

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**Centro Tecnológico**

**Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Labmetro - Laboratório de Metrologia e Automação**

**Um Método Sistemático Adaptado ao  
Projeto e Desenvolvimento de um  
Sistema de Medição Automático  
Dedicado à Inspeção Geométrica**

*por*

*Paulo Gustavo Veloso Moura da Silva*

Trabalho apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Metrologia Científica e Industrial na UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

Florianópolis, 25 de março de 2004

# APROVAÇÃO

**Nome:** Paulo Gustavo Veloso Moura da Silva  
**Titulação:** Mestre em Metrologia Científica e Industrial  
**Título da Dissertação:** Um Método Sistemático Adaptado ao Projeto e Desenvolvimento de um Sistema de Medição Automático Dedicado à Inspeção Geométrica.

---

Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.  
Orientador

---

Marco Antonio Martins Cavaco, Ph.D.  
Coordenador do Curso

## **Banca Examinadora:**

---

Armando A. Gonçalves Jr., Dr. Eng.

---

Celso Luiz Nickel Veiga, Dr. Eng.

---

Luis H. Sánchez Troncoso, Dr. Eng.

---

Reinaldo Dablander, Eng.

*Dedico este trabalho:  
àqueles que sempre depositaram confiança  
em minha capacidade, meus amados pais;*

*a acima de todos, o grande El Shadai.*

# AGRADECIMENTOS

---

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos:

aos professores e colaboradores que fazem o curso de Pós Graduação em Metrologia Científica e Industrial da Universidade Federal de Santa Catarina;

aos colegas de mestrado que me incentivaram durante a caminhada;

aos profissionais da Irmãos Zen S.A. pela contribuição técnica;

ao professor Gustavo Daniel Donatelli pelas orientações e conselhos;

ao governo federal pelo sustento financeiro fornecido durante o período de mestrado;

aos estagiários do Labmetro e do PET pela contribuição;

aos professores do curso de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco pela ótima bagagem teórica a mim conferida;

aos verdadeiros amigos pelas mensagens de encorajamento;

ao Pastor Geraldo e família pelo acolhimento nos primeiros dias;

à Elisa por todo o carinho e apoio;

aos novos amigos pelos momentos de descontração;

aos familiares que sempre me tiveram em suas orações;

aos meus irmãos Mário, Luiz, Luciana e Fernando pela amizade e respeito;

aos meus pais;

ao Criador do Universo pela força e coragem fornecidas.

Essas pessoas foram fundamentais para a concretização deste sonho.

*"...sê forte e corajoso; não temas, nem te espantes, porque o SENHOR, teu Deus, é contigo por onde quer que andares". Josué 1:9*

# RESUMO

---

Sistemas de medição automáticos dedicados à inspeção geométrica caracterizam-se por apresentar uma configuração pouco flexível, possuindo assim uma finalidade extremamente específica. No entanto, sua velocidade de resposta e alto nível de repetitividade os posicionam em cenário favorável frente aos demais tipos de dispositivos, os tornando ideais para aplicações onde há exigências quanto ao tempo e volume de inspeção, normalmente encontradas em processos onde se faz necessária a inspeção 100%. Porém, atender tais características bem como a finalidade para qual se destina o sistema, não é tarefa trivial. Na indústria o projeto e desenvolvimento de sistemas de medição, sejam eles dedicados ou não, se dá normalmente de forma não metódica. Somente em alguns casos, constata-se a presença de métodos próprios de organização, mais voltados ao atendimento dos requisitos da norma ISO 9000 do que a alcançar uma real qualidade funcional e metrológica no produto. Desta maneira são inibidas a sistematização das tarefas e a geração de documentação, importantes para tais projetos. Observa-se ainda, grande dificuldade em se manter o processo de desenvolvimento voltado ao atendimento das necessidades dos clientes. Isto se deve à falta de contato entre projetistas e clientes, a não percepção da importância da identificação destas necessidades pelos projetistas, ou ainda ao desconhecimento de como traduzir essas necessidades em especificações de projeto.

O presente trabalho pretende apresentar um método sistemático adaptado ao projeto e desenvolvimento de um sistema de medição automático dedicado à inspeção geométrica, encomendado por uma empresa do setor metalúrgico. Destacam-se as características metrológicas gerais envolvidas em algumas das fases de tal método, as técnicas e ferramentas utilizadas como apoio para identificar e analisar tais características, bem como o dispositivo físico resultante da aplicação do método.

# ABSTRACT

---

Geometric dedicated inspection measuring systems are featured by their poor flexibility; therefore they are designated for extremely specific applications. However, their response speed and high level of repeatability put them in a favorable position with respect to all other types of inspection systems, making them ideal for applications where requirements about time and demand of inspection are present. These requirements are usually found in those processes where the 100% inspection is necessary. Nevertheless, to accomplish those features, as well as the destination of the inspection system, is not an easy task. The design and development process of measuring systems, being them dedicated or not, normally is not made in a methodic way. Only in a few cases is noticed the presence of methods organized in order to attempt the requirements of the ISO 9000 standards better than reaching a real functional and metrological quality of the product. Thus, the systematization of tasks and the auto generation of documentation are inhibited. It is also noticed a certain difficulty in order to keep the development process turned towards the accomplishment of the clients needs. This is due to the lack of communication between clients and designers, the misperception importance of the identification of these needs by the designers, or even the lack of knowledge in how to translate those needs into specifications of design.

This work intends to present a systematic method adapted to the design and development of an automatic geometric dedicated inspection measuring system, requested by a metallurgic organization. Special attention is given towards the metrological features found in some of the phases of the design process, the skills and tools used as support to the identification and analysis of these features as well as the physical device resulted.

# ÍNDICE ANALÍTICO

---

<b>RESUMO</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE SIGLAS</b>	<b>xiv</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>1</b>
<i>Introdução</i>	1
1.1. Justificativas e objetivo	1
1.2. Definições <i>a priori</i>	2
1.2.1. Inspeção	2
1.2.2. Sistemas de medição automáticos dedicados	4
1.3. Garantia da qualidade geométrica em indústrias metal-mecânica	5
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>8</b>
<i>Revisão dos Métodos para Projeto e Desenvolvimento de Produtos e Adequação do Método Selecionado</i>	8
2.1 Métodos estudados	8
2.2 Método base: Sistemática de Ulrich & Eppinger	9
2.2.1 Características gerais do método	10
2.3 Adaptação ao Projeto e Desenvolvimento de Sistemas de Medição Automáticos Dedicados à Inspeção Geométrica	12
2.3.1. Requisitos para o projeto e desenvolvimento de sistemas de medição automáticos dedicados à inspeção geométrica	14
2.3.2. Atendimento aos requisitos para o projeto e desenvolvimento de sistemas de medição automáticos dedicados à inspeção geométrica	14
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>16</b>
<i>Aspectos Relevantes e Detalhamento do Método Adaptado</i>	16
3.1 Identificação das necessidades dos clientes	17
3.2 Desenvolvimento do conceito	18
3.2.1. Caracterização do mensurando	18
3.2.2. Geração de especificações metrológicas	20
3.2.3. Projeto metrológico conceitual	22
3.2.4. Validação metrológica preventiva	24

3.3 Projeto de sistemas	25
3.4 Projeto detalhado	26
3.5 Elaboração do software, hardware mecânico e elétrico para controle e automação da medição	28
3.5.1. Instrumentação virtual	28
3.5.2. Projeto de elementos de automação mecânica	30
3.5.3. Integração da instrumentação virtual com elementos de automação mecânica	31
3.6 Fabricação, integração e testes	32
3.6.1. Controle da qualidade dimensional	35
3.6.2. Qualificação	37
3.6.3. Avaliação metrológica final	38
3.7 Elaboração de documentação para garantia da qualidade em processos de medição	40
3.7.1 Procedimento de medição	42
3.7.2. Relatórios de calibração	44
3.7.2.1 Calibração	44
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>46</b>
<i>Estudo de Caso - Aplicação do Método no Projeto e Desenvolvimento de um Sistema de Medição para Arrastes de Impulsores de Partida</i>	46
4.1 Características gerais do problema	46
4.2. Identificação das necessidades dos clientes	50
4.3 Desenvolvimento do conceito	55
4.3.1 Caracterização do mensurando	55
4.3.2 Geração das especificações metrológicas	60
4.3.3 Projeto metrológico conceitual	63
4.3.4 Validação metrológica preventiva	70
4.4 Projeto de sistemas	76
4.5 Projeto detalhado	78
4.5.1 Prototipagem	78
4.5.2 Elaboração do software, hardware mecânico e elétrico para controle e automação da medição	83
4.6 Fabricação e Aquisição de Componentes Especiais	93
4.7 Integração e Testes	94
4.7.1 Qualificação	94
4.7.2 Avaliação metrológica final	102
4.8 Análises dos Resultados Obtidos no Estudo de Caso	106
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>109</b>
<i>Conclusões e Oportunidades de Melhoria</i>	109
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>112</b>
<b>ANEXO A</b>	<b>116</b>
<i>Check Lists para Entrevistas</i>	116

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1.1 Inter-relação entre os processos de produção e medição. _____	6
Figura 2.1: Método sistemático de Ulrich & Eppinger apresentado sob o ponto de vista de suas características gerais. _____	11
Figura 2.2: Método sistemático de Ulrich & Eppinger para o projeto e desenvolvimento de produtos. _____	12
Figura 2.3: Método adaptado para sistemas de medição dedicados à inspeção geométrica. _____	13
Figura 3.1: Método adaptado para sistemas de medição dedicados à inspeção geométrica. _____	16
Figura 3.1: Atividades e resultados da fase de identificação das necessidades dos clientes. _____	18
Figura 3.2: Carta de controle de média e amplitude. _____	20
Figura 3.3: Fluxograma - Geração das especificações metrológicas. _____	21
Figura 3.4: Extrato de uma matriz “métricas versus necessidades interpretadas”. ____	22
Figura 3.5: Fluxograma - Geração de conceitos. _____	22
Figura 3.6: Elementos funcionais de um sistema de medição genérico. _____	23
Figura 3.7: Atividades para definição do sistema de medição. _____	24
Figura 3.8: Fluxograma: Projeto de sistemas. _____	26

Figura 3.9: Peça modela em software de CAD. _____	27
Figura 3.10: Principais componentes de um “instrumento virtual”. _____	29
Figura 3.11: Painel de controle de instrumento virtual desenvolvido em Labview™. _____	30
Figura 3.12: Processo de integração instrumentação virtual versus elementos de automação mecânica. _____	32
Figura 3.13: Características da etapa destinada à fabricação de componentes de mecânica de precisão. _____	34
Figura 3.14: Geometria real comparada à geometria ideal de uma peça mecânica. ____	35
Figura 3.15: Destaque de um desenho técnico. _____	36
Figura 3.16: Seqüência de ações para a avaliação metrológica final. _____	39
Figura 3.17: Recomendação sobre a incerteza alvo. _____	40
Figura 3.18: Exemplo de folha de rosto de um procedimento de medição. _____	43
Figura 3.19: Curva de erros obtida da calibração de uma balança comercial. _____	45
Figura 4.1: Impulsor de partida de um motor de arranque. _____	47
Figura 4.2: Arraste – Peça objeto do estudo de caso. _____	48
Figura 4.3: Usinagem das faces que definem a altura dos arrastes _____	49
Figura 4.4: Dispositivo de medição previamente utilizado pela empresa. _____	56
Figura 4.5: Extrato de uma carta de três vias - diagnóstico do processo de fabricação. _____	58
Figura 4.6: Tempo entre falhas presentes na fabricação dos arrastes. _____	59

Figura 4.7: Diagrama de funções do dispositivo automático de inspeção. _____	63
Figura 4.8: Árvore de classificação para o sistema de medição automático. _____	64
Figura 4.9: Sistema de transporte e fixação e calha de alimentação. _____	66
Figura 4.10: Cabeçote de medição para o arraste. _____	67
Figura 4.11: Conjunto “esfera, base e mola” e seus respectivos graus de liberdade. __	69
Figura 4.12: O sistema de medição para a altura do arraste. _____	70
Figura 4.13: Causas do erro de medição. _____	71
Figura 4.14: Gráfico gerado a partir da simulação Monte Carlo. _____	72
Figura 4.15: Diagrama esquemático para o DM do estudo de caso. _____	77
Figura 4.16: Layout esquemático para o DM do estudo de caso. _____	77
Figura 4.17: Fotos do componentes prototipados. _____	78
Figura 4.18: Novo conceito para o sistema de medição automático. _____	80
Figura 4.19: Cubo Central – Nova solução para o problema de transporte e fixação da peça. _____	81
Figura 4.20: Momento fletor devido ao peso próprio do cabeçote de medição. _____	82
Figura 4.21: O sistema de medição automático em sua configuração plena. _____	83
Figura 4.22: Circuito pneumático e diagrama trajeto-passo do sistema de medição. _	86
Figura 4.23: Micro CLP especificado para o controle dos elementos de automação mecânica. _____	87

Figura 4.24: Easy Box™ - Interface para aquisição de dados. _____	87
Figura 4.25: Tela de zeragem do software para automação e controle da medição. ___	88
Figura 4.26: Fluxograma – Algoritmo do modo de zeragem. _____	89
Figura 4.27: Tela de inspeção do software para automação e controle da medição. ___	90
Figura 4.28: Fluxograma – Algoritmo do modo de inspeção. _____	91
Figura 4.29: Ilustração do processamento matemático-geométrico utilizado na determinação das alturas máxima e mínima. _____	92
Figura 4.30: Foto do sistema de medição automático parcialmente montado. _____	94
Figura 4.31: Bancada experimental utilizada na integração dos blocos funcionais do dispositivo para medição do arraste. _____	95
Figura 4.32: Posicionamento dos transdutores na distância padrão. _____	96
Figura 4.33: Foto do cabeçote de medição para a peça dos estudo de caso. _____	97
Figura 4.34: Resultados gráficos da avaliação da repetitividade dos transdutores. ___	99
Figura 4.35: Ilustração de um ciclo completo de medição. _____	101
Figura 4.36: Foto do sistema de medição automático. _____	102
Figura 5.1: Possibilidades de controle monitoramento de vários instrumentos de medição. _____	110

# ÍNDICE DE TABELAS

---

Tabela 1.1: Principais propósitos da inspeção. _____	3
Tabela 2.1: Pesquisa bibliográfica - Trabalhos que abordam o tema “Projeto de Produtos”. _____	9
Tabela 3.1: Estrutura organizacional para garantia da qualidade utilizando planos da qualidade. _____	41
Tabela 4.1: Declaração de missão do dispositivo de medição da altura do arraste. ____	51
Tabela 4.2: Questionário (para técnicos analistas) guia para as entrevistas. _____	52
Tabela 4.3: Declarações do Técnico Analista da Qualidade e necessidades interpretadas. _____	53
Tabela 4.4: Lista final das necessidades dos clientes. _____	54
Tabela 4.5: Valores característicos do processo de fabricação dos arrastes. _____	60
Tabela 4.6: Matriz “métricas versus necessidades” criada para o exemplo. _____	61
Tabela 4.7: Matriz “métricas versus valores” do exemplo”. _____	62
Tabela 4.8: Conceitos solução para algumas funções do dispositivo. _____	65
Tabela 4.9: Conceito solução para a função “medir” do dispositivo do exemplo. ____	66
Tabela 4.10: Relatório de experimentos referente ao sistema de transporte e fixação. _____	79
Tabela 4.11: Especificações dos cilindros pneumáticos utilizados na automação mecânica do sistema. _____	84

Tabela 4.12 Componentes mecânicos Standard.	93
Tabela 4.13: Repetitividade dos transdutores indutivos.	97
Tabela 4.14: Balanço final de incertezas para Hmax.	104
Tabela 4.15: Balanço final de incertezas para Hmin.	104

# LISTA DE SIGLAS

---

- A/D** Analógico Digital
- CAD** Projeto Auxiliado por Computador (Computer Aided Design)
- CEP** Controle Estatístico do Processo
- CLP** Controlador Lógico Programável
- DM** Dispositivo de Medição
- fdp* Função Densidade de Probabilidade
- GPS** Especificação Geométrica do Produto (Geometric Product Specification)
- GRR** Repetitividade e Reprodutibilidade (Gage Repetibility and Reproducibility)
- GUM** Guia para Expressão da Incerteza na Medição (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)
- HBT** Transdutor de Meia Ponte (Half Bridge Transducer)
- IP<sup>2</sup>D<sup>2</sup>** Projeto e Desenvolvimento Integrado de Produtos e Processos (Integrated Product and Process Design and Development)
- ISO** Organização Internacional para Padronização (International Organization for Standardization)
- LIE** Limite Inferior de Especificação
- LSE** Limite Superior de Especificação

**MSA** Análise dos Sistemas de Medição (Measurement Systems Analysis)

**PC** Computador Pessoal (Personal Computer)

**R** Amplitude (Range)

**SM** Sistema de Medição

**USB** Universal Serial Bus

**VIM** Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia

# CAPÍTULO 1

---

## Introdução

### 1.1. Justificativas e objetivo

Conforme Milton Wetzel [1] “A racionalização do projeto foi intensamente pesquisada nos últimos 30 anos”. Atualmente, é comum se deparar com empresas que utilizam os métodos disponíveis na bibliografia para desenvolvimento de produtos e processos tecnológicos. Estes métodos se baseiam geralmente em alguns princípios simples de entender, mas não tão simples de aplicar, notadamente: a orientação ao cliente, a engenharia simultânea e a documentação das ações de projeto. Infelizmente, estas práticas não parecem estar igualmente difundidas entre aqueles que desenvolvem produtos metrológicos para demandas de inspeção específicas. Uma pesquisa informal feita entre vários projetistas de dispositivos de medição sinalizou que na maioria dos casos não se aplica método algum: o projeto se realiza em forma empírica, sem rastreabilidade das decisões adotadas e com uma elevada incerteza sobre o atendimento das necessidades do cliente, em especial dos requisitos metrológicos. Somente em alguns casos se constatou a presença de métodos próprios de organização, mais voltados ao atendimento dos requisitos da norma ISO 9000 do que a alcançar uma real qualidade funcional e metrológica no produto. Em geral, observa-se grande dificuldade em se manter o processo de desenvolvimento voltado para o atendimento das necessidades do cliente final, devido à falta de contato entre estes e os projetistas, a não percepção da importância da identificação destas necessidades pelos projetistas, ou ainda ao desconhecimento de como traduzi-las em especificações de projeto.

Este trabalho de dissertação propõe um método para projeto de sistemas de medição dedicados à inspeção geométrica, com foco nos clientes finais e no atendimento dos requisitos metrológicos.

Sistemas de medição dedicados caracterizam-se basicamente por apresentar uma configuração pouco flexível. No entanto, sua velocidade de resposta e alto nível de repetitividade os tornam ideais para aplicações onde existem exigências de tempo e volume de inspeção (e.g. na inspeção 100% ou na classificação dimensional). Conclusivamente, o trabalho, norteado nessas características básicas, tenta unificar os conceitos de garantia da qualidade, principalmente os aspectos metrológicos da qualidade, e projeto de produtos, como o “*do it right the 1<sup>st</sup> time*” (fazer certo da primeira vez) com propósito de catalisar o processo de desenvolvimento de produtos metrológicos.

Nos itens subseqüentes estão relacionadas as principais definições relativas à temática aqui abordada.

## **1.2. Definições *a priori***

### **1.2.1. Inspeção**

A palavra “inspeção” tem tantos significados que uma definição precisa deverá preceder qualquer discussão mais importante. De acordo com J. M. Juran [2] “inspeção sempre indica avaliação da qualidade de alguma característica em relação a um padrão”. Essa avaliação pode ser descrita como o “ato de inspeção” e consiste nas seguintes ações aplicadas a cada característica da qualidade” [2]:

1. Interpretar a especificação.
2. Medir a característica da qualidade.
3. Comparar o resultado da medição com a especificação.
4. Julgar a conformidade.
5. Dispor dos casos conformes.
6. Dispor dos casos não-conformes.

7. Registrar os dados obtidos.

J. M. Juran [2] ainda afirma, “A principal função da inspeção é determinar se o produto está de acordo com a especificação. Essa prática é freqüentemente chamada de inspeção de aceitação, ou aceitação do produto”. No entanto, existem ainda outras razões, sendo as mais importantes listadas na Tabela 1.1.

<b>Propósito</b>
Distinguir lotes bons de lotes ruins
Distinguir peças boas de peças ruins
Determinar se o processo está mudando
Determinar se o processo está próximo dos limites de especificação
Classificar a qualidade do produto
Classificar a reprodutibilidade dos operadores
Estimar a incerteza do instrumento de medição
Assegurar informação produto-projeto
Medir a capacidade estatística do processo

Tabela 1.1: Principais propósitos da inspeção.

G.D. Donatelli [3] em sua tese intitulada “Capacidade dos Sistemas de Medição em Tarefas de Inspeção 100%” infere que: “No atual contexto da relação consumidor-fornecedor, a contaminação de um lote de produtos com unidades não-conformes é considerada inaceitável do ponto de vista da qualidade. A forma mais eficiente de alcançar zero defeito é produzindo a característica da qualidade em um processo de fabricação capaz (i.e  $C_p \geq 1,33$  e/ou  $C_p \geq 1,67$  ). Infelizmente, processos com capacidade insuficiente podem ser encontrados em toda parte nas indústrias. Nesse casos, a inspeção 100% deve ser usada para identificar e separar unidades não-conformes”. Resumidamente, nos casos onde a inspeção por amostragem se torna ineficiente, normalmente quando produtos críticos estão sendo avaliados, se faz necessária a inspeção 100%. Enquanto sistemas de medição manuais estão sendo utilizados, a solução de inspeção 100% passa a se tornar onerosa e pouco confiável. A inspeção automatizada exerce um papel importante no sentido de abrandar tais empecilhos, além de proporcionar a diminuição dos tempos de inspeção.

### **1.2.2. Sistemas de medição automáticos dedicados**

De acordo com o VIM [4] “Sistemas de medição<sup>1</sup> são definidos como o conjunto completo de instrumentos de medição e outros equipamentos acoplados para executar uma medição específica”. Em sua versão dedicada os sistemas de medição são construídos para resolver um problema específico de medição, sendo limitados no que diz respeito à sua aplicabilidade.

Considerando que, na manufatura de grande demanda, peças com dimensões primárias críticas são produzidas em grandes quantidades, a inspeção individual e segregação dimensional de tais componentes requerem equipamentos com taxas de produção consideráveis, ocasionalmente tão altas quanto centenas de peças por minuto inspecionadas e selecionadas [5].

Esses requisitos de inspeção são satisfeitos por tipos particulares de equipamentos, sistemas automáticos de medição e seleção, que realizam de forma rápida todas as fases essenciais da inspeção, citadas abaixo:

1. Manuseio de material, incluindo o transporte das peças individuais à estação de medição, e subsequente transporte das peças inspecionadas, de acordo com as instruções recebidas pelas a unidade de medição;
2. A medição propriamente dita, incluindo a verificação das dimensões primárias, e quando necessário, das suplementares.
3. Tomada de decisão e garantia de sinais de instrução para as funções de manuseio de material requeridas [5].

---

<sup>1</sup> No presente documento os termos dispositivo de medição (DM), dispositivo de inspeção e sistemas de medição (SM) serão empregados como sinônimos.

Conclusivamente, a reunião dos conceitos acima nos fornece uma idéia a respeito da finalidade de sistemas de medição automáticos dedicados à inspeção geométrica, foco deste trabalho.

### **1.3. Garantia da qualidade geométrica em indústrias metal-mecânica**

Segundo Nigel Slack *et al* [6] Há uma crescente consciência de que bens e serviços de alta qualidade podem dar a uma organização considerável vantagem competitiva. Boa qualidade reduz custos de retrabalho, refugo e devoluções e, mais importante, boa qualidade gera consumidores satisfeitos. Alguns gerentes de produção acreditam que, a longo prazo, a qualidade é o mais importante fator singular que afeta o desempenho de uma organização em relação aos seus concorrentes. Como qualidade é tão importante para o desempenho de qualquer organização, uma tarefa chave da função operação deve ser garantir que ela proporcione bens e serviços de qualidade para seus consumidores internos e externos. Isso não é necessariamente direto. Por exemplo, apesar da “revolução da qualidade”, não há definições claras ou consensuais de o que “qualidade” significa. Na verdade, parece haver aproximadamente tantas definições de “qualidade” quanto há pessoas escrevendo sobre esta. O professor David Garvin categorizou muitas das várias definições em “cinco abordagens” de qualidade: a abordagem transcendental, a abordagem baseada em manufatura, a abordagem baseada no usuário, a abordagem baseada no produto, e a abordagem baseada no valor.

Neste trabalho serão apenas elucidadas as abordagens a seguir [6]:

- **Abordagem Baseada em Manufatura:** A abordagem baseada em manufatura preocupa-se em fazer produtos ou proporcionar serviços que estão *livres de erros* que correspondem precisamente a suas especificações de projeto
- **Abordagem Baseada no Usuário:** A abordagem baseada no usuário assegura que o produto ou o serviço está adequado a seu propósito. Essa definição demonstra preocupação não só com a conformidade com as especificações, mas também com a adequação das especificações às necessidades do consumidor

- **Abordagem Baseada no Produto:** A abordagem baseada no produto vê a qualidade como um conjunto mensurável e preciso de características, que são requeridas para satisfazer ao consumidor.

No âmbito das indústrias do segmento metal-mecânico, a aceleração do processo de globalização e o conseqüente aumento da competitividade entre as corporações tornaram urgente a fabricação de peças com qualidade assegurada (o termo qualidade é aqui tratado segundo a abordagem baseada no produto). No entanto, dependendo das exigências de exatidão, do tipo e quantidade de peças e parâmetros geométricos a serem controlados em cada peça a medir, os meios de controle convencionais (paquímetros, micrômetros, etc.), podem resultar em despesas consideráveis, inviabilizando assim sua aplicação [1]. Portanto, a qualidade dos meios de medição deve ser igualmente assegurada uma vez que é através dos mesmos que se enxergam as características que são necessárias para satisfazer ao consumidor. A Figura 1.1 ilustra o processo de medição e sua inter-relação com o processo produtivo.

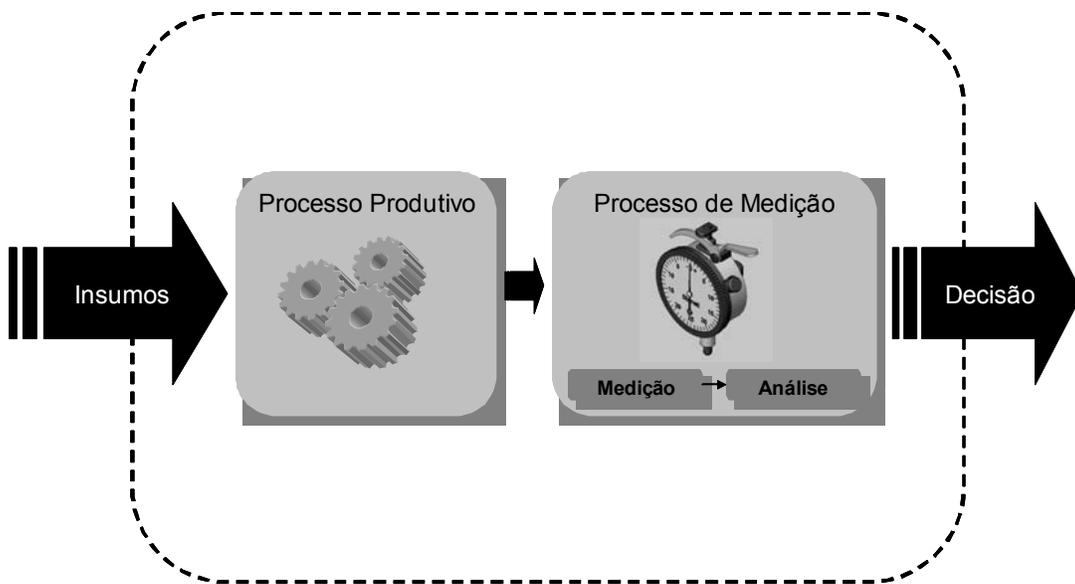


Figura 1.1 Inter-relação entre os processos de produção e medição (adaptado) [7].

No sentido de atender as demandas atuais, este trabalho tem como objetivo geral apresentar e discutir um método sistemático que auxilie os projetistas de sistemas de

medição dedicados à inspeção geométrica, sem qualquer restrição quanto à sua finalidade, durante processo de projeto e desenvolvimento do produto.

No capítulo seguinte serão descritos, de uma forma geral, os diversos métodos estudados incluindo o método final escolhido.

# CAPÍTULO 2

---

## Revisão dos Métodos para Projeto e Desenvolvimento de Produtos e Adequação do Método Selecionado

A bibliografia vigente conta com uma considerável gama de livros, apostilas, manuais e normas que tratam do tema “projeto de produtos”. No presente capítulo pretende-se, através de uma revisão bibliográfica: citar alguns desses materiais apresentando suas principais características, bem como explicar de forma geral o método selecionado como referência para esta dissertação introduzindo as adaptações efetuadas para a sua aplicação no desenvolvimento de produtos metrológicos. Vale ressaltar, que não é intenção do autor que subscreve julgar a eficiência dos métodos estudados. Os critérios utilizados para selecionar o método de referência lançam fora qualquer intenção negativista.

### 2.1 Métodos estudados

Os resultados da revisão bibliográfica sinalizaram que embora os trabalhos que tratam do tema “Projeto de Produtos” tenham suas peculiaridades a maioria deles segue uma plataforma semelhante. Ou seja, tentam reunir diversas áreas de conhecimentos (marketing, qualidade, produção, etc.) no esforço de criar produtos “completos”. Na Tabela 2.1 estão listados os trabalhos analisados bem como seus autores e principais características. É importante ressaltar que não foi utilizado nenhum critério de seleção específico, a escolha do trabalho intitulado “*Product Design and Development*” assinado por Karl T. Ulrich, Stephen D. Epingner [12] foi empírica e se balizou principalmente na experiência de utilização dos que orientaram o presente trabalho.

Bibliografia		Características
Autor (es)	Trabalho	
Mike Bexter	<i>Projeto de Produto: guia prático para o desenvolvimento de novos produtos</i> [8]	Procura integrar a abordagem que leva em consideração o ponto de vista do mercado ou da engenharia: como identificar e satisfazer as necessidades dos consumidores com a abordagem que leva em conta as questões de como criar e projetar um produto
Edward B. Magrab	<i>Integrated Product and Process Design and Development</i> [9]	Apresenta o método para desenvolvimento de produtos e processos de forma integrada (IP <sup>2</sup> D <sup>2</sup> ). O paradigma IP <sup>2</sup> D <sup>2</sup> leva em consideração uma considerável gama de requerimentos, objetivos e limitações, de forma mais ou menos abrangente, anteriormente ao início do processo de projeto detalhado
John R. Lindbeck	<i>Product Design</i> [10]	Introduz os métodos de projeto concorrente ou simultâneo, comumente conhecido por projeto para manufatura, onde os aspectos de projeto de planejamento de produtos são considerados como uma totalidade
John M. Usher, Utpal Roy, Hamid R. Pansaei	<i>Integrated Product and Process Development</i> [11]	Reúne artigos que apresentam idéias e aplicações que dão suporte ao projeto de produtos, o projeto de processos, ou a integração entre estes últimos.
Karl T. Ulrich, Stephen D. Eppinger	<i>Product Design and Development</i> [12]	Faz um misto entre as perspectivas de marketing, projeto e manufatura e as reúne em uma única vertente.

Tabela 2.1: Pesquisa bibliográfica - Trabalhos que abordam o tema “Projeto de Produtos”.

## 2.2 Método base: Sistemática de Ulrich & Eppinger

O sucesso econômico de empresas ou, no caso em questão, de um projeto depende da habilidade da equipe de desenvolvimento em identificar as necessidades dos clientes e criar produtos que satisfaçam essas necessidades e que possam ser fabricados com custos reduzidos [12].

Neste trabalho adotou-se como referência o modelo do processo de desenvolvimento de produto de Ulrich & Eppinger [12]. Esse modelo foi selecionado, além dos motivos

citados nas páginas antecedentes, pela sua simplicidade conceitual e adaptabilidade a distintos tipos de produto.

### **2.2.1 Características gerais do método**

A método adotado consiste, de uma maneira geral, basicamente no que está apresentado na Figura 2.1 – o fluxo em azul corresponde a maneira correta de se abordar o problema, as setas vermelhas representam justamente o contrário. O cliente idealiza um produto com características peculiares, em seqüência contrata os serviços de um projetista que em passo complementar gera suas especificações e o direciona para manufatura. É certo que nem sempre as necessidades do cliente ficam claras e objetivas para o projetista, isso pode desencadear erros no processo de projeto que se refletem de forma indesejada no produto final. Neste ponto não é possível retroceder às etapas iniciais do processo. Em face disso são desperdiçados insumos intelectuais e materiais, sem fazer menção ao tempo despendido e ao valor monetário aportado. Ulrich & Eppinger [12] sugerem um método de fases que possui foco nos clientes finais, de forma que suas necessidades são todas identificadas nas fases iniciais do projeto - tal processo está indicado na Figura 2.1 pelo fundo cinza - reduzindo intensamente a probabilidade de desencadeamento de erros de projeto.

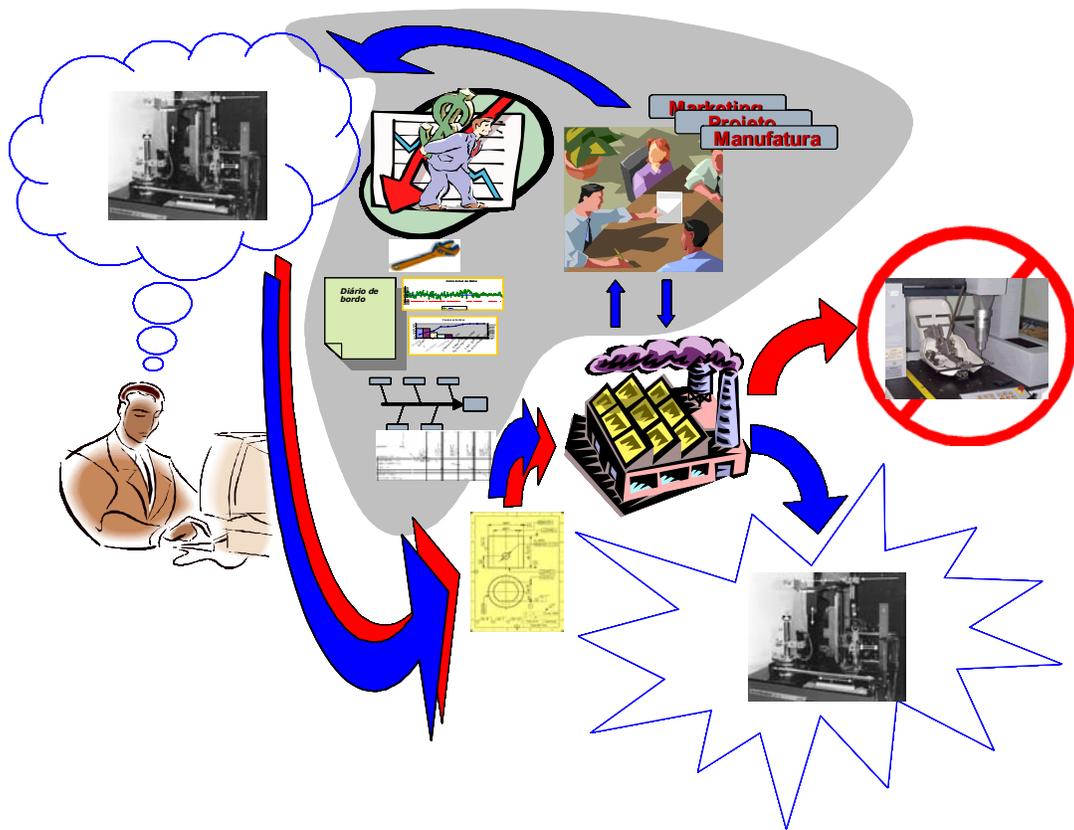


Figura 2.1: Método sistemático de Ulrich & Eppinger apresentado sob o ponto de vista de suas características gerais.

Os autores propõem uma sistemática orientada à satisfação das necessidades do cliente, suportada por ferramentas fáceis de aplicar, tais como a matriz de QFD (desdobramento da função qualidade), matrizes de decisão, estruturas de função e outras de provada efetividade. Isso permite documentar o processo e fornece rastreabilidade às decisões.

Ulrich e Eppinger [12] sugerem ainda organizar o processo de desenvolvimento em cinco fases (Figura 2.2). A fase 1 diz respeito ao *projeto conceitual* do produto: nela são identificadas as necessidades dos clientes e são gerados os conceitos para satisfazer essas necessidades. A fase 2 se refere ao *projeto em nível de sistema*, que corresponde ao delineamento dos componentes que constituem o produto, sejam eles componentes de *software*, *hardware* ou ainda *humanware*. Na fase 3 é desenvolvido o *projeto*

*detalhado* do produto, focando nos aspectos de fabricação e montagem. A fase 4 se refere ao *teste e refinamento do produto*, na qual se realizam os testes para liberação e ajustes finais. Finalmente, a fase 5 corresponde a sua fabricação seriada.

Na Figura 2.2 pode-se observar também como as distintas atividades se realizam ao longo do tempo.

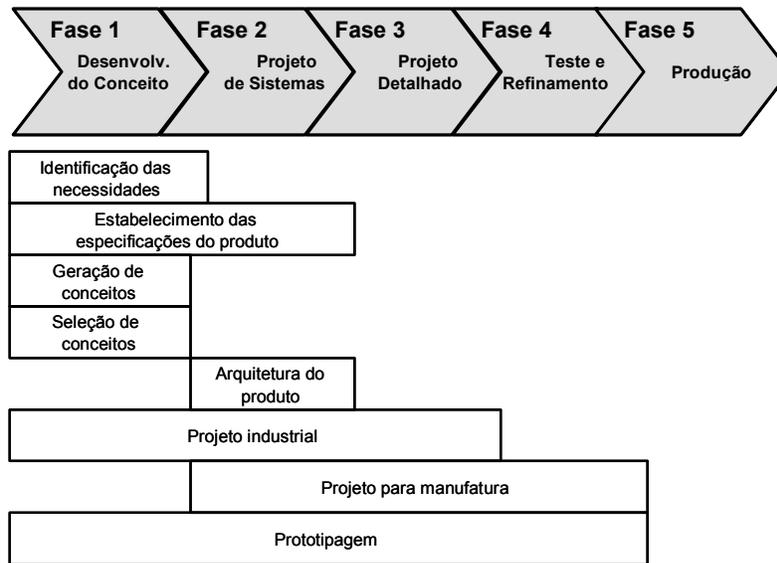


Figura 2.2: Método sistemático de Ulrich & Eppinger para o projeto e desenvolvimento de produtos (adaptado) [12].

### **2.3 Adaptação ao Projeto e Desenvolvimento de Sistemas de Medição Automáticos Dedicados à Inspeção Geométrica**

A modificação proposta pelo autor pode ser observada na Figura 2.3, na qual se destacam principalmente as atividades de cunho metrológico.

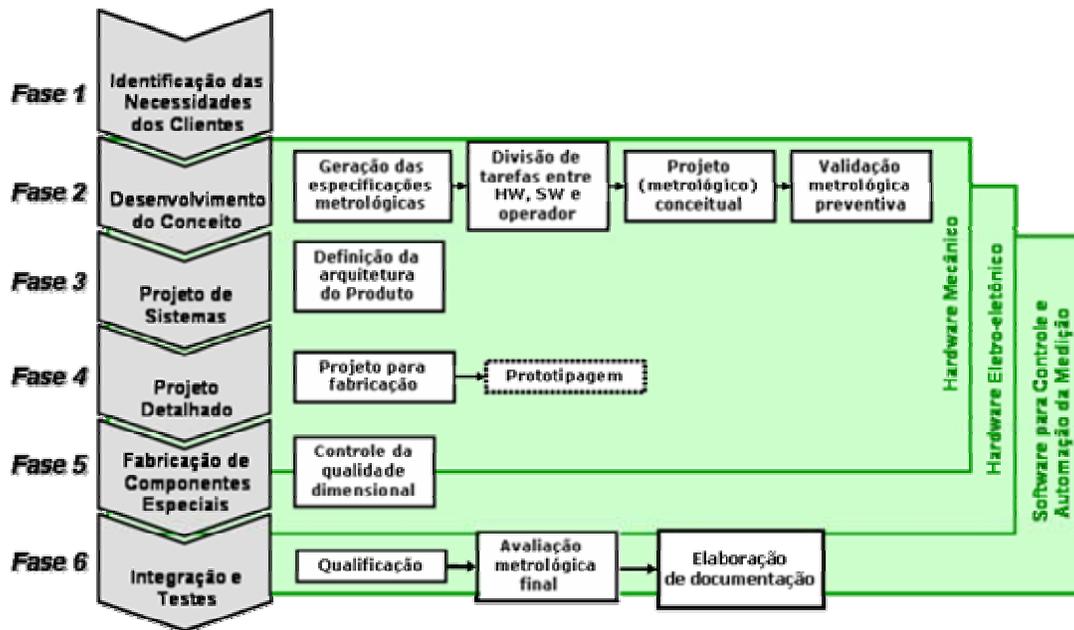


Figura 2.3: Método adaptado para sistemas de medição dedicados à inspeção geométrica.

A seguir, uma breve descrição e justificação das diferenças com relação ao modelo base:

- Foi destacada, como Fase 1, a atividade de identificação das necessidades dos clientes, devido à sua importância para o sucesso do projeto e o fato de ser realizada geralmente em forma deficitária.
- Foram acrescentadas, na fase de desenvolvimento do conceito, tarefas explícitas de geração de especificações metrológicas, de divisão de tarefas entre hardware (HW), software (SW) e operador e de validação metrológica preventiva ou preliminar. Estas atividades pretendem introduzir conceitos de garantia da qualidade das medições desde as primeiras etapas do desenvolvimento do sistema de medição.
- A fase de fabricação foi encaixada imediatamente após o projeto detalhado, por se tratar de dispositivos únicos ou produzidos em poucas unidades.

- Os testes foram deslocados para o final e associados à integração dos subsistemas. Nesta fase se levam a cabo a validação metrológica experimental e a qualificação do sistema de medição.

Foi identificada ainda a necessidade de considerar que, uma vez realizada a distribuição de tarefas, o processo de desenvolvimento se separa em três sub-processos, que acontecem simultaneamente, mas envolvendo conjuntos diferenciados de conhecimentos: o desenvolvimento do hardware mecânico, o do hardware eletro-eletrônico e o do software. O desenvolvimento de software se estende até a fase de integração e testes, quando normalmente podem ser detectados os problemas de software e a necessidade de acréscimos ou mudanças. Em todas as fases, pressupõe-se a utilização de ferramentas disponíveis na literatura, tais como a matriz de QFD (desdobramento da função qualidade), matrizes de decisão, diagramas de causa e efeito e de Pareto, gráficos de controle, dentre outras.

### **2.3.1. Requisitos para o projeto e desenvolvimento de sistemas de medição automáticos dedicados à inspeção geométrica**

Pela própria natureza dos requisitos impostos sobre eles, os sistemas de medição automáticos dedicados à inspeção geométrica são freqüentemente sistemas complexos, envolvendo subsistemas mecânicos, eletrônicos e, dependendo da tecnologia aplicada, de software (i.e. sistemas mecatrônicos). Apesar desta complexidade, precisam ser desenvolvidos a um custo mínimo, já que sua especificidade faz com que se tratem de dispositivos únicos ou fabricados em poucas unidades, sendo o custo de desenvolvimento uma parte expressiva do custo total. Isso leva à necessidade de minimizar o tamanho das equipes, reduzir tempos e recorrer ao uso de protótipos somente quando for estritamente necessário.

### **2.3.2. Atendimento aos requisitos para o projeto e desenvolvimento de sistemas de medição automáticos dedicados à inspeção geométrica**

Para atender aos requisitos citados no tópico antecedente, é necessário:

- Identificar sem ambigüidades as necessidades dos clientes (funcionais, ergonômicas, metrológicas, econômicas, etc.);
- Gerar uma grande quantidade de conceitos-solução alternativos, selecionando a opção mais adequada por meio de seqüência lógica e convergente;
- Maximizar a padronização;
- Usar preferencialmente componentes e sistemas “de prateleira”, de qualidade e confiabilidade reconhecidas;
- Assegurar a confiabilidade metrológica desde as primeiras etapas do desenvolvimento do sistema, usando métodos de avaliação da incerteza de medição baseados em informação a priori.

Assim, pode-se minimizar o risco de não conformidade nos testes de validação do equipamento e, portanto, a necessidade de modificações tardias. O método proposto neste trabalho considera estes aspectos cruciais e sugere ferramentas simples para organizar e documentar o processo de desenvolvimento.

Um processo de desenvolvimento padronizado favorece o rastreamento das decisões e permeia a organização de documentação. Por outro lado o excesso de burocracia introduz uma dimensão onerosa a esse processo e em alguns casos inibe a criatividade. Assim, deve haver um compromisso entre a padronização e a criatividade no sentido de favorecer a qualidade do produto final.

Analogamente à sistemática de Ulrich & Eppinger [12] o método adaptado é constituído de fases, etapas e tarefas. Pretende-se no capítulo subsequente explicar de maneira detalhada cada um desses elementos.

# CAPÍTULO 3

## Aspectos Relevantes e Detalhamento do Método Adaptado

É indiscutível o fato de que Sistemas de Medição possuem como proeminência suas características metroológicas. Não obstante, os demais aspectos não podem, nem devem, ser negligenciados. Portanto, é imprescindível neste ponto, além de tentar explorar de perto as peculiaridades quando existirem características metroológicas, mostrar os destaques relevantes (aspectos funcionais, ergonômicos, etc.) ao longo do processo sistemático. Em suma, no atual capítulo tenta-se fazer um apanhado dos principais pontos da sistemática proposta, mostrando os passos necessários para concluí-la, etapa por etapa, bem como os conceitos envolvidos nesse processo. A sistemática é mais uma vez apresentada para guiar o leitor no decorrer do capítulo.

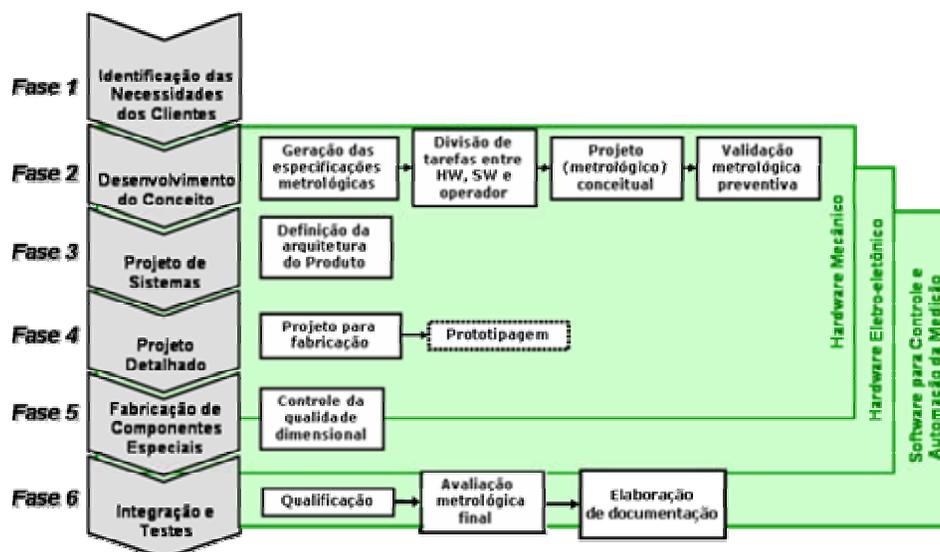


Figura 3.1: Método adaptado para sistemas de medição dedicados à inspeção geométrica.

### 3.1 Identificação das necessidades dos clientes

Os objetivos específicos dessa fase estão abaixo relacionados [12]:

- Assegurar que o produto esteja focado nas necessidades dos clientes;
- Identificar necessidades latentes ou subjetivas bem como as explícitas;
- Assegurar que nenhuma necessidade crítica seja ignorada ou esquecida;
- Prover uma base de fatos para justificar as especificações do produto;
- Documentar as necessidades identificadas;
- Desenvolver um entendimento comum das necessidades dos clientes dentre os membros da equipe de projeto e o grupo de usuários finais do DM (Dispositivo de Medição).

A fase inicial da adaptação em sua essência não se distingue da proposta por Ulrich & Eppinger [12]. No sentido de guiar o processo de coleta de informações estes autores sugerem a criação de *check lists* ou questionários gerados para cada um dos distintos tipos clientes destinatários. Esses questionários, por sua vez, contam com perguntas específicas aos profissionais das diversas áreas de conhecimento (e.g. marketing, qualidade, produção, projeto, etc.). Ao final da etapa de identificação das necessidades dos clientes estão disponíveis uma série de declarações a respeito do sistema de medição.

A Figura 3.12 ilustra os passos necessários para concluir a presente etapa. O trabalho começa com a definição do escopo do projeto, onde é gerada a declaração de missão, que fornece uma descrição sumária do DM, os objetivos de negócios (tempos e valores), o cliente primário, as suposições (limitações à liberdade do projetista) e por fim os *stakeholders* (aqueles que estarão em contato com o sistema de medição durante o seu ciclo de vida). Havendo sido identificados os principais afetados pelo sistema, são então coletados dados junto aos mesmos através de entrevistas individuais. Em seqüência é gerada, como resultado das entrevistas, uma série de declarações pessoais que estão “na linguagem do cliente” e podem não se referir em forma direta e clara aos atributos que o sistema deve possuir. Para solucionar este problema é ideal que as declarações sejam

interpretadas no sentido de facilitar a geração das especificações do produto, resultando em uma lista de necessidades interpretadas. Uma vez interpretadas as necessidades chega o momento de agrupá-las em conjuntos semelhantes (ordenar hierarquicamente) para então graduá-los segundo suas respectivas importâncias. Essa ponderação é essencial à hora de resolver compromissos de projeto.

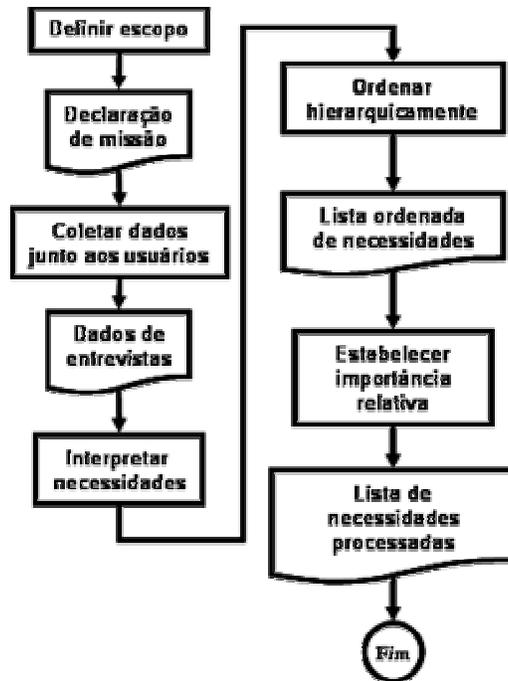


Figura 3.1: Atividades e resultados da fase de identificação das necessidades dos clientes (adaptado) [12] .

## 3.2 Desenvolvimento do conceito

### 3.2.1. Caracterização do mensurando

A geração das especificações não pode ser realizada arbitrariamente. Caso contrário, corre-se o risco de criar conjuntos de especificações que são inconsistentes com a tecnologia disponível. Para evitar tal problema, é necessário em passo anterior caracterizar cuidadosamente a interface do sistema. No caso de sistemas de medição, é especialmente importante a caracterização adequada do mensurando, em outras palavras

é imperativo, neste ponto, efetuar uma análise a respeito da especificação que o produto deve atender.

O controle estatístico de processo (CEP) pode auxiliar de sobremaneira nesta etapa, permitindo a geração de informação objetiva sobre a variabilidade do mensurando dentro de cada peça e entre peças fabricadas pelo processo. Assim, podem ser definidas com segurança:

- A faixa de operação do sistema de medição;
- A relação entre variação do processo e a incerteza de medição;
- O tipo de não conformidade (sistêmica ou eventual);

O tipo de gráfico de controle mais comumente empregado para controlar variáveis é o gráfico  $\bar{X}$ -R, tipicamente usado quando várias peças podem ser medidas em um tempo relativamente curto, formando um sub-grupo. Em um dos gráficos controla-se a média do sub-grupo ( $\bar{X}$ ). O outro é usado para controlar a variação dentro do sub-grupo, por intermédio da amplitude (R) [6]. Na Figura 3.23 ilustra-se uma carta de controle de média e amplitude.

Uma outra variação é o chamado gráfico de três vias. Este é constituída por um gráfico de valores individuais que sinaliza o deslocamento com relação ao alvo do processo, uma carta de amplitudes móveis, que mostra as variações entre diferentes peças e por fim o gráfico das amplitudes, que apresenta as variações dentro de uma mesma peça. Tal carta será abordada de uma forma mais apurada nos itens subseqüentes do presente trabalho.

Vale ainda colocar que deve estar assegurada a qualidade das medições do dispositivo usado durante o processo de análise preliminar.

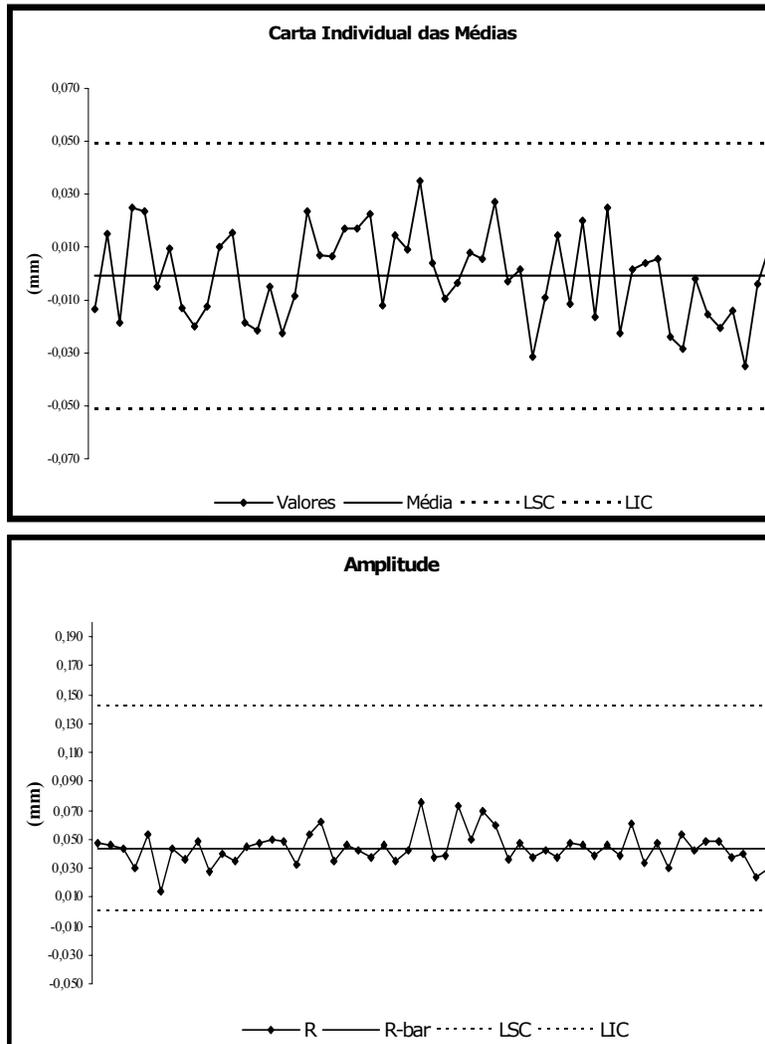


Figura 3.2: Carta de controle de média e amplitude.

### 3.2.2. Geração de especificações metrológicas

No fluxograma abaixo (Figura 3.3) estão indicados os passos necessários para concluir a etapa em questão.



Figura 3.3: Fluxograma - Geração das especificações metrológicas (adaptado) [12].

As necessidades processadas não são uma boa base para o projeto de um sistema técnico complexo. Por esta razão a equipe de projeto deve estabelecer um conjunto de especificações que traduzam da forma mais próxima possível o que o produto deverá fazer. Uma especificação é originada pela junção de uma métrica com um valor. Para gerar as especificações pode se usar como base a matriz “métrica versus necessidades”, que é uma versão simplificada da “casa da qualidade”. O documento gerado pode ser considerado a chave de todo o processo de desenvolvimento: é referência para todas as decisões posteriores.

Na

Figura 3.45 pode ser observado o extrato de uma matriz de métricas versus necessidades (os valores da métricas não estão indicados), mostrando a geração de métricas que representam o comportamento metrológico do sistema de medição. Um ponto na célula onde se cruzam uma linha com uma coluna significa que a métrica é relevante para o atendimento da necessidade correspondente.

Necessidade Interpretada		Métrica							
		R&R(% Tol)	R&R(% PV)	Estabilidade	Linearidade	Histerese	Erro máximo permissível	Resolução	
1	O dispositivo possui propriedades metrológicas adequadas	●	●	●	●	●	●	●	
2	O dispositivo é geometricamente compatível com os tipos de peças a serem medidas.								
3	O dispositivo é sensível às variações da peça	●	●		●	●			
4	O dispositivo é robusto à variação de temperatura			●					
5	As medidas feitas com o dispositivo são rastreáveis					●			
6	O dispositivo classifica as peças de forma confiável	●	●	●	●		●	●	
7	O dispositivo fornece informação adequada para setup do processo de torneamento.		●	●	●		●	●	
8	O dispositivo fornece informação para construir cartas de controle de média e amplitude.		●	●	●		●	●	

Figura 3.4: Extrato de uma matriz “métricas versus necessidades interpretadas”.

### 3.2.3. Projeto metrológico conceitual

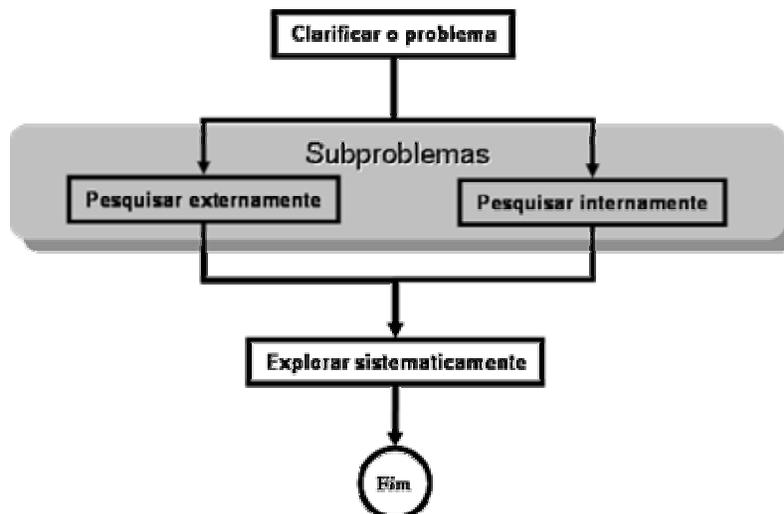


Figura 3.5: Fluxograma - Geração de conceitos (adaptado) [12].

O cerne desta etapa é gerar vários conceitos com potencial para solucionar o problema. O conceito de um produto contém uma descrição aproximada de sua tecnologia, princípios de funcionamento e forma [12]. O processo de geração de conceitos tem início na chamada clarificação do problema (Figura 3.5). A tarefa principal é

desenvolver um entendimento geral a seu respeito para em seqüência, se necessário, fragmentá-lo em subproblemas. Para a decomposição do problema, recomenda-se inicialmente imaginá-lo como sendo uma caixa preta, apresentando assim suas funções da forma mais geral possível. Em seguida deve-se criar um diagrama de funções para o mesmo. A idéia é fornecer uma descrição mais detalhada do DM, apresentando suas funções básicas (e.g. medir, transporta e fixar a peça). Com respeito a este tema, E. O. Doebelin [13] opina que se os instrumento de medição forem observados de um ponto de vista generalista, logo se reconhece em seus elementos um padrão de similaridade no que diz respeito aos seus blocos funcionais. Na Figura 3.6 apresenta-se um possível arranjo de estrutura de funções para um instrumento de medição genérico.

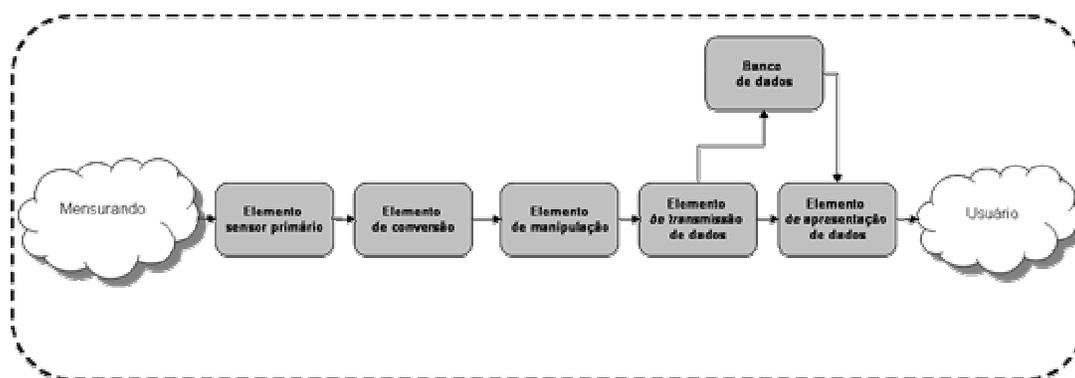


Figura 3.6: Elementos funcionais de um sistema de medição genérico (adaptado) [13].

O tempo de projeto é uma demanda real, concentrar esforços em todos os subproblemas seria demorado e oneroso. Portanto, a ordem é focar os subproblemas mais críticos, pesquisando soluções que melhor os resolvam. A pesquisa pode se desenrolar de forma individual ou em grupo. Nela são geradas soluções originais, portanto é imperativo que os projetistas ponham em prática sua criatividade. É possível que a solução para um determinado subproblema já esteja disponível na literatura ou em bancos de patentes, logo o projetista deve atuar também pesquisando nessas áreas. Como resultado das atividades de pesquisa, o time terá coletado algumas dezenas de fragmentos de conceitos [12]. A exploração sistemática organiza o conjunto de soluções através do auxílio de ferramentas como árvores de classificação e tabelas de combinação.

É pertinente lembrar que o objetivo nesta etapa é gerar tantos conceitos-solução alternativos quanto seja possível para cada bloco funcional, combinando-os uns com outros para obter diversas soluções ao problema global. Essas soluções devem ser analisadas criticamente para escolher a mais promissora. Isso se realiza com o auxílio de uma matriz de decisão, que permite avaliar as soluções alternativas segundo critérios derivados da lista de necessidades e da matriz de métricas versus especificações.

Para o caso dos sistemas de medição, é ainda particularmente relevante nesta etapa determinar o método de medição, selecionar a estratégia de medição que melhor resolve o problema e definir o tipo e quantidade de transdutores a serem utilizados (Figura 3.7). Esse processo se desenrola em meio a uma atmosfera que fornece subsídios suficientes para se tomar decisões relativas ao grau de automação do dispositivo, onde serão divididas as tarefas entre dispositivos automáticos e o operador.

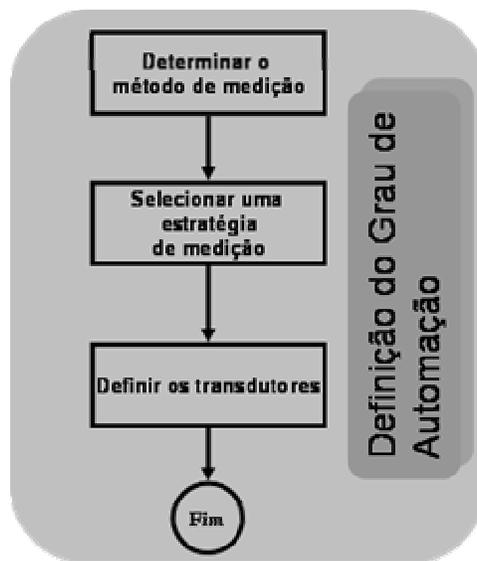


Figura 3.7: Atividades para definição do sistema de medição.

#### 3.2.4. Validação metrológica preventiva

A solução selecionada precisa ser validada antes de partir para o projeto de. Para validar uma proposta de sistema de medição, é necessário estimar o desempenho metrológico

do mesmo, comparando-o com os valores ideais e marginalmente aceitáveis das métricas. Nesta situação, é interessante a utilização de métricas para as quais exista um procedimento de avaliação baseado em informação *a priori* (não experimental). Tal é o caso da incerteza de medição, quando estimada a partir de quantidades tipo B [14][15]. Dependendo da complexidade do problema, a incerteza pode ser estimada analiticamente ou por simulação Monte Carlo. O método de simulação Monte Carlo é baseado na geração aleatória de números através de uma função densidade de probabilidade associada a cada uma das entradas, formando uma função densidade de probabilidade analítica para o resultado de saída [16][17][18]. Este último método também é consistente com o ISO GUM e permite atacar problemas fisicamente complexos. Na simulação Monte Carlo segue-se os seguintes passos:

- Constrói-se um modelo matemático para a medição com as características abaixo;

$$Y = f(v_1, v_2, v_n),$$

onde  $v_1 \dots v_n$  são as variáveis de influência e  $Y$  é o resultado da medição.

- Atribui-se a cada uma das variáveis uma *fdp* (função densidade de probabilidade);
- A incerteza final será obtida da combinação, por simulação, das incertezas associadas a cada uma das variáveis de influência.

Observa-se que a identificação das fontes de incerteza dominantes pode ser usada para orientar a melhoria do sistema, tornando-o robusto, por exemplo, à variação dos parâmetros ambientais.

### **3.3 Projeto de sistemas**

Na presente fase, o dispositivo de medição é arranjado em blocos físicos. A principal intenção é definir tais blocos em termos das suas funções e das interfaces existentes

entre eles. No passo inicial (Figura 3.89) é criado um diagrama esquemático do dispositivo através do qual são apresentadas suas funções básicas. A utilização desse recurso promove a visualização das funções gerais do dispositivo, bem como define os sistemas necessários para executá-las. Em seqüência os elementos funcionais detentores de características semelhantes são agrupados de tal forma a eliminar redundâncias. A criação de um layout geométrico força o time de projeto a considerar quais são as interfaces geométricas existentes entre os blocos funcionais do dispositivo [12]. O layout pode ser construído em duas ou três dimensões através da utilização de qualquer software gráfico. Vale salientar que não é necessário ainda detalhar o desenho, tal atividade se dará em etapas subseqüentes do processo de projeto. Tendo em vista que as interações entre blocos são reais, sejam elas incidentais ou funcionais, é importante identificá-las. Desta forma são rastreados possíveis problemas de incompatibilidade.

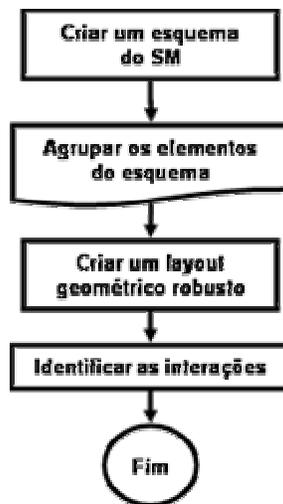


Figura 3.8: Fluxograma: Projeto de sistemas (adaptado) [12].

### 3.4 Projeto detalhado

Uma vez concluída a fase relativa ao projeto de sistemas do produto, é necessário neste ponto dar continuidade à sistemática, iniciando a primeira etapa da fase de projeto detalhado (fase 4), ou seja, o “*projeto para fabricação*”. A etapa de projeto para fabricação consiste no detalhamento (em nível de modelo sólido) dos componentes do

DM esboçados nas etapas prévias. No sentido de apoiar a referida etapa, recomenda-se a utilização de softwares de CAD. Esse esforço é válido, pois com a digitalização é possível fazer uso de ferramentas como: simulações de tensões, de movimentos relativos entre peças, dentre outras. A Figura 3.9 ilustra a análise de tensões de um determinado componente mecânico, feita com o suporte do SolidWorks®.

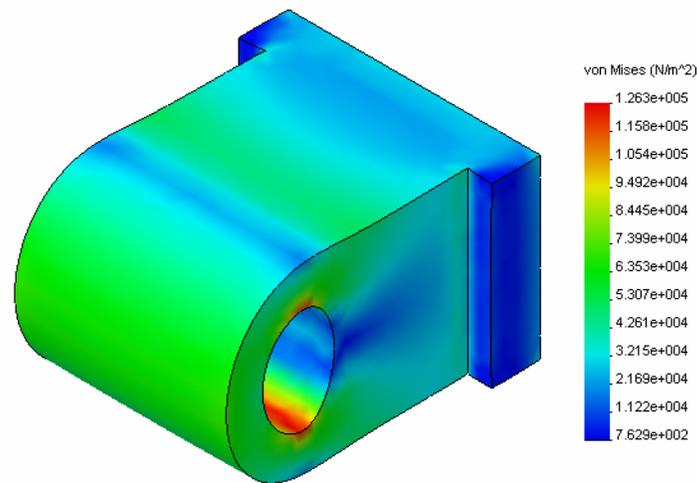


Figura 3.9: Peça modela em software de CAD.

Nem todas as avaliações podem ser feitas por simulação computacional. Em geral, os protótipos são construídos para proporcionar aos projetistas uma melhor compreensão do resultado do processo de desenvolvimento, bem como das funções do produto. No intuito de abrandar os impactos econômicos causados pela prototipagem desnecessária, recomenda-se modelar apenas aquelas partes que constituem um risco maior para o funcionamento efetivo do sistema, normalmente os componentes que agregam mais de uma função. Sugere-se ainda que os materiais utilizados sejam de classes inferiores às que seriam aplicadas em definitivo, tendo sempre em mente que as funções do produto final não devem ser comprometidas. O processo de prototipagem tem início na definição do objetivo da construção do protótipo. É importante deixar claro qual a finalidade do protótipo, de modo que a probabilidade de serem modelados componentes de fácil assimilação seja praticamente aniquilada. Em seqüência, é preciso estabelecer o nível de aproximação do protótipo com relação ao seu elemento real correspondente,

determinando assim o seu nível de complexidade. É importante ainda elaborar um plano de experimentos adequado para execução dos testes. Por fim, um cronograma contendo os aspectos construtivos e de teste deve ser desenvolvido, além de um relatório de experimentos com os resultados dos testes.

### **3.5 Elaboração do software, hardware mecânico e elétrico para controle e automação da medição**

#### **3.5.1. Instrumentação virtual**

Neste ponto a equipe de projeto deve definir qual software de controle a utilizar. Porém, não se pode negar a eficiência dos softwares que fazem uso do princípio de “instrumentos virtuais” [19]. Portanto, o autor recomenda a sua utilização sempre que possível.

Um típico instrumento virtual é constituído pelos seguintes blocos (Figura 3.101)[19]:

- Transdutores e equipamentos de condicionamento de sinal (transformadores, atenuadores, amplificadores, filtros, multiplexadores, e etc.);
- Aquisição de dados com placa de amostragem, conversores A/D, e geradores de clock;
- Computador;
- Software (controle da aquisição de dados, processamento do sinal digital, e interface do usuário).

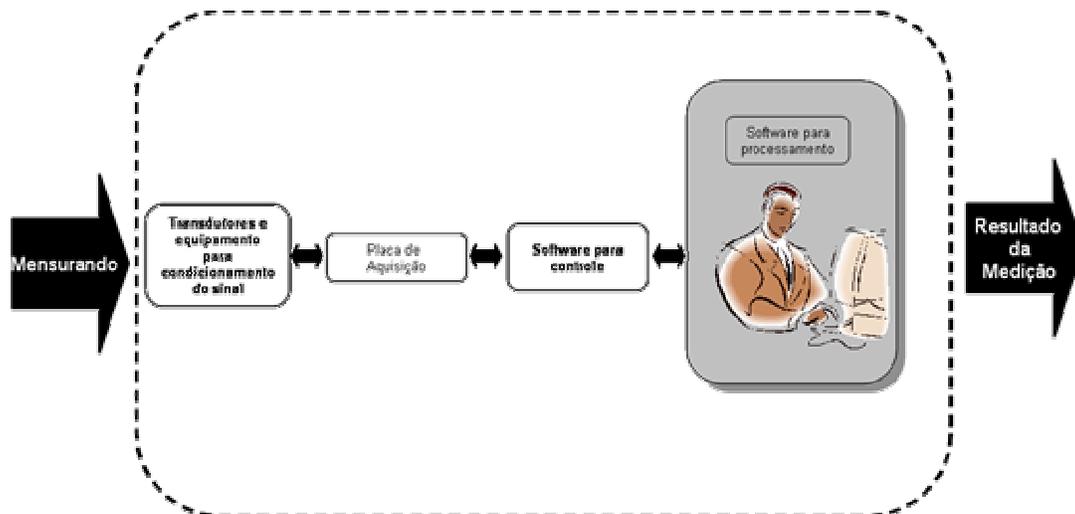


Figura 3.10: Principais componentes de um “instrumento virtual”.

O Labview™ da National Instruments pode ser citado como um exemplo de software para controle e processamento. Através dele, o programador cria uma interface em um computador que simula parte dos elementos funcionais do instrumento de medição, ou seja, é possível controlar o processo de medição, ler a partir de um transdutor e até mesmo executar operações matemáticas por intermédio de um simples computador pessoal, obviamente com as configurações de software e hardware adequadas ao programa.

A Figura 3.11 mostra o painel de controle de um típico instrumento virtual de medição desenvolvido por meio do Labview™.

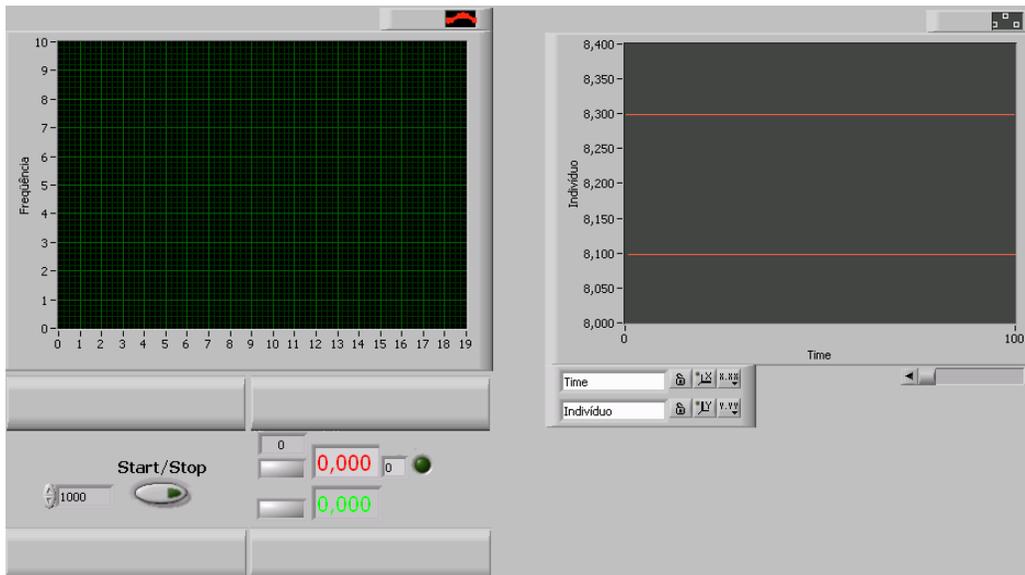


Figura 3.11: Painel de controle de instrumento virtual desenvolvido em Labview™.

Para seu correto emprego em um sistema da garantia da qualidade, é essencial ainda caracterizar e estimar as incertezas associadas aos resultados fornecidos pelos instrumentos virtuais. É importante que a avaliação de incertezas seja um processo economicamente aceitável, portanto o método de avaliação deve ser, mesmo que aproximado, fácil de aplicar [19]. Nuccio e Spataro [19] propõem dois métodos para avaliação da incerteza de medição de instrumentos virtuais: um método numérico, que simula o processo físico da conversão A/D, e um método teórico aproximado, que aplica a lei de propagação de incertezas do ISO GUM [15].

### 3.5.2. Projeto de elementos de automação mecânica

Define-se nesta etapa o hardware mecânico e elétrico para executar as suas funções automáticas. Cabe à equipe decidir se o controle será puramente pneumático, eletropneumático ou através de controladores lógicos programáveis (CLP's). Essa definição está, normalmente, relacionada com o grau de complexidade da aplicação do sistema mecatrônico. Entretanto, o uso de CLP's vem se tornando cada vez mais freqüente no chão de fábrica, no parágrafo seguinte tenta-se justificar tal afirmação através das razões expostas por A. Bollmann [20].

Modificar ou ampliar um programa na eletropneumática convencional significa refazer as ligações dos fios e/ou até modificar a estrutura física com a inclusão de mais componentes, o que demanda normalmente muito tempo. No caso do controlador programável basta modificar as instruções no programa que foi armazenado na sua memória. Além da programação variável, os CLP's apresentam ainda as seguintes principais vantagens em relação ao uso de relés para implementar as funções lógicas dos comandos:

- Facilidade de instalação e montagem;
- Simplicidade nas ligações com os demais componentes do comando;
- Redução do tempo de implementação e alteração da lógica do comando, devido à facilidade de programação e reprogramação;
- Integração fácil e simples com computadores;
- Incorporação de um grande número de temporizadores, contadores, unidades de operações aritméticas e entradas e saídas analógicas;
- Custo bem menor, a não ser em casos de comandos extremamente simples, nos quais a execução puramente pneumática ou eletropneumática é mais econômica;
- Tamanho e peso reduzidos;
- Facilidade de expansão dos módulos de entrada e saída, pela modularidade da sua construção.

### **3.5.3. Integração da instrumentação virtual com elementos de automação mecânica**

Integrar a instrumentação virtual com os elementos de automação é vital para o funcionamento efetivo do sistema de medição automático como um todo. Para tanto, as questões ligadas à comunicação entre as duas interfaces (instrumentação virtual e automação mecânica) devem ser previamente definidas. Os CLP's mais modernos

possuem saídas para conectores do tipo serial. Felizmente, os últimos softwares para controle e automação da medição conseguem, através de um *software driver* adequado, se comunicar com esse tipo de interface de comunicação. O esquema apresentado na Figura 3.123 ilustra o processo de comunicação anteriormente mencionado.

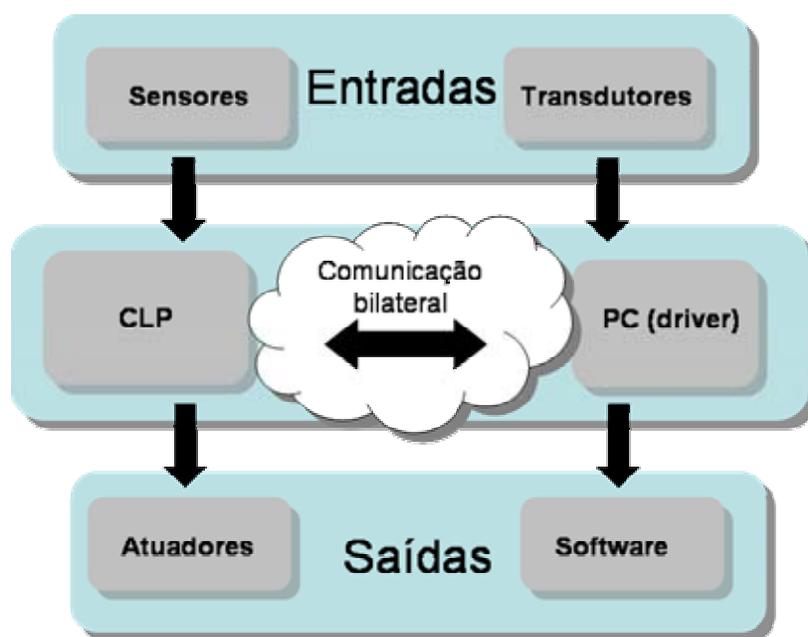


Figura 3.12: Processo de integração instrumentação virtual versus elementos de automação mecânica.

### 3.6 Fabricação, integração e testes

O presente tópico refere-se às fases 5 e 6 da sistemática. Neste ponto o sistema de medição já deve possuir as suas características e subsistemas definidos, bem como as questões relativas aos possíveis problemas de peças críticas (prototipagem) delineadas. A equipe de projeto, tendo em mãos os desenhos detalhados de todas as peças mecânicas, pode prosseguir e enviá-los para um fabricante com competência em mecânica de precisão. Componentes mecânicos de dispositivos de medição requerem uma atenção especial no que tange a sua exatidão. Nesse sentido é imperativo fazer uso das técnicas da “Mecânica de Precisão” que, por sua vez, corresponde ao conjunto de tecnologias em aprimoramento, necessárias à conformação geométrica de componentes

e/ou sistemas de precisão que se caracterizam pelas suas tolerâncias de fabricação estreitas e/ou pelas suas dimensões muito pequenas [21].

O autor que subscreve julga recomendável que a fabricação dos componentes de precisão mecânica se dê em meio a um processo que se assemelha ao ciclo PDCA (Figura 3.13). O PDCA é uma ferramenta da qualidade largamente utilizada e consistente com a filosofia da melhoria contínua. O ciclo começa com o estágio P (*Plan*) que envolve o exame do problema existente. O estágio D (*Do*) envolve a implementação do plano imaginado na primeira etapa. A seguir, vem o estágio C (*Check*) onde a solução é avaliada. Por fim, o estágio A (*Act*) onde a solução é consolidada [6]. No âmbito do desenvolvimento de componentes mecânicos de precisão, inicialmente (*Plan*) a peça é imaginada e esboçada a mão dentro da etapa de projeto metrológico conceitual. Em seguida (*Do*) é modelada em um software de CAD na etapa de projeto para fabricação e, se necessário, alterada para se adequar às demandas do projeto. Após isso (*Check*) o componente é detalhado. E finalmente (*Act*) enviado para fabricação. É correto afirmar que o PDCA deve se dar de maneira contínua (um ciclo seguido do outro). Embora essa idéia, não seja evidente no domínio do projeto de produtos metrológicos, é válido, ainda assim, utilizar o PDCA como referência. Dessa forma, o processo de desenvolvimento e fabricação ocorre em meio a uma atmosfera favorável à garantia da qualidade, o que é sempre bem-vindo.

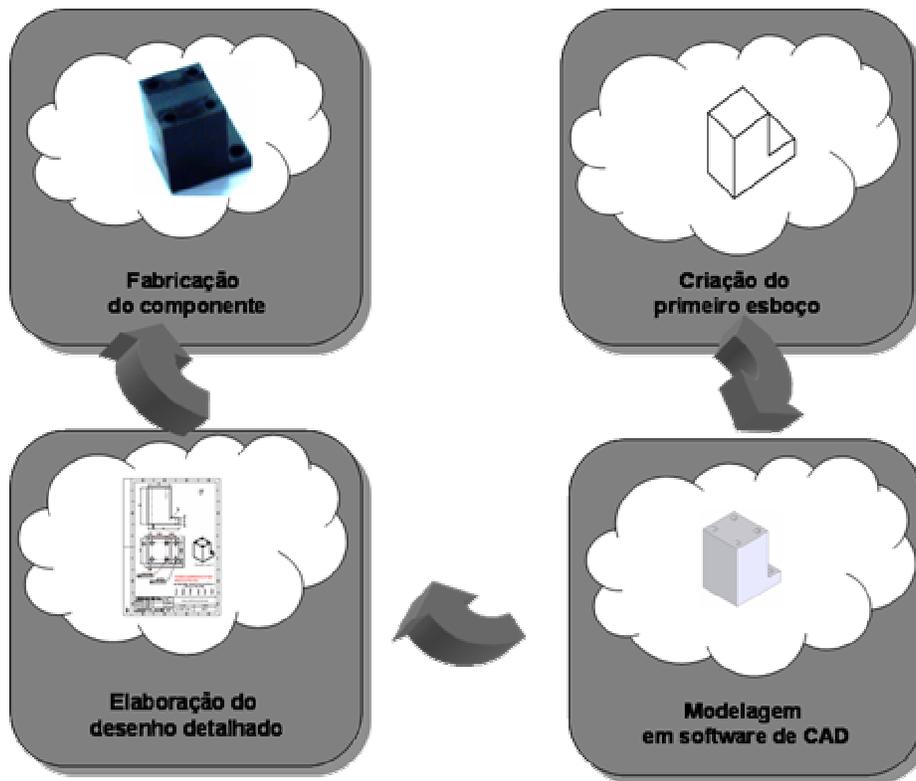


Figura 3.13: Características da etapa destinada à fabricação de componentes de mecânica de precisão.

Os sistemas de CAD (Computer Aided Design) têm um papel importantíssimo durante a fase de fabricação. Com esse respeito, A. F. Souza *et al* afirmam [22]: Os sistemas de CAD atuais não se restringem apenas à geração e manipulação de desenhos em duas dimensões. Este recurso é considerado somente uma funcionalidade desses sistemas e representa apenas uma pequena parcela dos possíveis benefícios a serem obtidos com a utilização dessa tecnologia. Hoje, um software CAD, representa, uma potente e indispensável ferramenta para a indústria moderna, permitindo, além da geração de desenhos 2D:

- modelar produtos tridimensionais com formas complexas;
- realizar análise de forma geométrica para auxiliar a manufatura;
- definir volume e centro de massa do produto;

- comunicação com outros softwares, através de interfaces padronizadas.

### 3.6.1. Controle da qualidade dimensional

Peças ou máquinas, enquanto elementos de projeto, são corpos perfeitos, livres de quaisquer espécies de erro. No entanto, após sua fabricação sua geometria fica ligeiramente diferente da que foi inicialmente imaginada. A Figura 3.14 ilustra as afirmações das linhas anteriores.

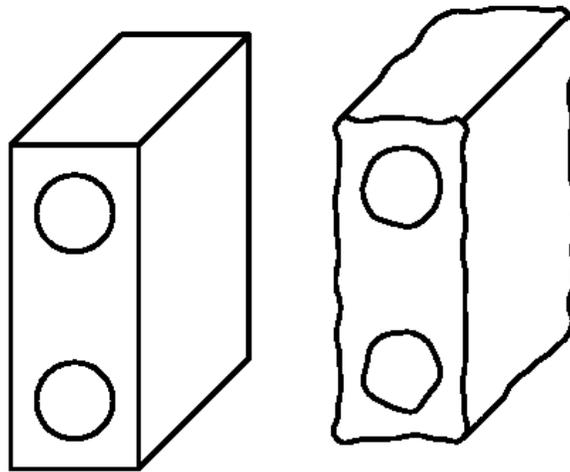


Figura 3.14: Geometria real comparada à geometria ideal de uma peça mecânica (adaptado)

[23].

Desconsiderando os erros de fabricação, o produto pode ser aceito se seus erros (geométricos, dimensionais ou micro geométricos) são controlados. Há um conjunto de requisitos, denominados GPS (*Geometrical Product Specification*), que busca gerenciar tais erros no sentido de colocá-los em limites aceitáveis. Inseridos no GPS existem requisitos para tolerâncias dimensionais, tolerâncias geométricas e tolerâncias de superfície e textura [24] [25].

Nessa direção, o autor que subscreve conjetura importante atentar para os seguintes pontos:

- os desenhos são a base para o controle da qualidade dimensional das peças;

- as tolerâncias devem ser estabelecidas de modo a serem evitados conflitos entre as interfaces: *Projeto/Manufatura e Projeto/Metrologia*;
- as tolerâncias geométricas e dimensionais devem condicionar as características geométricas e dimensionais que implicam em maiores erros e incertezas.

Na Figura 3.156 é mostrado o destaque de um desenho técnico no qual foram especificadas tolerâncias dimensionais e geométricas.

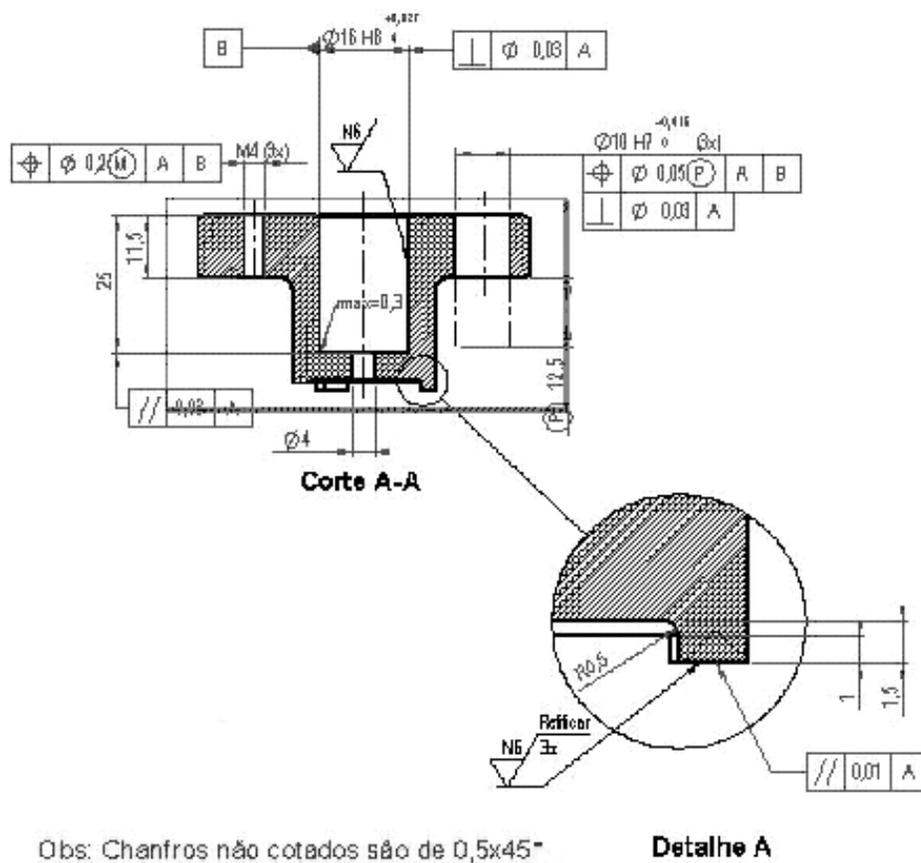


Figura 3.15: Destaque de um desenho técnico.

### 3.6.2. Qualificação

Na penúltima etapa do método proposto, recomenda-se a execução de uma qualificação funcional do sistema de medição. Milton Wetzel Pereira [1] propõe que na qualificação deve-se avaliar:

- desvios dimensionais e de forma das tolerâncias exigidas pelo projeto e montagem;
- funcionalidade do sistema de posicionamento e fixação das peças, guias, mancais, posicionamento e fixação de transdutores;
- deficiências na operação do dispositivo.

É recomendável que a qualificação seja feita por intermédio de ensaios funcionais devidamente documentados. Vicente Machado Neto, em sua tese intitulada Metodologia para Garantia da Confiabilidade no Desenvolvimento de Produtos Mecatrônicos [26] enumera alguns aspectos básicos que devem ser observados no que chama de “ensaios funcionais” aplicáveis perfeitamente ao presente item. Alguns desses aspectos estão listados abaixo.

- Verificar o correto funcionamento e corrigir as falhas de projeto;
- Verificar a interação do usuário final com o produto;
- Verificar o funcionamento após a produção;
- Verificar o funcionamento do produto com os diversos tipos de ruídos não ambientais.

O autor também sugere a criação de um procedimento de ensaios contendo:

- características do produto a ser ensaiado, versão do projeto e tipos de soluções utilizadas (versão do software);
- as principais dúvidas quanto ao desempenho do produto;
- as metas do ensaio, quais os objetivos;
- operador(es);
- variáveis importantes a serem monitoradas;

- condições ambientais;
- regime de operação;
- duração do ensaio;
- custos;
- responsável pelas análises das falhas.

### **3.6.3. Avaliação metrológica final**

O VIM (Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia) [4] define procedimento de medição como sendo o conjunto de operações, descritas especificamente, usadas na execução de medições particulares, de acordo com um dado método.

Um sistema de medição adequado é aquele cuja incerteza da medição levantada é menor ou igual que a incerteza alvo [14]. Entretanto, se a incerteza de medição estimada for muito menor que a sua correspondente incerteza alvo, é provável que o sistema de medição não esteja economicamente compatível com as demandas do problema de medição. Na avaliação metrológica definitiva, cujo fluxograma está apresentado na Figura 3.16, é estimada a incerteza de medição associada ao processo no qual o dispositivo está inserido. Em seqüência tal incerteza é comparada com incerteza de medição alvo.

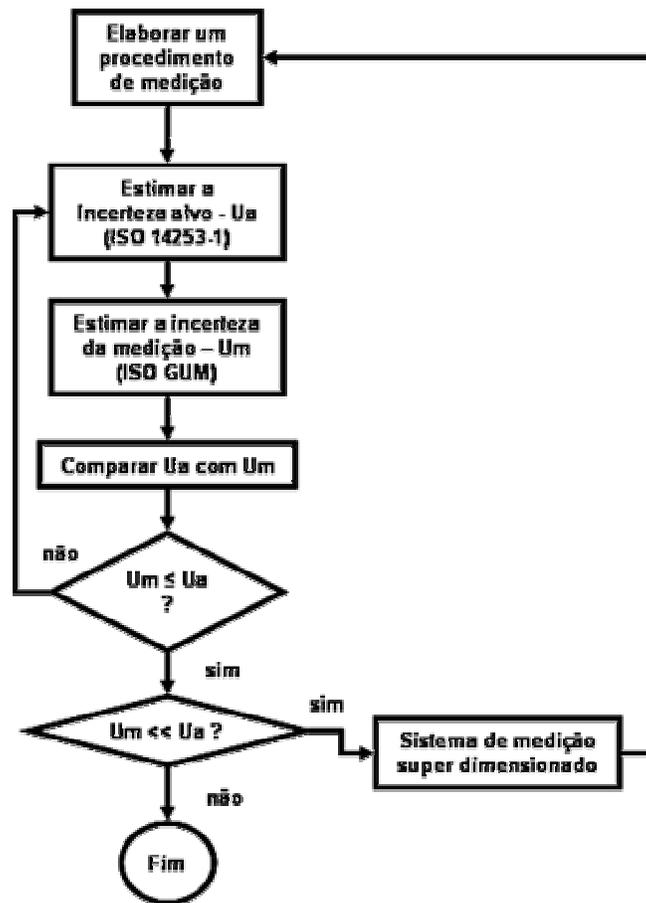


Figura 3.16: Seqüência de ações para a avaliação metrológica final (adaptado) [14].

Na norma ISO 14253-1 há recomendações para a incerteza alvo, na melhor das hipóteses igual a 1/10 (um décimo) da tolerância especificada para a característica de interesse. Tal sugestão se baseia em estudos que levam em conta o custo de aquisição do instrumento de medição e o custo relacionado à fabricação do componente cuja característica será medida. Pode-se perceber através da Figura 3.17 que a relação entre incerteza de medição e intervalo de tolerância apresenta seu valor ótimo próximo a 10%, daí a utilização da regra de um para dez. É correto afirmar que tal recomendação não é absoluta. Caminhando nessa direção há aceitações para uma relação incerteza/intervalo de tolerância de até um para três. Obviamente sendo esse um valor crítico, somente adotado em situações onde se conhecem os problema que tal escolha pode desencadear.

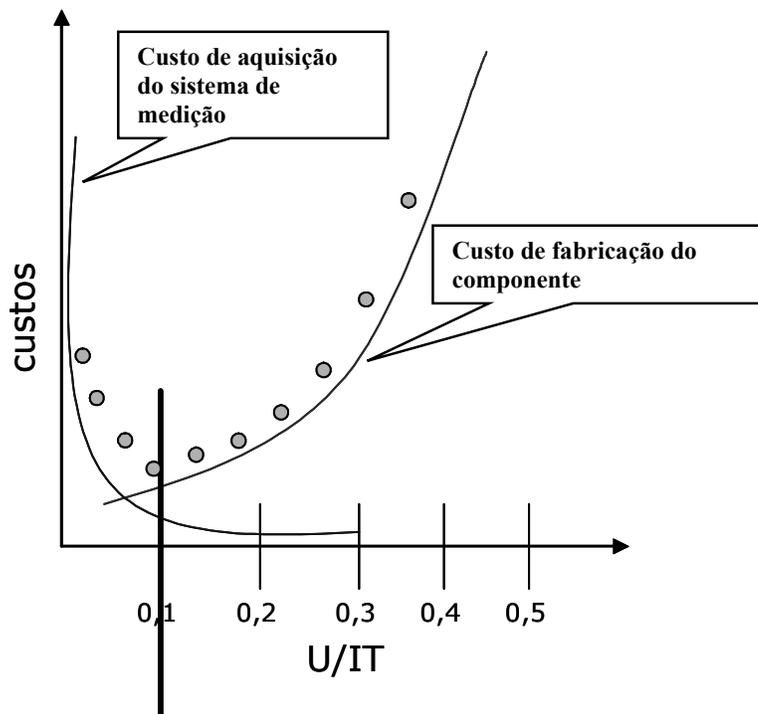


Figura 3.17: Recomendação sobre a incerteza alvo (adaptado) [23].

É importante ainda lembrar que o trabalho de validação deve ser referenciado nas normas e recomendações vigentes [7][14][15].

### 3.7 Elaboração de documentação para garantia da qualidade em processos de medição

Em seu livro sobre controle da qualidade, Juran [27] afirma:

“O termo garantia é utilizado aqui no sentido restrito de estabelecer confiança no cumprimento, pela empresa, da missão da qualidade. Os gerentes das empresas asseguravam essa garantia por meio do contato pessoal tal como um exame pessoal dos produtos e dos processos. À medida que as empresas cresceram, esse contato pessoal foi delegado a supervisores intermediários e a inspetores, privando, dessa forma, os gerentes de níveis hierárquicos mais elevados da garantia através da observação pessoal.

Durante muitos anos, a administração superior obtinha essa garantia por meio da confiança nesses supervisores e inspetores, porém sem criar um substituto para a anterior garantia independente (por meio da observação pessoal). Entretanto, ficava cada vez mais evidente que era essencial algum tipo de garantia independente, de modo que teve início uma pesquisa para descobrir novas formas para essa garantia. Uma dessas formas, largamente empregada atualmente, requer a preparação prévia de planos detalhados da qualidade, análise e auditorias, para estabelecer se os planos estão (1) adequados e (2) sendo seguidos”. A estrutura organizacional utilizada é mostrada a seguir (Tabela 3.1):

Atividades	Departamentos da qualidade		
	Departamento de linha	Planejamento da qualidade	Garantia da qualidade
Preparar os planos da qualidade	■	■	
Executar os planos	■		
Auditar para determinar se execução está de acordo com os planos			■

Tabela 3.1: Estrutura organizacional para garantia da qualidade utilizando planos da qualidade.

Juran [27] ainda denota que:

“O uso desse plano de delegação assegura aos departamentos de linha o comando pleno de seu pessoal, ao mesmo tempo em que proporciona análises independentes dos planos e da execução”.

O conceito de garantia da qualidade através do atendimento às instruções estabelecidas em planos e/ou documentos é semelhantemente aplicado na garantia da qualidade de processos de medição. O autor do presente trabalho entende que a elaboração de tais documentos é essencial ao correto emprego de sistemas de medição. Nos itens que

seguem, são apontadas sugestões para preparação de procedimentos de medição e calibração.

### **3.7.1 Procedimento de medição**

Um procedimento de medição deve conter informações que orientem o operador na execução de sua tarefa de medição. Na sua elaboração alguns aspectos devem ser observados;

- **Redação:** O redator deve focalizar os objetivos no usuário do procedimento, quanto à leitura, clareza, compreensão do texto, objetividade, simplicidade, e conclusão. Todas as informações fornecidas devem ser utilizadas, as frases devem ser curtas e simples e a pontuação de acordo com as concordâncias da língua portuguesa.
  
- **Formato:** O procedimento deve ter um formato padronizado (por exemplo, conforme o modelo seguinte, Figura 3.18. [28])

<b>Procedimento de Medição</b>		<b>PM - 000</b>	

Emitido por:	Aprovado por:	Data	Revisão

**Sumário**

1. Objetivo
2. Aplicação
3. Documentos de referência
4. Terminologia
5. Equipamentos e materiais
6. Condições Ambientais
7. Precauções e preparação
8. Método
9. Registros
10. Determinação e análise dos resultados
11. Incerteza de medição
12. Apresentação dos resultados
13. Anexos

Figura 3.18: Exemplo de folha de rosto de um procedimento de medição (adaptado) [28].

Em se tratando de sistemas de medição automáticos, esses documentos devem possuir adicionalmente instruções claras para a correta utilização do software de automação da medição e dos sistemas de controle (eg. CLP's e unidades de condicionamento). Analogamente devem existir mecanismos de proteção (Poka Yokes) para evitar incoerências quanto à utilização do DM.

### **3.7.2. Relatórios de calibração**

Quanto à elaboração dos relatórios de calibração valem as observações feitas para elaboração de procedimentos de medição. No entanto, algumas definições, no sentido de diferenciar os dois termos, devem ser feitas de antemão.

#### **3.7.2.1 Calibração**

Segundo o VIM [4]:

Calibração é um procedimento experimental através do qual são estabelecidas, sob condições específicas, as relações entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões. O resultado da calibração geralmente é registrado em um documento específico denominado certificado de calibração ou, algumas vezes, referido como relatório de calibração. O certificado de calibração apresenta várias informações acerca do desempenho metrológico do sistema de medição analisado e descreve claramente os procedimentos realizados. Frequentemente, como seu principal resultado, apresenta uma tabela, ou gráfico, contendo, para cada ponto medido ao longo da faixa de medição: a) estimativas da correção a ser aplicada e b) estimativa da incerteza associada à correção. Em função dos resultados obtidos, o desempenho do DM pode ser comparado com aquele constante nas especificações de uma norma técnica, ou outras determinações legais, e um parecer de conformidade.

É prática comum apresentar como resultado da calibração um gráfico contendo os erros associados ao longo da faixa de medição do sistema de medição. Na Figura 3.19 ilustra-se um exemplo de curva de erros obtida da calibração de um balança comercial.

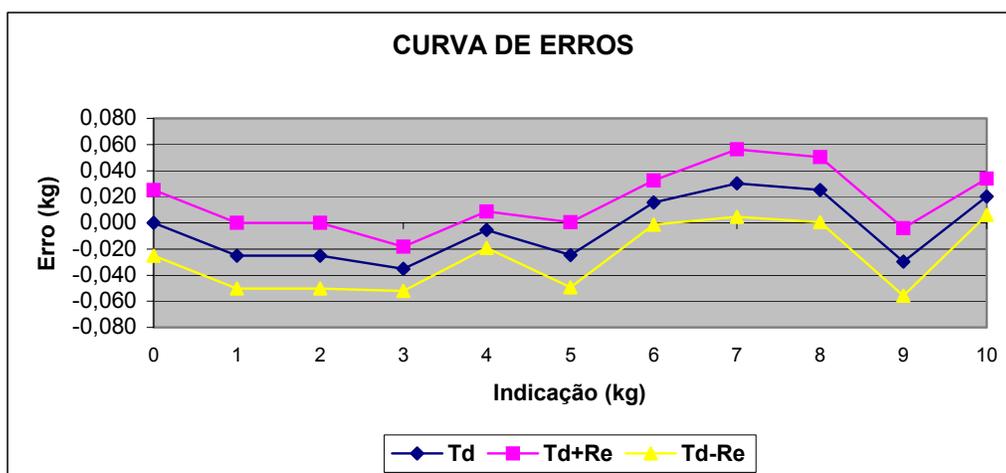


Figura 3.19: Curva de erros obtida da calibração de uma balança comercial.

No atual capítulo a sistemática proposta foi apresentada e discutida, segundo o seu ponto de vista teórico. Neste sentido foram apresentados, quando conveniente, exemplos genéricos a fim de que o leitor se localizasse no contexto abordado. No capítulo seguinte será apresentado um estudo de caso, onde, através da aplicação prática do método, um dispositivo de medição automático foi projetado e desenvolvido.

# CAPÍTULO 4

---

## Estudo de Caso - Aplicação do Método no Projeto e Desenvolvimento de um Sistema de Medição para Arrastes de Impulsores de Partida

Em seqüência à apresentação conceitual do método, se faz necessária uma comprovação de sua efetividade. No presente capítulo, introduz-se um estudo de caso onde o método foi aplicado na solução de um problema de inspeção para a empresa Irmãos Zen S.A., parceira do curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Inicialmente far-se-á uma breve explanação do assunto, onde serão mostradas as características gerais do problema, em seguida apresentar-se-ão os resultados obtidos da aplicação do método propriamente dito.

### **4.1 Características gerais do problema**

O impulsor de partida é um componente que pertence a um conjunto eletromecânico denominado motor de partida ou motor de arranque. Como seu próprio nome já diz, esse último dispositivo é encarregado de dar partida no motor de combustão interna, seja este aplicado em veículos ou na indústria na forma de motor estacionário. O impulsor de partida possui a finalidade específica de transmitir potência (movimento) do motor de partida para o motor térmico, permitindo a desvinculação de ambos os sistemas quando o motor térmico atinge uma determinada velocidade de rotação [30] [31]. Na Figura 4.1 pode-se observar um impulsor de partida montado, com seus componentes principais assinalados, a saber: arraste, pinhão e chapa de proteção.

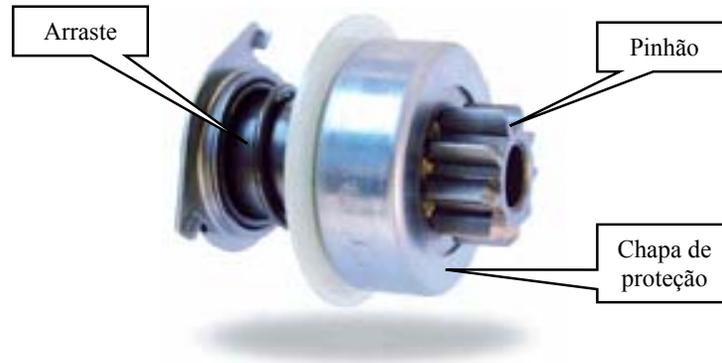


Figura 4.1: Impulsor de partida de um motor de arranque.

O impulsor de partida materializa o princípio da roda livre. Para isso, a peça conhecida como “arraste” possui vários setores de hélice interna (tipicamente 5 ou 6), em cada um dos quais fica alojado um rolete cilíndrico (Figura 4.2). No interior do conjunto arraste-roletes, e em contato com estes últimos, insere-se a pista cilíndrica do pinhão. A transmissão se produz quando o arraste gira num sentido tal que os roletes se vêm forçados a avançar no espaço progressivamente menor definido pelos setores de hélice. Ficam então acunhados entre o arraste e a pista do pinhão, transformando estes dois últimos numa peça única e transmitindo a potência sem deslizamento. A liberação se produz quando o pinhão, acionado pelo motor de combustão interna, gira mais rápido do que o arraste, fazendo com que os roletes se desloquem para regiões dos setores de hélice onde ficam folgados, perdendo contato com a pista do pinhão.

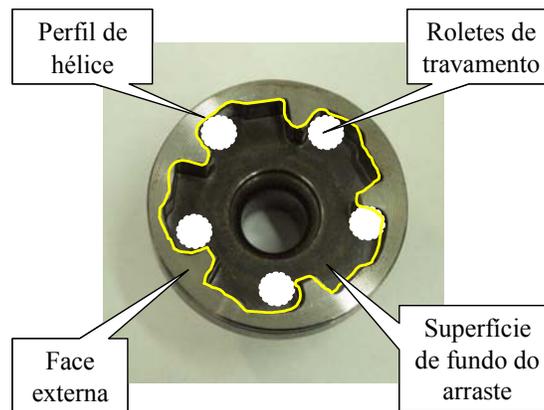


Figura 4.2: Arraste – Peça objeto do estudo de caso.

Existem múltiplos requisitos geométricos para assegurar o eficaz funcionamento da roda livre. Um deles, típico da construção mostrada na Figura 4.1, é que os roletes devem possuir ainda folga axial quando a chapa de proteção é montada no arraste. Sem essa folga, seu movimento seria restringido, ocasionando um problema funcional. Na Figura 4.2 ilustra-se um modelo de arraste, onde estão indicados: a superfície de fundo do arraste, a face externa, os setores de hélice e os roletes de deslizamento.

O presente trabalho possui foco em evitar o problema funcional que pode surgir quando a distância entre a superfície de fundo e o plano definido pela face externa do arraste (que determina a posição da chapa de proteção) não atende as especificações geométricas.

A família de arrastes objeto deste trabalho, é usinada segundo a seqüência a seguir (Figura 4.3):

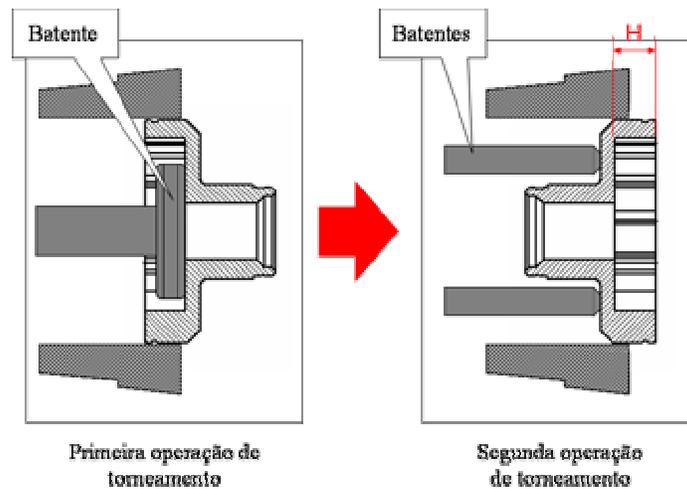


Figura 4.3: Usinagem das faces que definem a altura dos arrastes

Pode-se observar que a altura de interesse depende de duas operações sucessivas de faceamento em torno CNC, não existindo garantia do paralelismo entre a superfície do fundo e a superfície da face externa. Considerando essa situação, definiram-se valores máximos e mínimos para a altura real  $H$  mostrada na Figura 4.3 (i.e. altura medida) e caracterizou-se a conformidade com a especificação quando:

Equação 4.1: 
$$H_{\max} \leq LSE \text{ e } H_{\min} \geq LIE$$

De forma análoga, a caracterizou-se não-conformidade quando:

Equação 4.2: 
$$H_{\max} > LSE \text{ e/ou } H_{\min} < LIE.$$

Deficiências em atender a especificação de engenharia dos arrastes motivaram a exigência, por parte do cliente destinatário, em inspecionar 100% das peças fabricadas. Embora a inspeção 100% vise garantir, em sentido forte, a conformidade do produto, ela se torna onerosa e pouco confiável enquanto são utilizados sistemas de inspeção manuais. Assim, a Irmãos Zen S.A. encomendou ao PósMCI o projeto de um sistema de medição detentor das seguintes características preliminares.

- **Automático**, com intenção de eliminar a necessidade de um operador exclusivo para efetuar as medições;

- **Portátil**, no sentido de facilitar o seu transporte em uma eventual mudança de layout da planta;
- **Alta velocidade de inspeção**, com o objetivo de reduzir os tempos demandados pela inspeção;
- **Intercambiável**, com a finalidade de poder usar o sistema de medição em outros processos de usinagem semelhantes;
- **Adaptável**, permitindo a inspeção de peças pertencentes à mesma família, mas com dimensões diferenciadas;
- **Pós-processo**: significando que o sistema de medição não é incorporado ao processo de fabricação.

A partir deste ponto será relatada a aplicação do método proposto no capítulo 3 ao desenvolvimento do sistema de inspeção descrito acima. Para tanto, serão apresentados os resultados relativos à aplicação de cada uma de suas fases e correspondentes etapas durante o projeto do sistema de inspeção em questão.

## **4.2. Identificação das necessidades dos clientes**

Conforme indicado no esquema geral do método, no passo inicial da presente fase foi necessário definir o escopo do trabalho. Na Tabela 4.1 é apresentado o documento denominado declaração de missão, gerado a partir dessa definição.

<b>Descrição do Produto</b>	Sistema de medição automático para medição da altura do perfil de arrastes de motores de partida
<b>Objetivos de Negócios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lançamento em 2003</li> <li>• Redução de 80% no tempo de inspeção (<math>\leq 10</math> segundos por peça)</li> <li>• Redução de 20% no tempo de usinagem</li> </ul>
<b>Cliente Primário</b>	Gerência de Produção
<b>Suposições</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automático</li> <li>• Portátil</li> <li>• Pós-processo</li> <li>• Intercambiável</li> <li>• Alta velocidade de resposta</li> <li>• Nível de incerteza adequado</li> </ul>
<b>Stakeholders</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produção <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Operador CNC</li> <li>○ Supervisores de produção</li> <li>○ Técnicos de processo</li> </ul> </li> <li>• Qualidade <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Técnicos metrologistas</li> <li>○ Técnicos em instrumentação</li> <li>○ Técnicos Analistas (CEP)</li> </ul> </li> <li>• Manutenção <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Suporte (dispositivos de apoio)</li> </ul> </li> <li>• Finanças <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Analista de custos da empresa</li> </ul> </li> <li>• Terceiros <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Responsáveis pela calibração</li> <li>○ Fabricante do dispositivo</li> </ul> </li> <li>• Projeto <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Especialistas em metrologia</li> <li>○ Especialista em CAD</li> <li>○ Especialista em softwares para automação da medição</li> </ul> </li> </ul>

Tabela 4.1: Declaração de missão do dispositivo de medição da altura do arraste.

Na tarefa subsequente as atenções foram voltadas para a coleta de informações junto aos clientes e *stakeholders*. No sentido de guiar as entrevistas, e considerando o tipo de informação que cada um dos entrevistados poderia fornecer, criaram-se questionários direcionados. Como amostra, na Tabela 4.2 pode-se observar o questionário para os Técnicos Analistas da Qualidade:

<b>Técnicos Analistas da Qualidade</b>
1. Considera interessante que o dispositivo forneça informação para construir cartas de controle? Quais cartas?
2. Quais os valores extremos dos desvios achados em arrastes?
3. Existem defeitos que pudessem comprometer a integridade de um dispositivo automático? Caso afirmativo, quais são e qual a frequência com que esses defeitos acontecem.

Tabela 4.2: Questionário (para técnicos analistas) guia para as entrevistas.

A execução das entrevistas permitiu perceber o amplo leque de exigências a que está submetido um dispositivo de inspeção. Muitas delas, especialmente as não metrológicas, podem passar facilmente despercebidas para um especialista em metrologia que não esteja em contato direto com o processo de fabricação. Por outro lado, percebeu-se que nenhum dos entrevistados foi capaz de expressar as necessidades de performance metrológica de forma clara. O autor considera que esta situação não é própria da empresa, senão uma consequência da separação de funções existentes em todas as empresas de produção. Assim, a obtenção de soluções adequadas para problemas de inspeção somente pode ser viabilizada através do contato direto entre os clientes e *stakeholders* e o especialista em metrologia encarregado de dar solução ao problema. Dado que a lista de clientes e *stakeholders* da Tabela 4.1 é comum à maioria dos dispositivos de inspeção de aplicação industrial, os questionários realizados podem se constituir numa guia idônea para o desenvolvimento de outros dispositivos de inspeção de geometrias. Por essa razão, eles foram incluídos nesta dissertação, no Anexo A, em versão completa.

Como recomenda o método, a partir das respostas dos entrevistados foi criada a lista de necessidades interpretadas. Na Tabela 4.3 é apresentada a parte dessa lista correspondente às respostas do Técnico Analista de Produção:

Entrevistado: Técnico Analista Entrevistador: Paulo Moura Data/hora: 26/02/03 - 13:41		
Questão	Declaração do Cliente	Necessidade Interpretada
1.	Sim, pois o cliente exige carta de controle. Pode ser aplicada carta de média e amplitude, com frequência de 50 peças.	O dispositivo fornece informação para construir cartas de controle de média e amplitude.
2.	Não existe histórico dos valores extremos dos desvios encontrados em arrastes. Porém, os responsáveis pela inspeção final enviam um relatório notificando as não-conformidades. Seria interessante se o dispositivo gerasse um diário de bordo automático com a relação das não-conformidades.	O dispositivo gera relatórios de não-conformidades (diário de bordo automatizado).
3.	Não existe histórico de problemas físicos com relação a dispositivos de medição. É necessário porém, atentar para a parte elétrica e eletrônica do dispositivo a ser projetado (chão de fábrica, ambiente hostil).	O dispositivo é elétrica e eletronicamente seguro (blindagem, aterramento, compatibilidade eletromagnética).

Tabela 4.3: Declarações do Técnico Analista de Produção e necessidades interpretadas.

Após as etapas de estabelecimento de importância e hierarquização, a lista de necessidades dos clientes possuiu sua formatação final. Essa lista pode ser consultada na Tabela 4.4, onde na última coluna está assinalada a importância designada para cada métrica. Observa-se que as necessidades podem ser classificadas em categorias tais como “confiabilidade metrológica”, “funcionalidade”, “ergonomia”, “manutenção”, “fabricação” e “economia/custos”. Uma solução que satisfaça todas as necessidades na lista, com certeza satisfará aos clientes e *stakeholders*.

Necessidades Interpretadas		
1	O dispositivo possui propriedades metrológicas adequadas	5
2	O dispositivo é geometricamente compatível com os tipos de peças a serem medidas.	5
3	O dispositivo é sensível às variações da peça	5
4	O dispositivo é robusto à variação de temperatura	5
5	As medidas feitas com o dispositivo são rastreáveis	5
6	O dispositivo classifica as peças de forma confiável	5
7	O dispositivo fornece informação adequada para <i>setup</i> do processo de torneamento.	4
8	O dispositivo fornece informação para construir cartas de controle de média e amplitude.	4
9	O dispositivo é robusto às variações ambientais (vibrações, ruídos elétricos, umidade, poeira, agentes corrosivos...).	5
10	O dispositivo inspeciona a peça após a segunda operação de torneamento.	5
11	O dispositivo garante a uniformidade e integridade das peças a serem inspecionadas.	5
12	O dispositivo é ergonômico.	4
13	O tempo de medição é adequado ao ciclo de produção.	4
14	O dispositivo opera com distintos tornos CNC.	3
15	As dimensões do dispositivo atendem aos requisitos do novo layout dos tornos CNC.	4
16	O dispositivo é transportável.	4
17	O dispositivo possui sistema de limpeza de peças automático	2
18	O dispositivo é elétrica e eletronicamente seguro (blindagem, aterramento, compatibilidade eletromagnética).	5
19	O dispositivo possui alimentação automática.	2
20	O dispositivo possui rápido <i>setup</i> (adequação à peça a ser inspecionada).	4
21	O dispositivo expulsa a peça automaticamente e separa as não-conformes	3
22	O dispositivo avisa da aparição de peça não-conformes	5
23	O dispositivo é simples e de fácil manutenção e operação.	4
24	O dispositivo possui <i>preset</i> (zeramento) automático.	3
25	O dispositivo gera relatórios de n.c. (diário de bordo automático).	3
26	O dispositivo terá comunicação com o CNC.	2
27	O dispositivo não possui componentes com dimensões reduzidas em grandes quantidades.	2
28	Os materiais utilizados estão em acordo com as normas específicas.	5
29	O dispositivo está construído com peças intercambiáveis.	5
30	Os componentes são recomendados pelo fabricante do dispositivo.	5
31	As documentações (manuais, procedimentos, desenhos, certificados) acompanham o dispositivo.	5
32	O projeto dimensional básico do dispositivo estará pronto até o dia 20 de março de 2003.	
33	O dispositivo possui uma relação custo/benefício satisfatória.	5
<p>Legenda:</p> <p>Importância 5 – Característica crítica</p> <p>Importância 4 – Característica altamente desejável</p> <p>Importância 3 – Característica desejável</p> <p>Importância 2 – Característica dispensável</p>		

Tabela 4.4: Lista final das necessidades dos clientes.

## 4.3 Desenvolvimento do conceito

### 4.3.1 Caracterização do mensurando

A especificação do cliente limita o erro de planeza do fundo do arraste e estabelece uma tolerância de ( $\pm 0,10$  ou  $\pm 0,15$ ) mm, dependendo do modelo de peça, para a distância entre a superfície do fundo do arraste e a definida pela face externa. Como já foi antecipado, devido à soma dos efeitos do erro de planeza da superfície do fundo do arraste e do erro de paralelismo entre esta e a superfície da face externa, a distância de interesse pode apresentar valores distintos na região de trabalho de cada rolete, na mesma peça real. Considerando ainda a natureza bilateral da especificação, a conformidade com a especificação implica na comparação dos valores extremos dessa distância com os limites de tolerância, como já expressado nas equações 4.1 e 4.2. Por esta razão decidiu-se definir dois mensurandos, um correspondente ao valor máximo da distância e outro ao valor mínimo. Assim, para o valor máximo, tem-se:

*Distância máxima  $H_{\max}$  entre a superfície real do fundo do arraste e o plano definido pela face externa, medida na direção perpendicular a um plano ajustado por mínimos quadrados ao fundo real, na região de trabalho dos roletes, a 20°C.*

A definição do mensurando para o valor mínimo da distância,  $H_{\min}$ , decorre da anterior. Esses mensurandos deverão ser realizados pelo dispositivo de medição a projetar, sendo que qualquer desvio com referência à condição ideal gerará contribuições à incerteza de medição.

A geração de dados que pudessem descrever o comportamento do processo foi realizada com auxílio do dispositivo para medição da altura do arraste previamente utilizado no chão de fábrica (Figura 4.4). Porém, antes de proceder à avaliação, entendeu-se que era necessário analisar o próprio dispositivo, uma vez que a consistência dos resultados das medições estava diretamente ligada às suas propriedades metrológicas.

Neste dispositivo, cada peça é colocada sobre um fuso giratório, garantindo-se o contato entre a face do arraste e o plano de apoio do fuso por meio de um contrapeso *ad hoc*. Girando o conjunto fuso-peça-contrapeso manualmente, um transdutor indutivo que apalpa na superfície do fundo do arraste permite determinar os valores extremos da altura do arraste numa coluna eletrônica.

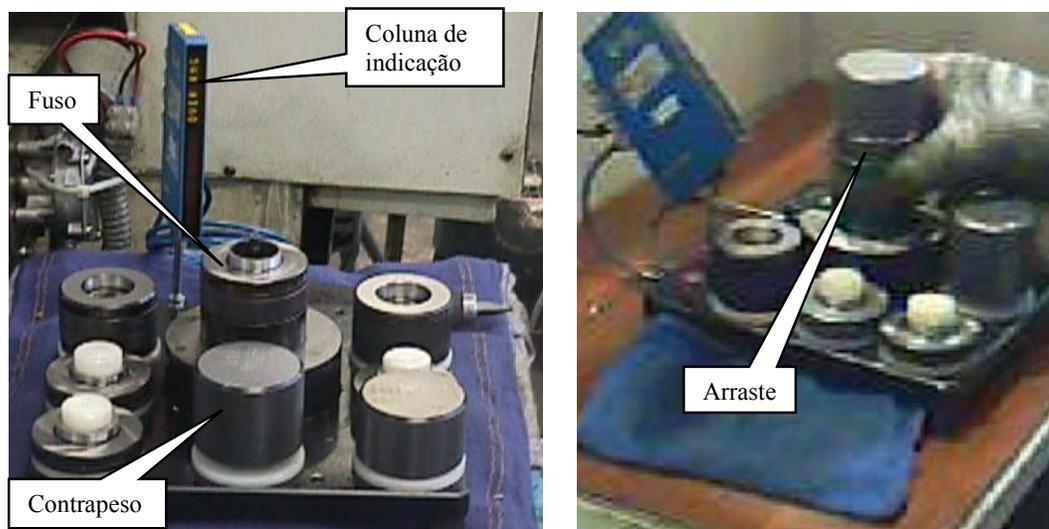


Figura 4.4: Dispositivo de medição previamente utilizado pela empresa.

Os valores fornecidos pelo dispositivo não são consistentes com a definição dos mensurandos  $H_{\max}$  e  $H_{\min}$  por diversas razões.

- A referência é feita através da superfície perpendicular ao fuso em que se apóia a face externa, medindo-se a altura na direção perpendicular a essa superfície e não na direção perpendicular ao fundo.
- O apalpador do transdutor indutivo faz contato com a superfície do fundo do arraste num diâmetro menor ao definido pelos centros dos roletes, produzindo-se assim uma provável subestimação da diferença entre  $H_{\max}$  e  $H_{\min}$ .

Apesar destas divergências, considerou-se que o dispositivo da Figura 4.4 era uma forma econômica de gerar dados orientativos sobre o processo produtivo.

Para conhecer as propriedades estatísticas das medições feitas com esse dispositivo, foi realizada uma análise de repetitividade e reprodutibilidade segundo o método proposto no manual de Análise do Sistema de Medição (MSA) [7]. O dispositivo mostrou-se marginalmente capaz quando o valor de GRR% é calculado com referência a dispersão do processo e capaz quando o valor do GRR% é calculado com referência à tolerância. Assim, pôde-se entrar em consenso quanto à utilização do dispositivo existente para fornecer dados que permitam a caracterização do comportamento estatístico do processo de fabricação.

O estudo das variações do processo produtivo foi realizado à saída da segunda operação de torneamento, usando um gráfico de controle de três vias, que permite separar a variação dentro da peça da variação entre peças (na Figura 4.5 pode-se observar um dos gráficos obtidos). O uso dos gráficos não foi limitado à avaliação passiva da variação presente no processo. Uma criteriosa análise permitiu enumerar as principais fontes causadoras de variação dentro de uma mesma peça bem como as causas que levam a variações entre diferentes peças. Constatou-se que:

- A variação da altura dentro da peça, associada ao erro de paralelismo entre a face externa e o plano de referência, se mantém razoavelmente sob controle, mas é uma parte expressiva da variação total do processo. Esse erro de paralelismo é o resultado do acúmulo de variações da primeira e segunda operação de torneamento, presumivelmente causadas pelo apoio inseguro da peça nos batentes durante a alimentação e sujeição.
- O gráfico de médias apresenta uma variação estrutural tipo dente de serra, de período não constante (ver linhas vermelhas superpostas). Apesar disso, a variação da altura média entre peças é baixa e bem menor que a tolerância que nesse caso é  $\pm 0,1$  mm.
- O gráfico de amplitudes móveis apresenta pontos fora de controle periódicos, temporalmente relacionados com o padrão de variação estrutural das médias.

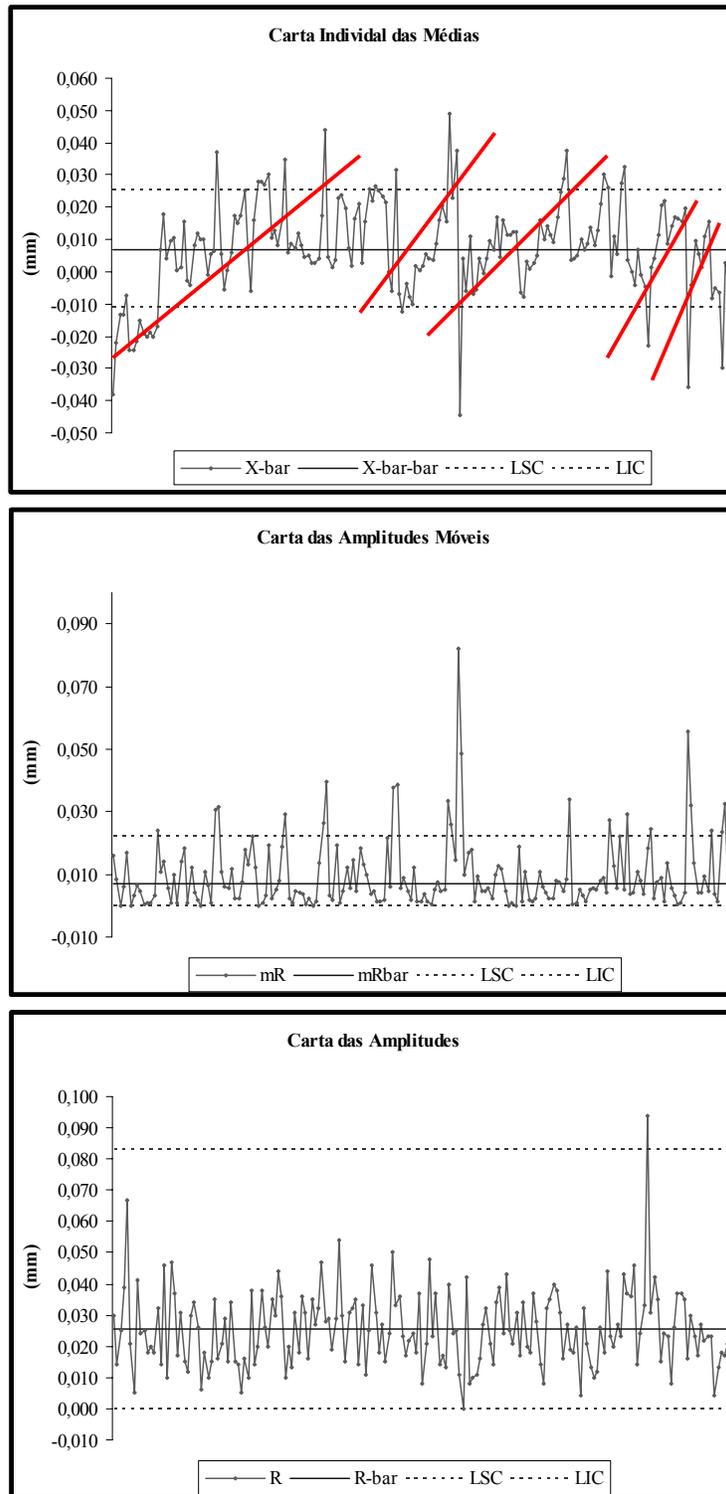


Figura 4.5: Extrato de uma carta de três vias - diagnóstico do processo de fabricação.

Por intermédio do cruzamento de informações com o diário de bordo, constatou-se que os sinais de fora de controle no gráfico das médias aconteciam próximos ao horário em que ocorrera a troca do inserto da ferramenta de corte. Assim, as linhas vermelhas representam a tendência da média associada ao desgaste de ferramenta. Dado que o número de unidades entre amostra é constante (50 unidades), pode-se inferir que o tempo de duração de um inserto apresenta grande variação (comparando-se o tempo de duração do primeiro inserto com o do último). A redução dessa variação pode ser um objetivo de melhoria contínua que, se alcançado, resultará na redução da variação total. No entanto, a análise descartou a possibilidade de que este fenômeno fosse o causador das não-conformidades que motivaram a exigência de inspeção 100%, já que estas se produziam em instantes aleatórios, sem relação com a troca do inserto.

Adicionalmente, construiu-se um gráfico dos tempos entre as falhas ocorridas no intervalo do estudo, podendo-se constatar que o tempo médio entre falhas é de aproximadamente 22 minutos. Partindo-se do pressuposto de que são fabricados em média 4 arrastes a cada minuto, chega-se a uma taxa de 1 peça não-conforme a cada total de 88 peças. Cabe destacar que os pontos fora de controle caracterizando tempo entre falhas excepcionalmente altos correspondem a instâncias de manutenção ou *setup*, não sendo, portanto, indicativos de momentos “particularmente bons” do processo.

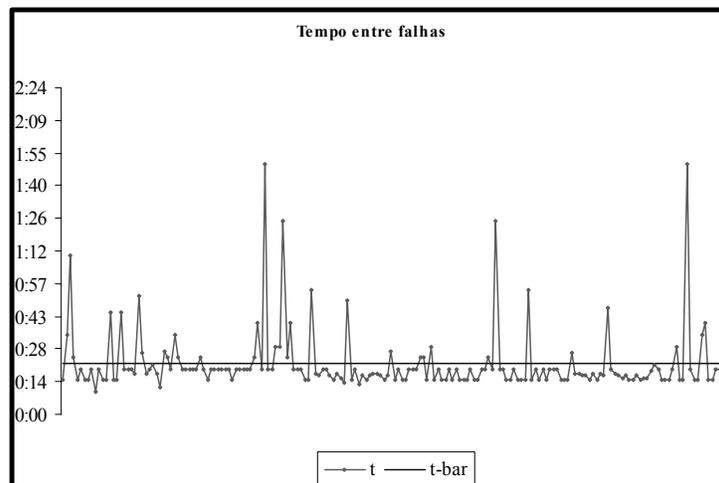


Figura 4.6: Tempo entre falhas presentes na fabricação dos arrastes.

Os resultados da caracterização do mensurando podem ser resumidos na seguinte frase: trata-se de um processo altamente capaz, com não-conformidades esporádicas associadas à ação de causas especiais que não podem ser controladas por melhoria do processo sem prejuízo do tempo de usinagem. Essas não-conformidades se devem principalmente a aumentos atípicos do erro de paralelismo entre o fundo do arraste e a face externa, e não a uma variação da altura média dos arrastes. Conseqüentemente, faz sentido aumentar a eficiência da inspeção 100% desenvolvendo um dispositivo automático que seja capaz de avaliar as alturas  $H_{\max}$  e  $H_{\min}$ .

Adicionalmente, do estudo estatístico da Figura 4.5 obtiveram-se os parâmetros característicos do processo, a seguir:

<b>Desvio padrão das alturas médias</b>	0,007 mm
<b>Valor médio do erro de paralelismo (<math>H_{\max} - H_{\min}</math>)</b>	0,026 mm

Tabela 4.5: Valores característicos do processo de fabricação dos arrastes.

Embora a evidência coletada neste estudo seja limitada e não descreva o comportamento do processo para todos os modelos de arraste que o dispositivo deve inspecionar, ela é suficiente para balizar o projeto.

#### 4.3.2 Geração das especificações metrológicas

As atividades da presente etapa se resumiram em criar a chamada matriz “métricas versus necessidades” e em seguida estabelecer valores para as métricas gerando as especificações técnicas para o desenvolvimento do dispositivo de medição. Nas páginas subseqüentes estão apresentadas respectivamente a matriz “métricas versus necessidades” e a matriz “métrica versus valores”. Especialmente na matriz “métrica versus valores” existem métricas (observar destaque em amarelo no documento da página 62) para as quais não foram estabelecidos valores, até a conclusão deste documento.

Necessidade Interpretada		Métrica
1	O dispositivo possui propriedades metrológicas adequadas	R&R(%Tol)
2	O dispositivo é geometricamente compatível com os tipos de peças a serem medidas.	R&R(%PV)
3	O dispositivo é sensível às variações da peça	Estabilidade
4	O dispositivo é robusto à variação de temperatura	Linearidade
5	As medidas feitas com o dispositivo são rastreáveis	Histerese
6	O dispositivo classifica as peças de forma confiável	Erro máximo permissível
7	O dispositivo fornece informação adequada para setup do processo de torneamento.	Resolução
8	O dispositivo fornece informação para construir cartas de controle de média e amplitude.	Incerteza combinada expandida
9	O dispositivo é robusto às variações ambientais (vibrações, ruídos elétricos, umidade, poeira, corrosão...).	Características de resposta/Sensibilidade
10	O dispositivo inspeciona a peça após a primeira e a segunda operação.	Faixa de medição
11	O dispositivo garante a uniformidade e integridade das peças a serem inspecionadas.	Lista de peças (Número de peça Valco)
12	O dispositivo é ergonômico.	Temperatura de Operação
13	O tempo de medição é adequado ao ciclo de produção.	Offset devido à temperatura
14	O dispositivo opera com distintos tornos CNC.	Plano de calibração/verificação segundo ISO 9000:2000, ISO 9002:1, ISO 7025 e normativas das gerais
15	As dimensões do dispositivo atendem os requisitos do novo layout dos tornos CNC.	Probabilidade de erro tipo I e II
16	O dispositivo possui boa transportabilidade.	ISO 14253-1
17	O dispositivo sistema de limpeza automático.	Permite visualizar resultado de medição
18	O dispositivo é elétrica e eletronicamente seguro (blindagem, aterramento, compatibilidade eletromagnética).	Saida compatível com WinCEP
19	O dispositivo possui alimentação automática.	Coefficiente de Amortecimento de Vibrações Mecânicas
20	O dispositivo possui rápido setup (mudança de peça).	Frequência crítica de vibração
21	O dispositivo expulsa a peça automaticamente e separa as n.c.	Blindagem e isolamento segundo norma NBR 9311
22	O dispositivo avisa da aparição de peça n.c.	Aterramento segundo norma ....
23	O dispositivo é simples e de fácil manutenção e operação.	Ruído elétrico admissível/Grau de Proteção segundo CEI/IEC 529
24	O dispositivo possui preset (zeramento) automático.	Compatibilidade eletromagnética segundo norma NBR 7845
25	O dispositivo gera relatórios de n.c. (diário de bordo automático).	Resistente à corrosão pela transpiração
26	Haverá comunicação (automática ou não) entre o dispositivo e o CNC.	Resistente ou protegido contra poeira
27	O dispositivo não possui componentes com dimensões reduzidas em grandes quantidades.	Número e detalhe das cotas a inspecionar
28	Os materiais utilizados estão em acordo com as normas específicas.	Impacto da peça nos containers de saída
29	O dispositivo está construído com peças intercambiáveis.	Impacto da peça na alimentação
30	Os componentes são recomendados pelo fabricante do dispositivo.	Pressão contida na fixação e na medição
31	As documentações (manuais, procedimentos, desenhos, certificados) acompanham o dispositivo.	Segundo normas de ergonomia ....
32	O projeto básico dimensional do dispositivo estará pronto até o dia 20 de março de 2003.	Altura com relação ao piso
33	O dispositivo possui uma relação custo/benefício satisfatória.	Tempo unitário de inspeção
		Produtividade média (peças por hora)
		Tempo de alimentação
		Tempo de remoção das peças inspecionadas
		Lista de tornos
		Dimensões externas do dispositivo (S.M. + Acessórios)
		Área de acesso do operador
		Área de depósito de peças inspecionadas (C e NC)
		Peso do dispositivo
		Autoimpante
		Tensão de alimentação
		Proteção contra sobrecargas e curtos
		Número de peças à espera de inspeção
		Tempo de setup para mudança de peça
		Expulsão automática de peça com separação de NC
		Alarme sonoro e luminoso de peça NC rejeitada do dispositivo/peça
		Fácil manutenção e operação
		Possui preset automático
		Diário de bordo automático (NC)
		Comunica com CNC (protocolos)
		Dimensões mínimas dos componentes do dispositivo
		Lista de materiais aceitáveis
		Lista de normas de tolerâncias dimensionais e geométricas
		Marca de componentes preferidas
		Lista de manuais e procedimentos
		Data limite do projeto dimensional 20 de Março
		Custo do dispositivo
		Data limite dispositivo operacional: julho 2003

Tabela 4.6: Matriz “métricas versus necessidades” criada para o exemplo.

Nº	Métrica	Necessidades	Valor		Unidade
			Ideal	Marginal	
1	R&R(%Tol)	1,5,8	10	20	%
2	R&R(%VP)	1,3,6,7,8	10	20	%
3	Estabilidade	1,4,5,6,7,8	O S.M. é estável	-	Subj.
4	Linearidade	1,3,6,7,8	< 25	< 25	µm
5	Histerese	1,3,5			
6	Erro máximo permissível	1,6,7,8	U <sub>95%</sub>	U <sub>95%</sub> +td	mm
7	Resolução	1,6,7,8	0,001	0,002	mm
8	Incerteza combinada expandida	1,3,4,5,6,7,8	0,02	0,04	mm
9	Característica de resposta/Sensibilidade	1,3,4,5,6,7,8,10	73,75	73,75 ±1%	mV/V/mm
10	Faixa de medição	1,2,3	±2,50	±2,50	mm
11	Lista de peças (número de peça Valeo)	3,5,6,7,8	012.0380.0, 012.0381.0, 012.0382.0, 012.0383.0, 012.0384.0, 012.0385.0, 012.0386.0		Subj.
12	Temperatura de operação	4,6,7,7	-10 a +65	-10 a +65	°C
13	Offset devido à temperatura	4,6,7,8	< 25	< 25	µm/°C
14	Plano de calibração e verificação segundo ISO 9000 2000, ISO 10012-1, ISO 17025 e reome	5	Sim	-	Bin.
15	Probabilidade de erro tipo I e II	6			
16	ISO 14253-1	6	Sim	-	Bin.
17	Permite visualizar resultado de medição	7	Sim	-	Bin.
18	Saída compatível com WinCEP/Outros softwares	8	Sim	Outro Software	Subj.
19	Coefficiente de Amortecimento de Vibrações Mecânicas	9	Livro Vibrações Mecânicas		Subj.
20	Frequência crítica de vibração	9	Livro Vibrações Mecânicas		Subj.
21	Blindagem e isolamento segundo norma NBR 9311	9,18	Sim	-	Bin.
22	Aterramento segundo norma NBR 6935	9,18	Sim	-	Bin.
23	Ruído elétrico admissível/Grau de Proteção segundo CEI/IEC 529	9	IP65		Subj.
24	Compatibilidade electromagnética segundo norma NBR 7845	9,18	Sim	-	Bin.
25	Resistente à corrosão pela transpiração	9	Sim	-	Bin.
26	Resistente ou protegido contra poeira	9	Sim	-	Bin.
27	Número e detalhe das cotas a inspecionar	10	C:\users\faa\Irmãos_Zen\Desenho_peças_ZEN		Subj.
28	Impacto da peça nos containers de saída	11,21	0	Peso da peça	N
29	Impacto da peça na alimentação	9,11	0	Peso da peça	N
30	Pressão de contato na fixação e na medição	11	4	6	bar
31	Lista de normas de ergonomia	12	NR 17	-	Subj.
32	Altura com relação ao piso	12	1,0	0,8-1,2	m
33	Tempo unitário de inspeção	13,19,20	10	15	s
34	Produtividade média (peças por hora)	13,19	300	250	peças/s
35	Tempo de alimentação	13,19,20	4	8	s
36	Tempo de remoção das peças inspecionadas	13,20	4	8	s
37	Lista de tornos	14	112-31, 112-32		Subj.
38	Dimensões externas do dispositivo (S.M. + Acessórios)	15,16,32	C:\users\faa\Irmãos_Zen\DM3A (fase final)\montagens	-	Subj.
39	Área de acesso do operador	15,32	C:\users\faa\Irmãos_Zen\DM3A (fase final)\montagens	-	Subj.
40	Área de depósito de peças inspecionadas (C e NC)	15,32	C:\users\faa\Irmãos_Zen\DM3A (fase final)\montagens	-	Subj.
41	Peso do dispositivo	16	9	10	kg
42	Autolimpante	17	Sim	Limpeza Semi-automática	Bin.
43	Tensão de alimentação	18	220	V	
44	Proteção contra sobrecargas e curtos segundo norma NR 10	18	Sim	-	Bin.
45	Número de peças à espera de inspeção	19	40	20	peças
46	Tempo de setup para mudança de peça	20	5	10	s
47	Expulsão automática de peça com separação de NC	21	Sim	-	Bin.
48	Alarme sonoro e/ou luminoso de peça NC e/ou parada do dispositivo/máquina	22	Sim	-	Bin.
49	Fácil manutenção e operação	23	Sim	-	Bin.
50	Possui preset automático	24	Sim	-	Bin.
51	Diário de bordo automático (NC)	25	Sim	-	Bin.
52	Comunica com CNC (protocolos)	19,26	Sim	-	Bin.
53	Dimensões mínimas dos componentes do dispositivo	27	C:\users\faa\Irmãos_Zen\DM3A (fase final)\peças desenhadas		Subj.
54	Lista de materiais aceitáveis	16,28	C:\users\faa\Irmãos_Zen\DM3A (fase final)\drawings		Subj.
55	Lista de normas de tolerâncias dimensionais e geométricas	29	C:\users\pgv\Projeto ZEN\Trabalhos\Normas_Tolerancias.xls	-	Subj.
56	Marcas de componentes preferidas	30	FESTO, SMC, Marposs, Mitutoyo, etc.		Subj.
57	Lista de manuais e procedimentos	31	Manual do Usuário		Subj.
58	Data limite do projeto dimensional 20 de Março	32	Sim	-	Bin.
59	Custo do dispositivo	33	Confidencial	-	Subj.
60	Data limite dispositivo operacional: julho 2003	34	Sim	-	Bin.

Tabela 4.7: Matriz “métricas versus valores” do exemplo”.

### 4.3.3 Projeto metrológico conceitual

Na Figura 4.7 pode-se observar o diagrama de funções criado para o dispositivo automático de inspeção, resultado do passo seguinte da sistemática. Em preto representou-se o fluxo de material (i.e. peças) e em azul o de energia. O fluxo de sinais não foi apresentado, para simplificar o diagrama. É perceptível que o dispositivo em questão não se detém apenas à solução do problema da medição. Há uma série de outras funções associadas ao mesmo, que são essenciais para o atendimento das necessidades dos clientes e *stakeholders*. Tratando-se de um sistema automático, identificam-se como sendo críticas as funções de armazenamento das peças entre o torno CNC e o dispositivo de inspeção propriamente dito, o transporte das peças até o dispositivo de inspeção, a fixação da peça a medir e sua liberação após a medição, a segregação das peças não conformes, dentre outras. Várias destas funções precisam de energia, a qual deve ser fornecida externamente na forma de energia elétrica ou pneumática (disponíveis no chão de fábrica) e convertida em energia mecânica, antes da sua aplicação, por meio de sistemas de conversão adequados.

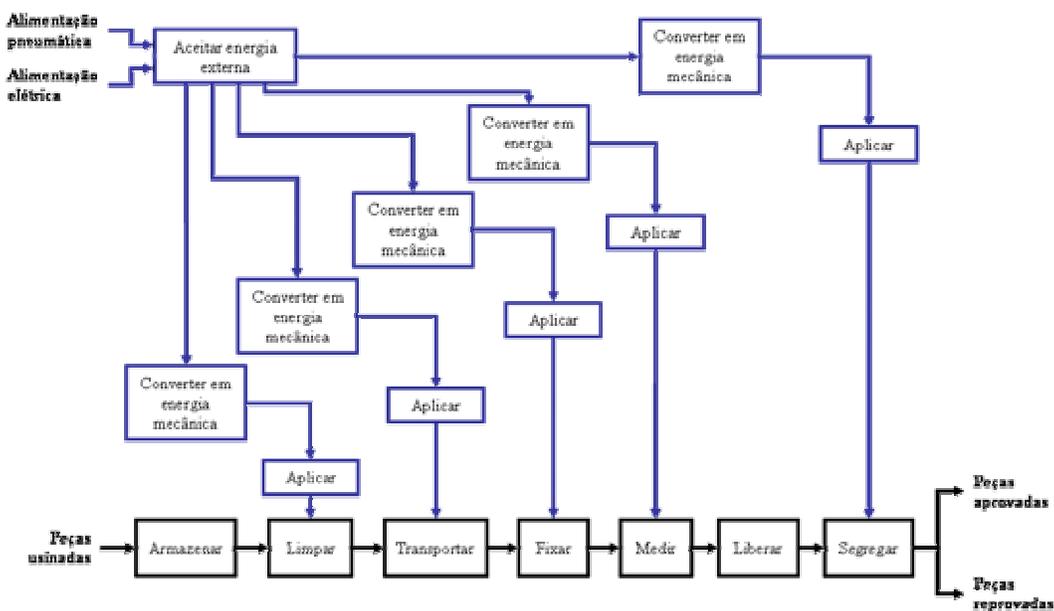


Figura 4.7: Diagrama de funções do dispositivo automático de inspeção.

Cada um dos blocos funcionais da Figura 4.7 representa um sub-problema, para o qual foram propostas soluções. Através de exploração sistemática e fazendo uso de árvores de classificação, onde as soluções dos sub-problemas são organizadas, o time de projeto chegou às soluções alternativas detalhadas na Figura 4.8.

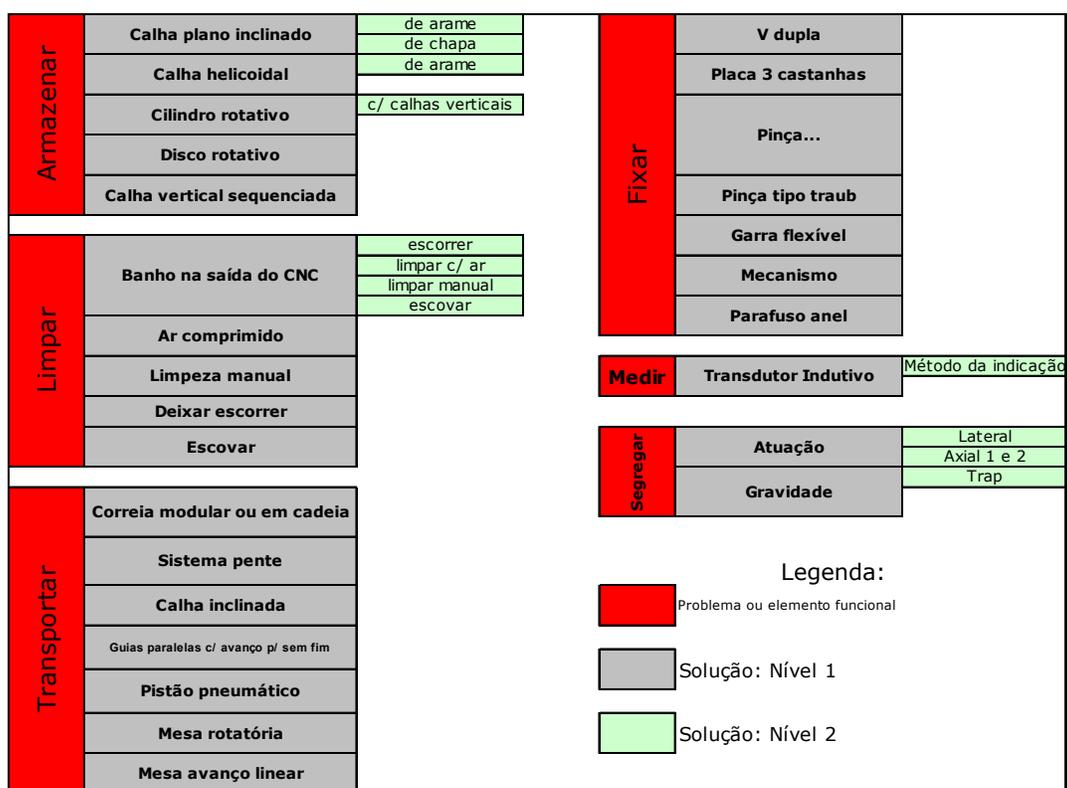


Figura 4.8: Árvore de classificação para o sistema de medição automático.

Através de uma triagem onde foram retirados aqueles conceitos que não se adequavam, em primeira vista, às demandas do cliente, os participantes da equipe de projeto selecionaram os cinco conceitos mais promissores dos quais 3 foram escolhidos para uma avaliação definitiva fazendo uso de uma matriz de decisão preliminar (não mostrada). Optou-se pela adoção das declarações dos clientes – aquelas contidas na matriz “métricas versus necessidades” – como os critérios de qualificação das referidas matrizes de decisão (preliminar e definitiva). A primeira delas possui apenas aquelas declarações mais gerais a respeito das características do DM, a segunda matriz é a que

define o conceito final, logo se fez uso, nesse caso, de todas as declarações presentes na matriz “métricas versus necessidades”.

Da análise anterior surgiu a primeira versão do dispositivo de inspeção. As soluções adotadas estão descritas brevemente na tabela a seguir:

<b>Armazenar</b>	Disco giratório, atuando como elemento de acumulação e permitindo uma primeira limpeza por escorrimento do óleo de usinagem. A peça é colocada no disco pela esteira de saída do torno CNC. O operador cuida para que as peças fiquem apoiadas pela sua face externa.
<b>Limpar</b>	Jato de ar comprimido à saída do disco elimina restos de óleo e cavaco.
<b>Transportar</b>	A peça entra numa calha em C, empurrada pelas outras peças que se encontram no disco de armazenamento. Desce pela calha por gravidade e fica com a face externa para cima, disponível para ser alimentada por uma lingüeta de transporte e fixação.
<b>Fixar</b>	Entre o extremo em V da lingüeta e um topador.
<b>Liberar</b>	Por retrocesso da lingüeta, com expulsão por cilindro pneumático
<b>Segregar</b>	O automatismo se detém com a peça não conforme fixada e a disponibiliza para extração manual com intervenção do operador.

Tabela 4.8: Conceitos solução para algumas funções do dispositivo.

Na Figura 4.9 pode-se observar uma representação gráfica tri-dimensional das soluções selecionadas para o sistema de transporte e fixação.

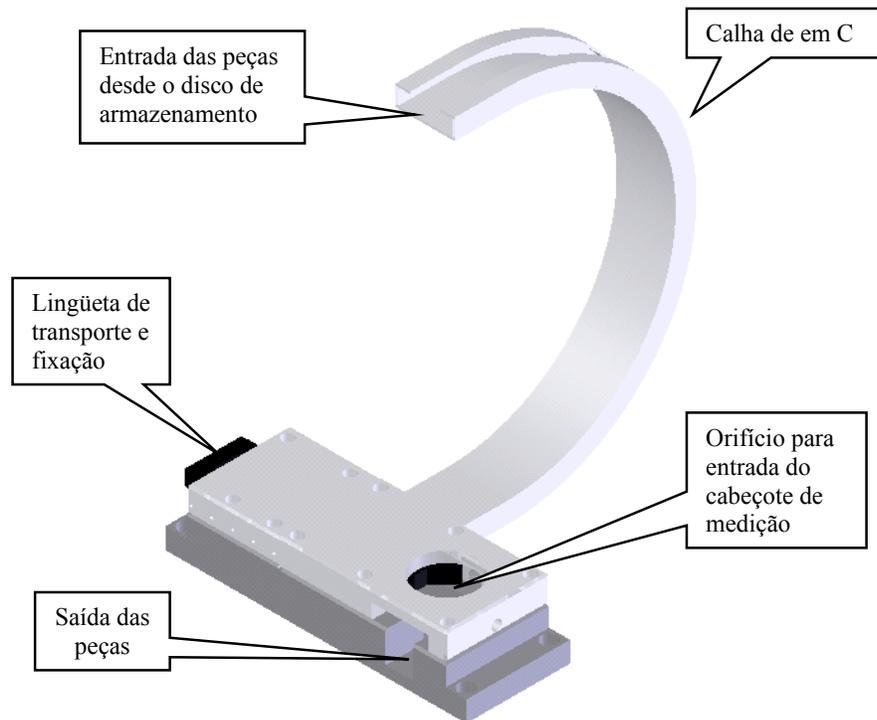


Figura 4.9: Sistema de transporte e fixação e calha de alimentação.

Os resultados da etapa de determinação do método de medição, seleção da estratégia de medição que melhor resolve o problema e definição do tipo e quantidade de transdutores a serem utilizados para no DM do exemplo podem ser observados na Tabela 4.9.

<b>Transdutores</b>	3 transdutores indutivos a 120°
<b>Estratégia de medição</b>	Estabelecimento da referência por apalpação mecânica em 3 pontos equidistantes na superfície de fundo do arraste – Medição da altura por apalpação de três pontos na superfície limite superior – Calculo de altura máxima e mínima por software.
<b>Método de medição</b>	Direto.
<b>Grau de automação</b>	100% automático – avanço e retrocesso do cabeçote de medição por atuador pneumático.

Tabela 4.9: Conceito solução para a função “medir” do dispositivo do exemplo.

Os transdutores foram especialmente selecionados para atender à faixa de medição especificada. Nesse caso optou-se pela utilização de transdutores indutivos do tipo meia ponte (HBT) com uma faixa de medição de  $\pm 2,0$  mm. O princípio de funcionamento desses transdutores consiste na utilização de três bobinas (duas delas idênticas) enroladas em uma carcaça comum. A bobina principal é a que recebe a alimentação (tensão alternada). As duas restantes são conectadas de forma tal que a sua saída é uma tensão combinada que representa a diferença de tensão induzida até elas. Com o núcleo na posição central, a saída é zero. Entretanto, qualquer movimento fora dessa posição produz uma saída que muda em fase e magnitude com o deslocamento relativo [33].

Para o dispositivo em questão, o resultado desta etapa foi um cabeçote de medição que corporifica o conceito da Tabela 4.9. A seguir pode-se observar uma perspectiva isométrica do mesmo, onde estão identificados os componentes principais:

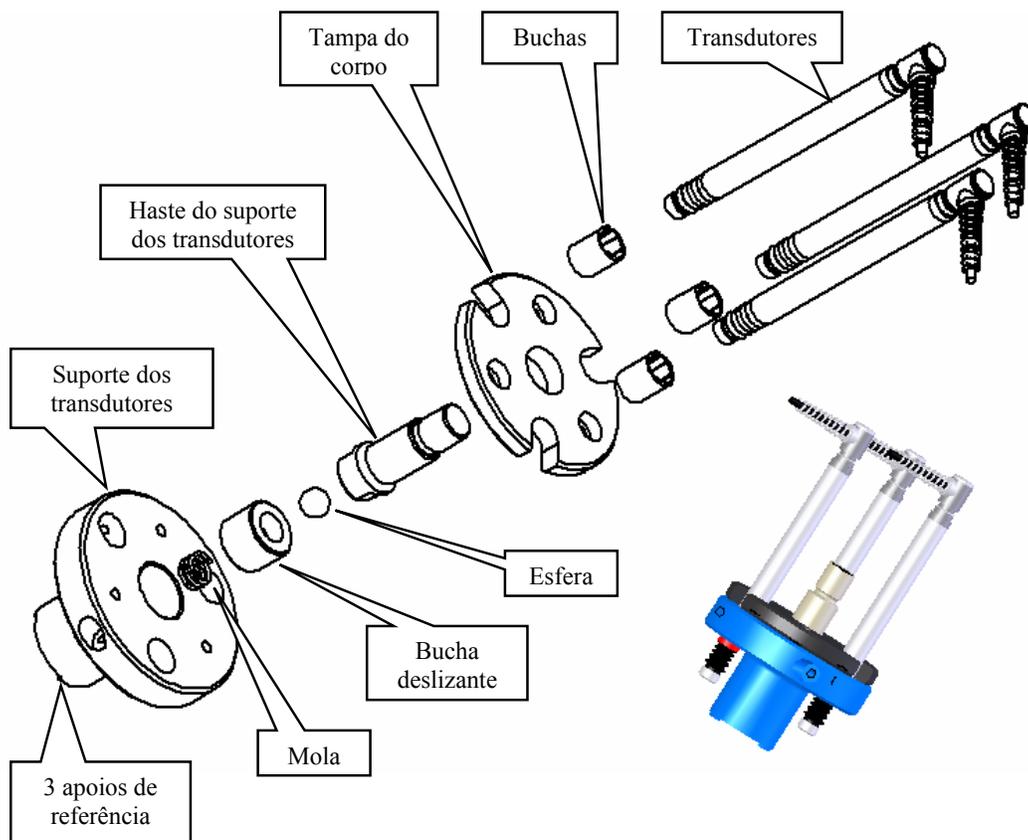


Figura 4.10: Cabeçote de medição para o arraste.

O projeto do cabeçote de medição tem como pontos de destaque a sua capacidade de medir todas as peças da família sem necessidade de ajustes, a sua robustez às variações de temperatura e a sua capacidade de produzir leituras que independem do erro de paralelismo da peça e, dentro de certos limites, da posição da peça com referência ao cabeçote.

A capacidade de se adequar às peças da família foi obtida estudando as alturas nominais e os diâmetros de contato na face externa dos diferentes modelos de arraste a medir. As diferenças de altura são absorvidas pelo curso dos transdutores, que consegue acomodar as diferenças entre os valores nominais mais as associadas à dispersão do processo de fabricação. A adequação a distintos diâmetros foi obtida usando um sensor plano de diâmetro 4 mm em lugar do sensor esférico tradicional. Embora isso introduza uma fonte adicional de incerteza, associada ao erro de paralelismo, ela é desprezível frente à incerteza alvo.

A robustez à temperatura foi obtida fixando os três transdutores indutivos diretamente na peça que realiza a referência (peça azul da Figura 4.10.). Assim, o comprimento, afetado pelas eventuais dilatações devidas à diferença entre a temperatura da peça e a do cabeçote, é extremamente curto (i.e. o valor da altura nominal do arraste). Logo, a influência da temperatura se limita praticamente ao seu efeito nos transdutores.

A robustez ao erro de paralelismo e a posição da peça foi obtida permitindo que todo o cabeçote gire livremente no extremo da haste. Isso é possível porque entre a haste do suporte dos transdutores, que faz a ligação do cabeçote com o atuador pneumático, e a bucha deslizante, que se encontra guiada no furo do cabeçote de medição e suportada por uma mola, foi intercalada uma esfera de precisão sobre apoios cônicos retificados. Esse conjunto ou rótula confere ao cabeçote a capacidade de se adequar a peças cujo fundo não está perfeitamente perpendicular à direção de avanço do cabeçote. A mola, além de amortecer o curso final do avanço, confere ao sistema de aquisição o tempo necessário - durante a compressão e descompressão da mola - para capturar os valores dos transdutores.

O esquema apresentado na Figura 4.11 ilustra os recursos de flutuação e adequação à geometria da peça conferidos ao cabeçote de medição.

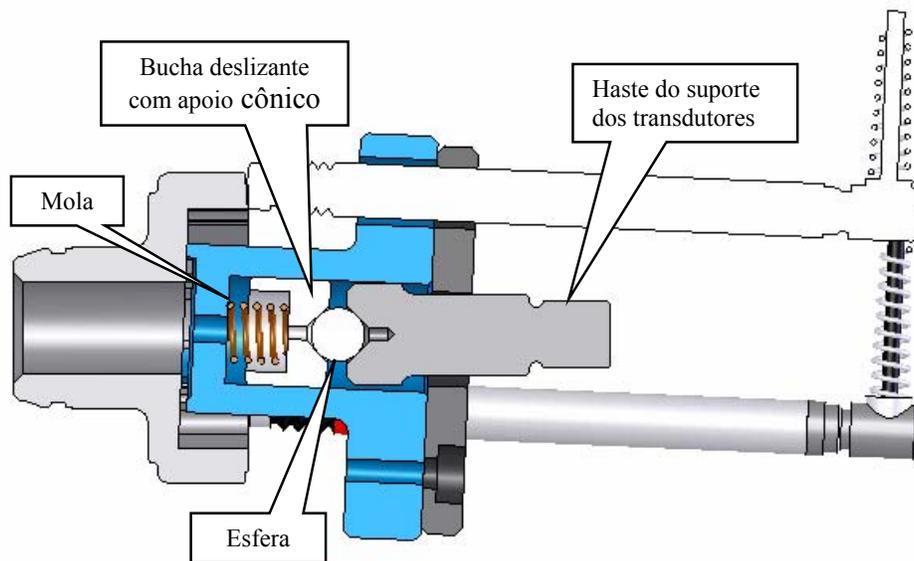


Figura 4.11: Conjunto “esfera, base e mola” e seus respectivos graus de liberdade.

Na Figura 4.12 observa-se a primeira solução global para as funções transportar a peça, fixar a peça e medir a altura do arraste. Detalham-se os acionamentos pneumáticos de fixação e expulsão da peça, assim como o cabeçote de medição mostrado na Figura 4.10.

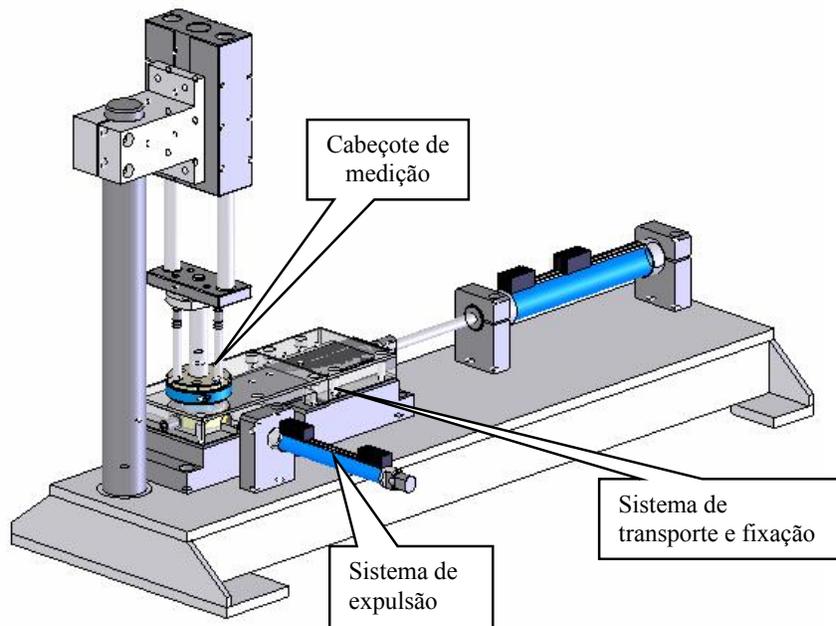


Figura 4.12: O sistema de medição para a altura do arraste.

#### 4.3.4 Validação metrológica preventiva

Nesta etapa foram analisadas as possíveis causas de erros de medição, focando a atenção principalmente no cabeçote de medição, por se considerar que o resto do dispositivo não afeta a performance metrológica. A seguir, pode-se observar um diagrama de causa-efeito do erro de medição:

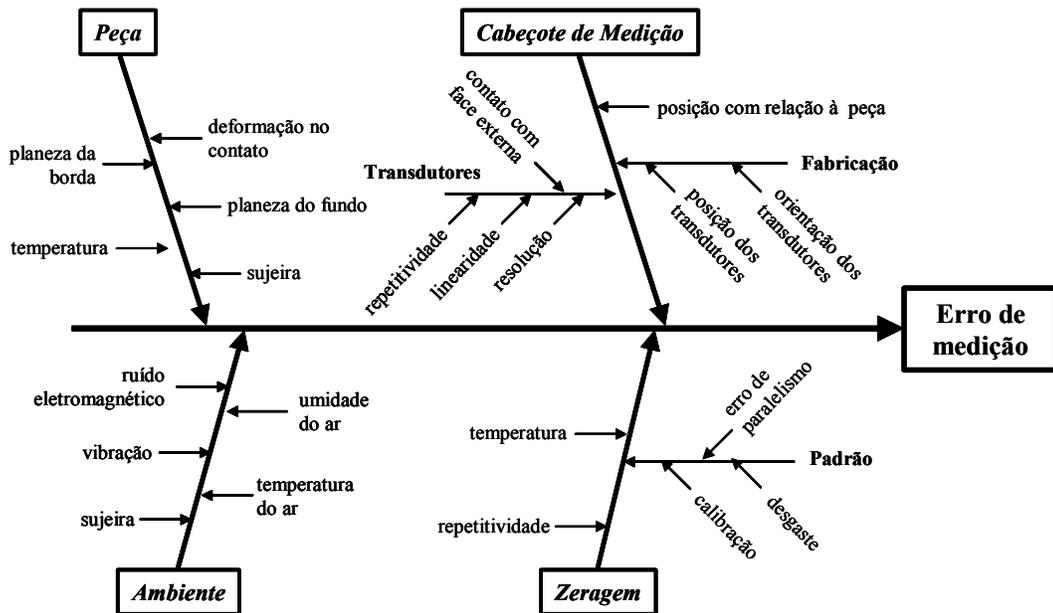


Figura 4.13: Causas do erro de medição.

Analisando individualmente as causas propostas na figura anterior, identificaram-se as mais significativas para o desempenho metrológico do sistema:

1. Desvios geométricos na fabricação e montagem do cabeçote, particularmente o desvio posicional dos transdutores com referência a sua posição nominal e o desvio de posição do centro do cabeçote com referência ao centro da peça.
2. Planeza do fundo da peça.
3. Diferença de temperatura entre peça e cabeçote de medição.
4. Deriva do transdutor devida à temperatura.
5. Repetitividade, linearidade e resolução dos transdutores.
6. Erro de zeragem dos transdutores, devido a erros de paralelismo no padrão, calibração do padrão e repetitividade do sistema durante a zeragem.

Para validar o projeto metrológico deve-se estimar a incerteza associada às causas de erro listadas acima, utilizando somente informação *a priori*, dada a impossibilidade de realizar experimentos.

A quantificação da incerteza associada aos desvios posicionais dos transdutores e do cabeçote foi realizada por simulação Monte Carlo, a partir da construção de um modelo matemático para o conjunto cabeçote-peça. Esse modelo matemático reproduz a operação do programa de medição do dispositivo, mas torna aleatória a posição de cada transdutor dentro da área definida pela sua tolerância posicional e também a posição do conjunto de transdutores com referência ao centro da peça.

Os valores de entrada ao modelo foram: as dimensões da peça e do cabeçote e os parâmetros do processo de fabricação. O algoritmo começa gerando um conjunto de três valores indicados pelos transdutores, consistentes com a distribuição do processo de fabricação. A partir desse ponto são calculados, de forma iterativa, 1000 valores de  $H_{\max}$  e  $H_{\min}$ , cada um deles correspondendo a posições diferentes dos transdutores e do cabeçote dentro das regiões de tolerância pré-definidas. Na Figura 4.14 pode-se observar um gráfico de dispersão representando essas posições aleatórias.

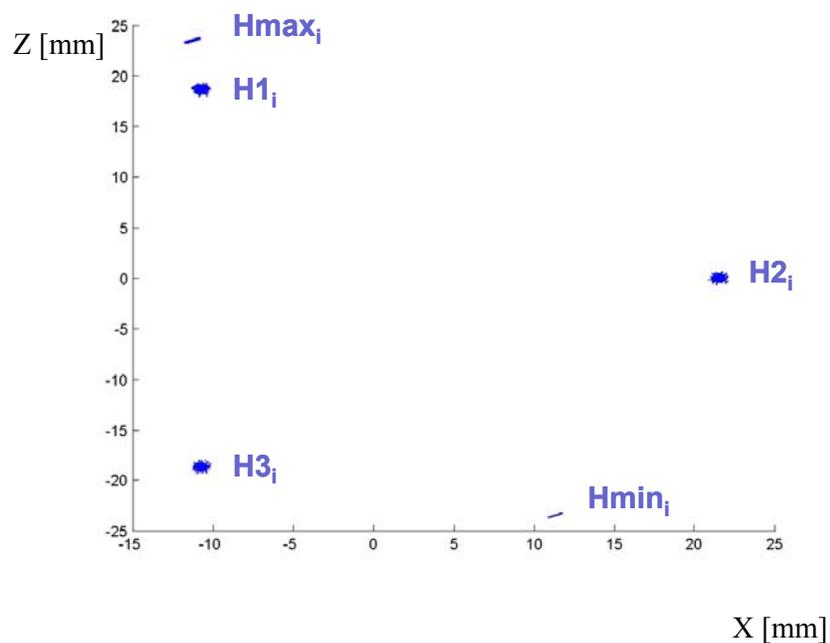


Figura 4.14: Gráfico gerado a partir da simulação Monte Carlo.

A representação corresponde a um único conjunto de três valores indicados pelos transdutores. O sistema coordenado é o sistema da peça. As três nuvens de pontos

dispostas em um triângulo equilátero representam as posições dos eixos dos transdutores, afetadas pelo desvio posicional de cada transdutor no cabeçote e o desvio do cabeçote com referência à peça. As duas pequenas nuvens em forma de meia lua são os pontos em que se localizaram  $H_{\max}$  e  $H_{\min}$ , devendo-se a dispersão à mudança dos cossenos diretores que definem a inclinação do plano.

Após múltiplas corridas de simulação, comprovou-se que a variação das alturas  $H_{\max}$  e  $H_{\min}$  ficava, em 95% dos casos, dentro de um intervalo de  $\pm 1 \mu\text{m}$ , centrado nos valores calculados com as posições nominais. A distribuição dos valores mostra-se aproximadamente normal. Define-se então uma incerteza padrão:

$$u_{\text{geometria}} = 0,5 \mu\text{m}$$

A razão deste valor baixo é que a incerteza é função do erro de paralelismo entre a superfície dos fundos (onde apóia o cabeçote) e a face externa (onde apóiam os apalpadores dos transdutores). Sendo que o ângulo entre estas superfícies é pequeno, a incerteza devida aos erros posicionais terá também um valor baixo.

O erro de planeza do fundo do arraste faz que o cabeçote, que apóia na região central, defina uma direção de medição potencialmente diferente da que teria se o fundo fosse perfeitamente plano. Dada a complexidade do fenômeno, tornou-se impossível construir um modelo matemático. Em consequência, estimou-se - de forma conservadora - que os erros associados poderiam estar, com densidade de probabilidade uniforme, dentro de um intervalo de  $\pm 10 \mu\text{m}$ . A seguir o valor da incerteza padrão devida ao erro de planeza:

$$u_{\text{planeza}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5,77 \mu\text{m}$$

Considerando que a diferença de temperatura entre peça e cabeçote pode estar, com densidade de probabilidade uniforme, dentro de um intervalo de  $\pm 10^\circ\text{C}$  e que o comprimento diferencial submetido à dilatação é igual à altura do arraste ( $L_0 = 10 \text{ mm}$ ),

a incerteza correspondente pode ser calculada usando a equação da dilatação linear para aço ( $\alpha_{\text{aço}} = 0,000011 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ):

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha_{\text{aço}} \cdot \Delta T = 1,1 \mu\text{m}$$

Assim, a incerteza padrão devida à diferença de temperatura é:

$$u_{\text{temp}} = \frac{1,1}{\sqrt{3}} = 0,64 \mu\text{m}$$

A temperatura no chão de fábrica pode oscilar entre 15°C e 35°C. No entanto, estes são valores extremos ao longo do ano. Dado que os transdutores serão submetidos a zeragens periódicas, não seria realista apreciar a deriva correspondente a essa diferença de temperatura. Considera-se então que a máxima variação de temperaturas entre duas zeragens sucessivas pode ser de 5 °C, o qual, segundo o manual de especificações dos transdutores, corresponde a uma deriva máxima de 1,25 μm. Assumindo distribuição uniforme, a incerteza padrão correspondente é:

$$u_{\text{der}} = \frac{1,25}{\sqrt{3}} = 0,72 \mu\text{m}.$$

Também do manual dos transdutores diferenciais selecionados, se obteve o valor da resolução (1 μm) e do erro de repetitividade 0,2 μm (2,77σ). As incertezas padrão correspondentes são:

$$u_{\text{resol}} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,29 \mu\text{m} \text{ e}$$

$$u_{\text{repet}} = 0,07 \mu\text{m}.$$

O erro de linearidade informado no catálogo, correspondente ao curso todo do transdutor, é 25 μm. Como o curso efetivo de trabalho do transdutor é

consideravelmente inferior ao curso total (<0,5 mm), optou-se por usar uma parte proporcional desse valor:

$$u_{linear} = \frac{2,5}{\sqrt{3}} = 1,44 \mu m .$$

O erro residual de zeragem pode ser estimado como sendo igual à resolução, assim:

$$u_{zeragem} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577 \mu m .$$

Combinando as incertezas, de [15] obtemos:

$$u(H_{max}) = u(H_{min}) = \sqrt{u_{geom}^2 + u_{planeza}^2 + u_{temp}^2 + u_{der}^2 + u_{repet}^2 + u_{linear}^2 + u_{resol}^2 + u_{zeragem}^2}$$

$$u(H_{max}) = u(H_{min}) = 6,08 \mu m .$$

Assumindo  $k=2$ , a incerteza expandida resulta:

$$U_{95\%}(H_{max}) = U_{95\%}(H_{min}) = 12,16 \mu m .$$

Dado que a menor tolerância a inspecionar é  $\pm 100 \mu m$ , a relação incerteza-tolerância fica:

$$\frac{U_{95\%}}{Tol} = \frac{12,15}{200} \cong \frac{1}{17}$$

Embora estimativa conservadora da incerteza para o erro de planeza do fundo do arraste tenha elevado o valor da incerteza combinada, a relação incerteza-tolerância motivou a classificação positiva do dispositivo de inspeção. Conseqüentemente, o dispositivo de inspeção foi considerado adequado para a tarefa.

## 4.4 Projeto de sistemas

Seguindo as orientações do método foi criado um diagrama esquemático (Figura 4.15) do produto. O diagrama ilustra suas funções bem como os elementos ou componentes responsáveis pela execução de tais funções. Com respeito ao referido diagrama valem os seguintes comentários:

- as linhas pontilhadas correspondem a funções de controle enquanto que as linhas cheias relacionam-se com comandos;
- as linhas verdes se referem à alimentação pneumática do sistema;
- os blocos com características semelhantes estão destacados em retângulos com cores iguais;
- o mecanismo de transporte e fixação foi posicionado no centro do diagrama por se tratar do componente para onde a maioria das funções converge.
- o diagrama permite visualizar as interações entre os blocos funcionais do sistema; o que é fundamental para a identificação de possíveis incompatibilidades.

Com base no diagrama de funções a equipe de projeto criou um layout geral para o dispositivo de inspeção geométrica (Figura 4.16).

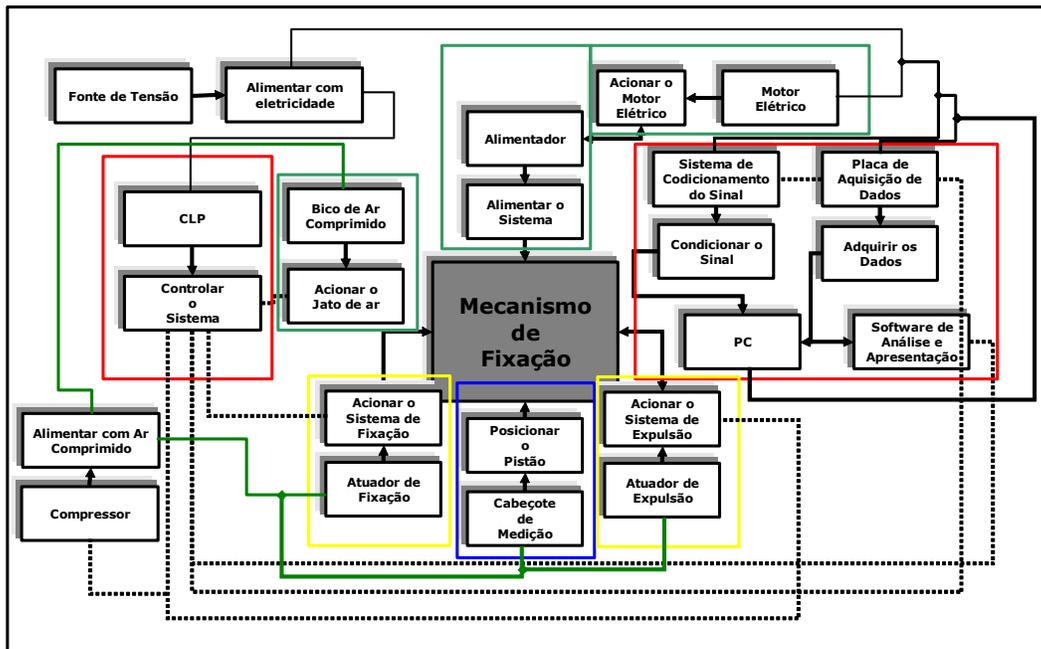


Figura 4.15: Diagrama esquemático para o DM do estudo de caso.

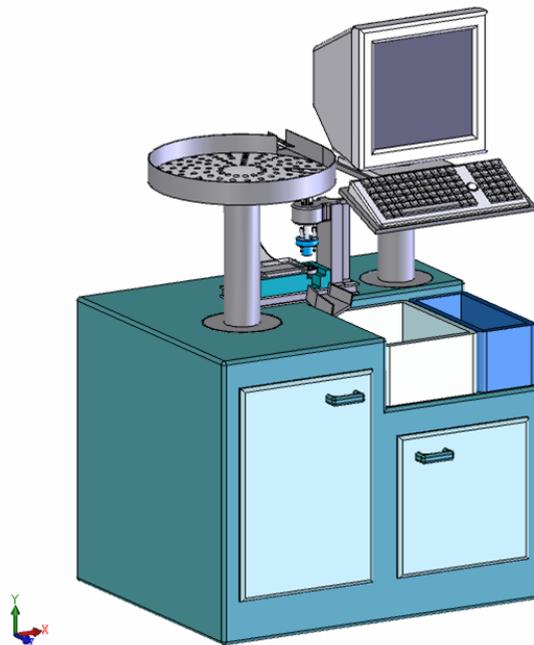


Figura 4.16: Layout esquemático para o DM do estudo de caso.

## 4.5 Projeto detalhado

### 4.5.1 Prototipagem

No caso do exemplo, inicialmente foi considerado necessário confeccionar apenas um protótipo, o do sistema de fixação e transporte. Essa decisão foi tomada com base na complexidade desse componente. Por agregar mais de uma função (transporte, fixação e expulsão), o modelo em CAD do chamado sistema de transporte e fixação da peça não passou à equipe de projeto a confiança necessária no sentido de validá-lo e enviá-lo para a fabricação definitiva. Porém, para analisar todas as funções do referido sistema foi igualmente necessário confeccionar um protótipo para a calha de alimentação, pois sem esta última não seria possível avaliar a entrada das peças no mencionado sistema de transporte e fixação.



Figura 4.17: Fotos do componentes prototipados.

A avaliação do comportamento do sistema de transporte e fixação resultou na identificação dos problemas nas regiões indicadas através dos círculos vermelhos da Figura 4.17. Vale ressaltar que tal avaliação não se deu arbitrariamente. Elaborou-se um

plano de experimentos onde foram analisadas as principais incógnitas que o componente trazia. O relatório referente a tais análises está apresentado na Tabela 4.10.

Item analisado	Resultados	Observações
1 - Testar a possibilidade de utilização de apenas um sistema de fixação e transporte.	Não é possível utilizar apenas 1 sistema de transporte e fixação devido à reduzida área de apoio de alguns modelos de peças.	
2 - Testar a efetividade da calha transportadora (checar interferências).	A calha transportadora, embora cumpra na maioria dos casos sua função, apresentou alguns problemas, são eles: a) A velocidade de entrada das peças no mecanismo de transporte e fixação é muito alta, isso faz com que a peça recue um pouco para a boca do mecanismo travando a passagem da lingüeta; b) Deve ser utilizado um sistema com alimentação individual (peça por peça), uma vez que alimentar várias peças traz algumas implicações negativas.	
3 - Testar os trabalhos de fixação, transporte e expulsão (procurar por possíveis incoerências).	As peças com maior altura chegam a bater na parte superior do tampo (na entrada).	Pode ser solucionado diminuindo a espessura, na entrada da peça, do tampo. Outra melhoria estaria relacionada ao aumento do comprimento do canal
4 - Verificar a existência de possíveis deslocamentos da peça na posição de medição.	O furo de referência foi deslocado para atender as necessidades da peça mais crítica. Com isso, as demais peças não sofrem deslocamentos expressivos em sua posição de medição.	Pode-se aumentar a espessura da guia para que solicitem as peças de cima para baixo.
5 - Verificar a existência de desgastes excessivos na peça e no sistema.	O impacto da peças na entrada do sistema pode causar um desgaste excessivo do mesmo.	Tratamentos mais robustos nestas regiões.

Tabela 4.10: Relatório de experimentos referente ao sistema de transporte e fixação.

Norteados pelos resultados obtidos da experimentação do protótipo, o time de projeto decidiu por abandonar o conceito, uma vez que este não atendeu, de forma satisfatória, as necessidades estabelecidas a priori. Essa decisão trouxe algumas mudanças para o projeto como um todo.

- Mudança na forma de fixar e transportar a peça, visto que pela análise do protótipo constatou-se que a forma atual para resolver esses dois problemas não era a mais adequada.
- Mudança na disposição do cabeçote de medição com relação aos demais componentes do sistema de medição.

Em uma outra oportunidade a equipe de projeto optou por mudar a arquitetura geral do sistema de medição (Figura 4.18) no sentido de atender às novas soluções para os problemas de fixação e transporte da peça.

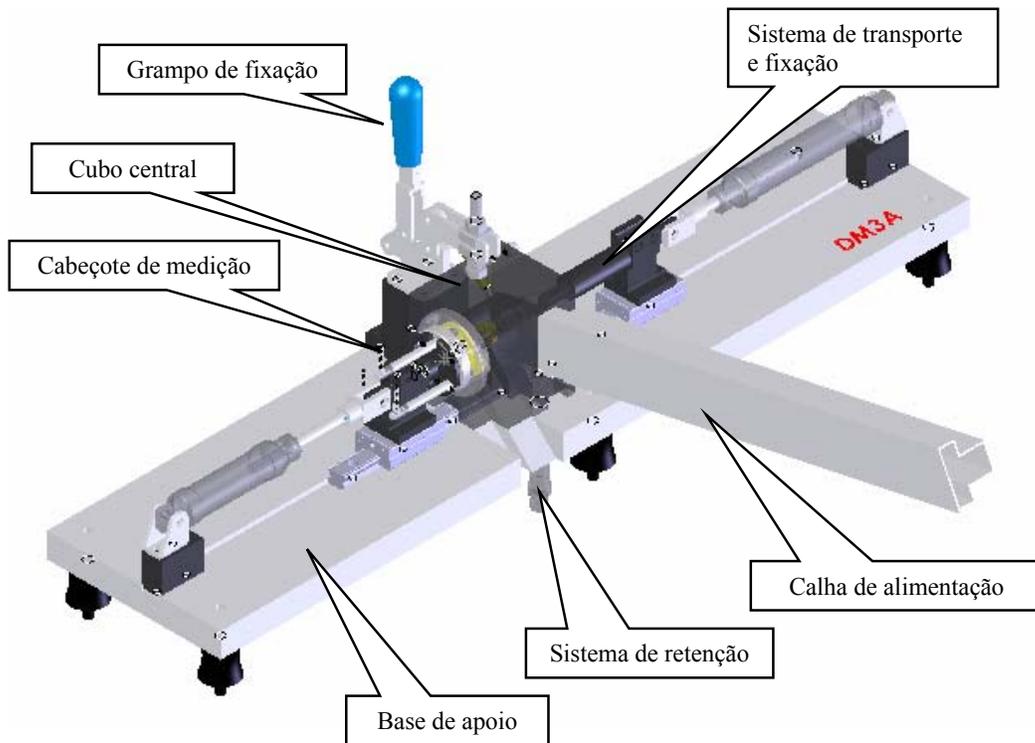


Figura 4.18: Novo conceito para o sistema de medição automático.

No novo conceito a peça não mais é transportada por sua base. Um cubo central, sobreposto a um trilho de precisão, guia a mesma através do seu diâmetro externo que possui uma área útil de contato consideravelmente maior que a base do arraste, inicialmente utilizada. Além disso, um pino de fixação, montado em um esquadro que por sua vez também está atrelado ao trilho de precisão, empurra a peça contra um flange de referência (Figura 4.19) instalado na parte terminal do cubo. Essa nova concepção eliminou os problemas encontrados no primeiro conceito com relação ao transporte e fixação da peça, além de garantir requisitos geométricos (e.g. concentricidade e alinhamento) vitais para o correto funcionamento do sistema. Embora esta solução tenha se enquadrado em um novo conceito, ela ainda atendeu aos requisitos estabelecidos nos diagramas esquemáticos e de função, criados para o conceito inicial. Na figura abaixo o cubo central é apresentado em detalhes.

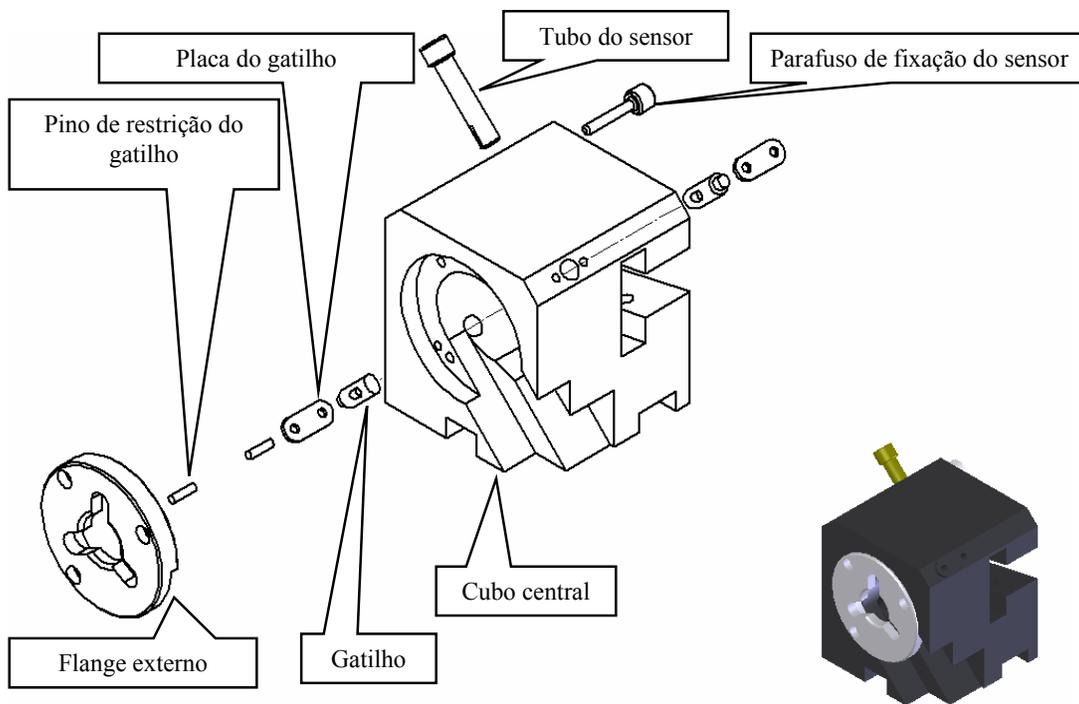


Figura 4.19: Cubo Central – Nova solução para o problema de transporte e fixação da peça.

A concepção de um cabeçote de medição de topo também foi deixada para trás. A implicação negativa que tal mudança poderia trazer era a de que a colocação horizontal

do cabeçote geraria um momento fletor devido ao peso próprio do cabeçote (Figura 4.20). Essa possibilidade foi confirmada, no entanto ela não trouxe nenhum problema significativo no que se refere ao funcionamento efetivo do sistema de medição, uma vez que se constatou que a magnitude do referido momento não é suficientemente grande para causar problemas. Além do mencionado momento fletor a mudança da disposição do cabeçote de medição com respeito ao restante do conjunto ocasionou um segundo problema, uma queda indesejada de sua extremidade, isto por conta da flutuação conferida ao cabeçote. Todavia este percalço foi solucionado adotando-se uma mola com rigidez suficiente para segurar o cabeçote em sua posição horizontal.

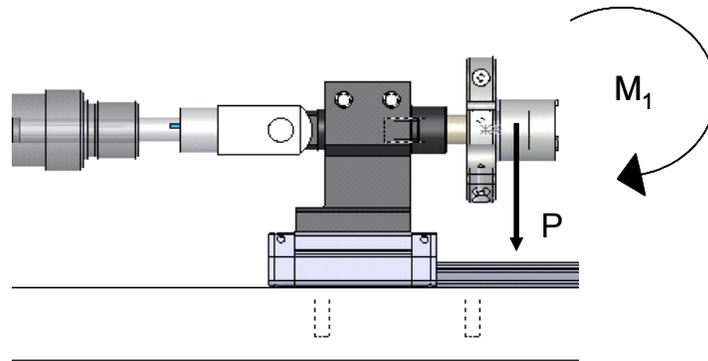


Figura 4.20: Momento fletor devido ao peso próprio do cabeçote de medição.

Como conclusão à fase de projeto detalhado chegou-se a uma solução global no que se diz respeito à arquitetura do sistema. Na Figura 4.21 ilustra-se o sistema de medição automático em sua forma plena, destaque para a bancada ergonômica desenvolvida para atender os requisitos estabelecidos na matriz métrica versus necessidades.

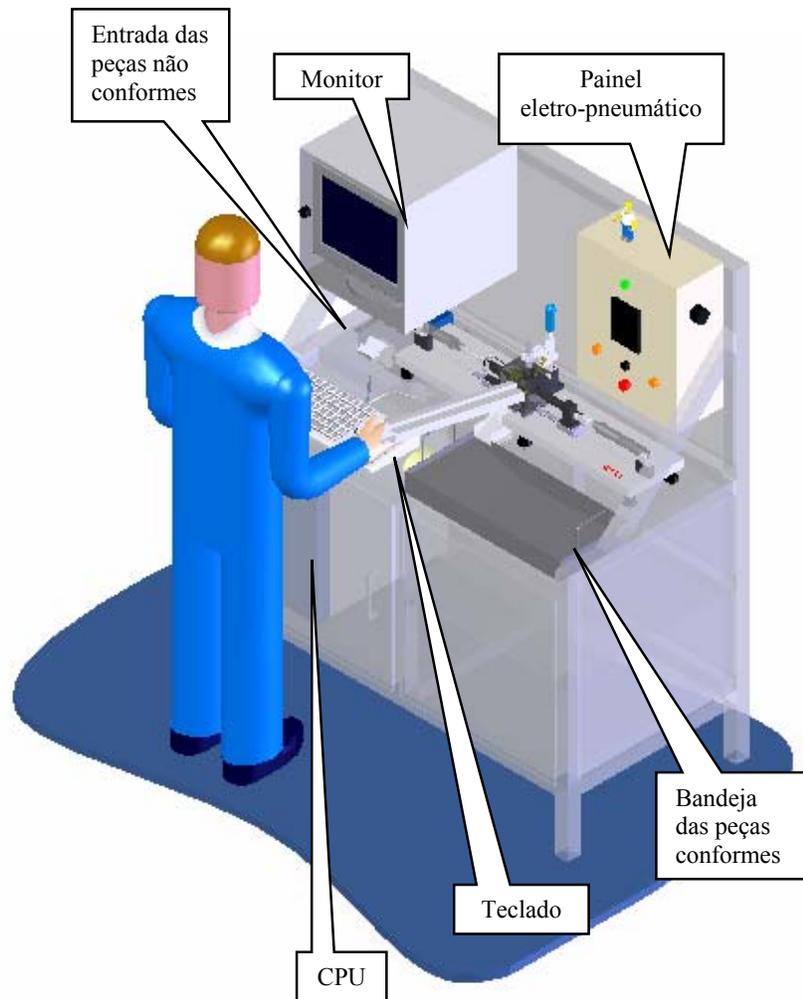


Figura 4.21: O sistema de medição automático em sua configuração plena.

#### 4.5.2 Elaboração do software, hardware mecânico e elétrico para controle e automação da medição

Durante a definição do hardware para controle e automação da medição, etapa que tem início na segunda fase e se prolonga até o final da sistemática, optou-se por selecionar componentes de automação mecânica padrão. Para tanto, três cilindros pneumáticos normalizados “ISO” [34], com características apresentadas na Tabela 4.11, foram selecionados. Esses cilindros correspondem à norma ISO 6432 [34], possuem camisa de aço e haste microrroletada [35].

<b>Cilindro ISO</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Curso (mm)</b>	<b>Características</b>
Medição	25	50	Dupla ação, amortecimento, articulação e cavalete, acoplamento compensador angular para haste.
Alimentação	25	100	Dupla ação, amortecimento, articulação e cavalete, acoplamento compensador angular para haste.
Trava	12	25	Dupla ação, amortecimento.

Tabela 4.11: Especificações dos cilindros pneumáticos utilizados na automação mecânica do sistema.

Foram destinados a cada cilindro dois sensores magnéticos de proximidade. Com estes sensores é possível detectar as posições finais e iniciais da haste dos cilindros selecionados. No êmbolo desses cilindros há um ímã permanente, cujo campo magnético aciona os sensores magnéticos de proximidade. Além dos sensores magnéticos dois sensores indutivos foram especificados, um para detectar a presença da peça na entrada do cubo central e outro para contagem das peças não conformes. Os sensores indutivos são emissores de sinal que detectam, sem contato direto, movimentos de máquinas de produção e processamento, robôs, linhas de produção e dispositivos de transporte, convertendo-os em um sinal elétrico [35].

Na Figura 4.22 é mostrado o esquema pneumático do sistema de medição [35]. Na mesma figura está também apresentado o diagrama trajeto-passo que indica a lógica de todo o sistema. Tal lógica é descrita em detalhes nas linhas que seguem:

1. A peça é detectada pelo sensor indutivo;
2. Essa condição aciona simultaneamente os cilindros trava e de alimentação;
3. No final de curso do cilindro de alimentação, o sensor magnético dispara o avanço do cilindro de medição;
4. O cilindro de medição avança e permanece no seu fim de curso por alguns segundos para que o sinal seja devidamente enviado para o computador;

5. Em seguida o cilindro de medição retorna a sua posição inicial, a comutação do sensor magnético colocado no seu início de curso dispara o recuo do cilindro de alimentação;
6. Uma vez estando recuados os cilindros de alimentação e de medição está caracterizada a condição para o recuo do cilindro trava;
7. O recuo do cilindro trava libera a peça seguinte e o ciclo se reinicia.

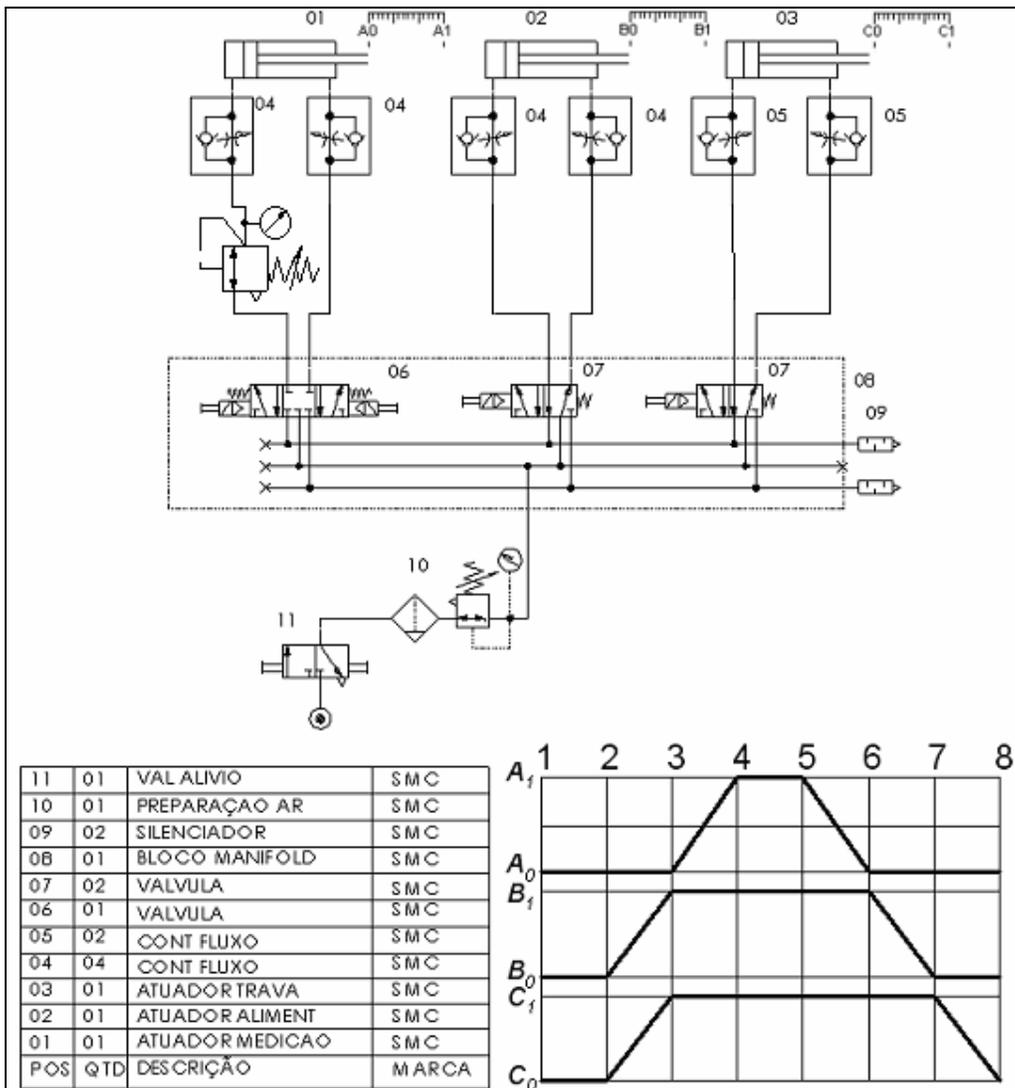


Figura 4.22: Circuito pneumático e diagrama trajeto-passo do sistema de medição.

No sentido de estabelecer um sistema para o controle dos elementos de automação especificou-se um CLP (Controlador Lógico Programável). O M90 (Figura 4 23) é um micro CLP, um controlador compacto detentor de um painel de controle, e normalmente empregado em tarefas de controle simples [36]. O M90 pode ser especificado para atender diferentes demandas. No caso específico da medição do arraste foi selecionado um modelo possuidor de uma porta de expansão do tipo serial. Esta porta é responsável pela comunicação do CLP com o computador.



Figura 4 23: Micro CLP especificado para o controle dos elementos de automação mecânica.

Com respeito à instrumentação virtual optou-se por utilizar:

- O Easy Box™ como o sistema de aquisição padrão, específico dos transdutores indutivos selecionados. O Easy Box™ consiste em um sistema de interface que permite uma conexão simples e econômica entre transdutores indutivos e medidores e um PC através de uma porta USB (Universal Serial Bus) [37];
- O LabView™ como ambiente de desenvolvimento para o software de controle e automação da medição;



Figura 4.24: Easy Box™ - Interface para aquisição de dados.

O software em linguagem LabView™ possui, em sua versão inicial, dois modos de operação. No primeiro (modo de zeragem) mostrado na figura, o sistema é calibrado no

valor nominal da característica de interesse. Esta tela do software possui três campos distintos, são eles:

- Campo 1: O operador deve selecionar o tipo de padrão a ser utilizado para zerar o sistema, dependendo da especificação da peça que será inspecionada;
- Campo 2: Contém informações a respeito das últimas calibrações;
- Campo 3: Neste campo o operador deve entrar com os dados de calibração de cada um dos padrões.
- Campo 4 : Fornece informações sobre a última zeragem.



Figura 4.25: Tela de zeragem do software para automação e controle da medição [38].

Neste ponto é interessante fazer uma explanação a respeito do processo de zeragem do sistema de medição propriamente dito. A peça padrão é fabricada na altura nominal especificada pelo desenho da peça a ser medida, possuindo as mesmas características geométricas do arraste. O detalhe, é que sua tolerância deve ser dez vezes menor que

tolerância da peça a medir. Assim, há uma garantia de que o valor estará o mais próximo possível do nominal. O modo de zeragem se distingue da inspeção no seguinte aspecto, o valor lido pelos transdutores será escrito no programa como o sendo o zero do sistema. Ou seja, qualquer valor acima deste será positivo e conseqüentemente qualquer valor abaixo, negativo. O fluxograma abaixo apresenta de forma resumida o algoritmo base utilizado para desenvolver o código do modo de calibração.

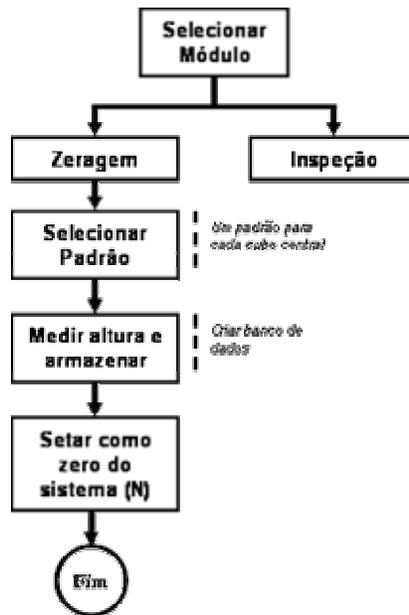


Figura 4.26: Fluxograma – Algoritmo do modo de zeragem.

O modo de inspeção foi concebido da forma indicada na Figura 4.27. Com respeito ao mesmo segue a explicação:

- Campo 1: Neste campo são selecionadas as peças a serem inspecionadas;
- Campo 2: Destinado à indicação dos resultados das medições;
- Campo 3: Mostra o número de peças boas e ruins;
- Campo 4: Gráfico dos resultados confrontados com as especificações de engenharia.



Figura 4.27: Tela de inspeção do software para automação e controle da medição [38].

Além dos campos mencionados acima, essa tela do software possui uma interface gráfica que apresenta os valores máximos e mínimos de altura encontrados em cada peça e os confronta com os valores de especificação de engenharia. Foi destinado também um campo para indicar a situação, em tempo real, da peça (aprovada ou reprovada). De maneira análoga ao modo anterior criou-se um fluxograma geral para nortear o desenvolvimento da parte do *software* reservada à inspeção (Figura 4.28).

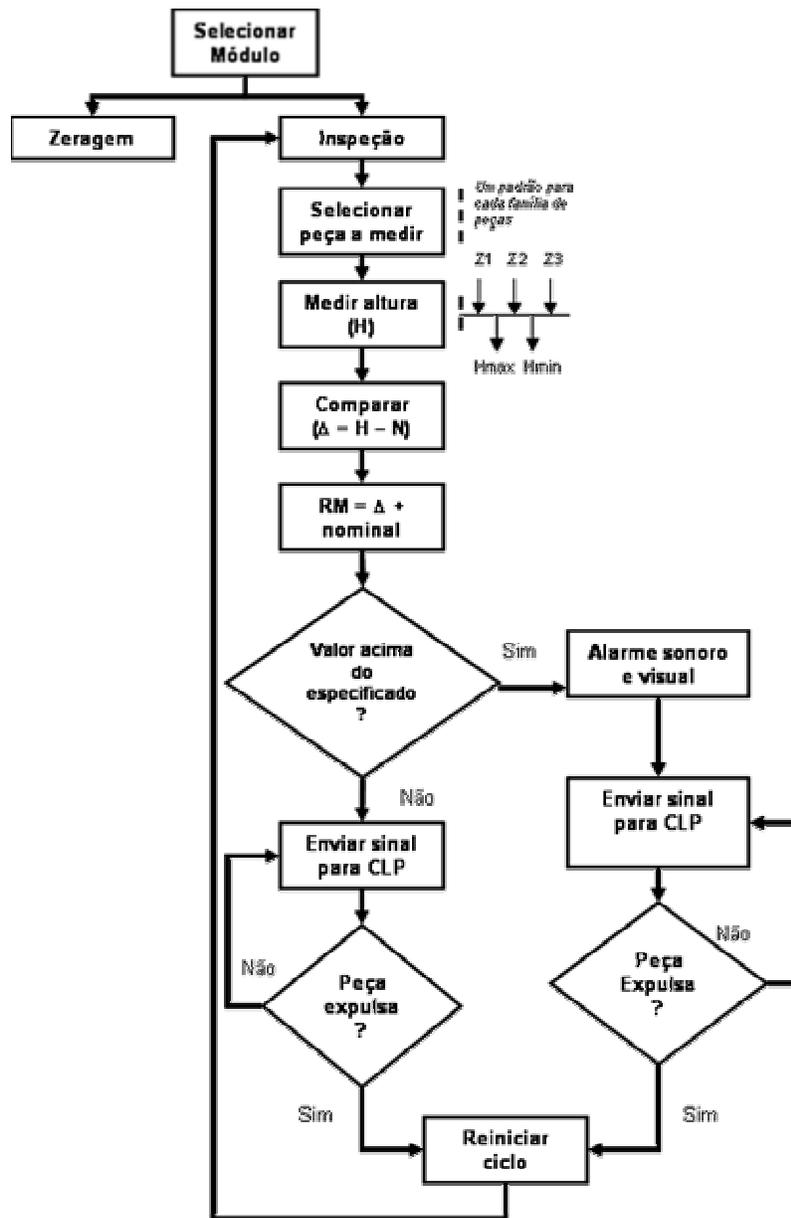


Figura 4.28: Fluxograma – Algoritmo do modo de inspeção.

Por trás do software existe um processamento matemático-geométrico através do qual são calculados os valores dos mensurandos  $H_{\max}$  e  $H_{\min}$ . Tal processamento segue a seguinte lógica: mediante as três alturas medidas pelos transdutores ( $z_1$ ,  $z_2$  e  $z_3$ ) cria-se um plano. Por intermédio desse plano é possível encontrar o erro de paralelismo (ou inclinação com relação a um plano horizontal) do arraste. Assim, extrapolam-se os valores das alturas para o raio da região de trabalho dos roletes (local onde devem ser tiradas as alturas). Dessa maneira, encontram-se matematicamente os valores máximo e mínimo da altura do arraste. A Figura 4.29 ilustra de forma sucinta as afirmações das linhas antecedentes.

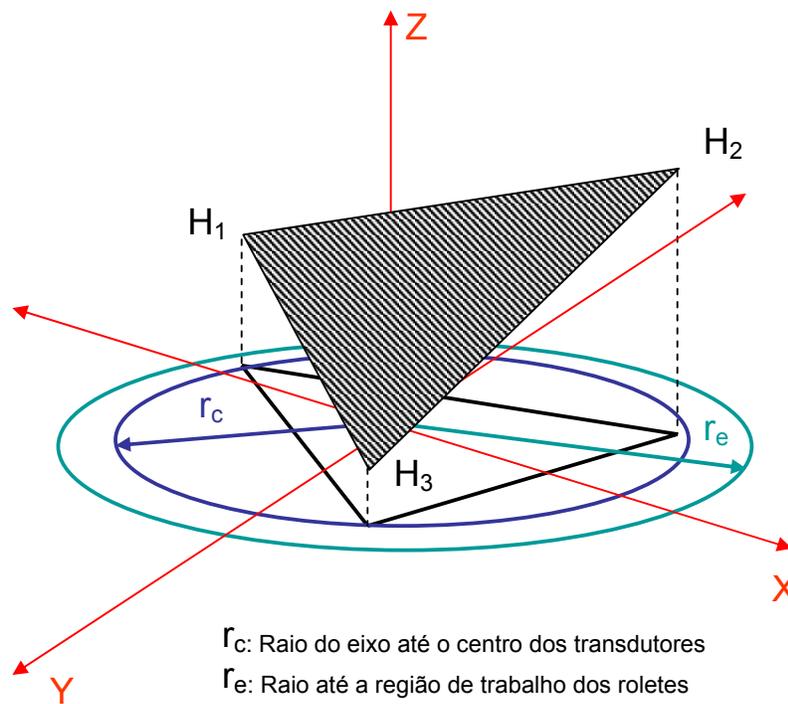


Figura 4.29: Ilustração do processamento matemático-geométrico utilizado na determinação das alturas máxima e mínima.

## 4.6 Fabricação e Aquisição de Componentes Especiais

Após algumas interações, o grupo de projeto, com o auxílio de um fabricante especializado em mecânica de precisão, obteve êxito no que diz respeito à fabricação dos componentes mecânicos. A foto abaixo ilustra o sistema de medição automático, montado de forma parcial. É importante destacar a presença de alguns componentes mecânicos de *prateleira*, adquiridos junto a fabricantes especializados. Tais componentes estão listados na Tabela 4.12 e indicados na Figura 4.30.

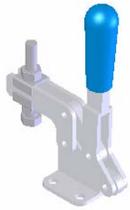
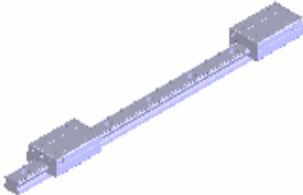
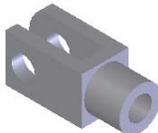
Componente	Função	Detalhe
1. Grampo de fixação' DE-STA-CO EMA [39]	Fixação do cubo central e setup rápido do sistema de medição.	
2. Guia de esferas THK [40]	Estabelecer guia para os componentes móveis (cabeçote de medição e pino de fixação)	
3. Articulação do atuador SMC [41]	Articular o atuador em sua posição definida.	
4. Forquilha do atuador SMC [41]	Conectar o atuador ao sistema adjacente (medição ou fixação)	

Tabela 4.12 Componentes mecânicos Standard.

Alguns desses componentes foram fundamentais no que se refere ao atendimento do requisito “*setup rápido*”:

- o grampo de fixação permitiu que os cubos centrais fossem trocados – conforme mudam os modelos das peças – de forma rápida e eficiente;
- a guia ou trilho, além de restringir um grau de liberdade do cubo central contribuiu com a repetitividade do sistema como um todo.

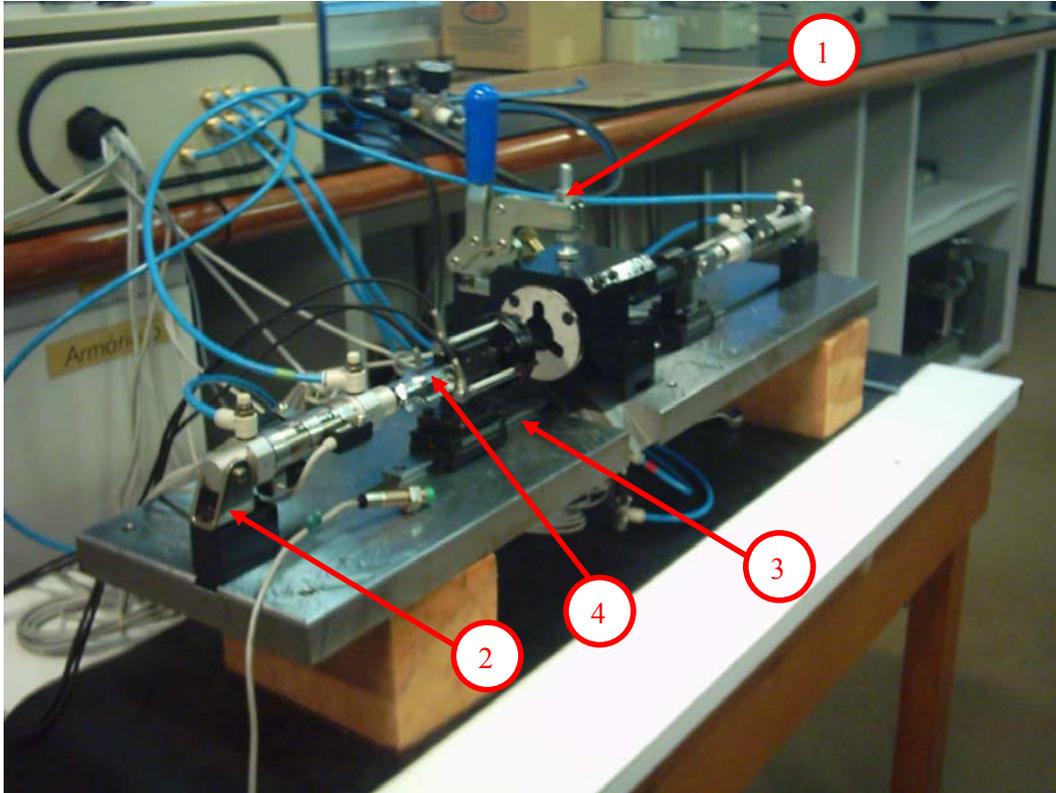


Figura 4.30: Foto do sistema de medição automático parcialmente montado.

## 4.7 Integração e Testes

### 4.7.1 Qualificação

No intuito de dar início aos testes de qualificação e avaliação do dispositivo, fez-se necessária a integração provisória dos blocos funcionais individuais do DM automático. Para tanto se montou uma bancada experimental. Tal bancada está apresentada na foto da Figura 4.31, onde estão detalhados seus componentes, a saber:

1. Entrada do ar comprimido;
2. Filtro regulador de vazão;
3. Painel eletro-pneumático;
4. Unidade de condicionamento do sinal;
5. Micro computador;
6. Sistema de medição.

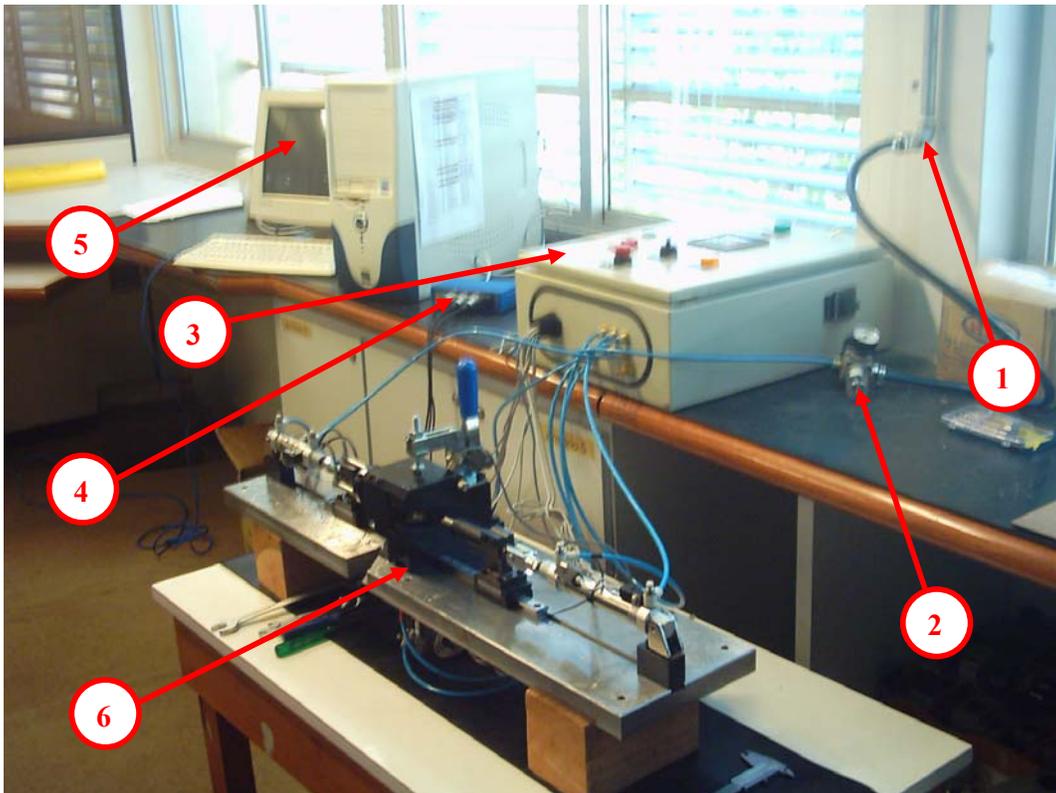


Figura 4.31: Bancada experimental utilizada na integração dos blocos funcionais do dispositivo para medição do arraste.

Antes de dar continuidade às atividades de integração e teste, foi necessário acoplar os transdutores, de forma adequada, no cabeçote de medição (Figura 4.32). O requisito principal era montá-los de maneira que seu curso pudesse cobrir todas as especificações de altura possíveis. Nesse caso, estabeleceu-se uma distância padrão (7,20 mm) da extremidade dos transdutores até o ponto de contato entre o cabeçote de medição e o

plano de referência da peça a ser medida. Assim, a posição central dos transdutores (zero da escala absoluta) ficou em 9,2 mm. Para tanto, se fez uso de um bloco padrão e de uma base retificada. Com esses recursos, todos os transdutores puderam ser posicionados o mais próximo possível da anteriormente mencionada distância padrão.

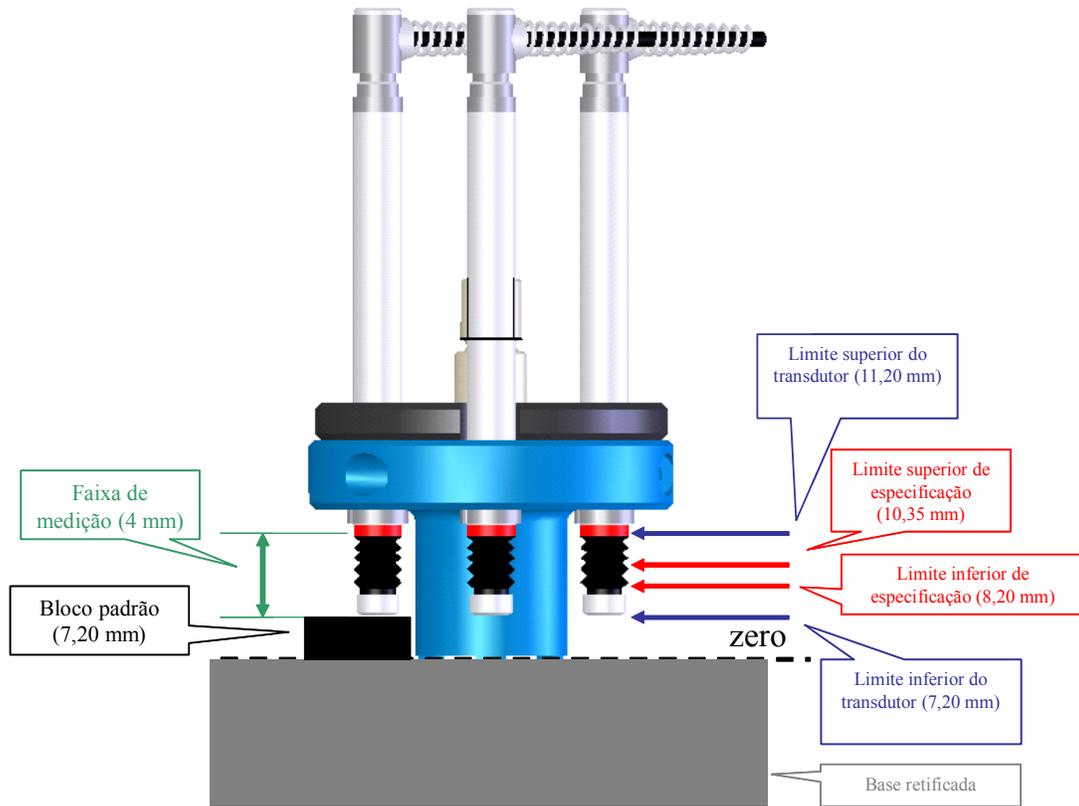


Figura 4.32: Posicionamento dos transdutores na distância padrão.

Na foto da Figura 4.33 ilustram-se os componentes utilizados durante a operação de posicionamento dos transdutores no cabeçote de medição.

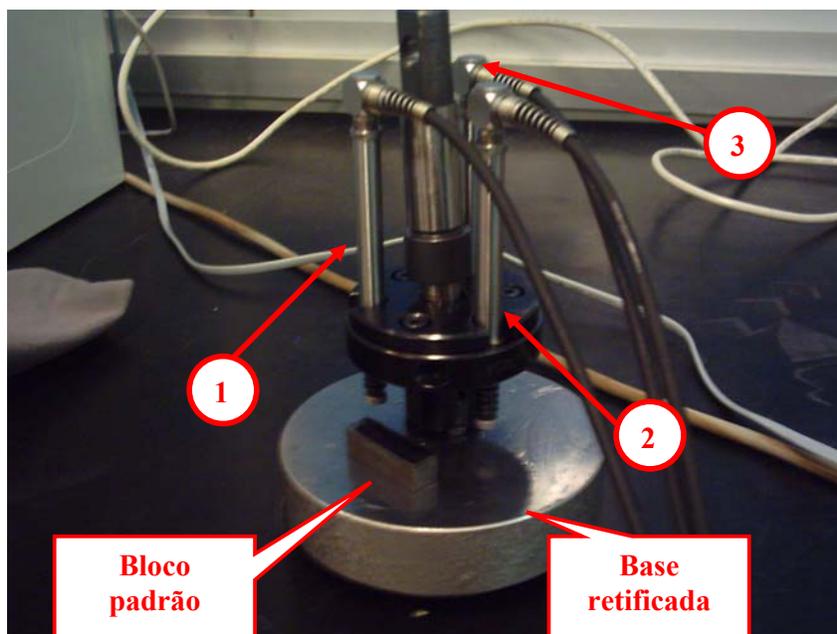


Figura 4.33: Foto do cabeçote de medição para a peça dos estudo de caso.

Logo em seqüência deu-se início à avaliação da estabilidade [29] dos transdutores. É importante ressaltar que a utilização de uma peça normal de linha – substituindo o padrão - trouxe algumas implicações negativas (apresentadas no parágrafo subsequente). Uma análise mais detalhada dos resultados mostrou o seguinte (Tabela 4.13<sup>2</sup>):

Canal	Desvio padrão da repetitividade
1. Transdutor Esquerdo	0,0211 mm
2. Transdutor Central	0,0205 mm
3. Transdutor Direito	0,0206 mm

Tabela 4.13: Repetitividade dos transdutores indutivos.

Os resultados obtidos (Figura 4.34) – correspondentes respectivamente ao transdutor esquerdo, central e direito - sinalizaram que os três transdutores medem com erros aleatórios [29] semelhantes. Isso significa que os fatores de ruído estão influenciando de forma quase que igualitária nos três. Pôde-se observar também, que todos os valores caíram dentro dos limites de controle, o que aponta um processo de medição estável [7].

<sup>2</sup> Os números assinalados correspondem às indicações da Figura 4.33.

Um ponto negativo da análise foi o de que o desvio padrão de repetitividade ficou aquém do que se imaginava inicialmente (constatou-se mais tarde que essa foi a principal consequência negativa da utilização de uma peça normal de linha). Isso tem origem em possivelmente um fator: os erros de planeza e paralelismo do arraste foram copiados e transmitidos aos resultados das medições. Ou seja, tais resultados estavam contaminados com os erros inerentes à própria peça medida.

Seqüencialmente, decidiu-se medir a mesma peça (por 10 vezes seguidas) sem realimentar o sistema, ou seja, a mesma ficou fixa no cubo central enquanto o cabeçote efetuava as medições (análise da repetitividade). Os resultados obtidos confirmaram as suspeitas anteriores. O erro de repetitividade estava menor que a própria resolução dos transdutores (0,001 mm), sugerindo que tal erro conferia com as especificações dos referidos transdutores ( $\leq 0,20 \mu\text{m}$  para  $2,77\sigma^3$ ).

---

<sup>3</sup> Valor obtido do manual de especificações técnicas dos transdutores.

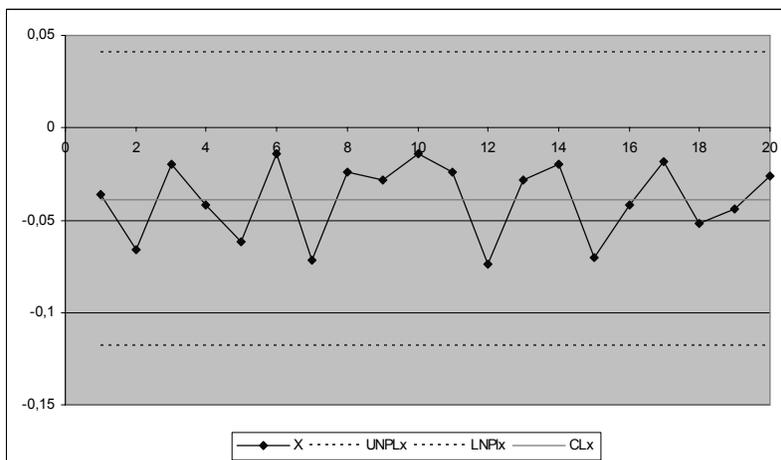
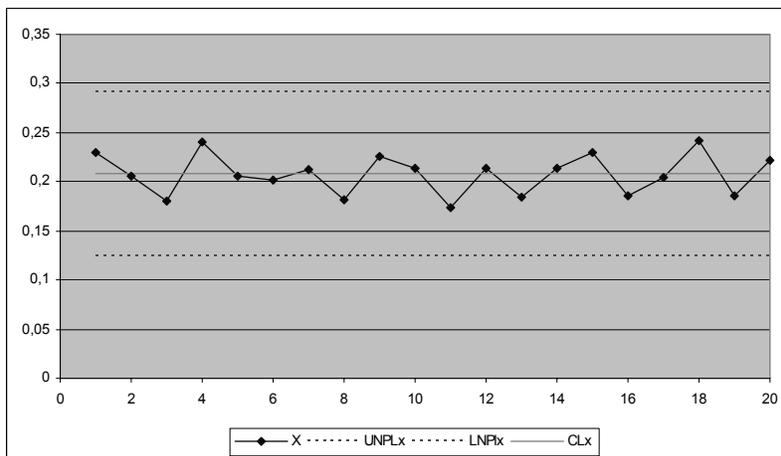
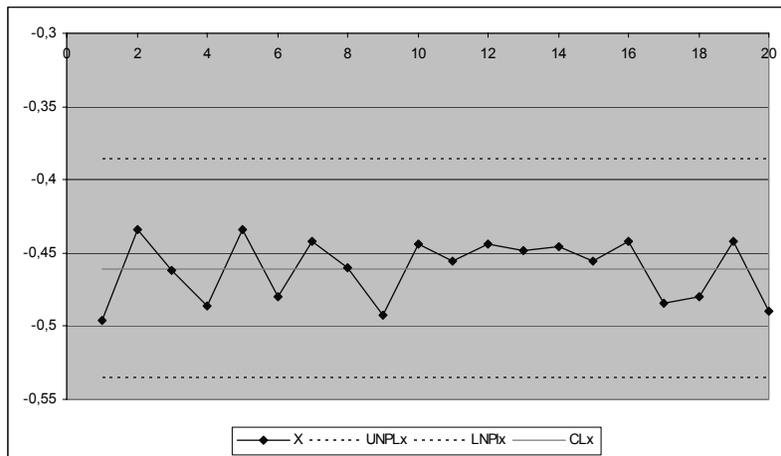


Figura 4.34: Resultados gráficos da avaliação da repetitividade dos transdutores.

Após a análise da repetitividade dos transdutores procederam-se as avaliações das funções alimentação, fixação, medição e expulsão da peça. Em seqüência o software para automação e controle da medição foi integrado aos demais blocos funcionais.

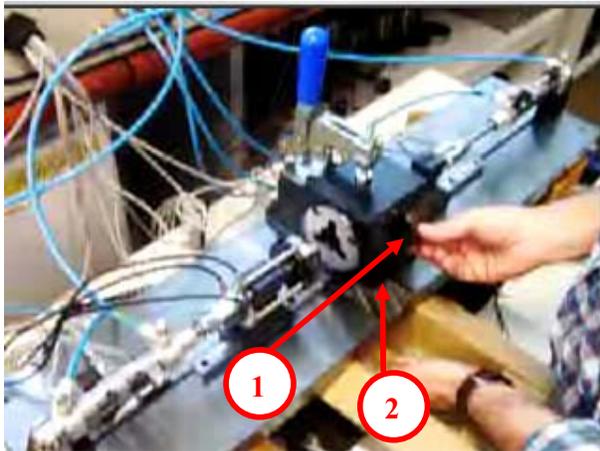
Antes de qualquer comentário a respeito da avaliação dos blocos funcionais é importante mostrar em detalhes o seu funcionamento. As fotos da Figura 4.35 dão uma idéia a respeito disso. Nela está apresentado um ciclo completo de medição. Os números circulados na mesma figura são descritos passo a passo a seguir:

- Foto 1: A peça um é alimentada (1) enquanto uma outra peça, peça dois, está sendo expulsa do cubo (2);
- Foto 2: O sistema de fixação e transporte avança e prende a peça um contra uma placa frontal (3), enquanto isso a peça dois está sendo posicionada na entrada do cubo para ser alimentada (4);
- Foto 3: O cabeçote de medição avança e procede com a medição da peça (5);
- Foto 4: O cabeçote de medição e o sistema de alimentação recuam (nessa ordem) e a peça 1 é expulsa (6) para que o ciclo possa se reiniciar.

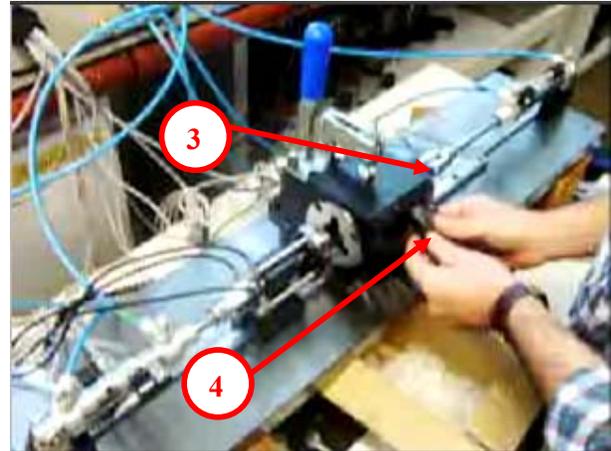
Com respeito à avaliação dos blocos funcionais, alimentação, fixação e transporte, medição e expulsão cabem os seguintes comentários:

- Embora a alimentação ainda não tivesse sua configuração final (calha de alimentação), pôde-se ter uma idéia de sua efetividade. Com respeito a isso se detectou um pequeno problema na entrada das peças, o sensor indutivo que faz detecção dessas, apresentou algumas deficiências no que se refere a sua mudança de estado. Isto foi resolvido com uma alteração simples na lógica do CLP, ou seja o ciclo se inicia apenas com uma comutação imediata do referido sensor, não sendo necessário que este permaneça comutado;

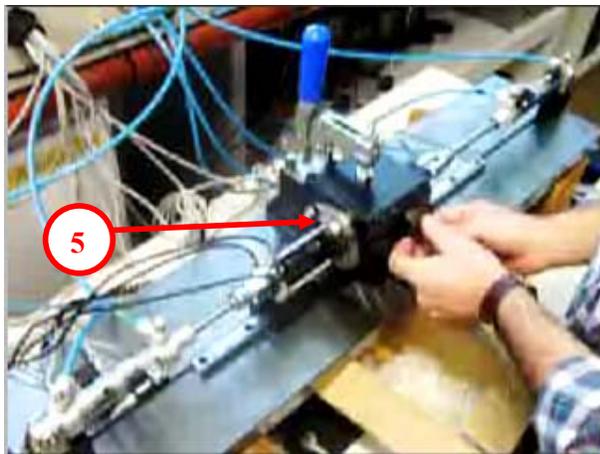
- Quanto aos trabalhos de fixação transporte não se encontrou nenhum tipo de problema. Esse processo se deu tal qual foi projetado e simulado;
- Com respeito à medição, não foram detectados problemas no que se refere ao trabalho mecânico desse bloco funcional.
- Finalmente, a peça, em sua expulsão, se comportou da forma esperada. Exceto em algumas ocasiões em que esta ficou presa na saída do cubo, situação que foi contornada com a adição de uma calha de saída especial.



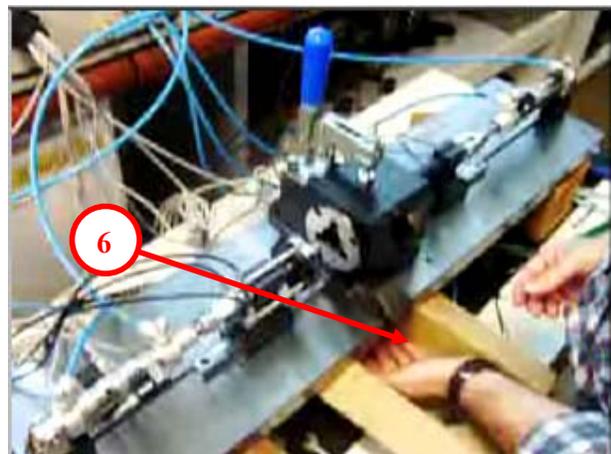
(Foto 1)



(Foto 2)



(Foto 3)



(Foto 4)

Figura 4.35: Ilustração de um ciclo completo de medição.

Ao passo em que eram realizadas as atividades laboratoriais de testes e integração, os componentes complementares do SM estavam sendo fabricados. Com a conclusão dos testes em laboratório o dispositivo foi enviado para que fosse integrado a tais componentes (i.e. bancada ergonômica, bandejas e calhas). Com isto, montou-se o sistema em sua bancada ergonômica. A Figura 4.36 ilustra o sistema de medição montado na referida bancada ergonômica.



Figura 4.36: Foto do sistema de medição automático.

#### **4.7.2 Avaliação metrológica final**

Foi visto, no capítulo 3, que ao término da qualificação o dispositivo de inspeção deve passar por uma avaliação metrológica final. Nesta avaliação são estabelecidos indicadores da “eficiência do sistema de medição” que determinam a sua liberação (o dispositivo estará apto para operação quando os resultados das avaliações estiverem em sintonia com os requisitos estabelecidos nas normas vigentes [14]). Colocou-se anteriormente que um desses indicadores seria justamente o confronto da incerteza de

medição expandida combinada com o valor da tolerância da característica medida. Assim, o dispositivo seria classificado como:

- capaz quando  $\frac{U_{95\%}}{Tol} \leq \frac{1}{10}$ ;
- marginalmente capaz quando  $\frac{U_{95\%}}{Tol} \geq \frac{1}{5}$ .

Neste sentido foram coletados dados segundo os seguintes critérios:

- avaliação dos dois mensurandos ( $H_{\max}$  e  $H_{\min}$ );
- medição (dez repetições) de um dos padrões de zeragem do dispositivo;
- medição de cinco peças do mesmo modelo, com cinco repetições cada.

Os dados coletados da medição do padrão forneceram subsídios para estimar a incerteza padrão associada ao processo de zeragem<sup>4</sup>, neste caso encontrou-se<sup>5</sup>:

$$u_{zeragem} = 2,785 \mu m \text{ para } H_{\max} \text{ e}$$

$$u_{zeragem} = 2,564 \mu m \text{ para } H_{\min}.$$

De forma análoga, a coleta dos valores resultantes das medições com as cinco peças viabilizou a estimativa da incerteza associada a repetitividade do SM para as duas alturas. Obteve-se assim:

$$u_{rep} = 7,258 \mu m \text{ para } H_{\max} \text{ e}$$

$$u_{rep} = 12,442 \mu m \text{ para } H_{\min}.$$

---

<sup>4</sup> Neste caso apenas foi considerada a repetitividade.

<sup>5</sup> No momento da conclusão deste documento o dispositivo de inspeção ainda passava pelos seus últimos ajustes. O autor sugere que, ao final do processo de ajuste, haverá uma melhoria significativa nesses valores.

Com as incertezas relativas à zeragem e à repetitividade estimadas, procedeu-se então com o balanço final de incertezas, apresentado nas tabelas seguintes.

Fontes de Incerteza		Efeitos Sistemáticos	Efeitos Aleatórios				
Símbolo	Descrição	Correção [μm]	Valor Bruto [μm]	Distribuição	u [μm]	k	n
$u_{geo}$	Geometria		1,000	Normal	0,500	2,000	∞
$u_{temp}$	Temperatura		1,100	Retangular	0,636	1,730	∞
$u_{der}$	Deriva		1,250	Retangular	0,723	1,730	∞
$u_{linear}$	Linearidade		2,500	Retangular	1,445	1,730	∞
$u_{zer}$	Zeragem		6,300	Normal	2,785	2,262	9
$u_{rep}$	Repetitividade		14,980	Normal	7,258	2,064	24
$u_c$	Incerteza Padrão Combinada				7,479	2,060	26
<b>U</b>	<b>Incerteza Expandida Combinada</b>				<b>15,407</b>		

Tabela 4.14: Balanço final de incertezas para Hmax.

Fontes de Incerteza		Efeitos Sistemáticos					
Símbolo	Descrição	Correção [μm]	Valor Bruto [μm]	Distribuição	u [μm]	k	n
$u_{geo}$	Geometria		1,000		0,500	2,000	∞
$u_{temp}$	Temperatura		1,100		0,636	1,730	∞
$u_{der}$	Deriva Térmica		1,250		0,723	1,730	∞
$u_{linear}$	Linearidade		2,500		1,445	1,730	∞
$u_{zer}$	Zeragem		5,800		2,564	2,262	9
$u_{rep}$	Repetitividade		25,680		12,442	2,064	24
$u_c$	Incerteza Padrão Combinada				12,572	2,000	∞
<b>U</b>	<b>Incerteza Expandida Combinada</b>				<b>25,145</b>		

Tabela 4.15: Balanço final de incertezas para Hmin.

No balanço final foram desconsideradas as fontes relativas à planeza, à repetitividade dos transdutores e à resolução destes últimos, devido ao entendimento de que o erro de repetitividade do dispositivo de medição já engloba essas fontes de variação, assim:

$$u(H_{max}) = \sqrt{u_{geom}^2 + u_{temp}^2 + u_{der}^2 + u_{linear}^2 + u_{resol}^2 + u_{zeragem}^2 + u_{repet}^2}$$

No caso da altura máxima (Hmax) encontrou-se:

$$U_{95\%} = k \cdot u(H_{max}) = 15,407 \mu m .$$

O que resulta nas relações:

$$\frac{U_{95\%}}{Tol_1} = \frac{15,407}{300} \cong \frac{1}{20} \quad e$$

$$\frac{U_{95\%}}{Tol_2} = \frac{15,407}{200} \cong \frac{1}{13} .$$

Para a altura mínima obteve-se:

$$U_{95\%} = 25,145 \mu m .$$

Resultando em:

$$\frac{U_{95\%}}{Tol_1} = \frac{25,145}{300} \cong \frac{1}{14} \quad e$$

$$\frac{U_{95\%}}{Tol_1} = \frac{25,145}{200} \cong \frac{1}{8} .$$

Os resultados mostraram que o dispositivo de inspeção geométrica está consistente com os requisitos relativos à incerteza de medição. Entretanto, as diferenças entre os erros de repetitividade relativos às alturas máxima e mínima, foram transmitidas para a incerteza padrão combinada, resultando em discrepâncias nos valores das incertezas combinadas expandidas. O autor julga que tais diferenças são devidas às características das peças, já que essas diferenças não aparecem na zeragem.

Vale ressaltar que os balanços de incertezas acima estão consistentes com requisitos estabelecidos em [15].

## 4.8 Análises dos Resultados Obtidos no Estudo de Caso

Como resultado final ao processo de desenvolvimento o dispositivo projetado atendeu cerca de 85% das necessidades estabelecidas pelos clientes e *stakeholders*. Na Tabela 4.16 estão listadas as necessidades interpretadas nas etapas preliminares do projeto, à última coluna estão marcadas apenas as necessidades atendidas. Este último indicador é animador uma vez que as necessidades não atendidas (destacadas em cinza) não eram prioritárias para o projeto<sup>6</sup>. Conclusivamente, o autor considera que o método foi aplicado com sucesso, o que vem a confirmar a importância dos processos organizados de projeto e desenvolvimento de produtos, notadamente produtos metrológicos. Percebeu-se, com este trabalho, que a identificação das necessidades (incluindo a documentação das mesmas), passando pela geração de especificações e criação de conceitos referenciados nessas especificações eleva de sobremaneira as chances de sucesso do produto final.

1	O dispositivo possui propriedades metrológicas adequadas	5	x
2	O dispositivo é geometricamente compatível com os tipos de peças a serem medidas.	5	x
3	O dispositivo é sensível às variações da peça	5	x
4	O dispositivo é robusto à variação de temperatura	5	x
5	As medidas feitas com o dispositivo são rastreáveis	5	x
6	O dispositivo classifica as peças de forma confiável	5	x
7	O dispositivo fornece informação adequada para <i>setup</i> do processo de torneamento.	4	x
8	O dispositivo fornece informação para construir cartas de controle de média e amplitude.	4	x
9	O dispositivo é robusto às variações ambientais (vibrações, ruídos elétricos, umidade, poeira, agentes corrosivos...).	5	x
10	O dispositivo inspeciona a peça após a segunda operação de torneamento.	5	x
11	O dispositivo garante a uniformidade e integridade das peças a serem inspecionadas.	5	x
12	O dispositivo é ergonômico.	4	x
13	O tempo de medição é adequado ao ciclo de produção.	4	x
14	O dispositivo opera com distintos tornos CNC.	3	
15	As dimensões do dispositivo atendem os requisitos do novo layout dos tornos CNC.	4	x
16	O dispositivo é transportável.	4	x
17	O dispositivo possui sistema de limpeza de peças automático	2	
18	O dispositivo é elétrica e eletronicamente seguro (blindagem, aterramento, compatibilidade eletromagnética).	5	x
19	O dispositivo possui alimentação automática.	2	
20	O dispositivo possui rápido <i>setup</i> (adequação à peça a ser inspecionada).	4	x
21	O dispositivo expulsa a peça automaticamente e separa as n.c.	3	

<sup>6</sup> Para uma descrição detalhada dos pesos fornecidos às importâncias relativas vide Tabela 4.4.

22	O dispositivo avisa da aparição de peça n.c.	5	x
23	O dispositivo é simples e de fácil manutenção e operação.	4	x
24	O dispositivo possui <i>preset</i> (zeramento) automático.	3	x
25	O dispositivo gera relatórios de n.c. (diário de bordo automático).	3	x
26	O dispositivo terá comunicação com o CNC.	2	
27	O dispositivo não possui componentes com dimensões reduzidas em grandes quantidades.	2	x
28	Os materiais utilizados estão em acordo com as normas específicas.	5	x
29	O dispositivo está construído com peças intercambiáveis.	5	x
30	Os componentes são recomendados pelo fabricante do dispositivo.	5	x
31	As documentações (manuais, procedimentos, desenhos, certificados) acompanham o dispositivo.	5	x
32	O projeto dimensional básico do dispositivo estará pronto até o dia 20 de março de 2003.	4	x
33	O dispositivo possui uma relação custo/benefício satisfatória.	5	x

Tabela 4.16: Listas das necessidades atendidas e não atendidas.

É importante ainda colocar que, a esta altura, estavam sendo elaborados os procedimentos de medição e de calibração do dispositivo, documentos sugeridos ao longo da descrição do método. Na figura abaixo se ilustra um extrato do manual<sup>7</sup> desenvolvido para o SM do exemplo.

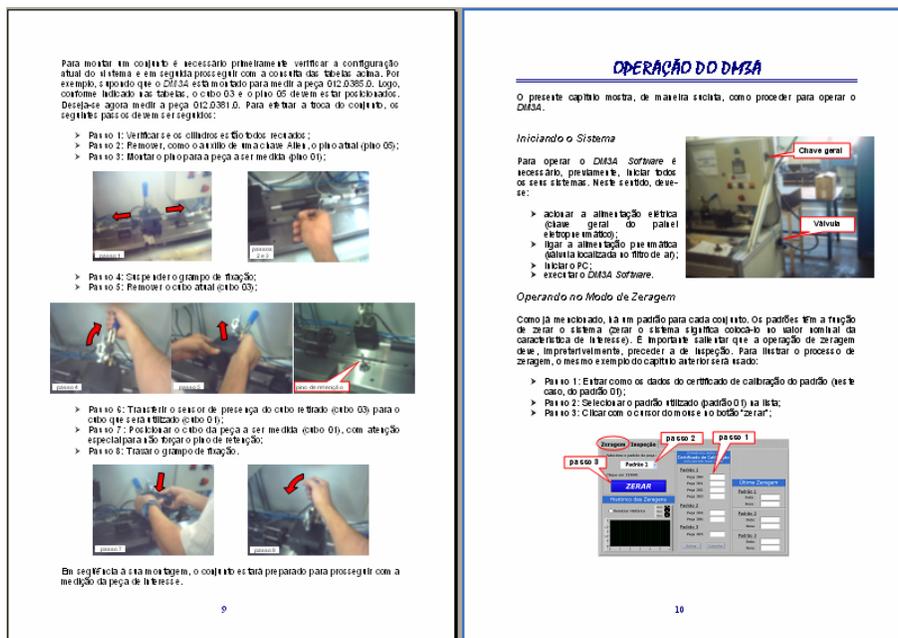


Figura 4.37: Extrato do manual do usuário desenvolvido para o SM do exemplo.

<sup>7</sup> Inseridos em tal manual estão os procedimentos de medição e calibração.

No capítulo subsequente serão apresentadas as conclusões finais bem como algumas sugestões de oportunidades de melhorias.

# CAPÍTULO 5

---

## Conclusões e Oportunidades de Melhoria

O método proposto fornece um direcionamento para os projetistas de dispositivos de medição. A intenção principal é viabilizar a sistematização do processo de projeto de dispositivos metrológicos bem como voltar suas especificações para o atendimento das necessidades dos clientes finais.

Através da utilização de ferramentas simples tais como a matriz de necessidades versus especificações, a estrutura de função, as matrizes de decisão, etc., a sistemática favorece a documentação do processo de desenvolvimento, fornecendo rastreabilidade às decisões.

A aplicação de métodos de avaliação da performance metrológica (e.g. a avaliação de incerteza de medição) desde as primeiras etapas do projeto, permite implementar um esquema de garantia preventiva da qualidade, aumentando a probabilidade de atender os requisitos metrológicos no produto final.

No entanto, o autor que subscreve deseja ressaltar a necessidade de se julgar criticamente quais ferramentas devem ser aplicadas em cada caso. A burocratização excessiva do processo de desenvolvimento aumenta os custos e os prazos, sem melhorar a qualidade do produto final.

Com respeito ao processo de integração entre os elementos de controle e automação mecânica e os elementos de controle e automação da medição valem os seguintes comentários:

- A estrutura criada nesse sentido pode ser extrapolada para níveis superiores. O controle dos vários sistemas de medição presentes em uma única célula de manufatura é algo tangível.
- Adicionando-se um ou outro componente de instrumentação é possível que se tenha acesso a esses vários instrumentos, por exemplo, através da Intranet de uma determinada empresa.
- O monitoramento remoto pode atingir patamares ainda mais expressivos. Existem softwares que possibilitam o acesso a sistemas de medição ou controle, por meio da Internet. Isso nos coloca em uma dimensão global do controle de processos, onde os gerentes de produção poderão, durante suas viagens de trabalho, monitorar vários processos de fabricação presentes em uma ou mais células de manufatura.

A Figura 5.1 ilustra o que foi sugerido nos itens antecedentes.

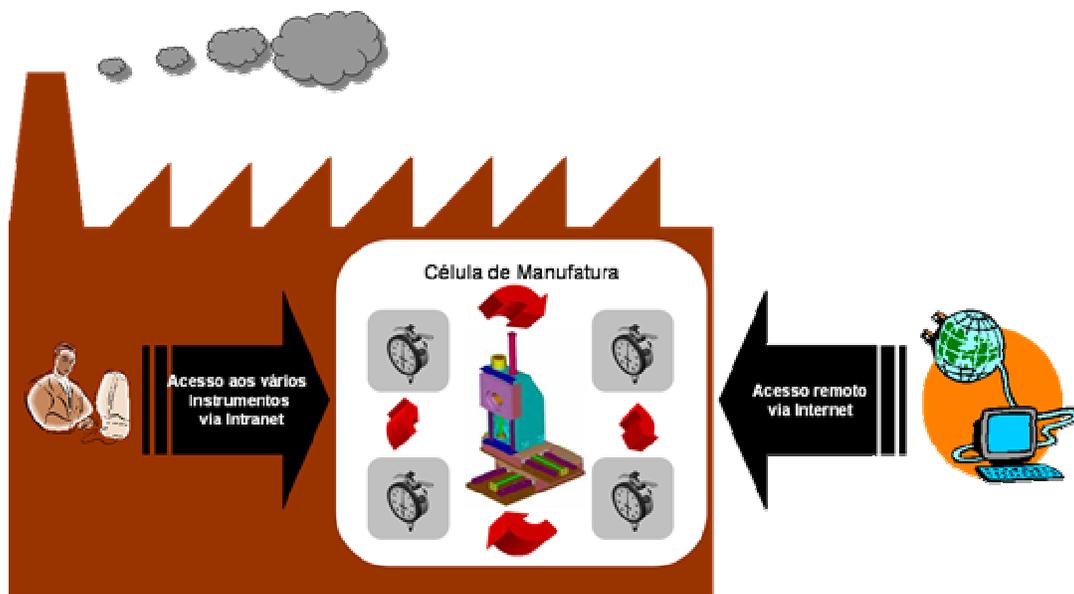


Figura 5.1: Possibilidades de controle monitoramento de vários instrumentos de medição.

É importante ainda expressar a importância dos projetos de parceria entre empresas privadas e universidade. Especialmente, no caso a que se refere esta dissertação, percebeu-se que tal parceria trouxe benefícios para ambos os lados. Pelo lado da organização privada houve criação de conhecimento interno que poderá vir a catalisar o seu desenvolvimento tecnológico. Já pelo lado da instituição pública houve um esforço no sentido de criar soluções cada vez mais inovadoras, o que poderá não apenas acelerar o crescimento da instituição como também contribuir para o desenvolvimento da região e do país.

Vale também ressaltar que projetos com alto nível de complexidade demandam a presença de competências diversas. A implementação de uma equipe multifuncional, no caso atual, foi essencial para o fomento do processo de desenvolvimento.

Adicionalmente, o autor gostaria de frisar que os tempos e prazos para conclusão de projetos devem ser planejados de forma minuciosa, evitando assim o aparecimento de inconvenientes e atrasos.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] M. W. Pereira, *Desenvolvimento de Dispositivos de Medição para Controle Geométrico*, Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, maio 1991.
- [2] J. M. Juran, F. M. Gryna, *Controle da Qualidade Handbook – Ciclo dos Produtos: Inspeção e Teste*, Makron Books do Brasil Editora Ltda. 1992.
- [3] G.D. Donatelli, *Capacidade dos Sistemas de Medição para Tarefas de Inspeção 100%*, Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis, maio 1999.
- [4] INMETRO/VIM, *VIM – Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia*, Rio de Janeiro: INMETRO/DIMCI, 52p. 1995.
- [5] F. T. Farago, M. A. Curtis, *Handbook of Dimensional Measurement – Third Edition*, New York, 1994.
- [6] N. Slack, S. Chambers, C. Harland, A. Harrison, R. Johnston, *Administração da Produção*, São Paulo: Atlas, 1997.
- [7] QS 9000/ MSA, *MSA - Análise dos sistemas de medição: manual de referência*, 3a. ed. Americana, Março de 2002.
- [8] Mike Bexter, *Projeto de Produto: guia prático para o desenvolvimento de novos produtos*. São Paulo: Chapman & Hall, 1995.
- [9] Edward B. Magrab, *Integrated Product and Process Design and Development: the product realization process*. New York: CRC Press, 1997.
- [10] John R. Lindbeck, Robert M. Wygant. *Product Design and Manufacture*. New Jersey: Prentice Hall, 1994.
- [11] John M. Usher, Utpal Roy, Hamid R. Pansaei, *Integrated Product and Process Development: methods, tools and technologies*. New York: John Wiley, 1998.
- [12] K. T. Ulrich, S. D. Eppinger, *Product Design and Development*, McGraw-Hill, 1995.

- [13] E. O. Doebelin, *Measurement Systems Application and Design*, McGraw-Hill Book Company, Third Edition, USA 1983.
- [14] ISO 14253-2, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 2: Guide to the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification*, International Organization for Standardization, Geneva 1998.
- [15] ISO, *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. Segunda Edição Brasileira do, Edição Revisada (agosto de 1998).
- [16] V. Mudronja, B. Runje, S. Medić, *Examples of Applying Monte Carlo Simulation in the Field of Measurement Uncertainties of the Standard Length*, XVII IMEKO World Congress Metrology in the 3rd Millenium June 22-27, 2003, Dubrovnik, Croatia.
- [17] M.G. Cox, P. Dainton, A.B. Forbes, P.M. Harris, *Use of Monte Carlo Simulation for Uncertainty Evaluation in Metrology*, Advanced Mathematical and Computational Tool in Metrology V, World Scientific Publishing Company (pp. 93-105), 2001.
- [18] A. P. Filho, B. Di Giacomo, *Uncertainty Evaluation in Small Angle Calibration Using ISO GUM Approach and Monte Carlo Method*. XVII IMEKO World Congress Metrology in the 3rd Millenium June 22-27, 2003, Dubrovnik, Croatia.
- [19] S. Nuccio, C. Spataro, *Approches to evaluate the virtual instrumentation measurement uncertainties*, IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol 51, no 6, December 2002.
- [20] A. Bollmann, *Fundamentos da Automação Industrial Pneutrônica*, ABHP, São Paulo 1997.
- [21] G. Höhne, *Projeto de componentes mecânicos de precisão*, Apostila do curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, EMC/UFSC, 1991.
- [22] A. F. de Souza, R. T. Coelho, *Tecnologia CAD/CAM - Definições e estado da arte visando auxiliar sua implantação em um ambiente fabril*, XXIII Encontro Nacional de Eng. de Produção, Ouro Preto, MG, Brasil, 21 a 24 de outubro de 2003.

- [23] P. Bennich, *Conflicts in the Interface between Design and Manufacturing*, Seminário: A Medida da Qualidade e Produtividade, Fundação CERTI, Florianópolis, março de 2003
- [24] ISO/FDIS 1101, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical Tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run*, Draft 2002.
- [25] G. Concheri, I. Cristofolini, R. Meneghello, G. Wolf, *Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T) versus Geometrical Product Specification (GPS)*, XII ADM International Conference, Italy, 2001.
- [26] V. M. Neto, *Metodologia para Garantia da Confiabilidade no Desenvolvimento de Produtos Mecatrônicos*, Tese de Doutorado, maio 2002.
- [27] J. M. Juran, F. M. Gryna, *Controle da Qualidade Handbook, Conceitos, Políticas e Filosofia da Qualidade*, Makron Books do Brasil Editora Ltda. 1991.
- [28] F. A. Lira, *Metrologia na Indústria*, Editora Érica Ltda, São Paulo 2001.
- [29] A. A. Gonçalves, *Apostila Metrologia – Parte I*, Curso de Pós Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Florianópolis 2001.
- [30] Webmecaauto, *Correio Técnico – Motor de Partida*, Disponível em: [http://www.webmecaauto.com/correio/ct07\\_partida.asp](http://www.webmecaauto.com/correio/ct07_partida.asp). Acesso em: 17/02/2004.
- [31] Bosch, *Curiosidades – Impulsor de Partida*, Disponível em: <http://www.bosch.com.br/br/autopecas/produtos/eletrica/curiosidades.htm>. Acesso 17/02/2004
- [32] D. J. Wheeler, *Understanding Statistical Process Control*, SPC Press, Knoxville, Tennessee, 1992.
- [33] Cooperinstruments, *LAT 100 / LDT 200 Series LVDT Displacement Transducers*. Disponível em: <http://www.cooperinstruments.com/pdf/latldt.pdf>. Acesso em: 10/02/2004.
- [34] ISO 6432, *Pneumatic fluid power -- Single rod cylinders -- 10 bar (1 000 kPa) series -- Bores from 8 to 25 mm -- Mounting dimensions*, Geneva 1985.

- [35] FESTO, Programa de Fornecimento 2001/2002, FESTO Brasil 2ª Edição, São Paulo 2001.
- [36] Unitronics, *M90 Micro OPLC User Guide*, Copyright Unitronics.
- [37] Marposs, *Easy Box™ Software for the Windows® operating system*, Copyright Marposs S.P.A., 2002.
- [38] PET Automação e Metrologia, Software para Automação de um Sistema de Medição, Departamento de Engenharia Mecânica UFSC, 2004.
- [39] DE-STA-CO EMA, *Soluções Completas em Sistemas de Fixação – Catálogo de Produtos*, São Paulo, Edição Junho de 2002.
- [40] THK, *General Catalog*, Tóquio Japão, 2000.
- [41] SMC, *Catálogo de Produtos*, São Paulo, Copyright SMC.

# ANEXO A

---

## *Check Lists* para Entrevistas

<b>Operador CNC</b>
1. Que tarefas o dispositivo de inspeção deveria fazer para que seu trabalho seja simplificado? <ol style="list-style-type: none"><li>Alimentação automática;</li><li>Expulsão automática com separação de não-conformes;</li><li>Alarme luminoso ou sonoro quando se acham peças não-conformes;</li><li>Parada da produção quando se acham peças não-conformes.</li></ol>
2. Quais as características das peças a inspecionar? <ol style="list-style-type: none"><li>Rebarbas;</li><li>Óleo;</li><li>Cavaco;</li><li>Batidas;</li><li>Temperatura.</li></ol>
3. Que características o dispositivo deveria possuir para que funcione no ambiente de uso?
4. Que problemas nas peças ou no processo de fabricação podem afetar a tarefa de inspeção?
5. Mostre como são inspecionadas as peças usando o dispositivo atual (todas as ações associadas, incluindo a limpeza).
6. Explique quais são os problemas e desconfortos associados ao uso do dispositivo de inspeção atual.
7. Qual o tempo necessário para inspecionar cada peça atualmente?
8. Como são dispostas as peças conformes e na-conformes?

9. Como sabe quando a máquina (fabricação) precisa ser ajustada e qual o valor do ajuste apropriado?

#### **Supervisor de Produção**

1. Quais os modelos de peças que o dispositivo deve inspecionar e quais as dimensões dessas peças?
2. Que tarefas o dispositivo deveria realizar
  - a. Alimentação automática;
  - b. Expulsão automática com separação de não-conformes;
  - c. Alarme luminoso ou sonoro quando se acham peças não-conformes;
  - d. Fornecer informações para construir cartas de CEP.
3. Que características o dispositivo deveria possuir para que funcione no ambiente de uso?
4. O dispositivo deveria atender mais de uma máquina?
5. Qual o nível de formação dos operadores que usarão o dispositivo?
6. Quantas peças precisam ser medidas por dia em média?
7. Qual o tempo disponível para medir cada peça?
8. Quais as conseqüências da parada do dispositivo de inspeção?
9. O que é feito com as peças refugadas?
10. Quais as principais “perdas” associadas à inspeção 100%?
11. Qual o principal empecilho que você enxerga no dispositivo atual?
12. Você acha que o dispositivo atual segura a produção das peças (gargalo)? Quanto poderia ser ganho de produtividade automatizando a inspeção?ais as características das peças a inspecionar?

#### **Técnicos em Metrologia**

1. Quais os requisitos que o dispositivo deve atender?
  - a. R&R (valor máximo);
  - b. Estabilidade;
  - c. Linearidade;
  - d. Incerteza de medição (valor máximo);

- e. Resolução;
- f. Faixa de medição;
- g. Temperaturas limite de operação.
2. O dispositivo será calibrado internamente? Caso sim, quais as limitações existentes para a calibração de dispositivos?
3. Existem antecedentes, na empresa, de dispositivos automáticos? Caso afirmativo, qual é a experiência?
4. Considera necessária a verificação periódica do dispositivo no chão de fábrica? Caso afirmativo, acha necessário automatizar a verificação? Qual o grau de automação?
5. Que documentação (manual, procedimentos) deve acompanhar o dispositivo?

#### **Técnicos de Instrumentação**

1. A manutenção do dispositivo será realizada internamente? Caso afirmativo, quais as limitações existentes em termos de equipamento e conhecimento?
2. Existem antecedentes, na empresa, de dispositivos automáticos? Caso afirmativo, qual é a experiência?
3. Qual o histórico de problemas com dispositivos similares a esses?
4. Quais componentes deveriam ser evitados?
5. Quais as marcas preferidas de instrumentos e componentes?
6. Quais operações ou tarefas deveriam ser evitadas?

#### **Técnicos de Processo**

1. Quais as informações necessárias para fazer o *setup* do processo de fabricação?
2. Qual a sua opinião a respeito de dispositivo de medição automático?
3. Como deve operar o dispositivo durante o *setup*?
4. Mostre como é feita a regulagem da máquina durante o *setup*.

### **Técnicos de Analistas da Qualidade**

1. Considera interessante que o dispositivo forneça informações para construir cartas de controle? Quais tipos de cartas?
2. Quais os valores extremos dos desvios achados nas peças?
3. Existem defeitos que pudessem comprometer a integridade de um dispositivo automático? Caso afirmativo, quais são e qual a frequência com que esses defeitos acontecem?

### **Coordenador da Qualidade**

1. Defina claramente as exigências do cliente final.
2. Qual a expectativa de crescimento na produção das peças inspecionadas?
3. Está prevista a aplicação do dispositivo para inspeção de outras peças? Caso afirmativo, quais as suas dimensões?
4. Qual o layout que será empregado às máquinas que fabricam as peças a serem inspecionadas?
5. É fisicamente viável que o dispositivo atenda simultaneamente várias máquinas?

### **Fabricante do Dispositivo**

1. Qual o tempo médio para fabricação de um dispositivo desse porte?
2. Quais as etapas críticas presentes em um processo de manufatura de um dispositivo desse porte?
3. Existem operações de usinagem ou tratamento térmico a serem evitadas?
4. Existem restrições nos materiais?
5. Quais os meios disponíveis para o controle da qualidade dimensional do dispositivo?