiente; • Possuir tecnologia confiável; 4. Operar nas condições do chão de fábrica <ul style="list-style-type: none"> • Possuir isolamento de vibrações; • Possuir sistema de compensação de temperatura; 5. Ser de fácil operação <ul style="list-style-type: none"> • Trocar apalpadores automaticamente; 	<ul style="list-style-type: none"> • Poder calibrar automaticamente os apalpadores; • Ter um software amigável; <ol style="list-style-type: none"> 6. Oferecer garantia e assistência técnica; <ul style="list-style-type: none"> • Oferecer peças de reposição no mercado nacional; • Oferecer treinamento aos operadores; • Ter um baixo prazo de entrega, a partir do pedido; 7. Possuir características compatíveis com as necessidades da empresa <ul style="list-style-type: none"> • Inspeccionar diferentes características da peça; • Ser compatível com os sistemas existentes na empresa; • Não provocar gargalo na produção; • Ter um baixo custo de aquisição; • Apalpar furos roscados;

Figura 5.7 – Conversão para as qualidades exigidas

DESDOBRAMENTO DAS QUALIDADES EXIGIDAS	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Ter baixo consumo de ar comprimido; 2. Apresentar garantia superior a um ano; 3. Apresentar baixa dispersão de resultados; 4. Possuir certificação ISO 9001; 5. Ser um fornecedor experiente; 6. Possuir tecnologia confiável; 7. Possuir isolamento de vibrações; 8. Possuir sistema de compensação de temperatura; 9. Trocar apalpadores automaticamente; 10. Poder calibrar automaticamente os apalpadores; 11. Ter um software amigável; 	<ol style="list-style-type: none"> 12. Oferecer peças de reposição no mercado nacional; 13. Oferecer treinamento aos operadores; 14. Ter um baixo prazo de entrega, a partir do pedido; 15. Ser de construção confiável (material); 16. Inspeccionar diferentes características da peça; 17. Ser compatível com os sistemas existentes na empresa; 18. Não provocar gargalo na produção; 19. Ter um baixo custo de aquisição; 20. Apalpar furos roscados; 21. Ter boa resolução.

Figura 5.8 – Desdobramento das qualidades exigidas

- A aplicação da ferramenta QFD resume a metodologia desenvolvida, uma vez que para montar a casa da qualidade, necessita-se passar por, praticamente, todas as fases previstas na metodologia;
- Se criteriosamente elaborada, a montagem da casa da qualidade é capaz de vislumbrar todos os aspectos relevantes a serem considerados durante a especificação de um sistema de medição ao sistema de manufatura, dando subsídios para uma adequada decisão;
- Mostra-se uma ferramenta adaptável à proposta deste trabalho que, por sua vez, é aplicável a qualquer tipo de organização, uma vez que ter-se-á considerado o específico relacionamento entre as necessidades do sistema de manufatura (considerando as condições ambientais, a estabilidade do processo, as características do mensurando, etc.), e as características de desempenho do sistema de medição (critérios técnicos e econômicos);
- Observando-se as “notas” (atendimento à qualidade exigida e à característica da qualidade), pode-se indicar a que melhor preenche as exigências do chão de fábrica, no caso simulado é a CMM-A, a qual preenche os critérios e está de acordo com as necessidades do chão de fábrica.

Assim, tem-se uma primeira visão da facilidade, objetividade e rapidez de aplicação do método proposto, sendo que a análise do resultado, após aplicação do método, será feita no item correspondente (5.3.5).

5.3.4 Coleta das Propostas

Aplicando-se as atividades propostas nesta fase, evitam-se custos com viagens e verificações junto a fornecedor e a respectivos clientes do sistema de medição. Um caderno de encargos adequadamente elaborado, detalhando todas as informações pertinentes, pode oferecer os subsídios necessários à continuidade do processo de especificação.

Esse tipo de atividade não foi observada nos casos analisados, uma vez que ainda é prática verificar, junto ao fornecedor, o funcionamento/modo de operar dos sistemas de medição considerados como opção.

5.3.5 Definição do Sistema de Medição

Nessa fase, complementa-se o preenchimento da casa da qualidade. Deve-se ter especial atenção ao relacionar a qualidade exigida com o critério de desempenho, bem como analisar criteriosamente as características do sistema de medição oferecido pelo fabricante, através de uma objetiva análise metrológica, ou seja, verificando-se detalhes como:

- Incerteza de medição;
- Repetitividade e reprodutibilidade;
- Faixa, gradiente e variações de temperatura permissíveis;
- Vibrações nas proximidades; etc.

Importantes observações, como o fato de existirem poucas CMMs com características de desempenho que permitam seu adequado uso no chão de fábrica (fora de ambiente climatizado), devem ser de conhecimento de grupo responsável pela especificação.

Para o caso simulado, verifica-se que duas foram as opções de máquinas, pois possuem volume de medição compatível com o previsto para bloco de motor e podem, segundo os fabricantes, trabalhar nas condições do chão de fábrica. Esse aspecto contribuiu para facilitar o preenchimento das correlações na figura 5.10, bem como a identificação da CMM mais adequada ao processo analisado.

Apesar de não contar com uma análise detalhada do processo de manufatura (devido a falta de dados e tempo disponível), o caso simulado é capaz de mostrar a objetividade, a concisão e a fácil interpretação do resultado proposto pela aplicação da metodologia. Nos casos estudados, verificaram-se falhas e desperdícios de meios e capital, uma vez que o processo não é analisado detalhadamente, as condições de utilização da CMM não são devidamente observadas, visitas aos fabricantes são realizadas, o montante investido pode não ter sido adequadamente direcionado e dimensionado (constatações e comentários informais), etc.

A fase que define o sistema de medição foi abordada distintamente. Houve situação em que foi determinada, em outros, o método de especificação estabelecido foi responsável pelos subsídios técnicos, sendo a análise financeira responsabilidade exclusiva da alta administração, etc.

Com a aplicação da metodologia proposta, presume-se que tanto a abordagem técnica como financeira sejam consideradas suficientes para dar os subsídios necessários ao responsável pela definição do sistema de medição.

5.3.6 Implantação do Sistema de Medição no Sistema de Manufatura

Sendo a última fase desenvolvida na metodologia, prevê o acompanhamento do desempenho do sistema de medição, após sua implantação. Isso é importante em função de:

- Comprovar as garantias oferecidas pelo fornecedor;
- Verificar se houve melhoria na capacidade do processo de fabricação;

- Fazer correções ou confirmações à respeito das previsões para retorno de investimento;
- Manter os sistemas de medição calibrados;
- Prevenir contra falhas, etc.

Fase ou providência dessa natureza não observada, explicitamente, em nenhum dos casos analisados, ou seja, não se verificou, de acordo com as informações disponíveis.

O estudo de casos práticos, além de contribuir com a solução de um desafio enfrentado pela indústria, apontou falhas na própria metodologia, tais como redundância de atividades, falta de objetividade em algumas tarefas propostas, etc. que foram sendo, gradualmente, sanadas com a evolução do trabalho.

5.4 ASPECTOS DA VALIDAÇÃO

A validação da metodologia constatou que:

- As informações referentes ao processo e ao mensurando, se disponibilizadas, garantem os subsídios necessários ao adequado emprego da metodologia;
- Através da análise dos critérios técnicos e econômicos, rapidamente são definidos os principais sistemas de medição capazes de cumprir a tarefa;
- A seleção das CMMs dos casos estudados não apresentam a consistência, concisão e objetividade inerentes à metodologia desenvolvida neste trabalho;
- O caso simulado é um exemplo típico que ilustra a necessidade em se considerar as exigências do cliente (sistema de manufatura) para se obter resultados coerentes e garantidos sob os aspectos técnico e financeiro, sem desperdício de meios.

Concluída a fase de validação da metodologia, vale verificar os benefícios técnicos e econômicos por ela propiciados à indústria de peças complexas.

CAPÍTULO 6

CONTRIBUIÇÕES DA METODOLOGIA À SOLUÇÃO DO DESAFIO DA FABRICAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS

A metodologia, proposta neste trabalho, buscou preencher uma lacuna existente na indústria brasileira, constatada através de visitas ao setor automobilístico e metal-mecânico. O seu desenvolvimento, mostrou-se complexo, em função dos múltiplos aspectos envolvidos, e oportuno, em função dos benefícios técnicos e econômicos que sua aplicação pode propiciar às indústrias.

Dificuldades como o tempo disponível para efetivá-la e a obtenção de informações, muitas das vezes sigilosas, foram apenas alguns dos óbices enfrentados e transpostos, total ou parcialmente, durante o período de sua elaboração.

6.1 BENEFÍCIOS TECNOLÓGICOS DECORRENTES DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

As principais vantagens em se aplicar a metodologia de especificação são:

- Aplicável em qualquer empresa, independente do seu porte e do capital a ser investido, ou seja, é flexível;
- Focada na solução do problema, considerando aspectos importantes do processo de manufatura, do mensurando, da estratégia de medição e das condições do ambiente;
- Disponibiliza os meios necessários ao cumprimento das atividades propostas nas seis fases;
- Garante ao setor responsável pela decisão de aquisição de um sofisticado sistema de medição os subsídios necessários e adequados à situação;
- Todos os critérios estabelecidos (técnicos e econômicos) podem ser satisfatoriamente abordados, desde que as ferramentas disponíveis sejam corretamente utilizadas;
- Propicia economia de tempo no processo de aquisição do sistema de medição, se comparado às “metodologias”, hoje praticadas, em função da objetividade das ferramentas utilizadas;
- Pode ser considerado um método seguro, em função de todas as considerações e análises que são feitas durante sua aplicação; e
- O resultado é explícito de forma clara e concisa – casa da qualidade.

6.2 BENEFÍCIOS ECONÔMICOS DECORRENTES DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Os benefícios na área econômica são significativos em função do foco da metodologia ser direcionado sobre a solução do problema. Como exemplos temos:

- Disponibiliza os meios efetivos ao processo de especificação, designando o grupo responsável, estabelecendo critérios, acompanhando a instalação dos equipamentos adquiridos e fazendo análises efetivas à consecução do trabalho;
- Estudo da relação benefício-custo antes da aquisição do sistema de medição, constatando as necessidades e respectivos custos;
- Garante que o investimento de capital busque a melhor relação benefício-custo;
- Reduz o tempo de análise e de interpretação dos dados relativos à especificação, uma vez que são facilmente vislumbrados na casa da qualidade;
- Redução dos custos com visitas a fornecedores e a usuários de sistemas de medição similares (desde que confiáveis), em função da metodologia prever a remessa de um caderno de encargos contendo todas as características do sistema de medição necessárias à execução da tarefa.

6.3 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

O trabalho motivado pelo desafio enfrentado pelas indústrias brasileiras, posicionou-se no contexto tecnológico, a fim de evidenciar a necessidade em se desenvolver uma metodologia capaz de especificar uma estação de medição por coordenadas a ser incorporada ao sistema de manufatura.

Em seguida, foram analisadas as técnicas e os fatos relevantes ao desenvolvimento da metodologia, onde buscou-se analisar aspectos relevantes como: as possíveis fontes de erro associadas ao resultado da medição, a localização do sistema de medição no chão de fábrica e o planejamento da qualidade, bem como procurou-se fazer um apanhado das ferramentas que serviram como apoio à metodologia.

Na seqüência, faz-se uma análise econômica com exemplos e com interpretações pertinentes, para poder-se mostrar como foi desenvolvida e validada a metodologia elaborada.

Participação das empresas

A colaboração e o interesse de algumas empresas parceiras da Fundação CERTI e os contatos com consultores e especialistas da área de medição por coordenadas deixaram evidente que o enfoque dado no trabalho foi condizente com uma necessidade atual, ou seja, a busca pela automatização, destinando-se apenas o capital adequado.

Os aspectos relevantes, observados durante a troca de informações junto às empresas parceiras foram:

- A significativa contribuição e disponibilidade de seus colaboradores à consecução do trabalho de dissertação de Mestrado; e
- O interesse despertado pela metodologia nas empresas, em função de sua objetividade, simplicidade e âmbito de análise.

Recomendações

Acredita-se que este trabalho ainda ofereça oportunidades para que outros venham a empregá-lo mais efetivamente, ou seja, buscando-se uma empresa que necessite adquirir um sistema de medição e esteja iniciando o processo de aquisição.

A calibração dos sistemas de medição incorporados ao chão de fábrica, segundo especialistas, é uma área ainda pouco explorada e imprescindível para que seja garantida a rastreabilidade do resultado da medição, podendo oferecer oportunidades de estudos.

A essência da metodologia

Segundo William F. Christopher /63/, existem três passos importantes para se melhorar a produtividade de um processo:

1. Mapeá-lo, a fim de se definir o objetivo;
2. Medi-lo, a fim de verificar seu desempenho e melhorá-lo; e
3. Motivar que todas as ações sejam cumpridas conforme planejado.

Como a metodologia desenvolvida segue esses passos, a sua adequada aplicação resultará em aumento da produtividade.

- /9/ QS - 9000 **Fundamentos do Controle Estatístico de Processo (CEP) – Manual de Referência.** Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation, 162 p. São Paulo, SP, 1995.
- /10/ WECKENMANN, A. **Statistical Process Control in Future Production.** Journal of Mechanical Engineering, v 4, n 1-2, p 4 – 18. 1998.
GEBAUER, U.
- /11/ WECKENMANN, A. **Alternatives in statistical process control: Control charts based on pre-set control limit method (PRECONTROL).** International Conference on Industrial Tools, n 4, p 337 – 342. University of Erlangen-Nuremberg, Germany, 1997.
GEBAUER, U.
- /12/ GAWLIK, J. **Assessment of measurement system capability for statistical process control (SPC) using R & R studies.** Production Engineering Institute, Mechanical Department of Krakow University Technology. Krakow, Poland, 1999.
REWILAK, J.
- /13/ KANE, V. E. **Process Capability Indices.** Journal of Quality Technology, v 18, n 1, p 41 – 52. 1986.
- /14/ DONATELLI, G. D. **Capability of measurements systems for 100% inspection tasks.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 125p. Florianópolis, SC, 1999.
- /15/ PFEIFER, T. **Measurement and quality control integration in computer integrated manufacturing (CIM).** IX COBEM, p 1 – 6. Florianópolis, SC, 1987.
- /16/ VEIGA, C. L. N. **Máquinas de Medir por Coordenadas.** Fundação Centro de Referência em Tecnologias Inovadoras, 174 p. Florianópolis, SC, 1991.
- /17/ MEDLAND, A. J. **The integration or coordinate measuring machines within a design and manufacturing environment.** Proceedings Instn Mechanical Engineers, v 207, p 91 – 97. 1993.
MULLINEAUX, G.
BUTLER, C.
JONES, B. E.

- /18/ MIGUEL, P. A. C. **CMM performance verification, considerations for a virtual artefact approach.** Tese (Manufacturing and Mechanical Engineering – PHD), Birmighan University, 227 p. Birmighan, England, 1996.
- /19/ SOUSA, A. R. **Medição por Coordenadas.** Ministério da Educação e do Desporto, Escola Técnica Federal, Núcleo de Mecânica, Laboratório de Metrologia, 123 p. Florianópolis, SC, 1998.
- /20/ VEIGA, C. L. N. **Tecnologia de Medição por Coordenadas – Verificação e Calibração.** Minicurso “E”, SI-MpCQ-97, Fundação CERTI, 63 p. Florianópolis, SC, 1997.
- /21/ TRAPET, E.
WÄLDELE, F. **Quality Assurance of CMM.** Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), 122 p. Aachen, Deutschland, 1993.
- /22/ MMS Online **CMMs Enables Flexible Quality Control.** Disponível na Internet: www.mmsonline/articles/0897bp1.html. 1997.
- /23/ MIGUEL, P. A. C.
KING, T. G.
DAVIS, J. **Ganhando produtividade e competitividade com o uso de MMCs.** Máquinas e Metais, n 2, p 54 – 63. 1995.
- /24/ WECKENMANN, A.
KNAUER, M. **Comparability or Coordinate Measurements.** KONFERENCJE – BUDOWA I EKSPLOATACJA MASYN, n 44, p 245 – 256. Bielsko-Biala, 1998.
- /25/ INMETRO **Guia para incerteza de medição.** Primeira edição Brasileira do Guide of Expression of Uncertainty in Measurement, 120 p. Diretoria de Metrologia Científica e Industrial – INMETRO. Rio de Janeiro, RJ, 1997.
- /26/ WECKENMANN, A.
KNAUER, M. **Causes and consequences of measurement uncertainty in production metrology.** Department of Quality Management and Manufacturing Metrology, University Erlangen-Nuremberg. Germany, 1999.
- /27/ BROWN & SHARP **Product description – Leitz Sirio 688.** Catálogo do fabricante. 1998.

- /28/ CARL ZEISS **Technische Daten – Zeiss FC 600.** Dados técnicos. 1998
- /29/ QS - 9000 **Planejamento Avançado da Qualidade do Produto e Plano de Controle (APQP) – Manual de Referência.** Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation, 101 p. São Paulo, SP, 1995.
- /30/ QS - 9000 **Análise dos Sistemas de Medição (MSA) – Manual de Referência.** Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation, 127 p. São Paulo, SP, 1995.
- /31/ INMETRO **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia.** INMETRO, 52p. Duque de Caxias, RJ. 1995.
- /32/ NBR 6409 **Tolerâncias de forma e tolerâncias de posição.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1980.
- /33/ YAU, H. T.
MENQ, C. H.
WONG, C. L. **An Intelligent Planning Environment for Automated Dimensional Inspection Using Coordinate Measuring Machines.** Transactions of ASME, v 114, p 222 – 230. 1992.
- /34/ KANCHEVA, T. **Needs for new organization of metrological control in quality control in Bulgaria.** Proceedings of the XIII IMEKO World Congress, v 3, p 2469 – 2480. September, 1994.
- /35/ KREJCI, J. **Transfer-line inspection with CMMs.** American Machinist, n 1, p 39 – 42. 1992.
- /36/ EITZERT, H.
WECKENMANN, A.
WEBER, H. **Functionality-oriented evaluation and sampling strategy in coordinate metrology.** Precision Engineering, v 17, p 244 – 252. 1995.
- /37/ BROWN & SHARP **Toyota cut new car development lead time.** Mfg. Magazine, n 5, article 12. London, England, 1998.
- /38/ BROWN & SHARP **CMMs in Australia Excel Under Tough Conditions.** Mfg. Magazine, n 1, article 17. London, England, 1999.

- /39/ BROWN & SHARP **CMMs offer flexible, economic solutions to sheet metal inspection applications.** Mfg. Magazine, n 5, article 7. London, England, 1998.
- /40/ BÖSSER, F. **Aspectos Avançados da Tecnologia de Medição por Coordenadas – Quadros Didáticos.** Fundação CERTI, Florianópolis, SC. 06/09/1999.
- /41/ GIGO, L. G. **Rastreabilidade de CMM.** Sistemas da Qualidade, LABMETRO/UFSC, 17 p. Florianópolis, SC, 1998.
- /42/ TRABASSO, L. G. **Introdução à Engenharia Simultânea.** Departamento de Engenharia Mecânica-Aeronáutica, ITA, CTA, 125p. São José dos Campos, SP, 1994.
- /43/ FALCONI, V. C. **Gerência da Qualidade Total.** Bloch Editores S. A., 187 p. Rio de Janeiro, RJ, 1990.
- /44/ FEINGENBAUM, A. **Total Quality Control.** McGraw-Hill, 3 ed, Capítulos 1, 7 e 12. New York, 1991.
- /45/ TANABE, I.
 KURODA, M. **The influence wich a factory environment gives to the machining accuracy and the measurement accuracy.** Central Machine Shop, Nagaoka University Technology. Kamitomioka, Niigata, Japan, 1999.
- /46/ OHFUJI, T.
 ONO, M.
 AKAO, Y. **Métodos de Desdobramento da Função Qualidade (1) – Manual de Aplicação do Desdobramento da Função Qualidade (QFD).** Fundação Cristiano Otoni, Escola de Engenharia da UFMG, v 2, 256 p. Belo Horizonte, MG, 1997.
- /47/ CHENG, L. C.
 SCAPIN, C. A.
 OLIVEIRA, C. A. **QFD – Planejamento da Qualidade.** Fundação Cristiano Otoni, Escola de Engenharia da UFMG, 261 p. Belo Horizonte, MG, 1990.
- /48/ REED, B. M.
 JACOBS, D. A. **QFD for large space systems.** Department of Engineering Management, Old Dominion University, 60 p. Norfolk, Virginia, USA, 1993.

- /49/ PAOLINO, R. F. **Faça as contas: o investimento em MMC é justificável.**
GENRST, D. H. Máquinas e Metais, n 8, p 28 – 37. 1992.
- /50/ GUIA - CMM **As máquinas de medição 3D comercializadas no Brasil e
seus fornecedores.** Máquinas e Metais, n 12, p 159 – 161,
1997.
- /51/ ROBLES, A. J. **Custos da Qualidade – Uma estratégia para a Competição
Global.** Editora Atlas S. A., 135 p. São Paulo, SP, 1994.
- /52/ PROMODEL Site: www.promodel.com/aspire/just_in_time.html. 1999.
- /53/ MIL-STD-961D **Military Specification Practices.** United States of America
Department of Defense, 1995.
- /54/ HEKELOVA, E. **Quality improvement in manufacturing.** Department of
Manufacturing Systems, Faculty of Mechanical Engineering,
Slovak University of Technology. Bratislava, Slovak Republic,
1999.
- /55/ NANDAKUMAR, P. **Models for Measuring and Accounting for Cost of
DATAR, S. M. Conformance Quality.** Management Science, v 39, n 1, p 1 –
AKELLA, R. 16. 1993.
- /56/ REINHART, G. **Qualitätsmanagemen: Ein Kurs für Studium und Praxis.**
LINDEMANN, U. Springer-Verlag, Heidelberg, 1996.
HEINZL, J.
- /57/ BESTERFIELD D. **Quality Control.** Prantice Hall International, Inc., 515 p. New
Jersey, USA, 1998.
- /58/ PUGH, S **A new design: the ability to compete.** Engineering Design
Centre, Boughborough University of Technology, p 12 – 16.
UK, 1983.
- /59/ BOTTURA, M. C. **Quem usa diz que as máquinas de medir 3D são
FUOCO, T. H. indispensáveis.** Máquinas e Metais, p 10 – 15. Abril, 1992.
- /60/ COOK, S. **A methodology for formulating measuring instrument
specifications.** Measurement, Elsevier, v 11, p 1 – 31. 1993.

- /61/ CMMWORLD **CMM - specification criteria.** Site. www.cmmworld.com.
1999.
- /62/ BRASIL,
MINISTÉRIO DA **Método de Assessoramento – Estudo de Estado Maior.**
AERONÁUTICA Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais, Universidade da
Força Aérea, 30p. Campo dos Afonsos, Rio de Janeiro, RJ,
1997.
- /63/ CHRISTOPHER, W. **Handbook for productivity measurement and**
THOR, C. G. **improvement.** Productivity, 1310p. Portland, Oregon, USA,
1993.