



Universidade Federal da Bahia
Instituto de Matemática
Departamento de Engenharia Mecânica

Mestrado em Mecatrônica

**UM MÉTODO DE PROJETO MECATRÔNICO PARA
AS NECESSIDADES DAS PEQUENAS E MÉDIAS
EMPRESAS**

TARSO BARRETTO RODRIGUES NOGUEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Salvador

Outubro de 2007

Universidade Federal da Bahia
Instituto de Matemática
Departamento de Engenharia Mecânica

TARSO BARRETTO RODRIGUES NOGUEIRA

**UM MÉTODO DE PROJETO MECATRÔNICO PARA
AS NECESSIDADES DAS PEQUENAS E MÉDIAS
EMPRESAS**

Trabalho apresentado ao Programa de Mestrado em
Mecatrônica do Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica.

Orientador: Herman Augusto Lepikson, Dr Eng.

Salvador

Outubro de 2007

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Bernadete Sinay Neves,
Escola Politécnica da UFBA

N778m Nogueira, Tarso Barreto Rodrigues
Um método de projeto mecatrônico para as necessidades das pequenas
e médias empresas / Tarso Barreto Rodrigues Nogueira. - Salvador, 2007.

155 f. : il.

Orientador : Prof.Dr. Eng. Herman Augusto Lepikson
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, 2007.

1.Projeto de produto. 2. Engenharia reversa I. Lepikson, Herman Augusto.
II.Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. III. Título.

CDD 20.ed. 658.5752

TERMO DE APROVAÇÃO

TARSO BARRETTO RODRIGUES NOGUEIRA

UM MÉTODO DE PROJETO MECATRÔNICO PARA AS NECESSIDADES DAS PEQUENAS E MÉDIAS EMPRESAS

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica, Universidade Federal da Bahia, pela seguinte banca examinadora:

Luis Gonzaga Trabasso _____
Doutor em Engenharia Mecânica, Loughborough University, England
Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA

Alberto Borges Vieira Júnior _____
Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia
Universidade Federal da Bahia

Herman Augusto Lepikson – Orientador _____
Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina
Universidade Federal da Bahia

Salvador, 11 de outubro de 2007

A Julio Verne

AGRADECIMENTOS

Especialmente, aos meus pais, a Dulce e Tici.

Ao professor Herman Augusto Lepikson.

À UFBA pela oportunidade e recursos para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas da Área de Projetos do SENAI CIMATEC e ao médico Antonio Bispo pela colaboração no estudo de caso.

Aos colegas do Laboratório de Metrologia do SENAI CIMATEC, em especial a Raimar Barbosa Santos.

Ao amigo Marcelo Porto Barreto.

À Secretaria do PPGM.

Aos colegas, professores e coordenadores do mestrado.

“As pessoas de sorte no mundo – as únicas pessoas de sorte no mundo para mim – são aquelas cujo trabalho é também um prazer.”

Sir Winston Churchill

trecho do discurso “A Caneta: Libertadora do Homem e das Nações”, *Author’s Club*,
Londres, 1908.

Tradução de Antonio Carlos Braga

RESUMO

A constante atualização do produto por meio de inovações, como resposta ou antevisão aos anseios dos clientes, é uma vantagem competitiva que garante à empresa industrial concorrer em pé de igualdade em um mercado exigente, seletivo e acessível. Nessa realidade de forte concorrência, o produto mecatrônico revela-se interessante ao empreendedor, pois, em geral, desperta expressiva curiosidade no mercado e é capaz de, integrando sinergicamente diversas disciplinas, reunir uma gama considerável de funções e atributos, facilitados pelo controle microprocessado, pela adoção de programas de computador para processamento de informações e por utilizar dispositivos mecânicos para permitir sua interação com o operador e o ambiente.

Desenvolver um novo produto mecatrônico não é algo trivial, demanda tempo e recursos consideráveis, investidos em equipamentos, programas de computador e, principalmente, em pessoal. A pequena e média empresa é uma organização cujas características operacionais e capacidade financeira dificultam ou impossibilitam o desenvolvimento próprio de produtos. Nesse contexto, a engenharia reversa mostra-se um meio promissor para desenvolver um novo produto a custo e prazo reduzidos e é utilizada como um dos pilares tecnológicos do método proposto.

Este trabalho propõe um método de projeto focalizado nas necessidades e potencialidades da pequena e média empresa e se baseia na utilização da engenharia reversa para concepção dos produtos mecatrônicos como alternativa aos métodos convencionais de projeto. O método foi sistematizado em quatro etapas básicas: o planejamento, o levantamento de dados do produto matriz, o reprojeto (tratado como reengenharia no desenvolvimento de programas de computador) e o estágio de reintegração. O método proposto procura unificar o tratamento da engenharia reversa nas diversas disciplinas da mecatrônica e explora as técnicas já automatizadas sempre que possível.

A aplicação do método é mostrada no desenvolvimento de um produto com aplicações médicas e ainda não fabricado no Brasil. Uma empresa de médio porte decidiu desenvolver um similar nacional, introduzindo algumas melhorias com vistas a garantir uma vantagem competitiva no mercado. O novo produto foi desenvolvido a partir de uma matriz importada, utilizando a digitalização em máquina de medição tridimensional, como principal tecnologia para a coleta de dados, e o reprojeto em CAD. O resultado alcançado demonstra as

potencialidades do método e mostra como uma empresa industrial de pequeno ou médio porte pode lançar um produto inovador investindo pouco em projeto e em prazo reduzido.

Palavras-chave:

Método de projeto, projeto de produto, engenharia reversa, produto mecatrônico.

ABSTRACT

Permanent product modernization by innovation, as a response or preview to customers needs is a competitive advantage that allows enterprises to compete in selective, accessible and exigent markets in same conditions. Within this strong competition scenario, mechatronic product interests entrepreneurs as attracts expressive attention among customers and also groups a wide range of functions and attributes, aided by micro-processing control, adoption of software for information processing and use of mechanical devices to provide interaction between operator and environment.

To design new mechatronic products is not common, as demands time and reasonable investments on equipment, software and most important, staff. Small and medium enterprises are organizations in which operational characteristics and financial conditions make difficult or even disable product self designing. In such context, reverse engineering is a promising alternative for low cost and short period product design, and therefore is regarded as the technological cornerstone for the method proposed herein.

This work is intended to establish a reverse engineering design method for mechatronic product conception focused on the needs and potentialities of small and medium enterprises as an alternative to traditional design methods. The method has been systemized into four basic steps: planning, original product data acquisition, re-design (regarded as re-engineering in software development) and re-integration stage. The proposed method is intended to unify reverse engineering treatment in many mechatronic subjects and explores automation techniques always when possible.

The method was applied to develop a medical product only manufactured outside Brazil. A medium sized company in Brazil decided to design other similar introducing improvements to achieve market competitiveness. A new product was designed based on a matrix imported, using coordinate measuring scanning as main technology for data collection and CAD re-design. The results demonstrate the method potentialities and shows how small or medium sized enterprises can release ultimate products in short period also with low design investment.

Key words:

Design Methodology, design, reverse engineering, mechatronic product.

LISTA DE FIGURAS

2.1: Custos dos desvios da qualidade	6
2.2: Etapas do processo de projeto.....	7
2.3: Da função à solução concreta.....	8
2.4: Aplicação de ferramentas computacionais ao projeto.....	10
2.5: Controle computadorizado.....	16
2.6: Abordagens da ER em função área do conhecimento.....	16
2.7: Projeto via engenharia reversa versus projeto convencional.....	17
2.8: Interface entre etapas importantes da ERM.....	18
2.9: O sistema mecatrônico.....	21
2.10: Tendências na fabricação de precisão.....	24
3.1: O processo de projeto.....	31
3.2: Interface entre ER e reprojeto.....	34
3.3: Geometria reconstruída em CAD após digitalização numa MMC.....	38
3.4: Item digitalizado na Figura 3.3.....	39
3.5: Processos de digitalização na ERM.....	41
3.6: Sistemas para medição por coordenadas 3D.....	41
3.7: Digitalização de geometrias padrão na MMC.....	46
3.8: Principais causas da incerteza de medição na MC.....	48
3.9: Influência da incerteza de medição sob um ponto.....	49
3.10: Planejamento da medição por MC CNC.....	50
3.11: Seqüência geral de digitalização na MC.....	51
3.12: Execução da medição/digitalização em MC.....	51
4.1: Competências da equipe básica de projeto.....	68
4.2: Representação gráfica do método.....	70
4.3: Abordagem a ser utilizada na ER.....	71
4.4: Elementos geométricos no CAD de uma MMC.....	81
4.5: Nuvem de pontos transformada em curvas no Solidworks.....	82
4.6: Nuvem de pontos transformada em superfície no Rhinoceros.....	83
4.7: Parte da nuvem de pontos gerada numa MMC.....	84
4.8: ¼ da peça submetida à digitalização nas suas principais curvas e superfícies.....	85

4.9: Peça em digitalização na MMC.....	85
4.10: Fluxograma A (Planejamento Básico e Estratégia).....	89
4.11: Fluxograma B.....	90
4.12: Fluxograma C.....	90
4.13: Fluxograma D.....	91
4.14: Fluxograma E.....	92
4.15: Fluxograma específico do Planejamento e Estratégia da ERM.....	93
4.16: Fluxograma F.....	94
4.17: Fluxograma G.....	95
4.18: Fluxograma G1.....	96
4.19: Fluxograma H.....	97
4.20: Fluxograma I.....	98
4.21: Fluxograma J.....	99
4.22: Fluxograma K.....	100
4.23: Fluxograma L.....	101
4.24: Fluxograma M.....	102
5.1: Transdutor de pressão sanguínea.....	103
5.2: detalhe do TPS sem a tampa do sensor após a desmontagem.....	104
5.3: Modelo de caixa preta do produto.....	107
5.4: TPS em operação.....	108
5.5: Conexão do TPS com o monitor.....	108
5.6: TPS – referências de operação.....	109
5.7: Desmontagem do sensor do TPS.....	111
5.8: Sensor/transdutor de pressão para o TPS.....	112
5.9: TPS em digitalização na MMC.....	114
5.10: Levantamento de dados do produto matriz na ERM utilizando MMC.....	115
5.11: Conjunto modelado no CAD Unigraphics NX.....	117
5.12: Parte interna da carcaça – abertura para o sensor de pressão.....	117
5.13: Tampa e sede do sensor.....	118
5.14: Sensor de pressão e cabo de comunicação.....	118
5.15: Protótipo rápido em plástico.....	119
I.1: Função global do produto.....	136
I.2: Desdobramento da função global.....	137
I.3: Matriz morfológica.....	139

II.1: Fluxograma A para o estudo de caso.....	143
II.2: Fluxograma B para o estudo de caso.....	144
II.3: Fluxograma C para o estudo de caso.....	145
II.4: Fluxograma D	146
II.5: Fluxograma E para o estudo de caso.....	147
II.6: Fluxograma do planejamento e estratégia da ERM para o estudo de caso.....	148
II.7: Fluxograma F para o estudo de caso.....	149
II.8: Fluxograma G para o estudo de caso.....	150
II.9: Fluxograma G1 para o estudo de caso.....	151
II.10: Fluxograma J para o estudo de caso.....	152
II.11: Fluxograma K para o estudo de caso.....	153
II.12: Fluxograma L para o estudo de caso.....	154
II.13: Fluxograma M para o estudo de caso.....	155

LISTA DE QUADROS

2.1: Principais aspectos relacionados ao produto mecatrônico.....	25
3.1: Comparação de desempenhos típicos entre BM e MMC.....	42
4.1: Posicionamento do método.....	67
4.2: Planejamento Básico.....	72
4.3: Estratégia.....	73
4.4: Planejamento/estratégia na ERM.....	74
4.5: Estágio 2 – coleta de dados do produto matriz.....	76
4.6: Levantamento de dados na ERM.....	77
4.7: Interface para a ERE.....	78
4.8: Interface para a ERS e ERC.....	78
4.9: Interface na ERM.....	80
4.10: Principais resultados da calibração da MMC.....	82
4.11: Reprojetos.....	87
4.12: Certificações e documentação do produto.....	88
5.1: Perfis e número de colaboradores.....	105
5.2: Nível de faturamento da empresa.....	105
5.3: Planejamento Básico para o TPS.....	106
5.4: Necessidades e requisitos para o novo produto.....	108
5.5: Estratégia para a ER do TPS.....	109
5.6: Planejamento da ERM para o TPS.....	110
5.7: Informações obtidas por medição convencional.....	110
5.8: 1ª parte do levantamento de dados do TPS.....	111
5.9: 2ª parte do levantamento de dados do TPS – ERM.....	113
5.10: Reprojetos do TPS.....	116
5.11: Documentação para o TPS.....	119
I.1: Exemplos da relação entre necessidades manifestas e reais.....	133
I.2: Questões para identificação das necessidades dos clientes.....	135
I.3: Questões para estabelecimento dos requisitos.....	136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D - Bidimensional

3D – Tridimensional

ANSI - *American National Standards Institute*

BM – Braço de Medição

CAD – *Computer Aided Design*

CAE – *Computer Aided Engineering*

CAM – *Computer Aided Manufacturing*

CIMATEC – Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia

CNC – Controle Numérico Computadorizado

CASE – *Computer Aided Software Engineering*

DfA - *Design for Assembly*

DfD - *Design for Disassembly*

DfM - *Design for Maintenance*

DMIS – *Dimensional Measuring Interface Standard*

ECAD - *Electronic Computer Aided Design*

ER – Engenharia Reversa

ERE – Engenharia Reversa Eletrônica

ERC – Engenharia Reversa Aplicada ao Controle

ERM – Engenharia Reversa Mecânica

ERS – Engenharia Reversa de Software

FDM - *Fused Deposition Modeling*

GE – General Electric

IGES - *Initial Graphics Exchange Specification*

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

INPI – Instituto Nacional de Propriedade Industrial

ISO - *International Organization for Standardization*

MMC – Máquina de Medição por Coordenadas

MC – Medição por coordenadas

MP – Melhoria do Produto

NURB – *Nonuniform Rational B-spline Curve*

OCP – Organismo de Certificação de Produtos

OMPI – Organização Mundial de Propriedade Industrial

PM – Produto Mecatrônico

PPM – Projeto de Produto Mecatrônico

PME – Pequena e Média Empresa

PR – Prototipagem Rápida

PTB - *Physicalisch Technische Bundesanstalt*

SENAI BA – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, Departamento Regional da Bahia

STEP - *Standard for the Exchange of Product Model Data*

TPS – Transdutor de Pressão Sangüínea

UFBA – Universidade Federal da Bahia

VDA-FS - *Verband der Deutschen Automobilindustrie – Flachenschnittstelle*

VIM – Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE QUADROS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiii
SUMÁRIO	xv
1. HIPÓTESE E ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	1
1.1. OBJETIVO DO TRABALHO	3
1.2. PROPOSTA E ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO.....	4
2. O PROJETO MECATRÔNICO	6
2.1. MÉTODOS CONVENCIONAIS DE PROJETO	6
2.2. A ENGENHARIA REVERSA NO MÉTODO DE PROJETO	11
2.3. O PROJETO MECATRÔNICO E O PRODUTO MECATRÔNICO	20
2.4. O PROJETO DE PRODUTO MECATRÔNICO NA PEQUENA E MÉDIA EMPRESA	27
3. A ENGENHARIA REVERSA NO PROJETO DE PRODUTO MECATRÔNICO	31
3.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA/SÍNTESE	32
3.2. ENGENHARIA REVERSA.....	32
3.3. REPROJETO	54
3.4. AVALIAÇÃO	62
3.5. RESULTADOS	64
4. PROPOSTA DO MÉTODO PARA PROJETO	66
4.1. ESTÁGIO 1: PLANEJAMENTO E ESTRATÉGIA DE ER.....	71
4.2. ESTÁGIO 2: LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES DO PRODUTO MATRIZ...	75
4.3. INTERFACE ENTRE O LEVANTAMENTO DE DADOS DO PRODUTO MATRIZ E O REPROJETO	78
4.4. ESTÁGIO 3: REPROJETO.....	86
4.5. ESTÁGIO 4: CERTIFICAÇÕES E DOCUMENTAÇÃO DO PRODUTO	88
4.6. FLUXOGRAMAS DO MÉTODO.....	88
5. ESTUDO DE CASO	103

5.1. CONTEXTO DO PROJETO.....	105
5.2. EXECUÇÃO DO PROJETO SEGUNDO O MÉTODO PROPOSTO	106
5.3. RESULTADOS	120
6. CONCLUSÕES.....	121
6.1. CONTRIBUIÇÕES	122
6.2. LIMITAÇÕES	122
6.3. TRABALHOS FUTUROS	123
REFERÊNCIAS	125
APÊNDICE 1: MÉTODOS PARA O LEVANTAMENTO DE DADOS DO PRODUTO MATRIZ E REPROJETO.....	132
I.1 IDENTIFICAÇÃO DA ESTRUTURA DE FUNÇÕES DO PRODUTO.....	136
I.2 MÉTODO DA MATRIZ MORFOLÓGICA.....	139
APÊNDICE 2: FLUXOGRAMAS DO ESTUDO DE CASO	141

1. HIPÓTESE E ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

A intensa concorrência determinada por uma economia cada vez mais globalizada exige que as empresas reajam rapidamente às exigências do mercado. A necessidade de um novo produto ou de melhorias nos já existentes é muito influenciada pela introdução de novas tecnologias, mudanças nas expectativas e demandas dos clientes e flutuações nos custos de matérias primas. Para capitalizar essas mudanças do mercado, a empresa deve projetar ou reprojetar seus produtos rapidamente e a baixo custo, já que inovação e diferenciação tornaram-se, mais do que nunca, fatores determinantes para a sobrevivência das empresas industriais. O projeto de novos produtos com elevado valor agregado pode representar um importante diferencial competitivo. A situação é mais crítica para as PMEs, que têm que lidar com a conflitante situação de carência de recursos técnicos, financeiros e humanos, mas ao mesmo tempo precisam acompanhar e, se possível, liderar o estado-da-arte das tecnologias emergentes, para se manterem competitivas e a estratégia de diferenciação é das mais eficazes. Segundo Porter (2004), a diferenciação é uma estratégia viável para garantir retornos acima da média em uma indústria porque ela cria uma posição defensável para enfrentar as forças competitivas. A diferenciação proporciona isolamento contra a rivalidade competitiva devido à lealdade dos consumidores com relação à marca como também a conseqüente menor sensibilidade ao preço.

Mais especificamente, o processo de projeto de produtos em pequenas e médias empresas (PMEs) é limitado pela reduzida capacidade de investimentos capazes de garantir a disponibilidade de equipamentos e programas de computador adequados, além do alto custo para a manutenção de uma equipe de projetos bem qualificada e experiente.

Para obter a diferenciação no mercado, uma das alternativas hoje mais usadas é a adição de novas funções ou alteração de requisitos no produto (tamanho, tempo de resposta, peso, ergonomia, ruído, etc.). Os projetistas passaram a introduzir, aos produtos de origem eminentemente mecânica, dispositivos eletromecânicos e eletrônicos (e, mais recentemente, microeletrônicos). Isso tem permitido a diminuição do tamanho e facilitado a integração entre partes mecânicas, eletrônicas, hidráulicas e pneumáticas, possibilitando o projeto e a operação sinérgica das partes, surgindo assim o produto mecatrônico. Dessa forma, a mecatrônica passou a ser fundamental para o desenvolvimento dos produtos, facilitando a introdução de

novas funções ou melhorando atributos importantes para o cliente, como tamanho, peso e empunhadura.

O projeto de produtos exige métodos específicos de realização em função da complexidade de suas várias etapas. Esses diferentes métodos possuem algumas restrições (detalhadas nos Capítulo 2), como o longo ciclo do processo de projeto e a necessidade de razoáveis investimentos em pesquisas de mercado. O caráter multidisciplinar do projeto com abordagem mecatrônica traz também um elemento complicador a mais, pois exige a formação de uma equipe que possa planejar e desenvolver o trabalho de forma interdisciplinar e sinérgica. Por outro lado, as modernas ferramentas, técnicas e abordagens de projeto, como o Projeto Auxiliado por Computador (*Computer Aided Design – CAD*) e a engenharia reversa, se mostram imprescindíveis à pequena e média empresa, pois podem representar importantes ganhos justamente nos seus pontos mais sensíveis, nos prazos e custos de projeto e fabricação.

O CAD é uma ferramenta que apóia o projeto e desenvolvimento de produtos em várias frentes a depender da sua aplicação. Existem ferramentas simples para o desenho em duas dimensões, tal qual uma prancheta computadorizada, até os CADs com grande poder de processamento e integrados a outras ferramentas computacionais, capazes de operar em 3D, simular a montagem de sistemas, promover a animação dos elementos em funcionamento e até integrar-se num ambiente mais amplo de gerenciamento do produto. No projeto de produto com a abordagem mecatrônica, destacam-se os CADs mecânico e eletrônico. O primeiro é utilizado basicamente no projeto dos componentes mecânicos em 3D, na simulação da montagem, na geração dos desenhos para fabricação e na criação de arquivos gráficos específicos para a utilização posterior. Já o segundo é utilizado para estruturar os circuitos eletrônicos, placas de circuitos e conexões com sensores, atuadores e outros dispositivos.

A Engenharia Reversa (ER) é uma abordagem para projeto que permite a criação de novos produtos em intervalos menores e com maiores possibilidades de sucesso se comparada aos métodos convencionais. A ER utiliza um produto já existente e testado como modelo para obtenção de informações, a fim de desenvolver um segundo produto com melhorias no tocante aos atributos mais importantes para o mercado. O menor investimento financeiro e prazos reduzidos de desenvolvimento já são por si só importantes, mas o fato de lançar um produto novo baseado em algo que já obteve o reconhecimento do mercado é, talvez, o maior dos atrativos, principalmente para a PME.

Pesquisas indicam que entre 80 e 90% das ferramentas e matrizes fabricadas hoje já são projetadas utilizando-se a ER. Ferramentas e matrizes podem ser consideradas o

“coração” de qualquer processo de realização do produto pela manufatura. Isto demonstra a sua importância para as indústrias de transformação de plásticos, automotiva, eletroeletrônica, dentre outras.

Um dos pilares da ER é a medição com o objetivo de obter informações sobre o item objeto de estudo e servirá como base para o desenvolvimento futuro. O levantamento dimensional e geométrico do item ou de suas partes mecânicas e as suas interações com os elementos eletrônicos constitui um conjunto de tarefas críticas para a garantia do sucesso do novo produto. Portanto, a digitalização dos elementos geométricos de um produto existente é um dos pontos de partida mais eficazes para o projeto de produtos mecatrônicos.

A medição por coordenadas é uma tecnologia que vem alcançando crescente aceitação na indústria de manufatura desde a década de 1990, por conta da variedade de suas aplicações e, principalmente a partir da sua integração a outras tecnologias computadorizadas. A digitalização realizada mediante a medição por coordenadas é hoje um dos melhores recursos para obtenção de informações sobre uma geometria existente.

O problema, ainda hoje existente, é que a aplicação nas PMEs dessas tecnologias emergentes de forma integrada para a criação de novos produtos, principalmente os mecatrônicos, ainda não se encontra suficientemente sistematizada.

A motivação para esta pesquisa é a oportunidade de propor um método de projeto de produto que melhor se adapte à realidade da PME da indústria de produtos mecatrônicos. Espera-se que, com o emprego de tal método, venha-se a obter ganhos representativos de custo do projeto e diminuição do tempo de lançamento do produto no mercado.

1.1. OBJETIVO DO TRABALHO

Este trabalho pretende comprovar a seguinte hipótese principal: um método de projeto mecatrônico utilizando a engenharia reversa com o uso do CAD e da medição por coordenadas é opção viável para uma PME desenvolver produtos de forma competitiva se adotados métodos de projeto adequados.

Hipóteses secundárias:

- a) é possível uma PME desenvolver produtos de forma competitiva;
- b) é possível adotar um método unificando as várias abordagens de engenharia reversa (mecânica, elétrica, de software);

- c) é possível para uma PME realizar o projeto de produto usando recursos de CAD e de equipamentos de digitalização e de medição com pequenos orçamentos.

1.2. PROPOSTA E ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi desenvolvido focalizando-se as necessidades das pequenas e médias empresas (PMEs) que fabricam produtos mecatrônicos. Por este motivo, buscou-se utilizar recursos acessíveis a razoável custo, com padrões de interface abertos e flexíveis, mas empregando soluções que assegurem o estado-da-arte no projeto de forma a assegurar a competitividade da sua atividade industrial.

Em geral, a literatura não trata amplamente do Projeto de Produto Mecatrônico (PPM). Os poucos trabalhos que o fazem utilizam métodos de projeto convencionais, dando mais ênfase aos aspectos gerenciais, como à necessidade da estruturação de equipes multidisciplinares. No projeto de produto, a ER é sempre associada à digitalização de elementos geométricos, em função da sua maior complexidade enquanto aplicada ao levantamento da geometria e dimensões de componentes. Os trabalhos sobre a aplicação da ER ao projeto de produto são comumente elaborados tendo como pano de fundo estruturas empresariais que dispõem de vastos recursos e grandes orçamentos. Portanto, o projeto de produto numa abordagem mecatrônica e com a aplicação da ER associada ao CAD é uma proposta em certo sentido inovadora e promissora na medida em que torna viável à PME mais agilidade e menos custo no seu processo de projeto. Este trabalho objetiva então os seguintes resultados:

- a) definir as características predominantes do produto mecatrônico de uma PME;
- b) associar a ER ao projeto de produto mecatrônico numa visão unificada e multidisciplinar, objetivando a utilização de tecnologias de medição, ensaios e ferramentas de projeto custo razoável, de forma a evitar o uso de soluções comerciais com elevado nível de integração, mas inacessíveis à PME;
- c) sistematizar a aplicação da ER no projeto de produto com o objetivo de se obter ganhos em prazos de execução, facilidade de fabricação e montagem e custos de projeto;
- d) gerar um método de projeto de produto mecatrônico adequada à PME.

Ao final do trabalho espera-se ter apresentado um método e um conjunto de

estratégias para prática da ER aplicável aos produtos mecatrônicos com especial preocupação no estabelecimento de sistemáticas que agreguem melhorias ao produto e o tornem mais atrativo ao mercado. Tais sistemáticas procuram garantir que maiores esforços em termos de criatividade e inovação possam ser investidos no produto e não no processo de projeto.

O presente trabalho foi estruturado em seis capítulos, sendo este o primeiro. O segundo e terceiro capítulos contextualizam e caracterizam o Produto Mecatrônico (PM) e descrevem como a ER se relaciona com o projeto de produto. Mostram ainda as vantagens da utilização da ER no Projeto de Produto Mecatrônico (PPM) e do uso de certas tecnologias de medição e ensaios como solução para a obtenção de informações. O quarto aborda o método proposto, as sistemáticas e estratégias para a sua implementação. O quinto capítulo apresenta um estudo de caso visando a validação do método e o sexto traz as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. O PROJETO MECATRÔNICO

Este capítulo percorre inicialmente os modelos convencionais de projeto, associando-os ao projeto mecatrônico e ao produto mecatrônico e suas características específicas. A engenharia reversa é então contextualizada e integrada ao projeto mecatrônico, tendo como foco a pequena e média empresa. Ao final do capítulo são tratados os pontos chaves da engenharia reversa e as ferramentas aplicáveis ao seu uso no contexto deste trabalho.

2.1. MÉTODOS CONVENCIONAIS DE PROJETO

A qualidade de um produto é avaliada a partir de indicadores baseados nos requisitos dos clientes. Preço, acabamento, tamanho, forma, funcionalidades, precisão são exemplos de requisitos, cada qual com a sua relevância para o cliente. Desvios da qualidade são gerados ao longo de toda a vida do produto e não somente durante o processo de fabricação. A maior parte dos desvios com relação à qualidade desejada pelo cliente é originária da etapa de projeto. A Figura 2.1 ilustra o problema e como os desvios impactam posteriormente no custo da correção. Por esse motivo, tanto se tem investido no estabelecimento de métodos de projeto que disciplinem a coleta de informações, seu processamento e utilização na criação do novo produto, visando à maior confiabilidade do projeto (Andrade, 1991; Amerongen, 2003; Back & Forcellini, 2003; Pahl & Beitz, 1988; Shigley, 1977).

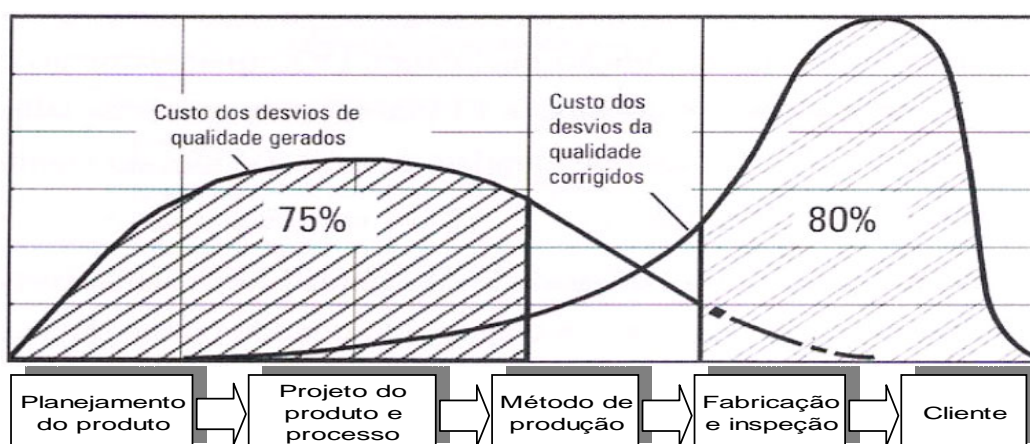


Figura 2.1: Custos dos desvios da qualidade. Fonte: Donatelli et al (2005).

O método de projeto proposto por Pahl & Beitz (1988) é o fruto de vários anos de pesquisa e representa uma abordagem clássica, característica da pesquisa alemã sobre o tema. Segundo eles, o objeto do projeto é tratado como um sistema capaz de transformar energia, material e informação. O processo de projeto permite a descrição do seu comportamento funcional utilizando princípios físicos e é estabelecido em quatro etapas: o projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar (de configuração) e o projeto detalhado. Este processo é ilustrado na Figura 2.2, indicando as ações e os resultados de cada etapa.

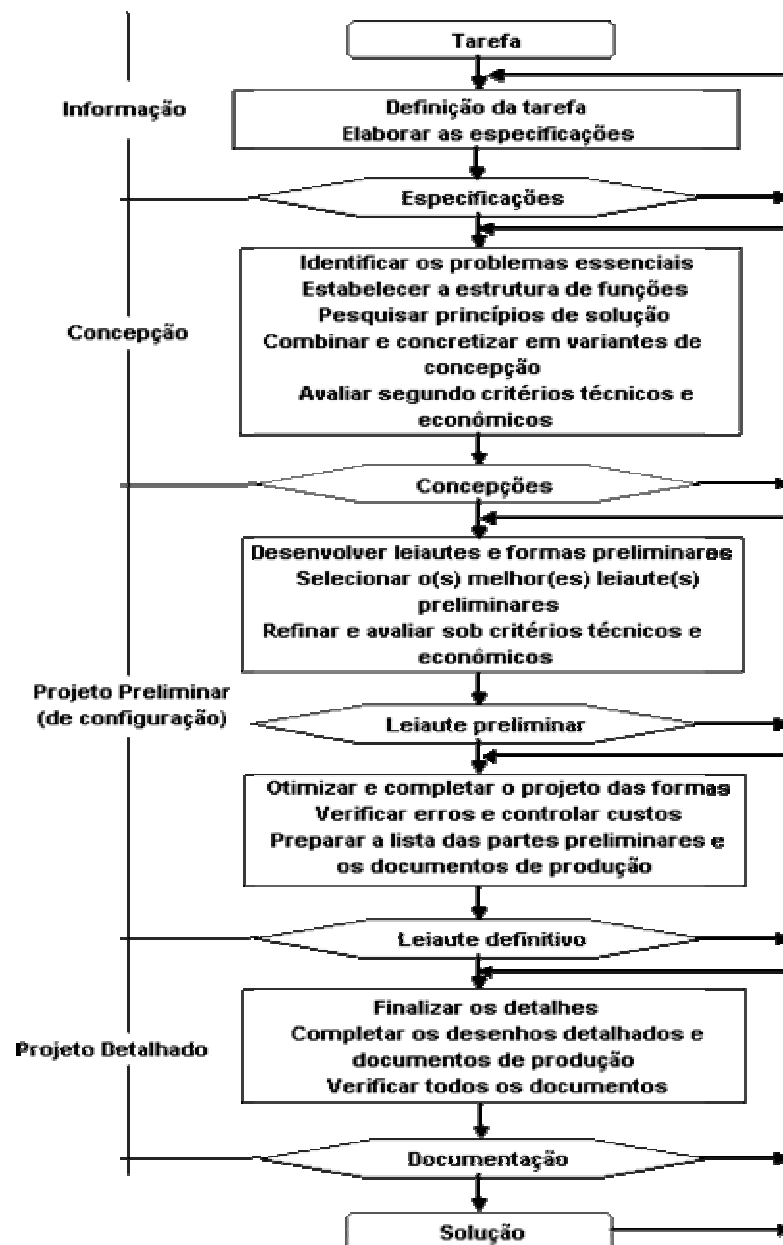


Figura 2.2: Etapas do processo de projeto. Fonte: Pahl & Beitz (1988).

Da etapa de definição da tarefa resulta a lista de requisitos do produto. A etapa de concepção, ou projeto conceitual, é realizada em diferentes passos: a) identificação de problemas essenciais, b) estabelecimento da estrutura de funções do produto, c) busca e combinação de princípio de soluções, d) obtenção de variantes de concepções e e) avaliação segundo critérios técnicos e econômicos.

A fase inicial de um projeto é aquela onde o problema deve ser sistematicamente avaliado e definido, gerando como resultado uma síntese com as soluções encontradas. A fase conceitual é caracterizada pela investigação dos requisitos do produto e suas interações e pelo uso da criatividade na busca de soluções. Pahl & Beitz (1988) estabeleceram cinco etapas para essa fase: formulação da função total; estabelecimento de um fluxo de funções do produto; pesquisa ou criação de princípios de soluções alternativos para cada função; combinação de um princípio de cada função para formar concepções e seleção das concepções viáveis.

Na Figura 2.3 estão ilustrados os passos percorridos pelo projetista da fase conceitual até o início da fase do projeto preliminar. Inicialmente se tem uma função a ser cumprida, que, no exemplo, deve simplesmente transformar energia elétrica em torque a partir de certo sinal de controle, isto é, ser capaz de prover movimento a um outro componente após um comando. Uma solução abstrata é então definida, estabelecendo-se certos parâmetros de operação do motor, definindo assim o seu comportamento geral. Por fim, o motor é especificado em detalhes, incluindo parâmetros de durabilidade, consumo, conexões de entrada e saída, etc. Dessa forma, têm-se finalmente um componente físico definido.

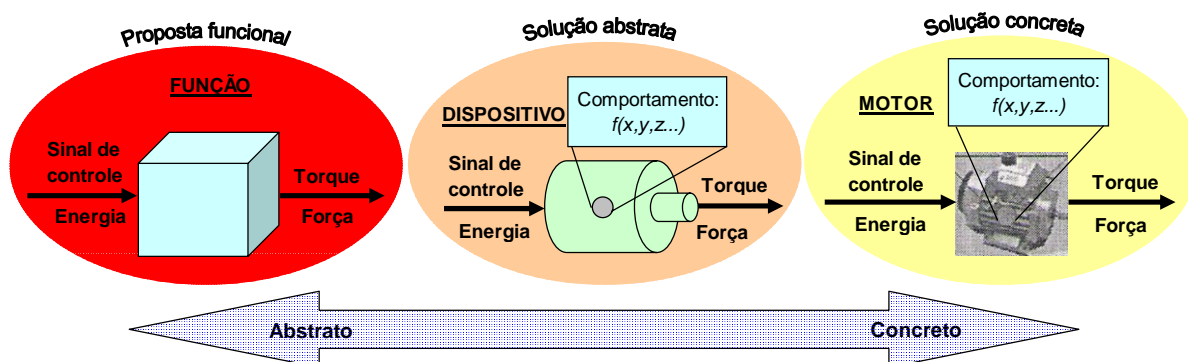


Figura 2.3: Da função à solução concreta. Fonte: Figura adaptada de SHEN et al (2005).

O projeto preliminar aproveita a concepção já avaliada tecnicamente e economicamente e procura atender a uma função, mediante a determinação de formas, leiaute, materiais e programas de computador apropriados. O projeto se inicia tendo como base um

leiaute preliminar, baseado nos requisitos básicos e prossegue trabalhando critérios de ergonomia, segurança, produção, operação, montagem, manutenção e custos.

O projeto detalhado complementa a etapa anterior, estabelecendo e detalhando os elementos constituintes, as formas em geral, as medidas, os acabamentos, os materiais, os aplicativos necessários, a integração com outros dispositivos e reavaliando o projeto e os custos de fabricação. A partir daí, são elaborados os documentos técnicos necessários à realização física das soluções.

Já o método proposto por Shigley (1977) encontra-se resumido na Figura 2.4. Shigley (1977) caracteriza o processo de projeto como um conjunto de seis passos: a primeira fase é a identificação de uma necessidade, seja o defeito em uma máquina ou a oportunidade de idealizar um novo produto de consumo a partir do reconhecimento de expectativas do mercado. A etapa seguinte é a definição do problema, que consiste em caracterizá-lo criteriosamente, estabelecer os seus requisitos e especificar o item a ser projetado, incluindo aspectos relacionados à função, características físicas, custo, qualidade e desempenho operacional. Ao final dessa etapa têm-se uma síntese do produto. A próxima etapa consiste da análise, que pode incluir avançados cálculos de engenharia e simulação (resistência mecânica, deformações, vibração, fluxo de fluidos, estimativa de vida útil, etc), e a inclusão, a partir dos seus resultados, de melhorias necessárias. A fase de avaliação deve verificar o quanto o resultado do projeto reflete as especificações iniciais. Normalmente requer a fabricação de protótipos e inúmeros ensaios para avaliar o desempenho do todo e de suas partes. Ao final têm-se como resultado um conjunto de documentos técnicos: desenhos, memoriais descritivos, especificações de materiais, listas de montagem e modelos.

Como se vê, nessa abordagem as ferramentas computacionais se encaixam aos métodos de projeto convencional, numa característica adaptativa dos processos de projeto a partir da década de 1980, que se difundiu com a popularização do uso do computador, inclusive nas médias e pequenas empresas.

Essa nova realidade permitiu o crescimento da utilização do CAD e assim fomentou a modelagem do produto em três dimensões, muito mais próximo da realidade, e facilitou ainda em muito o uso de ferramentas de análise de engenharia (tensões e deformações, fluxos de material e energia, fadiga de material, entre outras), cujas abordagens anteriormente eram limitadas pela imensa quantidade de cálculos necessários e pela falta de recursos capazes de tratá-los. A modelagem em três dimensões possibilitou aos projetistas encarar os conjuntos mecânicos como sólidos e isto permitiu compatibilizar melhor as interações e conexões das

mais diversas naturezas (elétricas, hidráulicas, pneumáticas, mecânicas). O maior interesse pelo CAD também fomentou o surgimento de aplicativos específicos para utilização no desenvolvimento de projetos em aplicações elétricas e eletrônicas, tubulações, modelagem de estampas, de calados de navios e outras. Convém também ressaltar a importância de aplicativos de apoio ao projeto, como, por exemplo, aqueles voltados à modelagem de engenharia (fluxos de materiais, esforços mecânicos e deformações, fluxos de energia), à modelagem de problemas matemáticos, ao PDM (*Product Information Management* - utilizado para gerenciar todas as informações e processos relativos ao ciclo de vida de um produto), ao CSM (*Component and Supplier Management* – incluindo tecnologia de grupo).

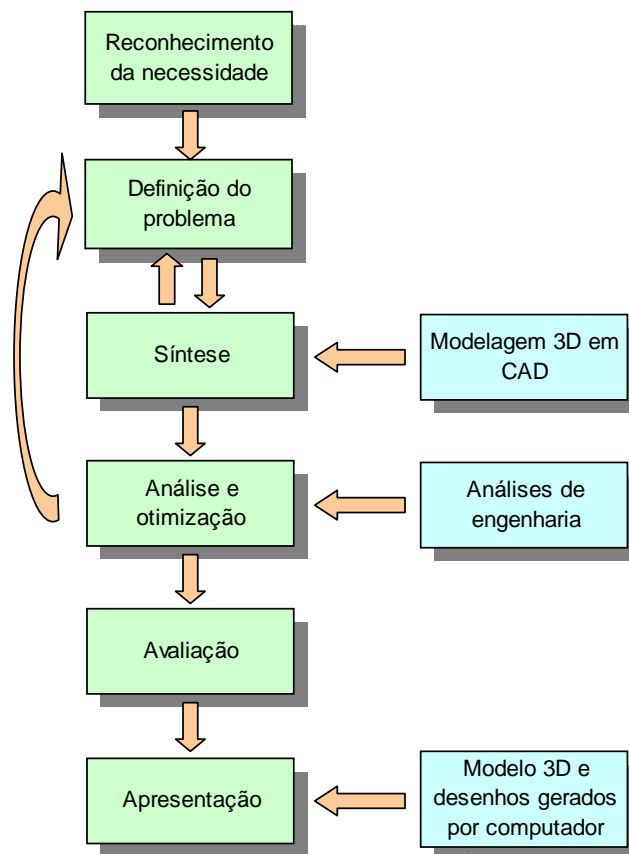


Figura 2.4: Aplicação de ferramentas computacionais ao projeto. Fonte: Figura Adaptada de Groover (2001).

O uso de ferramentas computacionais no projeto também criou formas padronizadas de transferência de informações por meio digital (dimensões, padrões de operação, formas, topologia, materiais e outras), o que, associado ao desenvolvimento de melhores métodos de ensaios e medição, propiciou a transferência direta de dados sobre um certo elemento físico

ou oriundos de um software para um software de modelagem.

Portanto, a introdução de ferramentas auxiliadas por computador afetou o processo de projeto, na medida em que possibilitou a sua evolução no que tange a maior facilidade, disponibilidade e rapidez no trânsito de informações, melhor interação entre diferentes disciplinas da engenharia e maior domínio e controle sobre o desenvolvimento do produto.

2.2. A ENGENHARIA REVERSA NO MÉTODO DE PROJETO

Aronson (1996) vê a ER como a avaliação sistemática de um elemento com o objetivo de se fazer uma réplica. Tal processo pode resultar numa cópia exata ou num novo produto com a incorporação de melhorias. Segundo Lee & Woo (2000), a ER se refere à criação de dados de projeto a partir de itens existentes. Já para Ferneda (1999) a ER pode ser entendida como uma operação de *benchmarking*, onde se podem comparar produtos com os melhores de sua classe.

Segundo Ingle (1994), a ER é um método singular, utilizado para solucionar necessidades específicas de um sistema, que não podem ser plenamente satisfeitas por meios convencionais de projeto. Ela ainda ressalta que a ER é um processo multidisciplinar, envolvendo engenheiros, técnicos projetistas, pessoal de compras e outros profissionais específicos. É possível notar nesta abordagem a aplicabilidade direta aos produtos com elevado nível de complexidade, incluindo fundamentalmente sistemas eletrônicos, mecânicos, de precisão e a sua integração.

Para Ingle, o alvo da ER é o crescimento da produtividade com o uso de uma documentação melhorada. Isto porque o resultado final é um conjunto de dados técnicos em mídia eletrônica (desenhos, modelos 3D, lista de materiais, especificações, planos da qualidade, planos de inspeção do produto, etc.) que consubstanciam a produção do item desejado.

Sob o ponto de vista de Aronson (1996) e Ferneda (1999), a ER envolve uma dentre as situações apresentadas abaixo:

- reutilização de projeto, incorporando dados de um outro projeto para projetar um novo produto;
- nacionalização de produtos;
- produtos antigos, para os quais não existe documentação técnica apropriada;

- produtos cuja documentação técnica encontra-se desatualizada por conta de modificações ocorridas no seu desenvolvimento;
- quando se necessita obter dados de um concorrente;
- nas indústrias automotiva, aeronáutica e naval após a criação de modelos físicos baseados em necessidades e análises funcionais;
- na reprodução de elementos da anatomia humana e
- na reprodução de obras de arte, esculturas.

Desde já é preciso relatar que existem duas abordagens distintas para ER. Na primeira abordagem, a ER é tida como um método de projeto completo, que pode substituir amplamente os métodos de projeto convencionais. Esta visão mais geral certamente se deve à sua utilização na área militar, tratada de forma detalhada por Ingle (1994). Para ela o processo de ER revela-se especialmente útil naqueles casos onde há pouca informação técnica acerca do produto ou nada se encontra disponível. Nesses casos, em geral não estão disponíveis desenhos, especificações de materiais e processos, dados de tolerâncias ou outras informações relevantes para a fabricação. Uma segunda abordagem resume a ER apenas às tarefas de coleta de dados do produto matriz e a modelagem utilizando ferramentas de projeto específicas, limitando-a a um conjunto de etapas que podem ser associadas a modelos convencionais de projeto. São tratadas dessa forma por Ferneda (1999), Lee & Woo (2000), Várady *et al* (1997) e outros.

Já no modelo proposto por Groover (2001), a ER se encaixa aos métodos de projeto convencional como resultado da aplicação intensiva de ferramentas computacionais a partir da década de 1980. Nessa abordagem, pode-se verificar a clara alusão à ER apenas como uma etapa do processo de projeto, de onde se obtém informações técnicas sobre o produto. Dessa forma, a ER é mais uma ferramenta de coleta de informações, que abastece as etapas seguintes de reprojeto a partir de padrões já existentes e não apenas originários de concepções dos projetistas. O mesmo vale para as análises de engenharia, que permanecem como acessórios na avaliação e melhoria do produto.

Alguns outros autores têm ainda uma visão mais restrita, afirmando que a ER se limita apenas ao estágio de levantamento de dados do produto estudado (digitalização, medição, ensaios). Dentre eles, Aronson (1996) e Maas (2001), podem ser citados. Para Várady *et al* (1997), Lee & Woo (2000), Mavromihales & Weston (2003), a ER também engloba a etapa de modelagem em computador, pois ambas possuem fortes interações e não podem ser separadas. Em ambas as abordagens nota-se que a ER passa a representar parte do

método de projeto convencional, como mais uma ferramenta, especificamente dedicada ao levantamento de informações sobre a forma, dimensões, leiaute e funções do produto modelo.

Pressman (1995) vê a ER sob a ótica do software e, para ele, ER é um processo de análise do programa num esforço para criar uma representação com maior nível de abstração do que o código fonte. Nessa aplicação, a ER é realizada em fases pós-desenvolvimento num programa existente. Na prática, a ER é empregada para recuperar projetos anteriores. Isso se dá de duas formas distintas:

- a) identificando o código fonte (quando isso é possível), ou
- b) monitorando o software quando em execução (levantamento do modelo comportamental do programa).

Bendersky (2003) ressalta que a ER em software (ERS) é de fato uma disciplina de análise e para evitar a sua utilização em atividades ilícitas relacionadas à pirataria foram criados métodos específicos para impedir o acesso ao código fonte.

Para Braga (1998), nada mais natural do que investigar sistemas prontos em busca de trechos de códigos que representem soluções para determinados problemas. Em muitos sistemas de informação pode-se aproveitar a estrutura geral de um programa existente, os módulos para montagens de menus, relatórios, consultas e a estrutura de inserção, alteração e eliminação de dados.

Braga (1998) ressalta que a ERS deve produzir, preferencialmente de forma automática, documentos que ajudem a aumentar o conhecimento geral do sistema de software, facilitando o seu reuso, manutenção, teste e controle de qualidade do software. Além disso, a ERS deve utilizar o conhecimento implementado em software antigo (ou legado) na produção de software novo e ajustar software e documentação existentes a novos padrões e ferramentas introduzidas por novos métodos e tecnologias de produção. Braga ainda cita no seu trabalho diversas ferramentas automatizadas para ERS.

Braga destaca as duas ferramentas básicas de apoio à ERS (neste trabalho considerados ensaios), que executam uma análise pós-desenvolvimento num programa existente:

- a) ferramentas estáticas: que usam o código fonte de um programa como entrada e extraem a arquitetura do programa, estrutura de controle, fluxo lógico, estrutura de dados e fluxo de dados;
- b) ferramentas dinâmicas: que monitoram o software em execução e usam as informações para construir um modelo comportamental do programa.

Chisholm *et al* (2000) tratam a ER sob o ponto de vista da eletrônica. Para eles, a ER é um processo de compreensão de um circuito eletrônico desprovido de qualquer especificação. A ER em circuitos eletrônicos (ERE) pode ser utilizada para análise de propriedade intelectual, análise de defeitos e de segurança e verificação de especificações para fins de projeto. Para a realização da ERE é necessária a aplicação de sinais de entrada e a análise dos sinais de saída mediante o uso de equipamentos geradores de funções e instrumentos de medição de sinais elétricos. A ERE procura obter uma imagem da estrutura interna do circuito eletrônico, extraindo ainda uma lista da malha de transistores existente.

Chisholm *et al* (2000), criaram um método para melhorar a velocidade, exatidão e eficiência na ERE. Eles justificam que inicialmente os circuitos eletrônicos eram grandes e compostos por dispositivos relativamente simples e observáveis a olho nu, mas envolviam uma enorme complexidade intrínseca. Os circuitos eletrônicos atuais podem conter alguns milhões de transistores em um centímetro quadrado. Em geral os circuitos eletrônicos são projetados a partir de complexos conjuntos de subcircuitos que são cuidadosamente mapeados, testados e documentados.

Chisholm *et al* (2000) resumem as duas alternativas de abordagem para a ERE. A abordagem sintática parte de bases de dados de subcircuitos conhecidos e tenta combiná-los de tal forma a atender às características do circuito submetido à ERE. Já a abordagem semântica, procura reduzir os subcircuitos à forma canônica, que depende basicamente dos sinais de entrada e saída do circuito. A forma canônica resultante é então comparada à base de dados contendo formas canônicas com funções conhecidas. A abordagem semântica é menos literal que a sintática e mais capaz de manejar variações não funcionais em um circuito (p. ex. variações de forma da placa ou de requisitos ambientais para operação). Além disso, a abordagem sintática não foi comprovada para utilização em circuitos altamente complexos. Por outro lado, a abordagem semântica é mais intensiva no uso dos recursos computacionais.

Em Mishra *et al* (1994) pode-se verificar o uso da ERE na coleta de dados para validação de microprocessadores. A validação ocorre a partir de dados funcionais coletados de um microprocessador novo mediante simulação de sua operação, comparando-o a dados de referência utilizando-se o mesmo software.

A utilização atual de chips programáveis ou configuráveis em substituição à composição de diversos dispositivos eletrônicos, transferiu parte da importância da ERE para a ERS. Semelhantemente à análise comportamental do software, a ER pode ser aplicada diretamente nos sistemas eletrônicos com base nos chips programáveis ou configuráveis para

compreensão do programa embarcado. Portanto, utilizam-se os sinais de entrada e de saída do sistema como meio para avaliar as funções e características operacionais do software.

Focalizando-se agora o domínio do controle automático de processos industriais, pode-se observar a mesma tendência do uso da microeletrônica com chips programáveis ou configuráveis. Pode-se exemplificar com os microprocessadores do tipo DSP (*Digital Signal Processing*). Para Oshana (2006), os microprocessadores do tipo DSP são uma forma específica de microprocessador com a mesma arquitetura básica (CPU, memória, barramentos, conjunto de instruções, etc.) dos modernos processadores digitais. A principal diferença é que os componentes são configurados para permitir a execução de certas tarefas de forma mais eficiente. De modo genérico, os processadores do tipo DSP têm hardware e software dedicados ao processamento numérico de alta velocidade e processamento rápido em tempo real de sinais analógicos provenientes dos sensores.

A partir das observações de Oshana (2006), pode-se resumir as principais vantagens do uso de chips programáveis ou configuráveis:

- facilidade de reprogramação ou atualização do software original;
- facilidade de expansão das funções originais;
- tamanho e peso reduzido e baixo consumo de energia;
- alta confiabilidade.

Portanto, conclui-se que a ERE é limitada a duas alternativas, ambas contando com ferramentas computacionais desenvolvidas:

a) a ERE realizada diretamente no circuito eletrônico, com vistas a levantar as suas características funcionais e permitir a sua replicação;

b) a ERE realizada tal qual a ERS nos chips programáveis e configuráveis. Quanto às aplicações diretas no controle automático, pode-se combinar a ERE e a ERS, obtendo-se o restante das informações por análise de módulos comerciais (sensores, atuadores, transmissores, etc.), desde que cumpram os requisitos de comunicação com o restante do sistema.

Cabe aqui um esclarecimento sob a ER em programas de computador dedicados ao controle automático. Quando necessário se referenciar exclusivamente ao domínio do controle, será chamada de ERC, enquanto que para os aplicativos de informação, ou nos casos gerais, chamar-se-á de ERS. Como será visto oportunamente, o tratamento dispensado a ambos os casos é o mesmo, apesar da função do software de controle ser bastante específica, isto é, ele fundamentalmente deve manter os valores das variáveis do processo controlado

dentro de limites aceitáveis para a operação conveniente do equipamento (Aström & Wittenmark, 1997). Na Figura 2.5, encontra-se o esquema básico de controle computadorizado. Segundo os autores, praticamente todos os sistemas de controle hoje estão baseados nesse esquema, onde u representa os sinais provenientes dos sensores e y os sinais enviados aos atuadores.

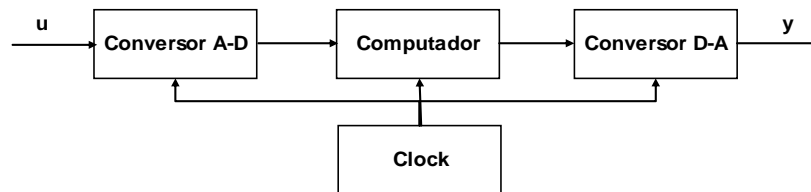


Figura 2.5: Controle computadorizado. Fonte: Aström & Wittenmark (1997).

Uma visão básica e sintética da ER em função das suas diversas abordagens aqui discutidas encontra-se ilustrada na Figura 2.6.

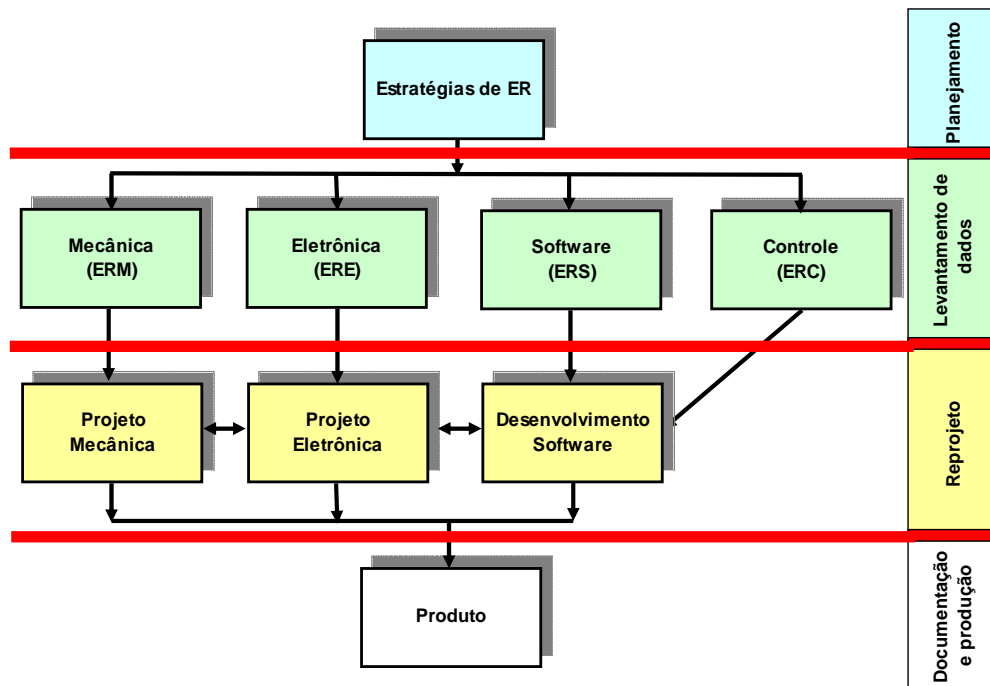


Figura 2.6: Abordagens da ER em função área do conhecimento.

Ingle (1994) realiza uma comparação entre o modelo de projeto convencional (Figura 2.7.a) com o modelo baseado na ER (Figura 2.7.b). Independentemente da abordagem (ERM, ERE, ERS), nota-se a substituição da etapa conceitual, no projeto convencional, por etapas

sucessivas de trabalho que visam reproduzir aspectos específicos de um produto já existente e apresentá-los na forma de informações utilizáveis por um projetista ou desenvolvedor de software (forma, dimensões, tipos de materiais, funcionalidades, padrões de comportamento, etc.).

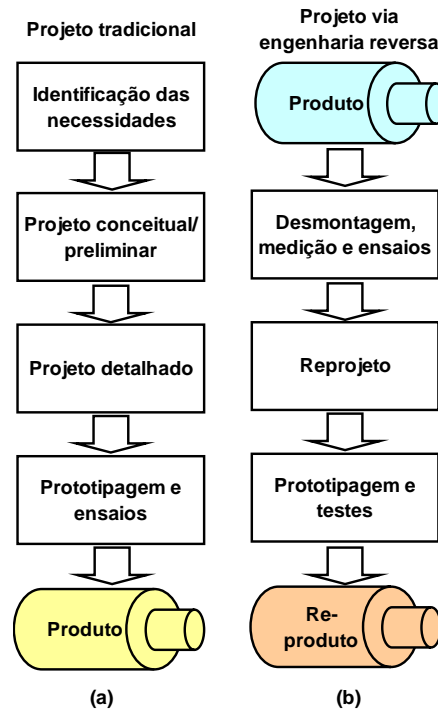


Figura 2.7: Projeto via engenharia reversa versus projeto convencional. Fonte: Ingle (1994).

Em algumas definições de ER é possível notar claramente a alusão ao trabalho com a parte mecânica, como no caso da definição de Lee & Woo (2000). Eles, Várady *et al* (1997), Martin & Cox (1997) e Ingle (1994) concordam em ressaltar a complexidade de certas etapas da ER quando aplicada à mecânica. Isto porque (observando-se a Figura 2.7.b), entre as etapas de Desmontagem, Medição e Ensaio e Reprojeto há um importante elo, cujo funcionamento adequado depende de um conjunto de fatores críticos de sucesso, ressaltados por Barbosa & Farinhas (2007), ilustrados na Figura 2.8 e detalhadamente discutido no Capítulo 3.

Uma situação hoje bastante comum que estimula o uso da ER, especificamente da ERM, é aquela onde as ferramentas ou matrizes para fabricação do produto são perdidas, por conta de desgaste ou acidente operacional. Tais ferramentas são hoje fundamentais para a criação de produtos mecatrônicos (fabricação de carcaças, peças de dispositivos mecânicos, suportes, entre outros), geralmente partes constituídas de materiais plásticos ou metálicos, o

que exige o emprego de métodos de fabricação, por exemplo, por injeção ou conformação mecânica, que, por sua vez, necessitam de ferramentas específicas. Em grande parte dos casos, não estão disponíveis os documentos técnicos necessários à recuperação ou fabricação do ferramental necessário. A ERM pode resgatar as informações dimensionais e geométricas diretamente a partir do produto final, empregando a medição do item como forma de digitalizar as informações e investindo na modelagem em CAD para reconstruir a ferramenta.

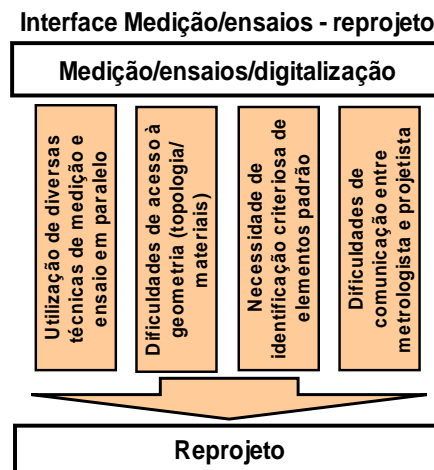


Figura 2.8: Interface entre etapas importantes da ERM.

Em muitos casos, existem ou existiram dados técnicos sobre o item, mas estes são insuficientes ou foram extraviados ou ainda estão desatualizados. Com a utilização da ER, obtém-se uma documentação técnica praticamente completa, obtida a partir do modelo existente estudado e desenvolvida por reprojeto.

Segundo Ferneda (1999), com o desenvolvimento de ferramentas computacionais e da tecnologia de medição por coordenadas, a ERM passou a ser adotada nas áreas de projeto mecânico e produção, principalmente a partir da década de 1990.

Ainda segundo Várady *et al* (1997), na ERM, o modelo em CAD é criado a partir da peça física por operações de digitalização dos elementos geométricos, mas grande parte do tempo é empregado no modelamento de superfícies e no desenvolvimento de novos conceitos. Portanto, trata-se da aplicação da ERM em projeto.

Portanto, na fase de levantamento dos dados do produto matriz, a digitalização é uma ferramenta importante, mas não a única. A utilização de diversas técnicas de medição, coletando medidas a partir de instrumentos convencionais e a simples observação podem representar uma parcela considerável do trabalho de obtenção das informações a partir do

produto matriz.

Um aspecto fundamental da ER, qualquer que seja a sua abordagem, é a introdução de melhorias ao produto estudado. A ER não se presta unicamente à cópia de um produto quando utilizada numa visão focalizada na inovação e competitividade. Isto é um aspecto fundamental para a compreensão das vantagens do emprego da ER. Como visto por Ingle (1994), o reprojeto é iniciado a partir das informações da etapa de medições e ensaios e se presta a reconstruir o produto matriz, adicionando-se melhorias às características originais. Essas mudanças geralmente são a resposta direta às necessidades do cliente e sua opinião sobre a utilização de um produto semelhante (p. ex.: alteração do software com a introdução de funções adicionais, mudança nas formas do produto para permitir uma melhor empunhadura, alteração dos tipos de conexões elétricas). Uma outra situação ocorre quanto o reprojeto reflete um salto nas características do produto, resultantes da introdução de uma nova tecnologia ou de mudanças no processo produtivo ou ainda de alterações relevantes nas funções do produto (p. ex.: utilização de novos componentes eletrônicos disponibilizados pelo mercado, automatização do processo de montagem de placas de circuitos eletrônicos, alteração do tipo de material utilizado em alguns componentes importantes).

Portanto, neste texto a etapa de reprojeto será considerada como Melhoria ao Produto (MP), isto é, a adição de alterações com o objetivo de atender às necessidades dinâmicas, determinadas pela produção ou pelo marketing. As alterações impostas pela produção são criadas em função de mudanças nos métodos de produção. Um exemplo típico é a alteração do material utilizado em um determinado componente (p. ex.: a empresa passa a dominar um novo processo produtivo, como a injeção de plástico para a produção de peças). Dessa forma, a empresa decide, por exemplo, substituir uma carcaça fabricada em aço por outra modelada em polipropileno. O marketing também tem influência notável na etapa de reprojeto, na medida em que pode, por exemplo, alterar as formas da mesma carcaça a fim de comunicar ao cliente uma idéia de modernidade do produto, atualizando-o em função das tendências atuais do *design*. O marketing também tem um efeito no sentido contrário, como canal de comunicação entre o cliente final e o produtor, conduzindo impressões, críticas e sugestões, por meio de pesquisas e reclamações. Um bom exemplo é a necessidade de alteração do software de controle do produto, como exigência para facilitar a operação do cliente em aplicações domésticas.

2.3. O PROJETO MECATRÔNICO E O PRODUTO MECATRÔNICO

Shetty & Kolk (1997) caracterizam a mecatrônica como uma filosofia de projeto integrada onde há o ambiente ideal para a sinergia entre diferentes disciplinas, tornando o produto final um conjunto harmonioso de componentes que agregam as vantagens do uso da eletrônica e da computação a dispositivos mecânicos, hidráulicos ou pneumáticos.

Histand & Alciatore (1999) definem mecatrônica como sendo o projeto de produtos cuja função é a integração sinérgica entre a mecânica, a eletricidade e a eletrônica, conectados por uma arquitetura de controle. A sinergia é garantida pela correta combinação dos parâmetros de operação, o que torna o produto final melhor que apenas a soma das partes.

Amerongen (2003) apresenta uma definição especificamente voltada para o projeto do produto mecatrônico. Para ele, o projeto mecatrônico é o projeto integrado de um sistema mecânico associado ao seu sistema de controle.

Chan & Leung (1996), assim como Shetty & Kolk (1997), definem o produto mecatrônico como sendo aquele que integra sinérgicamente componentes mecânicos, eletrônicos e software embarcado. Veículos automatizados, máquinas de montagem, produtos de consumo, como CD-players, câmeras, etc. são produtos mecatrônicos (DE VRIES & BREUNESSE, 1995).

Na avaliação de Hewit (1996), a importância da sinergia no projeto de produtos mecatrônicos pode ser exemplificada pelo projeto de robôs industriais. Os robôs da década de 1970 eram projetados simplesmente adicionando ao sistema mecânico diversos dispositivos eletrônicos e pneumáticos, entre outros e um sistema de controle genérico. Com isso era possível ao robô levar em elemento do ponto A ao ponto B, mas quase sempre não era possível especificar o caminho entre A e B e tampouco a velocidade de tal tarefa. Como então utilizar esses robôs em processos de soldagem autônoma, por exemplo, onde o controle do caminho percorrido pela tocha e a velocidade são parâmetros importantíssimos? A resposta para tais questões, segundo Hewit, está no projeto integrado, englobando todo o hardware, dispositivos de controle e o software. O primeiro robô projetado segundo uma sistemática sinérgica foi o PUMA, considerado o precursor dos robôs atuais.

Shetty & Kolk (1997) vêem a mecatrônica como um método usado para aprimorar o projeto de produtos eletromecânicos. Um método é uma coleção de práticas, procedimentos e regras usadas por quem trabalha em um nicho de conhecimento ou disciplina. Entre as disciplinas tecnológicas familiares pode-se incluir a termodinâmica, a mecânica, a eletricidade

e eletrônica, a computação, para nomear algumas (SHETTY & KOLK, 1997). Ainda segundo os autores, o sistema mecatrônico, por outro lado, é multidisciplinar, envolvendo quatro disciplinas fundamentais: eletricidade, mecânica, ciência da computação e informação tecnológica: “um sistema mecatrônico não é apenas um sistema eletromecânico e é mais do que um sistema de controle”.

Na Figura 2.9 pode-se ver um diagrama da análise de Shetty & Kolk (1997). Os sistemas de informação são constituídos por aplicativos dedicados ao controle do equipamento e a funções de simulação e otimização, quando aplicável. Cabe, entretanto, uma observação: não existem efetivamente sistemas reais ótimos, a não ser em modelos matemáticos, mas sim simplificações da realidade, a partir das quais se procura o aprimoramento contínuo. Os sensores e atuadores são utilizados para transformar a energia de alta potência (geralmente associada ao lado mecânico ou eletro-mecânico) para a baixa potência (o lado eletrônico e computacional). O bloco mecânico frequentemente consiste não apenas de componentes puramente mecânicos, mas também de elementos relacionados às disciplinas química, elétrica, térmica, acústica, hidráulica, pneumática, metrologia, entre outras. Os sistemas elétricos nesse modelo têm funções basicamente dedicadas ao controle, mas também podem ter emprego no acionamento elétrico de potência ou telecomunicação. Em suma, “A mecatrônica possibilita a combinação de atuadores, sensores, sistema de controle e computadores no processo de projeto” (SHETTY & KOLK, 1997).

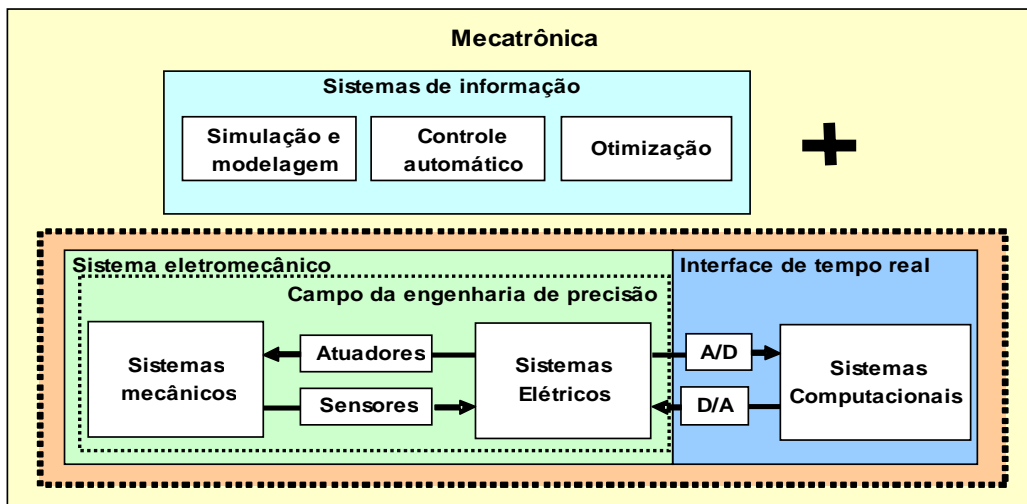


Figura 2.9: O sistema mecatrônico. Fonte: Shetty & Kolk (1997).

As características do sistema mecatrônico levam a sua subdivisão em módulos

específicos e subsistemas. A Figura 2.9 subdivide o sistema mecatrônico em diversos subsistemas (mecânico, elétrico, computacional e de informações). Um módulo é uma parte bem definida de um sistema ou subsistema do produto mecatrônico, com funções e características próprias (p. ex.: uma placa eletrônica acionadora de um motor).

Ainda segundo os autores “o projeto integrado de produtos mecatrônicos é caracterizado pelo uso intensivo da simulação e da modelagem ao longo dos estágios de projeto e da prototipagem”. Essa definição é corroborada por Chan & Leung (1996), que afirmam ser o desenvolvimento de produto em mecatrônica um esforço de equipe. O grupo responsável inclui engenheiros com diversas especializações: projeto, fabricação, qualidade e marketing em todas as disciplinas envolvidas (mecânica, elétrica, controle, programas de computador embarcados).

A integração na mecatrônica é promovida mediante a combinação de hardware (componentes eletrônicos e mecânicos) e software (controle e processamento de informações). A integração do hardware é obtida a partir do projeto do sistema mecatrônico como um sistema global e agregando sensores, atuadores e microprocessadores no sistema mecânico. A integração do software é baseada primeiramente nas funções de controle, que permitirão o funcionamento dentro de condições e limites definidos, e pode também englobar outras funções de processamento de informações.

Adamowski & Furukawa (2001) descrevem o funcionamento geral de um sistema mecatrônico: os sensores captam as informações do mundo físico que são processadas digitalmente, resultando em ações de controle. O sistema de controle age sobre o sistema físico através de atuadores. Disto resulta um sistema realimentado, que pode representar sistemas com níveis variados de complexidade.

Coelingh, de Vries & Amerongen (1997) ressaltam que durante o projeto do produto mecatrônico é necessária preocupação especial para com o sistema de controle. Um modelo do sistema a ser projetado deve ser estabelecido e deve prever simplicidade e baixo custo e reduzido número de parâmetros.

De Vries & Breunese (1995) afirmam que a grande vantagem do uso da abordagem mecatrônica no projeto é o aumento da funcionalidade (mais inteligência e flexibilidade), do desempenho e da confiabilidade, sem aumento de custos. Isso se dá justamente com a utilização do software com funções de processamento de informações.

Fruchter *et al* (1995) relacionam a abordagem mecatrônica ao método de Shigley. Para eles o projeto é um processo iterativo de síntese, análise e avaliação. Primeiramente é

preciso sintetizar os conceitos e soluções adotadas a partir dos requisitos e especificações disponíveis. Na etapa de análise, o desempenho do projeto é estimado a partir de soluções concebidas na fase anterior. Já na etapa de avaliação, o desempenho medido ou simulado pode ser comparado aos requisitos e especificações definidas. O projeto ou até os seus requisitos podem ser alterados em função dos resultados da etapa de avaliação. Modelagens e testes podem revelar a necessidade da modificação de uma parte do sistema, o que significa que o projeto encontra-se em um permanente ciclo de comunicação, que continua até que o consenso esteja estabelecido.

Por outro lado, a abordagem mecatrônica do projeto ressalta um problema característico do trabalho multidisciplinar, relatado por Fruchter *et al* (1995). Segundo o autor, tradicionalmente os seus membros têm dificuldades em comunicar informações do projeto, decisões e problemas entre as disciplinas envolvidas e fases distintas. A comunicação e investigação das soluções são baseadas no uso de:

- modelos distintos do projeto para diferentes equipes que trabalham no projeto,
- computadores individuais ou particulares para gravar as informações,
- diversos tipos distintos de mídias eletrônicas e padrões para a transferência das informações do projeto e
- esquemas de representação e comunicação técnica específicos de um certo grupo de profissionais (termos técnicos, programas de computador, representações gráficas, idiomas, etc).

De Vries & Breunese (1995) ressaltam um ponto muito importante: a abordagem mecatrônica afeta especificamente a fase conceitual do projeto, pois nessa etapa muitas decisões serão tomadas sobre aspectos funcionais, interações e integração espacial em módulos e subsistemas. Justamente nessa fase há um grande investimento em atividades de pesquisa (patentes, regulamentos técnicos, normas, literatura técnica), contatos com os fabricantes, consultas ao mercado e esforços para transformar em princípios de soluções os requisitos do projeto. Essa etapa já é extensa e intensiva no uso dos recursos humanos, o que acaba acarretando um forte impacto nos custos do projeto.

Hewit (1996) acredita que os japoneses exploraram melhor a mecatrônica e na tentativa de obter respostas para tal sucesso fizeram uma pesquisa com um universo de cem engenheiros (acadêmicos e industriais). A pesquisa constou de perguntas sobre temas relacionados à mecatrônica, das quais duas merecem aqui ser apresentadas. A primeira

questão foi a seguinte: “Que áreas de pesquisa em mecatrônica você acha importante no futuro?”. Dentre as respostas mais comuns estava a pesquisa dedicada a sistemas de suporte ao projeto. Uma outra pergunta interessante foi: “Que demandas educacionais são importantes para a mecatrônica?”. Duas respostas se destacaram: o método de projeto e a mecânica de precisão.

Para Schellekens *et al* (1998), o projeto mecatrônico encontra-se sob forte pressão oriunda da necessidade por máquinas, instrumentos e produtos de consumo que requerem alta precisão geométrica na fabricação. Hoje, essa tendência vem sendo muito facilitada pelo desenvolvimento das ferramentas computacionais para projeto (CAD/CAE/CAM) e está refletida na maior dedicação à precisão das formas e dimensões e à qualidade do acabamento superficial. Os autores apresentam um diagrama demonstrando como as exigências por precisão no processo de fabricação cresceram nos últimos anos (Figura 2.10). É importante ressaltar que tais exigências estão refletidas em todos os níveis, desde a fabricação normal até a de alta precisão.

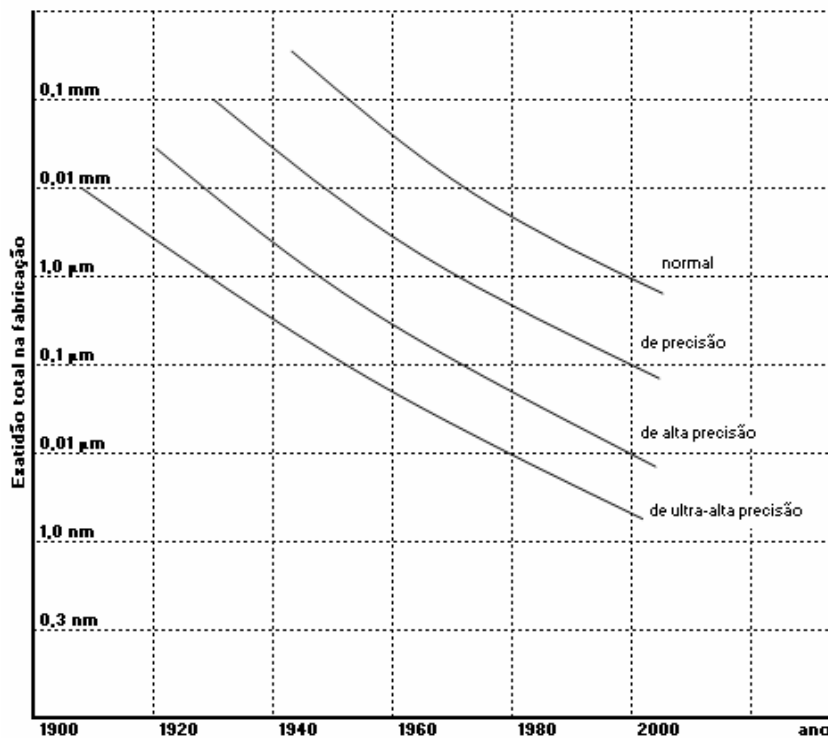


Figura 2.10: Tendências na fabricação de precisão. Fonte: Figura adaptada de Schellekens *et al* (1998).

Para Slocum (2002) há várias razões para fabricar um produto com alta precisão e abaixo se encontram as principais:

- criar um movimento altamente preciso,
- reduzir a dispersão dos resultados da ação de um produto,
- facilitar o ajuste e conseqüentemente viabilizar a montagem automatizada,
- melhorar a eficiência do produto,
- reduzir o custo inicial,
- reduzir o custo de operação,
- estender a vida útil do produto,
- miniaturizar componentes para propiciar a portabilidade.

Slocum (2002) ressalta que a noção de que um produto de alta precisão possui alto custo de produção é equivocada. Ele exemplifica com o caso da fabricação de motores de combustão interna, cuja fabricação de alta precisão eliminou peças de ajuste e vedação entre pistões e cilindros, reduzindo custos na ordem de até 25%.

O Quadro 2.1 apresenta uma síntese dos principais aspectos considerados por Hewit (1996), Breunese (1996), De Vries & Breunese (1995), Shetty & Kolk, (1997), Histan & Alciatore (1999), Slocum (2002) e Schellekens *et al* (1998) sobre o produto mecatrônico.

Autores	Aspectos relevantes para o produto mecatrônico
SHETTY & KOLK HEWIT HISTAND & ALCIATORE	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Necessidade de alto nível de integração e sinergia entre as partes; ▪ projeto multidisciplinar e integrado, com foco na aplicação; ▪ forte utilização de ferramentas computacionais para modelagem e simulação.
DE VRIES & BREUNESE	<ul style="list-style-type: none"> ▪ preocupação com a funcionalidade e inteligência do produto. <ul style="list-style-type: none"> ○ modularização e grande número de conexões
SCHELLEKENS <i>et al</i> HEWIT	<ul style="list-style-type: none"> ▪ preocupação com a precisão (tolerâncias e ajustes mais criteriosos); ▪ melhor acabamento superficial; ▪ formas mais complexas em função da aparência e aplicação; ▪ importância do método de projeto: <ul style="list-style-type: none"> ○ ciclos de projeto menores; ○ maior complexidade.
SLOCUM	<ul style="list-style-type: none"> ▪ precisão dos movimentos; ▪ maiores exigências com a montagem; <ul style="list-style-type: none"> ○ simplificação de movimentos ○ tempo de montagem ▪ forte tendência à miniaturização <ul style="list-style-type: none"> ○ portabilidade

Quadro 2.1: Principais aspectos relacionados ao produto mecatrônico.

Dessa forma, pode-se caracterizar resumidamente o produto mecatrônico da seguinte forma:

- Envolve a integração de componentes, exigindo a modularização e o estabelecimento de subsistemas.
- Possui interação funcional e integração espacial:
 - Presença de interconexões mecânicas e elétricas entre sensores, atuadores e módulos eletrônicos de controle e processamento de informações:
 - disposição e localização de módulos e dispositivos mecânicos e eletrônicos, baseados nas necessidades de integração entre os mesmos e de montagem ordenada;
 - Necessita de adensamento espacial como resposta a exigência por portabilidade, muitas vezes resultando em forte miniaturização, o que implica em dimensões reduzidas;
 - Presença de um chassi, base ou carcaça que fixa, alinha, abriga ou suporta conexões e componentes eletrônicos, mecânicos, etc, com características topológicas influenciadas pelas exigências de precisão e integração espacial;
 - Necessidade de movimentos precisos e facilidade de montagem, resultando em tolerâncias dimensionais, e geométricas apertadas e baixos níveis de rugosidade (acabamento superficial superior):
 - tolerâncias dimensionais e geométricas abaixo de 10 μm , afetadas pela necessidade de integração entre os componentes, precisão de movimentos e automatização da montagem;
 - Exige a interação efetiva entre subsistemas (conexão e comunicação).
- Seus componentes mecânicos possuem formas geométricas complexas e tolerâncias geométricas apertadas, além de exigir o uso da modelagem geométrica e montagem virtual em CAD para se ter um projeto efetivo:
 - acabamento externo motivado pela aparência e ergonomia, priorizando a forma e o acesso a controles, conexões e interfaces;
 - uso da simetria ao máximo, a fim de reduzir esforços adicionais de modelagem em CAD e facilitar a fabricação e a montagem;
 - uso intensivo de dispositivos e módulos de prateleira, isto é, disponíveis no mercado para uso genérico.

- o Geralmente possui software embarcado, capaz de assumir funções de controle, aquisição e manipulação de dados e, em muitos casos, interfaces para outros sistemas de software.

A segmentação do produto mecatrônico em módulos e subsistemas acaba naturalmente reforçando a tendência por especialização e separação entre as disciplinas durante a fase de projeto do produto. O resultado pode chegar à realização de projetos distintos para módulos específicos, como a parte mecânica separada da eletrônica, levando a resultados muitas vezes indesejáveis. Em contraposição a esse contexto, existe a necessidade de garantir a operação adequada de componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos, que propicie a correta comunicação e transmissão de movimentos e força, exigindo a definição de estruturas de suporte com características topológicas específicas, em função da localização de sensores, atuadores e conectores. A falta de sinergia na etapa de projeto causa retrabalho por conta das dificuldades de comunicação entre equipes que operam com pouca interação e acaba resultando no aumento de prazos e custos, além da baixa eficiência do resultado do projeto.

Para os propósitos deste trabalho e em função das características específicas das PMEs, a solução mais eficaz é adotar um modelo de projeto clássico associando a ER, como proposto por Groover (2001), Várady *et al* (1997), Lee & Woo (2000), Mavromihales & Weston (2003), e englobando as suas diversas abordagens (ERE, ERM, ERS, ERC). Entretanto, não se pode deixar de lado o conjunto de aspectos levantados por diversos autores no Quadro 2.1, como orientações para a definição de procedimentos em um método de projeto criterioso e orientado às necessidades da PME.

2.4. O PROJETO DE PRODUTO MECATRÔNICO NA PEQUENA E MÉDIA EMPRESA

Há de se ressaltar logo de início um ponto relevante relacionado à PME: a sua limitada capacidade de investimento e de disponibilidade de capital de giro, o que restringe o acesso à tecnologia e à atração de profissionais capacitados e em número suficiente. Tal situação exige a adoção de estratégias focalizadas e criativas para se manterem competitivas quando estão inseridas em mercados que envolvem produtos de base tecnológica, como é o caso dos produtos mecatrônicos. Por conseguinte, é imprescindível que a PME busque formas

de aplicar métodos de projeto focalizados no prazo e na utilização de recursos a custos moderados e já disponíveis no mercado.

Para Eckert *et al* (2006) as mudanças incrementais no produto reduzem os riscos de introdução da inovação e os custos com o projeto. A inovação acaba por incutir o risco do novo, daquilo que não está amplamente testado e submetido à chancela do mercado. Por outro lado, o processo de projeto convencional, em todo o seu ciclo, como proposto por Pahl & Beitz (1988) e Shigley (1977) representa elevado custo para o fabricante. O reprojeto utilizando mudanças incrementais no produto é uma estratégia pragmática para controlar o esforço de projeto e os riscos com segurança e confiabilidade, mas também é uma forma cognitiva de lidar com a complexidade do produto (ECKERT *et al*, 2006).

Portanto, o reprojeto baseado na reutilização de componentes ou módulos já testados e aprovados é uma estratégia que aposta na segurança e confiabilidade do produto matriz (produto original objeto da ER). Na área médica, de aviação e outras onde a segurança é fundamental, isso é ainda mais importante. Também o tempo dedicado ao projeto e ao enfrentamento das dificuldades relacionadas à complexidade do produto podem ser reduzidas. Tal conjunto de vantagens é justamente o que precisam as PMEs, pois importam na redução de prazos e custos, sem ter que abrir mão da segurança, confiabilidade e inovação.

Considerando-se uma equipe reduzida, característica de projetos de baixo custo e baseadas na ER, é justo supor o seu alinhamento às necessidades de mudanças, até como forma de evitar a cópia pura e simples de um produto matriz. Portanto, num método de projeto com base na ER, a mudança é fundamental e a sua gestão importante para a obtenção de resultados mais confiáveis e em prazos menores.

Nos projetos de produtos mecatrônicos específicos para PMEs, o modelo básico proposto por Groover & Zimmers (1984), Fruchter *et al* (1995), Groover (2001) e outros acaba se tornando o mais adequado, pois representa uma adaptação útil às PMEs, já que nele a ER une o levantamento de dados (incluindo digitalização/medição) com o CAD. Isso o torna mais simples, dinâmico e próximo da realidade industrial das PMEs.

As maiores exigências por precisão geométrica e acabamento superficial, associadas à necessidade de encurtar os ciclos de projeto do produto, conduzem à utilização do CAD como ferramenta de modelagem geométrica e de simulação da montagem e da interação espacial entre componentes, além do uso vinculado ao desenvolvimento dos componentes eletrônicos. Por outro lado, a aplicação da ER ao projeto de produto em grande escala (como abordado por Ingle, 1994) exige a utilização de tecnologias de medição que sejam capazes de

obter informações diretamente do produto matriz e com grande precisão, o que leva à medição tridimensional, que é cara. Assim, em um método de projeto voltada à PME, a utilização da medição tridimensional deverá ser usada com parcimônia e racionalidade, a fim de não inflacionar os custos.

A utilização de um método de projeto sistematizado, que englobe ferramentas oriundas dos métodos convencionais à ER e técnicas de medição e ensaios adequadas, é fundamental para a garantia de resultados confiáveis, em prazos menores e a custos reduzidos, estrategicamente requeridos pelas PMEs.

O custo, em especial o de pessoal, é justamente uma das maiores barreiras para a realização de um projeto no âmbito da própria empresa. Por isso, a subcontratação de serviços a escritórios de projetos, centros de pesquisa, institutos tecnológicos ou universidades ou ainda da utilização da modalidade de consórcio para programas de computador, máquinas e equipamentos de medição e ensaios são soluções exequíveis a custos razoáveis. Além do mais, tais instituições freqüentemente têm acesso a linhas de financiamento especiais (por meio de instituições como a FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos), algumas não-reembolsáveis ou com baixas despesas financeiras, ou a programas de fomento à exportação, como o PROJEX (Programa de Apoio Tecnológico à Exportação) do Governo Federal.

Em síntese, observa-se que métodos de projeto adequados são extremamente relevantes para a competitividade das PMEs. Além disso, a partir das constatações deste capítulo e diante da hipótese estabelecida no capítulo 1, conclui-se que um método de projeto de produto mecatrônico adequado às PMEs deve ser capaz de atender pelo menos aos seguintes requisitos:

- explorar a engenharia reversa como alternativa para poupar tempo e consequentemente diminuir custos do projeto;
- usar ferramentas computacionais de custo moderado, mas eficazes, para promover a agilidade do trabalho, a integração da equipe e a redução de erros;
- explorar o potencial das ferramentas disponíveis para se gerar projetos mecânicos de precisão, que sustentarão os sistemas mecatrônicos;
- utilizar racionalmente meios para coleta de dados do produto matriz (p. ex.: digitalização, ensaios em programas de computador e circuitos eletrônicos, medições em geral);
- fazer uso cuidadoso da contratação de serviço ou da modalidade de consórcio

para permitir o acesso a equipamentos, pessoal e programas de computador, que estejam além do alcance financeiro da empresa ou que não seja economicamente atraentes como investimento.

3. A ENGENHARIA REVERSA NO PROJETO DE PRODUTO MECATRÔNICO

O desafio de se ter um produto competitivo em curto espaço de tempo e a baixo custo em uma PME pode ser alcançado com a utilização de um método adequado, que focalize a abordagem de projeto mecatrônico e que utilize modernas ferramentas de auxílio, como, por exemplo, o CAD e a medição por coordenadas, mas, sobretudo, que explore as vantagens da utilização de um produto reconhecido pelo mercado como referência, de forma a aproveitar as oportunidades de aprimoramento, como a melhoria da precisão mecânica ou a busca por novas soluções ou abordagens para o software embarcado e o respectivo hardware.

Vê-se que a ER pode exercer um papel importante na redução do tempo de ciclo do projeto de um produto mecatrônico com o uso de técnicas de medição para o aproveitamento de informações sobre um item já aceito pelo mercado e com uma sistemática de reprojeção atenta às mudanças e melhorias necessárias. O objetivo, como já dito, é garantir menores custos no desenvolvimento de novos produtos e mais agilidade no seu aprimoramento, requisitos fundamentais para a competitividade das PMEs.

Um diagrama que caracteriza o aspecto geral do processo de projeto aqui abordado é mostrado na Figura 3.1 e cada uma de suas fases é comentada em seguida.

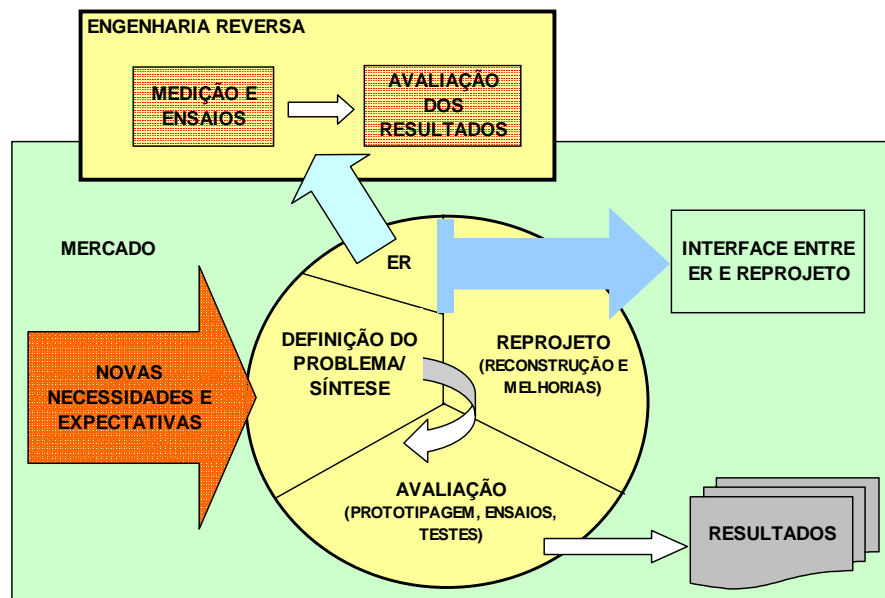


Figura 3.1: O processo de projeto. Fonte: Figura adaptada de Fruchter et al (1995).

3.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA/SÍNTESE

Assim como nos modelos de projeto convencionais, a fase de definição do problema corresponde à etapa conceitual, onde são definidos os requisitos adicionais ao produto matriz, uma sistemática para estudo das novas funções é aplicada e são selecionadas as soluções para as novas necessidades identificadas. Entretanto, neste modelo boa parte do esforço conceitual é substituída pela ER. Segundo Antonsson & Otto (1995) no estágio conceitual nos métodos convencionais de projeto alcança-se uma descrição ainda vaga e imprecisa do produto. Utilizando a ER, parte-se de um produto já operacional, o que resulta em informações provenientes de elementos físicos e comportamentos definidos do produto matriz. Isso poupa tempo no projeto e permite focalizar nos pontos onde é possível e necessário introduzir melhorias para a evolução do produto, principalmente em precisão mecânica.

Entrevistas com usuários finais, pessoal responsável pela manutenção e venda e o acompanhamento do produto matriz em operação revelam a necessidade de adicionar novos atributos e funções para melhor posicionamento do novo produto no mercado. Em função da complexidade do produto, métodos formais de identificação e tratamento das necessidades dos clientes e requisitos adicionais do produto devem ser utilizados. No Apêndice 1 encontram-se exemplos de métodos para a consulta aos clientes e o tratamento de suas necessidades, assim como a identificação da estrutura de funções do produto.

As informações obtidas da ER, os novos requisitos estabelecidos pelas necessidades dos clientes e o conhecimento da estrutura de funções do produto criam oportunidades de se reavaliar o projeto original à luz das novas tecnologias disponíveis e de diferentes abordagens para o tratamento do mesmo problema (p. ex.: o atendimento a uma função por meio de um circuito eletrônico pode ser agora atendido por um software). Uma importante ferramenta para o projetista avaliar e combinar soluções é a Matriz Morfológica. Segundo Back & Forcellini (2003), o método morfológico consiste numa pesquisa sistemática de diferentes combinações de elementos ou parâmetros, com o objetivo de encontrar uma nova solução para o problema. O Apêndice 1 traz a sistemática de construção da Matriz Morfológica.

3.2. ENGENHARIA REVERSA

A ER pode ser fundamentalmente segmentada em duas etapas principais: Medição e

Ensaaios, onde as informações sobre o produto matriz são coletadas e Avaliação, momento onde as informações coletadas são organizadas e avaliadas quanto ao seu aproveitamento nas fases subsequentes. Por outro lado, como visto no Capítulo 2, no projeto de produto mecatrônico a ER deve ser observada sob perspectivas mais especializadas, resultando em três abordagens: mecânica, elétrica e software/controle.

O ponto crucial do processo de projeto utilizando a ER é justamente a interface entre a coleta de informações do produto matriz e a fase de reprojeto, já que por ela trafegam todos os subsídios necessários ao desenvolvimento do novo produto. Essa interface pode ser identificada na Figura 3.1. A Figura 3.2 detalha os meios pelos quais as informações são coletadas e transferidas em cada abordagem de ER. Ela é uma boa representação da ponte entre a ER e o reprojeto. As características gerais do produto mecatrônico e da abordagem mecatrônica de projeto (conforme apresentadas no Capítulo 2) acabam provocando uma série de dificuldades durante a fase de levantamento de dados, principalmente nas etapas onde ocorrem a medição, a digitalização e os ensaios. Um método de projeto utilizando ER deverá ser capaz de tratá-los para que as informações transferidas à etapa de reprojeto sejam as mais exatas e completas quanto possível.

Observando-se ainda a Figura 3.2 e comparando-se as três abordagens de ER para um produto mecatrônico, é possível notar como a ERM apresenta desafios mais marcantes. Os pontos cruciais da interface estão inegavelmente em maior número e carecem de um tratamento automatizado e sequer suficientemente sistematizado. Tal situação permite classificar a ERM como a abordagem de maior complexidade no método e resulta em um tratamento específico neste trabalho.

3.2.1. A COLETA DE INFORMAÇÕES DO PRODUTO MATRIZ NA ENGENHARIA REVERSA E A INTERFACE COM O REPROJETO

A etapa de levantamento das informações a partir do produto matriz (digitalização, medições, ensaios e outros meios) engloba decisões sobre quais informações serão importantes e como serão utilizadas em etapas posteriores. As funções do item submetido à ER e as suas condições reais de operação, incluindo interações com outros equipamentos, são exemplos de informações extremamente importantes para se determinar quais conjuntos de dados serão relevantes. A equipe de projeto envolvida na ER precisa responder diversas

questões antes de proceder à coleta de dados do produto matriz. Na ERM, por exemplo, será necessário avaliar detalhadamente todos os elementos geométricos? Quais os elementos que podem ser determinados pelo próprio projetista em função de novos parâmetros de ergonomia ou de padronização? Que nível de detalhamento deve ser empregado em função das tolerâncias geométricas envolvidas? Na ERE, quais circuitos precisam ser profundamente investigados e quais podem ser substituídos por padrões comerciais? Na ERS/ERC, as funções do software original ainda serão aplicáveis ao novo produto? É necessário investir na coleta pormenorizada de informações do software? Tais questionamentos podem ser respondidos por meio da análise das aplicações do produto e das suas funções, como já discutido.

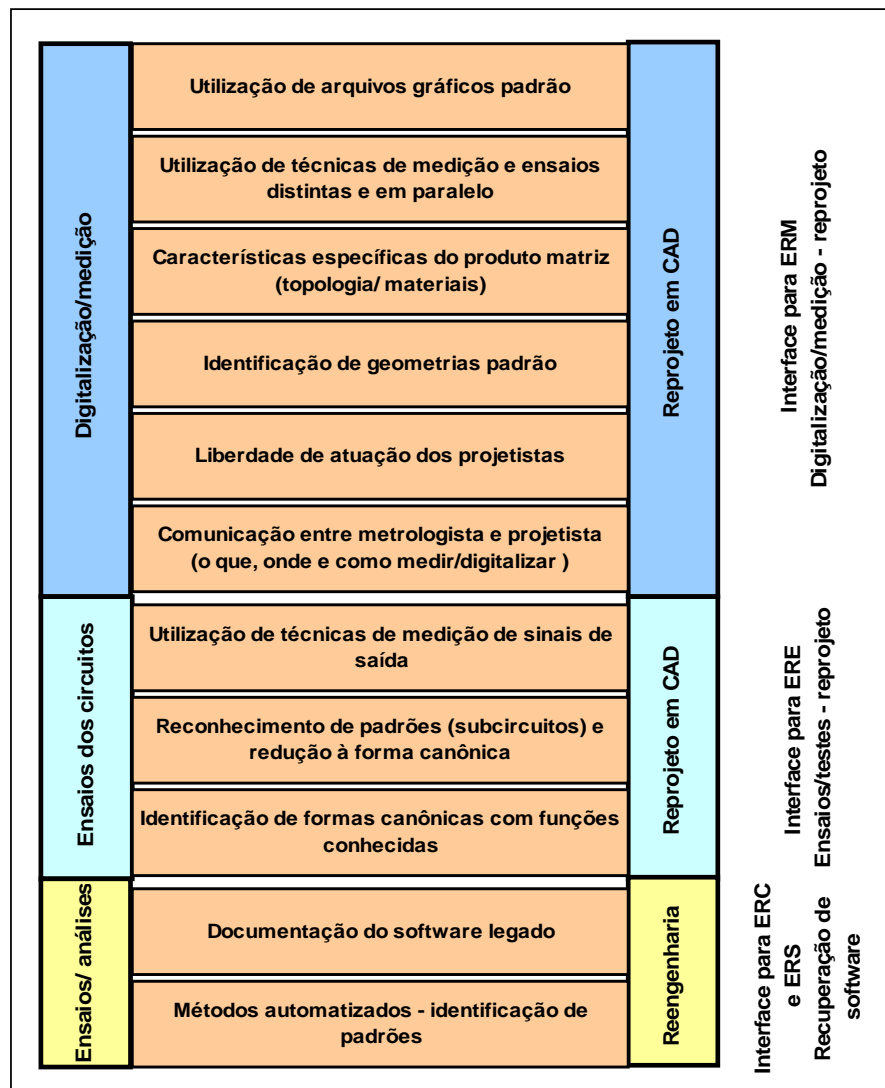


Figura 3.2: Interface entre ER e reprojeto.

3.2.2. ENGENHARIA REVERSA APLICADA À ELETRÔNICA, AO SOFTWARE E AO CONTROLE

Conforme ilustrado na Figura 3.2, no caso da abordagem de ERE, a interface entre a coleta de dados e o reprojeto possui três pilares. Em primeiro lugar, é imprescindível à abordagem ERE obter dados dos circuitos a partir da geração de sinais de entrada e medição de sinais de saída, utilizando geradores de funções, multímetros e osciloscópios. Um segundo pilar da ERE é o reconhecimento de padrões, após a segmentação do circuito em seus subcircuitos e estes à suas formas canônicas como resultado das medições realizadas na primeira etapa. O terceiro e último pilar faz a associação das formas canônicas identificadas com funções conhecidas para circuitos eletrônicos, inclusive permitindo a utilização de soluções alternativas.

Para Chisholm *et al* (2003), a etapa de coleta de dados da ERE consiste da desmontagem e avaliação do circuito eletrônico, alcançando a descrição das funcionalidades por meio da imagem de sua estrutura interna ao nível de transistores. Entretanto, em função da miniaturização e de barreiras intencionais para evitar a ER, o processo de levantamento de dados utilizando unicamente a imagem do circuito eletrônico é, segundo Chisholm *et al* (2003), hoje praticamente impossível. Os autores criaram um software dedicado a automatizar grande parte do processo de coleta de dados da ERE (*Reverse Engineering Assistant – REA*). Uma das funções do software é permitir a comparação de circuitos do produto matriz com uma biblioteca de componentes conhecidos. Nos circuitos onde essa análise, chamada de Sintática, não é possível, o software possibilita a utilização de uma técnica denominada Semântica, que transforma os circuitos do produto matriz em uma descrição canônica, tendo como referência uma biblioteca de formas abstratas. A forma canônica é aquela onde a função do circuito pode ser transformada por meio de um método bem definido em um modelo matemático. Portanto, esse método mapeia os circuitos semanticamente idênticos, transformando-o em um conjunto de fórmulas para cada resposta do circuito. Um exemplo do método é a aplicação para um circuito somador de 1 bit. Ele tem três entradas a , b e C_{in} e duas saídas C_{out} e sum . As saídas são definidas como a seguir na forma canônica *XOR/AND* para um somador de 1 bit.

$$sum = XOR(C_{out}, XOR(a, b))$$

$$C_{out} = XOR(AND(C_{in}, a), XOR(AND(C_{in}, a), XOR(AND(C_{in}, b), AND(a, b))))$$

Quanto à ER desenvolvida para o software, seja ele dedicado ao controle ou ao processamento da informação, são dois os pilares que sustentam a interface entre a coleta e o tratamento das informações provenientes do produto matriz. A documentação do software é o primeiro pilar. Não é incomum encontrar farto material sobre o software, utilizado principalmente na sua manutenção, inclusive o código fonte ou alguns de seus trechos. O segundo pilar são os métodos para identificação de padrões de comportamento do software. Esses métodos permitem detectar padrões reconhecíveis de operação, que podem ser reproduzidos no desenvolvimento do novo software (reengenharia de software). Segundo Novaes e Prado (2002), diversas técnicas padrão de ERS são utilizadas para obtenção do código legado e de seus diagramas de seqüência, que representam os fluxos de execução dos cursos normal e alternativos de cada cenário de uso do código legado. Um dos exemplos citados pelos autores é o método Fusion-RE. Existem alguns programas comerciais aplicados à ERS, como o Imagix 4D, capaz de coletar dados sobre o software matriz e gerar seu código fonte, identificado a arquitetura, estruturas de controle e fluxo de dados.

Na ERE, ERS e ERC, a ER procura identificar padrões de comportamento do software ou circuito eletrônico. Para Novaes e Prado (2002), padrões têm sido usados para descrever soluções para um problema repetido de projeto, ou princípios de projeto que se mostraram úteis no desenvolvimento de software. Estudos mostram que quando especialistas trabalham em um problema particular é raro que inventem uma nova solução para atacá-lo. Diversas soluções de projeto são por eles conhecidas, de acordo com a própria experiência ou a de outros profissionais. Quando confrontam-se com novos problemas, freqüentemente lembram-se de outros similares e reusam a solução antiga, pensando em pares "problema/solução". Esses pares podem ser agrupados em famílias de problemas e soluções similares, sendo que cada família exibe um padrão tanto de problema quanto de solução. Os padrões têm pelo menos dois propósitos: primeiro, fornecem exemplos a serem seguidos e artifícios a serem copiados e, para, então, serem posteriormente refinados ou estendidos.

Novaes e Prado (2002), definem ainda "*clichês*" como estruturas de programação ou algoritmos comumente usados no desenvolvimento de sistemas, isto é, padrões identificáveis. Apontam como vantagens do reconhecimento automático de clichês: "o aumento da facilidade de manutenção, documentação, evolução, otimização e depuração de software". Além disso, ajuda no estudo de como representar e usar o conhecimento e experiência de programação. Uma ferramenta específica para essa função é o *Recognizer*, que encontra, automaticamente, todas as ocorrências de determinados tipos de clichês em um programa e com base nisso,

constrói uma descrição hierárquica do mesmo.

3.2.3. ENGENHARIA REVERSA APLICADA À MECÂNICA

Quando a análise da ligação entre a ER e o reprojeto é executada para a ERM, encontra-se um cenário mais denso. Primeiramente, a ERM demanda o uso de um dentre vários tipos de arquivos gráficos padrão para transferência dos dados geométricos e topológicos identificados durante a sua coleta. A ERM também necessita de diversas técnicas distintas de medição e ensaios em paralelo, como por exemplo, a medição de distâncias e ângulos por meio de instrumentos convencionais, o ensaio para caracterização de materiais, a digitalização de geometrias utilizando MC e a análise de falhas. Um outro importante pilar é definido pelas características específicas do produto matriz, que podem afetar a coleta de informações e a sua transferência para o reprojeto, como a dificuldade de acesso a determinadas áreas da geometria ou o fato das superfícies serem constituídas de material facilmente deformável (p. ex.: espuma ou plásticos de paredes finas). Elementos padrão, como elementos de máquinas (p. ex.: mancais, roscas, parafusos, polias e eixos) devem ser identificados mediante observação e medições complementares e podem ser especificados detalhadamente na fase de reprojeto.

Um ponto crucial na ERM é a liberdade de atuação do projetista. Se por um lado permite a flexibilidade na especificação de elementos oriundos de padrões detectados, por outro pode fugir ao foco da ER e resultar em características indesejáveis ao cliente quando do reprojeto. Na ERM, um dos pontos de maior importância, justamente por ser aquele que pode causar forte impacto sobre o resultado da ER, é a comunicação entre o metrologista e o projetista durante atividades de digitalização. Zonas de digitalização específicas, seus limites, interseções entre curvas e superfícies e densidade de pontos são variáveis de controle difícil e todas fortemente dependentes da interação entre quem está realizando a medição e quem fará a reconstrução das geometrias no CAD. A topologia do produto matriz também necessita ser interpretada conjuntamente pela equipe (metrologista e projetista). É preciso identificar a relevância da representação de superfícies complexas (elas podem ser substituídas ou suas formas podem ser alteradas, ou devem ser digitalizadas com máxima fidedignidade?), zonas onde as tolerâncias dimensionais e geométricas forem importantes para o produto matriz precisam ser digitalizadas criteriosamente, interseções entre superfícies e elementos

geométricos diversos por conta da existência de aberturas para conexões, elementos de fixação, botoeiras, telas, etc.

Na Figura 3.3 pode-se constatar o resultado de uma digitalização utilizando uma máquina de medir por coordenadas (MMC), realizado sem a adequada comunicação entre o metrologista e o projetista. Trata-se de parte da carcaça (local da empunhadura) de um endoscópio. Nota-se, em comparação com a Figura 3.4, diversas zonas com deformações e até uma separação visível entre duas superfícies. Isso tudo é o reflexo das dificuldades encontradas na interface entre as etapas de medição/ digitalização e reprojetado na ERM, principalmente no que se refere à adequada coleta de pontos no processo de digitalização.

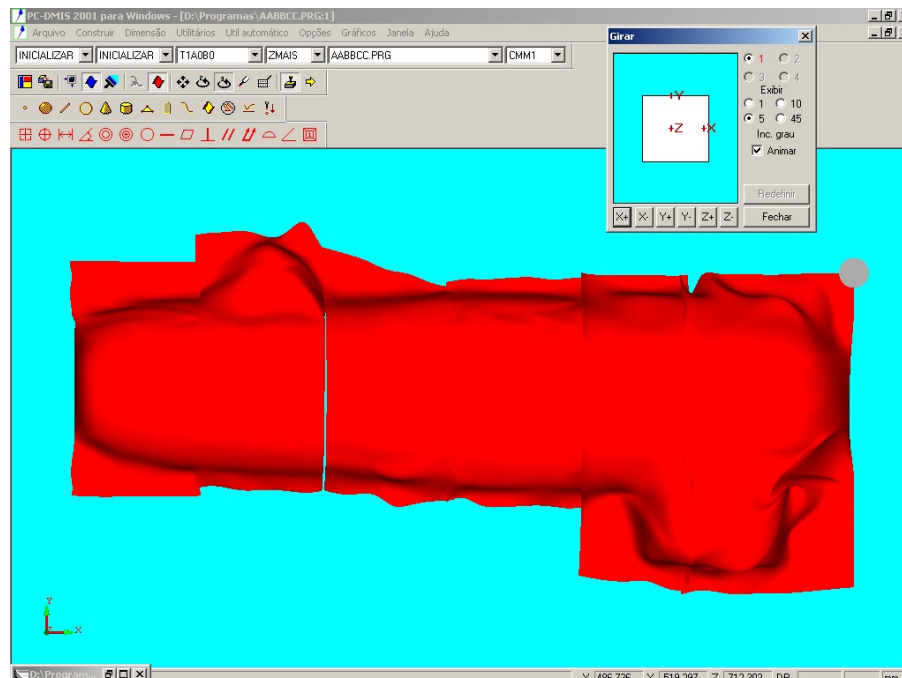


Figura 3.3: Geometria reconstruída em CAD após digitalização numa MMC. Fonte: SENAI CIMATEC.

Na ERM há uma maior variedade de tipos de ensaios e medições (p. ex.: digitalização por contato, medição com paquímetro, ensaio de tração, simples observação do produto matriz), que precisam ser realizados em paralelo. O planejamento e a execução de tais ensaios e medições devem ser conduzidos em conjunto pelo projetista e por quem fará os ensaios/medições. A falta de sistemáticas claras para tratamentos desses itens e as dificuldades de comunicação entre os membros da equipe causam considerável investimento extra em tempo e recursos. São essas as principais questões, que precisam ser devidamente tratadas no planejamento da coleta de dados na ERM:

- O que digitalizar, medir e ensaiar e como? O que pode ser objeto de simples observação do projetista?
- Qual a importância de cada item a ser digitalizado, medido ou ensaiado? Quanto investir em dedicação para cada item?
- Quais as relações entre partes elétricas e mecânicas e de como identificar os itens importantes para documentar?
- Como tratar os detalhes geométricos provenientes de conexões, elementos de fixação (parafusos, rebites, cordões de solda), botoeiras e telas?
- Como tratar geometrias complexas, como curvas e superfícies?
- Qual a incerteza de medição necessária a cada processo? Quais instrumentos de medição serão necessários?



Figura 3.4: Item digitalizado na Figura 3.3. Fonte: SENAI CIMATEC.

Tais questões precisam ser tratadas num enfoque metodológico específico, que possa dirigir ações e facilitar decisões, de forma a reduzir o tempo e o custo com digitalização, medição e ensaios, além de diminuir a possibilidade de equívocos em função de decisões ou considerações inadequadas durante o processo. Tais erros afetarão a fase de reprojeto e exigirão mais tempo de uso dos equipamentos de medição, daí a importância da coleta adequada das informações e seu tratamento.

Em função da complexidade da interface em ERM e da dependência direta do fator humano para o sucesso do trabalho, o método proposto no Capítulo 4 enfatizará a ERM e os procedimentos relacionados à interface entre a coleta de dados do produto matriz e o reprojeto.

3.2.4. A COLETA DE INFORMAÇÕES NA ABORDAGEM MECÂNICA DA ENGENHARIA REVERSA

Especificamente para a ERM, a coleta de dados da matriz original pode envolver muitas técnicas diferentes, que vão desde a simples observação, comparação, medição criteriosa, identificação de propriedades de materiais até o levantamento de detalhes topológicos e especificações técnicas. Serão definidos a seguir três técnicas distintas: medição, ensaio e digitalização.

Medição, segundo INMETRO & CNI (2000), é o conjunto de operações que têm por objetivo determinar o valor de uma grandeza. Grandeza é um atributo de um fenômeno, corpo ou substância, que pode ser qualitativamente distinguido e quantitativamente determinado. Na ER em geral, a medição é utilizada para identificar certos parâmetros específicos, como o diâmetro de um furo, a tensão elétrica em um conector, a rugosidade de uma superfície, etc. O termo ensaio pode ser confundido com medição, na medida em que seu principal objetivo é determinar o valor de alguns atributos de um fenômeno, corpo ou substância. Entretanto, o seu uso amplo está associado a um conjunto de medições (onde várias grandezas são medidas em um único ensaio), como nas áreas de tecnologia dos materiais, mecânica, química, eletricidade e outras. Por exemplo, em um ensaio de tração de um cabo de aço, várias medições podem ser efetuadas durante o ensaio e diversos parâmetros podem ser obtidos: tensão máxima, módulo de escoamento, módulo de elasticidade, tensão de ruptura, etc.

A utilização crescente de ferramentas computacionais associadas ao projeto de produto permitiram o uso da digitalização na engenharia reversa. O significado do termo é muito amplo e para os propósitos específicos deste texto, será adotada a definição de González (1995), segundo a qual digitalizar corresponde ao processo de extração de dados da geometria da peça, obtendo-se uma seqüência de pontos no espaço para posterior processamento. Os principais processos de digitalização encontram-se na Figura 3.5.

Os métodos de digitalização são divididos em duas famílias: os métodos táteis, nos quais o sensor entra em contato com o item a medir, e os métodos sem contato. De forma geral, os métodos sem contato apresentam dificuldades operacionais resultantes do surgimento de sombras ou ruídos provenientes da reflexão do sinal sobre a peça (em especial nos métodos acústico e magnético). A incerteza de medição de tais métodos é relativamente elevada em comparação com os métodos táteis, principalmente em função do elevado custo dos equipamentos que apresentam melhores resultados. Os métodos táteis são

operacionalizados por braços de medição (BMs) ou máquinas de medição por coordenadas (MMCs), que podem ser observados na Figura 3.6. O Quadro 3.1 compara seus desempenhos típicos. Em geral, os primeiros fornecem resultados com maiores incertezas de medição, mas têm a vantagem de ser portáteis. Ambos são utilizados não somente para digitalização em ERM, mas também para medição, na inspeção dimensional (para controle da qualidade por exemplo) e até para a calibração de instrumentos de medição (a depender a incerteza de medição requerida). Isto significa que o investimento realizado na aquisição do equipamento pode ser diluído em várias aplicações distintas.

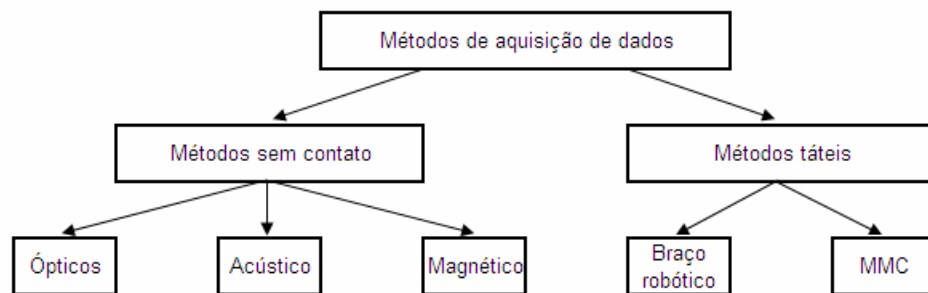
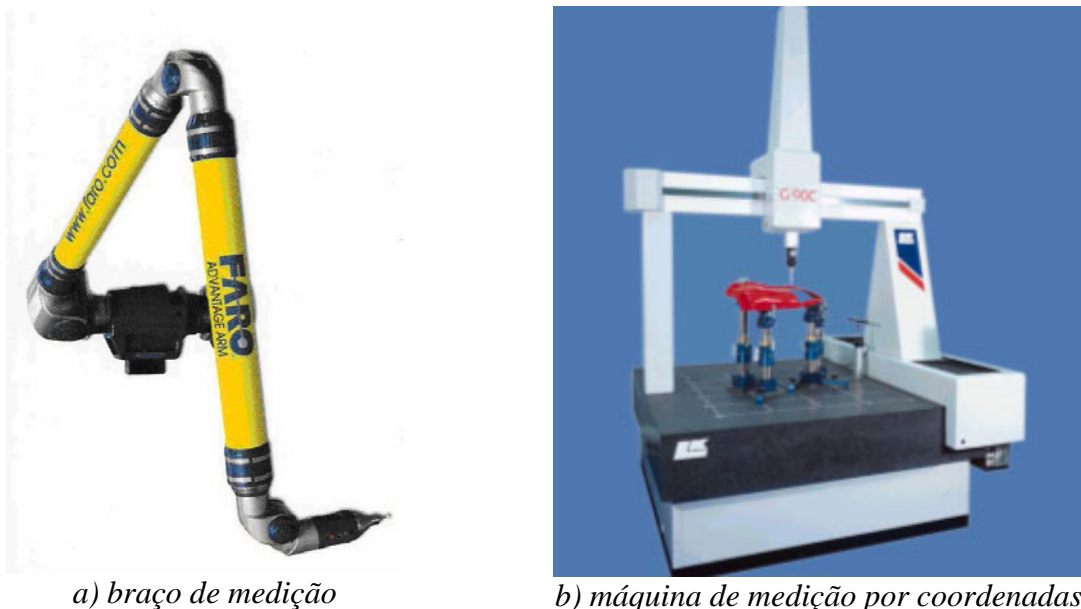


Figura 3.5: Processos de digitalização na ERM. Fonte: Figura Adaptada de VARÁDY et al (1997).



a) braço de medição

b) máquina de medição por coordenadas

Figura 3.6: Sistemas para medição por coordenadas 3D. Fontes: Faro (2004) e LK (1998).

O item c do Quadro 3.1 se refere a um dispositivo portátil utilizando um sensor sem contato a laser. O BM e a MMC dispõem de recursos para digitalização. Porém, o BM não

permite a operação em modo automático (programável), limitando-se a identificação de pontos a partir da manipulação do operador. Essa é uma grande desvantagem em relação à MMC, quando é necessário um grande conjunto de pontos ou um *grid* com distribuição constante de pontos. O desempenho relatado no quadro é uma estimativa dos fabricantes com base na norma ISO 10.360-2.

Equipamento	Exatidão segundo norma ISO 10.360-2	
	Erro total estimado	Repetitividade (medição de esfera)
a) Braço de medição (FARO Gage Plus)	$(5 + 8L/1000) \mu\text{m}^*$	6 μm
b) Máquina de medição por coordenadas (DEA, modelo Scirocco)	$(3 + 4L/1000) \mu\text{m}^*$	2,5 μm
c) Sistema de medição laser portátil (Faro Laser Tracker S1.2)	$(20 + 1,1L/1000) \mu\text{m}$	7 μm

* L – deslocamento em qualquer direção a partir da origem, em mm.

Quadro 3.1: Comparação de desempenhos típicos entre BM e MMC.

Ambos os equipamentos, com faixas de medição semelhantes, podem ser adquiridos por aproximadamente 100 mil dólares estadunidenses, tendo o preço do BM uma tendência de queda nos últimos anos. Ressalve-se, contudo, que as incertezas de medição ainda hoje são relativamente altas para as necessidades de muitas ERMs de produtos que requeiram mecânica de precisão. O mesmo acontece com os lasers de medição.

Para Varády *et al* (1997), existem desvantagens no uso dos métodos táteis, como a dificuldade de acesso a alguns locais particulares da peça e a impossibilidade de operação em materiais moles, como espumas, elastômeros, ou plásticos com paredes muito finas. Entretanto, a maior flexibilidade e menores incertezas de medição dos métodos táteis superam as desvantagens na maioria das aplicações, que não dependem desses materiais específicos.

Pela técnica de medição por coordenadas, se medem características geométricas com a definição de pontos sobre a superfície de um objeto a medir segundo um sistema de coordenadas espacial, seguido por processamento matemático (MAAS, 2001). Algoritmos específicos identificam elementos geométricos a partir de conjuntos de pontos, possibilitando, inclusive, a sua representação gráfica. Esse processamento pode ser empregado para diversas formas geométricas, incluindo superfícies livres, que podem ser discretizadas em pontos. A praticidade na medição, identificação e representação dos elementos geométricos e superfícies livres torna a medição por coordenadas hoje indispensável no controle geométrico.

Segundo Aronson (1996), produtores podem, e costumam fazer ERM no mesmo equipamento utilizado para realizar outros serviços. Portanto, é natural a tendência de empregar um sistema de medição que, apesar de muito utilizado na inspeção dimensional de lotes de peças e de geometrias complexas, pode também ser empregado na realização de ERM. Está exatamente aí uma das grandes vantagens da medição por coordenadas: a flexibilidade no uso do equipamento e ajuda a explicar o seu uso crescente na indústria, inclusive no Brasil, apesar do elevado investimento necessário.

Mas como utilizar a medição por coordenadas (MC) na ERM no contexto da PME, já que o equipamento (máquina de medição ou braço de medição) é tão caro? A solução para tal dilema pode ser a subcontratação do serviço de medição em empresas que possuem equipamento com disponibilidade, em prestadores de serviços, em centros tecnológicos e em universidades, ou ainda a utilização de forma compartilhada em condomínios de empresas. Condomínios tecnológicos são formas cada vez mais comuns de organização de PMEs de base tecnológica, justamente para enfrentar os altos custos de produção e pesquisa e desenvolvimento envolvidos.

A subcontratação de partes do projeto, inclusive sob a forma de parceria, tornou-se possível a partir da moderna tecnologia da informação e mostra-se hoje uma forte tendência, principalmente nas indústrias de produtos complexos. Isto tem sido conseguido sem afetar os compromissos com custo, integração entre disciplinas e ciclos de desenvolvimento mais curtos. “Tornou-se possível fragmentar projetos e transmitir, distribuir, produzir e juntar de novo as suas peças, conferindo uma liberdade muito mais ampla ao trabalho, principalmente intelectual” (FRIEDMAN, 2005). Tal tendência não se limita a grandes empresas, mas também converge em direção ao pequeno negócio, a partir da popularização da conectividade em banda larga e da videoconferência e motivados pela queda nos custos da comunicação. Tudo isso promove o desenvolvimento remoto e segmentado do projeto, sem perder a sinergia e o foco no mercado. A terceirização da medição segue o mesmo raciocínio, desde que sejam observados os devidos cuidados na comunicação entre as equipes (projeto e medição) e na especificação correta e detalhada do escopo do trabalho, ambos com o objetivo de garantir resultados eficazes.

Em alguns tipos de produtos mecatrônicos, a complexidade das peças e a necessidade de manter-se uma única origem de coordenadas para o conjunto tornam o uso da medição por coordenadas (MC) imprescindível. Tal produto mecatrônico é constituído de uma série de itens distintos e devem todos ser modelados em CAD utilizando-se uma origem comum

(ponto [0,0,0] do sistema de coordenadas cartesiano) para cada item e para o conjunto montado. Dessa forma, é possível realizar com precisão a montagem virtual (e depois real) de todas as peças no CAD a fim de se obter o produto final. Um dos exemplos típicos de tal necessidade é o atual projeto de automóveis, no qual essa característica é explorada para a montagem virtual do automóvel e a verificação das interferências e descontinuidades entre os itens dos sistemas que compõem o produto, o que é típico da maioria dos produtos mecatrônicos (o automóvel é hoje considerado um produto mecatrônico). O sistema único de coordenadas também é usado para a programação de montagem por robôs e por dispositivos automatizados.

Independentemente das vantagens da MC, ela é atraente no contexto deste trabalho principalmente por atender com sucesso às condições geométricas/topológicas típicas dos produtos mecatrônicos: dimensões reduzidas, necessidade de baixa incerteza de medição para fazer frente a tolerâncias e ajustes apertados e existência de formas geométricas livres, associadas a elementos geométricos básicos. Todos esses requisitos podem ser avaliados por meio da MC, lançando mão do seu arsenal de sensores (por contato ponto a ponto, por contato contínuo, sem contato), diversidade de pontas de medição (dimensões de esferas e comprimento das pontas) e acessórios (pontas especiais para acesso a locais específicos, extensões de grande comprimento, extensões com regulagem angular, etc.) e, sobretudo, fazendo uso adequado do seu software de medição tridimensional associado ao CAD.

Uma abordagem correta na ERM resultará em muitos ganhos na fase de reprojeto, pois aproveitará grande parte das considerações feitas no projeto do produto matriz, como as orientações direcionadas a aspectos específicos, voltadas aos requisitos do processo produtivo na montagem do produto, ao aproveitamento de componentes para reciclagem ou reutilização e à reposição de componentes ou acesso aos mesmos durante a manutenção (*Design for Assembly – DfA, Design for Disassembly – DfD, Design for Maintenance – DfM*).

A eficaz realização da ERM também afeta positivamente as outras abordagens da ER, pois dela resultará a estrutura física que suportará o produto e permitirá a transmissão de movimentos ou força, por exemplo. Por outro lado, o insucesso na ERM poderá causar uma série de problemas de graves conseqüências para a aceitação do produto. Por exemplo:

- dificuldade na montagem de placas de circuitos, sensores e atuadores por conta de equívocos nas dimensões ou localização de elementos de fixação;
- aquecimento excessivo dos componentes eletrônicos como resultado da restrição da ventilação;

- limitações na transmissão de movimentos por conta de geometrias inadequadas ou utilização de elementos de máquinas (p. ex.: rodas dentadas, correias, fusos) não apropriados;
- dificuldade de manipulação do produto em função de geometrias inadequadas ao corpo humano;
- dificuldades na produção (p. ex.: na expulsão da peça plástica após a injeção como resultado de uma geometria não adaptada ao processo de fabricação);
- dificuldades de operação por conta da falta de sinergia entre o sistema de controle e os atuadores (p. ex.: alcance, capacidade de movimentação, limitações de acesso, torque insuficiente), entre outros resultados possíveis.

Conclui-se, portanto, que a medição por coordenadas apresenta vantagens suficientes para destacar o seu uso na maioria dos trabalhos de ER por PMEs, quando a precisão dimensional e geométrica é um requisito importante, como no caso dos produtos mecatrônicos. Além disso, as poucas desvantagens relativas às dificuldades de acesso a certas regiões do item a medir podem ser tratadas utilizando-se acessórios específicos.

3.2.5. DIGITALIZAÇÃO DE GEOMETRIAS-PADRÃO, CURVAS E SUPERFÍCIES

No caso da digitalização de um produto mecatrônico, é comum a topologia ser afetada por elementos destinados à instalação de interruptores, conectores, sensores e atuadores e ainda janelas para ventilação e outros dispositivos. No exemplo de um furo necessário na carcaça de um produto matriz para a instalação de uma conexão elétrica, o operador do sistema de medição precisa saber, antes de tudo, se realmente é necessário identificar o furo e a sua posição. Algumas perguntas precisam ser respondidas: ele ainda será utilizado no novo produto? A precisão na identificação de sua posição é fundamental? Qual a tolerância? Basta identificar um furo ou é necessário identificar um cilindro (a espessura é importante nesse local?). Qual o sistema de coordenadas a ser utilizado (da carcaça, de uma certa placa de circuito impresso, do conjunto montado)? As superfícies que fazem fronteira com o furo precisam ser criteriosamente identificadas? Qual a densidade da nuvem de pontos (conjunto de pontos coletados durante a digitalização)? Quais os limites da digitalização? Essas são algumas questões importantes que precisam ser respondidas para que o trabalho de digitalização tenha resultados efetivos e evite a necessidade de retrabalho.

Nas MMCs a digitalização se dá de duas formas distintas. Inicialmente é possível, mediante um certo número de pontos-chave, identificar elementos geométricos do tipo poliedros (esferas, cilindros, cones), planos, oblongos e outros. Isso é possível, graças às ferramentas de processamento dos modernos programas de computador dos equipamentos. A MMC de medição possui um CAD próprio, caracterizado por possuir recursos suficientes apenas para visualização e identificação de entidades, mas apto a interpretar dados para caracterização de elementos geométricos comuns (ferramenta *features*). Na Figura 3.7 pode-se verificar o resultado da identificação automática de cones e cilindros utilizando uma MMC, cujo software segue o padrão DMIS (ANSI-DMIS, 2006).

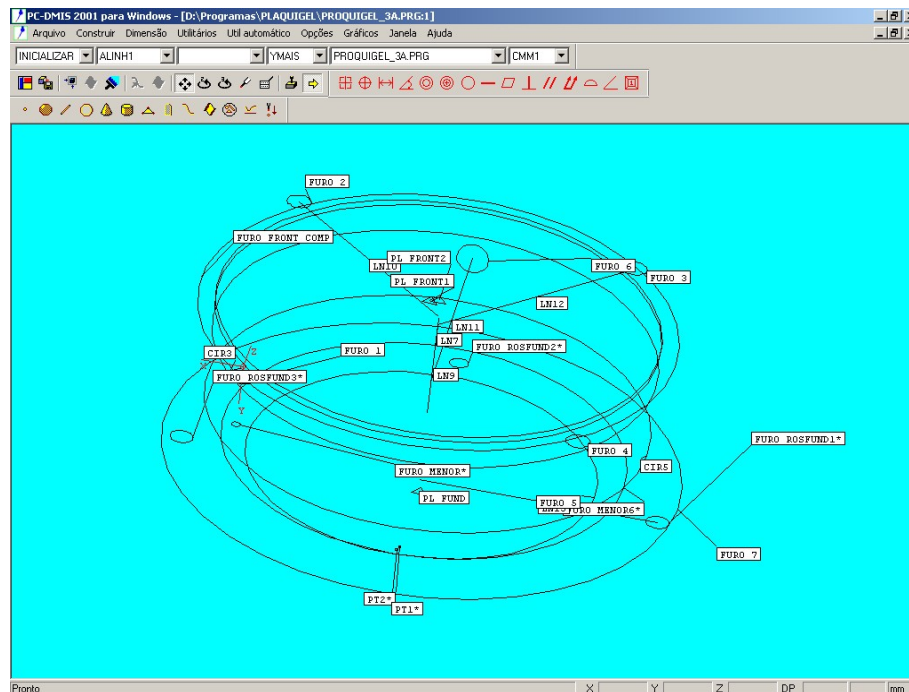


Figura 3.7: Digitalização de geometrias padrão na MMC.

O *Dimensional Measuring Interface Standard* (DMIS) é um padrão desenvolvido a partir dos esforços do *Consortium for Advanced Manufacturing International* e aprovado como norma pela *American National Standards Institute* (ANSI). O ANSI DMIS 5.0 é um protocolo para comunicação bidirecional de dados de medição entre o CAD e o sistema de medição. Nos equipamentos para medição por coordenadas ele é utilizado para a interligação entre o software de controle e a interface gráfica que o acompanha. O DMIS foi criado por um grupo de usuários e fabricantes para diminuir custos e complexidade resultantes do uso de plataformas não padronizadas (também chamados de programas nativos) (RIKER, 1993).

Por outro lado, aquilo que não pode ser identificado diretamente pelo software do equipamento, dentre as entidades geométricas conhecidas, passa a ser objeto de uma outra forma de digitalização, onde são tomados livremente um conjunto de pontos ao longo da curva ou superfície. Tal nuvem de pontos pode ser utilizada para que seja construída uma curva ou superfície no CAD.

Na digitalização de superfícies a densidade do *grid* e o caminho da ponta sensora sobre a peça são questões primordiais a serem definidas. Caso não haja interação entre o projetista e o metrologista, esses parâmetros serão determinados unicamente pela experiência do segundo. A equipe de projeto deve participar amplamente das discussões sobre os parâmetros de digitalização de superfícies, pois a tarefa exige muito tempo e esforço computacional.

As regiões com mudanças de curvatura precisam de um *grid* mais denso, enquanto que as regiões planas ou quase planas exigem um *grid* menos denso. Como não é possível variar o *grid* na digitalização da mesma região, o metrologista deve segmentar a superfície em partes em função do detalhamento necessário, para posterior remontagem no CAD ou utilizar uma densidade de pontos que atenda a ambas as situações.

Krishna *et al* (2000) propõem uma sistemática para avaliação dos *grids*. Inicialmente decide-se por um valor para o *grid* baseado na experiência. Uma segunda digitalização é realizada com metade da densidade do *grid* anterior (dobro de pontos). Em seguida, o metrologista coleta alguns pontos aleatoriamente na região anteriormente digitalizada e transfere todas as informações para o CAD por arquivo gráfico padrão. Cabe ao projetista comparar qual dentre as duas superfícies (opções de *grid* diferentes) mais se aproxima dos pontos individualmente coletados diretamente sobre a peça. Caso a superfície seja digitalizada numa região quadrilátera, o que é mais comum, o metrologista pode coletar cinco pontos de controle, quatro próximos das extremidades e um no centro. Cabe lembrar que esse procedimento é demorado e requer muito tempo de operação do sistema de MC, o que pode elevar em muito os custos de digitalização. Portanto, somente deve ser utilizado onde se deseje um elevado nível de fidedignidade com a superfície matriz.

Em função da demora na coleta de dados e do grande esforço computacional exigido, sugere-se aqui uma regra inicial para o estabelecimento do *grid* em função do tamanho da zona a ser digitalizada. Verifica-se o maior comprimento do quadrilátero limitador da zona a ser digitalizada e divide-se por 50. Por exemplo, para uma zona com 10 cm de comprimento em ambos os lados, adota-se um *grid* de 2 x 2 mm.

Na digitalização de curvas e superfícies um cuidado muito importante a ser observado é a interseção entre vizinhanças. Como revelado por Barbosa e Farinhas (2007), o melhor a fazer na digitalização de superfícies, principalmente onde a topologia é mais complexa, é obter uma série de curvas e definir as superfícies a partir de quatro curvas que a limita. Este método é possível na maioria dos CADs comerciais e preferido dos projetistas, pois garante maior fidedignidade, além de necessitar de um número menor de pontos. O ponto crucial (sistemática preferida neste trabalho) é garantir que as curvas limites tenham pontos de interseção.

3.2.6. SELEÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO

A seleção dos sistemas de medição utilizados na ER pode ser realizada com base em três princípios básicos. Inicialmente, é preciso verificar se o equipamento é capaz de medir aquela dimensão (Ex.: um micrômetro externo não pode medir uma profundidade). A seguir deve-se verificar a faixa de operação do equipamento (Ex.: não se pode utilizar um braço de medição que tem alcance máximo de 500 mm para medir um comprimento de 650 mm). Por fim é preciso avaliar a incerteza do processo de medição/digitalização.

Diversas fontes de erros afetam o resultado de um processo de medição. A faixa de valores na qual se pode encontrar com certo nível de confiança o resultado da medição é chamada de incerteza de medição (ABNT & INMETRO, 2003). A incerteza de medição pode afetar o resultado da digitalização e deve ser monitorada para que esse efeito seja mínimo. Na Figura 3.8 estão ilustrados as três principais causas da incerteza de medição na medição por coordenadas

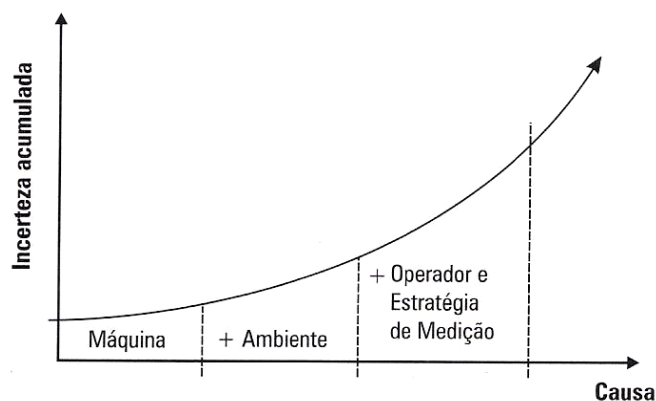


Figura 3.8: Principais causas da incerteza de medição na MC. Fonte: Donatelli et al (2005).

A incerteza de medição pode ser calculada por meio de um método recomendado (ABNT & INMETRO, 2003). Na medição por coordenadas, a incerteza de medição é fundamentalmente devida aos erros e incerteza da calibração da MMC/BM e pode ser obtida diretamente do certificado de calibração em função do comprimento medido. Para as aplicações gerais, tal solução resulta numa estimativa razoável.

A incerteza de medição pode afetar os resultados de uma digitalização na medida em que cada ponto coletado está, na realidade, localizado em uma zona em torno do valor mais provável (ponto indicado na MMC/BM). A situação está ilustrada na Figura 3.9.

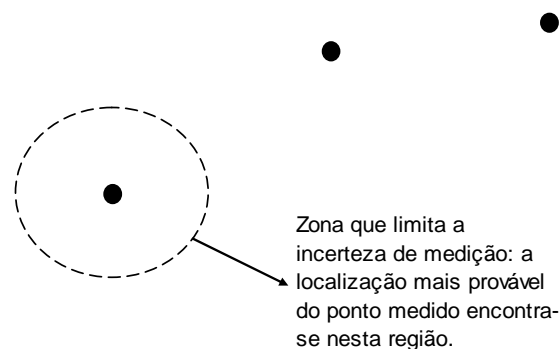


Figura 3.9: Influência da incerteza de medição sob um ponto.

Portanto, a incerteza adicionada ao processo de medição pelo sistema utilizado deve ser melhor que a exatidão esperada para a reconstrução do produto no CAD. Schoeler & Fidelis (1992) sugerem que ela deve ser pelo menos três vezes menor, sendo esta a abordagem usada neste trabalho.

3.2.7. PROGRAMAÇÃO DA MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Com a estratégia de ER estabelecida, pode-se elaborar a programação da medição. Para as medições efetuadas com instrumentos convencionais (paquímetros, micrômetros, trenas, escalas, etc.) um procedimento simples com a seqüência de itens a medir é o suficiente. Para aqueles itens a serem avaliados por MC, um programa de medição CNC precisa ser elaborado. Como não há modelos 3D em CAD do produto matriz, deve-se utilizar a programação do tipo *on line*.

A partir das definições da estratégia da medição o metrologista responsável pela MC,

poderá estabelecer a seqüência de medição, incluindo o caminho de movimentação da ponta sensora, a escolha das pontas e sensores mais adequados, os parâmetros gerais de movimentação (velocidade de deslocamento, velocidade de encontro com a peça, distância de encontro, ângulo de encontro e posição do cabeçote de medição). Ainda nesta fase é preciso definir que elementos ou relações geométricas precisam ser definidos em termos numéricos ao final da execução do programa de medição (Ex.: relações geométricas de forma e posição, como paralelismo, planeza, coaxialidade, cilíndricidade, entre outras) (ABNT, 1997).

A seleção dos sensores (por contato contínuo, ponto a ponto ou sem contato) depende do nível de detalhamento desejado e da dificuldade de acesso a pontos específicos da superfície a ser medida. A escolha das pontas de medição é função do espaço disponível, do nível de detalhamento requerido e do material da peça a medir. Se a peça é pequena e suas superfícies possuem interseções com outros elementos ou muitas mudanças de direções, talvez uma esfera de 0,3 mm seja necessária. Por outro lado, se as condições possibilitam o uso de uma esfera de 2 mm ou até de 4 mm, a programação da medição se torna mais fácil, já que o operador pode visualizar melhor a esfera e o contato desta com a superfície a ser tocada. A medição por contato em peças de alumínio e suas ligas utilizando pontas de rubi (óxido de alumínio sinterizado) não é recomendável, em função da afinidade química entre o sensor e a peça. Ao deslizar o sensor sobre a peça a medir, ocorre a deposição do alumínio da peça sobre o sensor de rubi, o que deforma a superfície do mesmo, introduzindo erros significativos na medição (SCHMIDT *et al*, 2006).

Na Figura 3.10, têm-se um resumo das etapas de programação da MC. Uma questão importante nessa fase é a definição de que forma o elemento a ser medido será fixado e como ocorrerá o alinhamento da peça. Na programação *on line* os elementos de referência que serão utilizados para o alinhamento devem ser escolhidos em função do sistema de coordenadas desejado (direções de alinhamento da peça) e da localização da sua origem (sobre alguma região da peça ou a uma distância pré-determinada). Mais informações sobre a programação na MC podem ser obtidas em Weckenmann (1998).

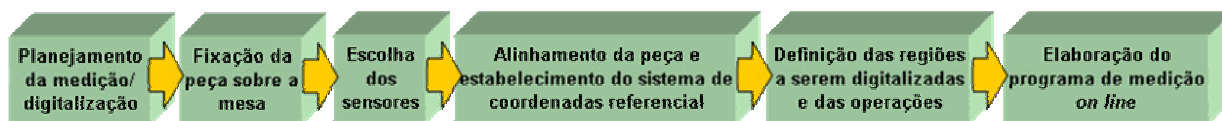


Figura 3.10: Planejamento da medição por MC CNC.

O programa de medição possui duas partes: a primeira construída com a identificação manual (utilizando *joystick* na MMC) dos pontos sobre a peça e a segunda realizada em modo automático (CNC).

Uma seqüência de medição adequada deve prever o mínimo de troca de sensores e de pontas de medição. Com os recursos disponíveis na maioria dos equipamentos de MC atuais, pode-se sugerir a seqüência geral como ilustrado na Figura 3.11. O metrologista, como parte integrante da equipe de projeto, deve analisar criteriosamente aspectos mais críticos da matriz, tais como, acabamento, estado de deterioração, condição das partes padronizadas (sedes de mancais, retentores, eixos, entre outros) e resistência ao toque ao planejar a medição e elaborar o programa da MC.

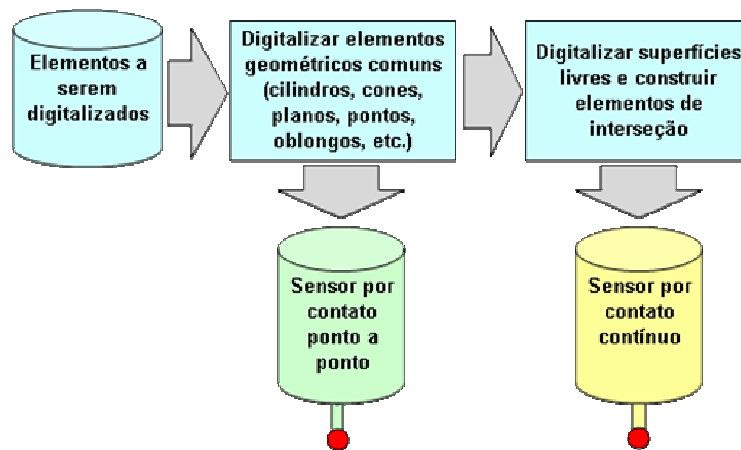


Figura 3.11: Seqüência geral de digitalização na MC.

Na Figura 3.12, pode-se identificar as diversas fases da execução do programa, que deve ser iniciada pela verificação metrológica do sistema de medição, utilizando padrões adequados. O objetivo dessa tarefa é observar se o equipamento mantém o seu desempenho inalterado desde a última calibração. Mais informações sobre o assunto podem ser obtidas em Schoeler & Fidelis (1992) e Noronha (1994).

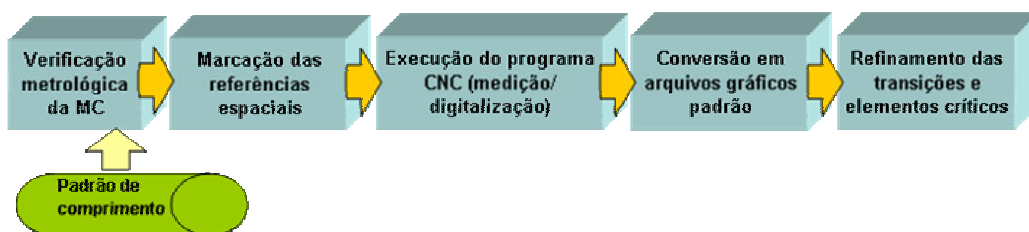


Figura 3.12: Execução da medição/digitalização em MC.

Ao final da execução do programa, o metrologista deve solicitar ao software de MC o registro numérico de parâmetros ou relações geométricas, como estabelecido no planejamento. Esses dados podem ser muito úteis para orientar decisões durante a fase de reprojeto e devem ser registrados em relatórios específicos.

Com todos os elementos digitalizados, o metrologista pode agora gerar o arquivo gráfico padrão (discutido adiante). Para tanto, ele deve selecionar no CAD da MMC os elementos geométricos que devem ser transferidos para o CAD, onde será feita a modelagem do produto.

3.2.8. A INTERFACE ENTRE MEDIÇÃO 3D E O CAD

Os problemas com a digitalização podem ser comparados a qualquer processo de medição utilizando um sistema programável. A dificuldade inicial é saber o que digitalizar e como fazê-lo. Alguns problemas específicos da interface MC/CAD são tratados por Schwartz & Karadayi (1989). Eles dão especial atenção à situação onde os programas de medição somente podem ser executados para verificação de erros na própria estação de trabalho do sistema de medição. No caso de problemas, o operador precisa manter contato com os projetistas para que modificações sejam implementadas, o que requer um processo de construção interativo, ou exige que ambos conheçam simultaneamente e profundamente os aplicativos de CAD e do sistema de medição. O operador de CAD encontra grande dificuldade em identificar e interpretar as configurações físicas das MMCs e BMs e as situações peculiares da movimentação e do acesso à peça.

Após a digitalização dos elementos geométricos do produto matriz, é possível transferir as informações obtidas mediante a geração de um arquivo gráfico padrão. De maneira simplificada, pode-se dizer que a busca desses padrões de transferência de informações gráficas entre sistemas CAD diferentes objetiva que eles conversem entre si (AGUIAR, 1995). Portanto, o objetivo da geração de um arquivo gráfico padrão é a comunicação entre o CAD do sistema de medição com o CAD 3D onde o produto final será modelado.

A alternativa para as empresas sem esses padrões, seria a compra de diferentes sistemas CAD que atendessem às necessidades de seus clientes. Isso acarretaria altos custos de aquisição, treinamento e manutenção de diferentes sistemas (AGUIAR, 1995).

Desde os anos 1980 foram desenvolvidos vários padrões para a troca de dados de produto na busca de uma interface normalizada, tais como IGES (*Initial Graphics Exchange Specification* – EUA) e o VDA-FS (*Verband der Deutschen Automobilindustrie – Flachschnittstelle* – Alemanha) e desde o início da década de 1990, vem sendo desenvolvido o STEP (*Standard for the Exchange of Product Model Data*). As primeiras especificações para intercâmbio de dados tratavam, genericamente, de dados geométricos e dimensionais (KERN, 1997).

O IGES é um padrão neutro, não vinculado a desenvolvedores de CADs ou a fabricantes de máquinas e equipamentos, que inicialmente objetivava a exportação de informações sobre um modelo entre CAD e CAM. Em 1979 o comitê responsável por normas relacionadas ao CAD da *American National Standards Institute* (ANSI) criou a norma Y14.26M, dando início à trajetória do IGES. O padrão permitiu a representação digital e a comunicação de dados sobre o produto, que é descrito apenas em termos de sua forma física e dimensões (KEMMERER, 1999).

A partir da década de 1990 o IGES foi adotado amplamente na indústria, o que motivou o desenvolvimento paralelo do STEP como seu sucessor e como forma de adicionar novas funções (não apenas dados geométricos e dimensionais) e corrigir o problema da perda de informações sobre a geometria da peça quando da geração do arquivo numa situação recorrente no IGES (PRATT, 2000).

Pode-se dizer que o IGES foi o precursor do STEP (KEMMERER, 1999). O STEP foi concebido para manipular informações sobre um produto em todo o seu ciclo de vida, desde o início do projeto até sua retirada de circulação. O padrão STEP é, na realidade, uma família de padrões organizados em uma estrutura similar à de um sistema de banco de dados (KERN, 1997).

Comparando-se os conversores IGES e STEP, Schild *et al* (1995) concluem:

- O IGES busca a flexibilidade em função da aplicação pretendida, já que grande variedade de sistemas poderão importar o arquivo. O IGES é capaz de transferir informações sobre todos os componentes de um modelo, incluindo o sistema de coordenadas utilizado e sua origem, ou de partes específicas (por exemplo: um eixo, um conjunto de suportes para fixação de uma placa de circuitos ou ainda uma nuvem de pontos).
- O IGES transfere apenas elementos geométricos contidos no projeto.
- O IGES pode atuar tanto em sistemas simples (CADs 2D) até em CADs para

modelagem de sólidos e encontra-se disponível em qualquer pacote comercial.

- A conversão em IGES acarreta alguma perda de informação, principalmente na interseção entre elementos geométricos.
- O STEP é compatível com qualquer sistema CAD, desde que este conversor esteja agregado ao pacote comercial adquirido.
- O STEP é capaz de atuar com o conceito de *master model*, isto é, as informações disponíveis sobre o produto podem incluir, além daquelas relacionadas à forma e dimensões, topologia, listas de materiais, dados administrativos ou ainda de montagem.
- A conversão em STEP não acarreta a perda de informações.

A utilização do IGES ou do STEP no projeto de produto dependerá em muito da estratégia de digitalização definida e dos recursos disponíveis à PME. Se por um lado o STEP apresenta algumas vantagens importantes, ele ainda está em consolidação como padrão de transferência, enquanto o IGES pode ser facilmente encontrado nas diversas opções de pacotes comerciais de CAD.

3.3. REPROJETO

A fase de reprojeto ou reengenharia no desenvolvimento de programas de computador, reúne e organiza as informações provenientes da ER e é o momento do projetista avaliar e aplicar as soluções necessárias para a introdução de novos atributos e funções ao produto. Essas mudanças devem atender aos novos requisitos do cliente e possibilitam o avanço em relação ao produto original. Por isso são classificadas aqui como melhorias. Nessa fase, o CAD e outras ferramentas de auxílio ao projeto são intensamente utilizadas.

Para Ingle (1994), o reprojeto, é a etapa que reúne todos os dados oriundos da coleta de dados por meio de medições, ensaios, digitalização e ainda aqueles provenientes de documentação técnica remanescente do produto matriz, os avalia e os utiliza para desenvolver o novo produto, introduzindo funções ou atributos em função das necessidades do cliente. Na abordagem pela ER, o reprojeto equivale à etapa de Detalhamento do Projeto nos métodos convencionais. Essa abordagem de reprojeto adaptativa e multidisciplinar permite reconstruir partes do produto matriz conforme sua configuração original e definir melhorias necessárias

ao produto (alterações de hardware e software para atendimento aos novos requisitos identificados).

Efetivamente, o trabalho do projetista na fase de reprojeto se divide em duas etapas: inicialmente, ele aproveita as informações provenientes da ER (p. ex.: leiaute, nuvem de pontos e geometrias em arquivos gráficos padrão, dados de dimensões diversas, dados de ensaios) e, por meio de software de auxílio ao projeto (CADs, ferramentas para desenvolvimento de programas de computador), os utiliza para reconstruir partes do produto matriz e introduz ainda as novas soluções para cumprimento dos novos requisitos identificados (p. ex.: novas configurações geométricas, novos circuitos eletrônicos). A partir daí, segue-se como na etapa de detalhamento do projeto dos métodos convencionais, inclusive com o uso intensivo de outras ferramentas de auxílio, como o CAE (*Computer Aided Engineering*), o CAM (*Computer Aided Manufacturing*).

3.3.1. O REPROJETO E A PROPRIEDADE INDUSTRIAL

O debate sobre patentes tem se tornado mais intenso em função do aumento do conteúdo de investimentos em pesquisa e desenvolvimento de novos produtos, a redução do ciclo dos produtos e a relativa facilidade de copiar utilizando-se a ER (MODY, 1990 *apud* PEREIRA, 1995).

Para OMPI (1997), a propriedade industrial é a denominação dada a patentes, marcas registradas, direitos autorais, desenhos industriais e outros tipos de propriedade intangível, que se originam de criações da mente e, em seu sentido mais amplo, não possuem forma física.

Di Blasi (2005) conceitua invenção como o bem incorpóreo, resultado da atividade inventiva, o qual define algo, enquadrado nos diversos campos da técnica, anteriormente não conhecido e utilizado. Para ele, a atividade inventiva é a disposição e o esforço intelectual humano para a criação.

Segundo Di Blasi (2005), patente de invenção é o direito outorgado pelo governo de uma nação a uma pessoa, o qual confere a exclusividade de exploração do objeto de uma invenção, ou de um modelo de utilidade, durante um determinado período, em todo o território nacional. Quando a solução inventiva diz mais respeito a um detalhe de funcionamento ou de utilização, ela é classificada como um modelo de utilidade (p. ex.:

substituindo-se o disco giratório de um aparelho telefônico por um teclado). Para OMPI (2007), a proteção para modelos de utilidade é geralmente buscada para inovações de natureza adicional, sendo as exigências para o seu registro geralmente menos rigorosas. No Brasil, diferentemente dos Estados Unidos, o código fonte do software é protegido como direito autoral e não recebe as proteções legais comparáveis àquelas concedidas a uma patente.

Para OMPI (2007), a patente concede a seu proprietário o direito exclusivo de controlar quem fabrica, usa, vende, oferece para venda e/ou importa qualquer produto ou tecnologia protegida por reivindicações de patentes. As reivindicações constituem parte do pedido de patente no qual são descritas as características técnicas do invento cuja patente é pretendida (DI BLASI, 2005). Segundo OMPI (2007), as reivindicações constituem a parte legalmente mais importante de um pedido de patente. Elas determinam o escopo de proteção provido por uma patente.

Requisitos legais para a patenteabilidade segundo OMPI (2007):

- **Novidade:** A invenção não deve estar em uso público ou ser conhecida por outras pessoas. Novidade não significa algo revolucionário; até pequenos aprimoramentos podem ser novas e úteis.
- **Aplicação industrial:** As invenções devem ser capazes de serem submetidas à prática. A invenção deve ser útil.
- **Atividade inventiva:** A não-obviedade requer que uma invenção não seja óbvia para alguém que é um especialista versado no campo científico/técnico da invenção.

O processo de registro de uma patente é dispendioso, leva tempo e requer acompanhamento constante. Entretanto, segundo Di Blasi (2005), os custos relativos a processos judiciais por infração de patentes, “ato de utilização não autorizada ou não permitida em lei” (DI BLASI, 2005) são consideravelmente elevados, principalmente quando a patente é concedida em diferentes países.

Portanto, para ser viável economicamente, o produto não deve infringir uma patente concedida. O desenvolvimento de um novo produto deve, portanto, avaliar o estado da técnica, incluindo a análise cuidadosa dos registros de patentes e estudar as reivindicações, com o objetivo de identificar os limites do seu escopo. “O estado da técnica se refere às informações científicas e técnicas que existem antes da data efetiva de um determinado pedido de patente” (OMPI, 2007).

Para evitar a infração de uma ou mais patentes, existem duas alternativas possíveis: o

licenciamento, que é a concessão do direito de exploração da patente a um terceiro (DI BLASI, 2005) ou o contorno das reivindicações da(s) patente(s), com a introdução de aprimoramentos a um produto existente, que caracterizem um certo grau de novidade. Segundo Pereira (1995), a concessão de patentes do tipo modelo de utilidades, é muito explorada no Brasil, representando grande parte dos registros do Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), justamente por serem o resultado da criação de novos produtos a partir de alterações nas funções ou utilização de produtos já existentes.

Segundo OMPI (2007), o agente de propriedade industrial tem um importante papel na orientação do inventor e na elaboração de um pedido de patente capaz de garantir um escopo de proteção o mais amplo e claro quanto possível.

3.3.2. FERRAMENTAS PARA MODELAGEM GEOMÉTRICA NO REPROJETO

Em se tratando de ferramentas de auxílio ao projeto, o CAD é a mais conhecida em função da importância e da extensão do seu uso. Lee (1999) *apud* Groover & Zimmers (1984) definem o CAD como uma tecnologia que “utiliza sistemas computacionais para assistir a criação, modificação, análise e otimização de um projeto”. Ainda segundo Lee, “o papel básico do CAD é definir a geometria do projeto – partes mecânicas, estrutura arquitetônica, circuito eletrônico e leiaute”.

Ferneda (1999) afirma que a modelagem de sólidos emergiu no final dos anos de 1970, devido ao fato de proporcionar a representação de peças de forma geometricamente complexa e permitir que importantes processos de manufatura sejam modelados. Ele define um modelo sólido como sendo um modelo de superfície com dados de topologia adicionados e complementa: “o modelamento sólido permite criar uma réplica exata (um *mockup* digital) de um projeto proposto dentro do computador”.

Uma tecnologia de CAD recentemente introduzida e já presente inclusive em pacotes comerciais de baixo custo é o modelamento por *features*. Segundo Ferneda (1999), *features* podem ser definidos como:

- alguma entidade nomeada com atributos de forma e função;
- qualquer elemento geométrico ou funcional, ou propriedade de um objeto, útil no entendimento da função, comportamento ou desempenho daquele objeto.

As entidades básicas de um modelo, assim como uma superfície, aresta ou vértice, ou um atributo de geometria básica como uma linha de centro, são frequentemente referidos como *features* primitivos (FERNEDA, 1999). Dentro da geometria, áreas específicas podem ser identificadas e são chamadas de *features* de forma, como furos, chanfros e *slots*.

Segundo Lee (1999), a representação de uma curva ou superfície por um certo número de pontos surgiu da necessidade do projetista experiente que precisava construir uma curvatura a partir de pontos que melhor representassem a forma. Utilizando um algoritmo específico, o projetista pode conectar os pontos e criar uma forma contínua. Semelhantemente, no CAD o projetista dispõe de uma nuvem de pontos e utilizando algoritmos de interpolação produz uma curva ou superfície. A equação da curva ou superfície é então estabelecida e mantida para posterior manipulação no CAD.

Sobre os algoritmos para interpolação de curvas, é importante comentar aqui os três principais casos: Curvas de Bezier, *B-splines* e NURBS. A Curva de Bezier é definida pelos vértices de um polígono que encerra a curva resultante. Bezier escolheu a função polinomial de Bernstein como função de combinação. O grau da Curva de Bezier é determinado pelo número de pontos de controle. Daí surgem dois problemas: primeiramente, quando uma curva de forma complicada é representada por Bezier, muitos pontos de controle precisam ser utilizados, o que resulta em um grau muito elevado do polinômio, o que provoca um elevado esforço computacional. Por outro lado, a propriedade de alterar certas porções da curva sem afetar outros locais é muitas vezes desejável na modelagem em CAD (LEE, 1999).

As desvantagens das curvas de Bezier são causadas pela sua função de combinação. Cox (1972) e De Boor (1972) sugeriram uma alternativa à função proposta por Bezier. A curva resultante dessa nova função é chamada *B-spline*. O valor do grau da *B-spline* não mais depende do número de pontos de controle. Um nó é um parâmetro que limita os intervalos finitos onde a função tem valor diferente de zero. Os múltiplos nós fazem com que a *nonperiodic B-spline curve* passe pelo primeiro e último ponto de controle como uma Curva de Bezier. Entretanto, numa curva periódica, o primeiro e último ponto fazem a mesma contribuição para a forma da curva que os outros pontos de controle sem que a curva passe por eles. A *nonperiodic B-spline curve* é mais popular nos sistemas de CAD, já que a maioria dos projetistas prefere curvas que passam pelos pontos inicial e final (LEE, 1999). Quando o espaço entre nós é sempre uniforme, esses nós são chamados *uniform knots* e a curva assim construída é uma *uniform B spline curve*. Quando se modifica a forma da curva, sempre se adicionam ou extraem nós, produzindo-se espaços não uniforme entre eles. Nesse caso tem-se

uma *nonuniform B-spline curve*, ou sinteticamente *NURBS*. A *NURBS* nada mais é que uma *nonuniform B-spline curve* onde se utilizam as mesmas funções de combinação, derivadas de nós não uniformes.

Portanto, a estrutura de dados provenientes da etapa de digitalização pode variar de uma nuvem de pontos até um elemento geométrico definido, delimitado por linhas de contorno. A partir daí, cabe aos projetistas reconstruir as geometrias necessárias e aplicar as alterações exigidas pelos novos requisitos, retornando sempre que necessário à ferramenta de digitalização para levantar novas informações ou corrigir distorções.

Existem hoje diversos pacotes comerciais de CAD 3D que podem ser aplicados ao projeto de produto. Os mais conhecidos para modelagem geométrica são: *CATIA*, *UNIGRAPHICS NX*, *ProEngineer*, *SolidEdge*, *Solidworks* e *Inventor*. De um lado, o *CATIA* e o *NX* são ferramentas integradas poderosas, mas extremamente caras e demandam grandes investimentos em capacitação de pessoal. No outro extremo estão os CADs de custo reduzido, como os *Solidworks*, *SolidEdge* e *Inventor*, que apresentam menores exigências computacionais, mas possuem limitações, principalmente na modelagem de curvas e superfícies complexas e no entendimento de características topológicas. Quanto à aplicação, hoje existem ferramentas comerciais de CAD bastante especializadas, desde aqueles utilizados para modelagem de superfícies livres (p. ex.: usados por desenhistas industriais para definição de modelos conceituais de produtos) até os CADs para uso em projeto mecânico e eletrônico, como o *Medea* e o *ITIS-CAD*, para circuitos elétricos. Alguns aplicativos têm uso muito específico, como no projeto de tubulações (p. ex.: *Eplant Piping*), de estampos (*Wicam 3D*), de calados de navios, de circuitos hidráulicos e outras aplicações. Nos CADs para aplicação em projeto mecânico e eletrônico, a formalização do modelo é rígida nas propriedades dimensionais, topológicas e funcionais, podendo representar fielmente a integração dos diversos componentes reais.

Considerando o foco deste trabalho nas PMEs e nos seus prestadores de serviço, as soluções endereçadas no método proposto estarão voltadas ao uso de pacotes comerciais de baixo custo, como o *Inventor*, o *Solidworks* e o *SolidEdge*.

Na fase de reprojeto, há ainda outras três importantes ferramentas que precisam ser comentadas: o CAE, o CAM e a Prototipagem Rápida (PR).

Segundo Groover (2001), o termo CAE é normalmente utilizado para análises de engenharia desempenhadas pelo computador. Exemplos de análises assim realizadas pelos aplicativos CAE: propriedades da massa (p. ex.: localização do centro de massa), verificação

de interferências, análise de tolerâncias, cinemática e análise dinâmica (p. ex.: movimentos de peças, incidência de forças externas sobre o movimento, combinação de velocidades em mecanismos), simulação de complexos circuitos eletrônicos, simulação de eventos discretos (p. ex.: simulação de uma célula de manufatura), elementos finitos (p. ex.: transferências de massa e calor, fluxo de materiais, distribuição de tensões, deformações). O CAE utiliza as geometrias modeladas no CAD para realizar simulações e estudos a fim de avaliar como o produto se comportará sob determinadas condições (LEE, 1999).

O CAM é uma tecnologia que utiliza o auxílio do computador para planejar, gerenciar e controlar operações de manufatura, mediante interfaces com os recursos de produção (máquinas operatrizes). Uma das mais importantes vantagens do CAM é a utilização do Controle Numérico Computadorizado (CNC), que utiliza instruções programáveis para controlar máquinas operatrizes (fresadoras, tornos, centros de usinagem, retificadoras e outras), robôs e máquinas de medir a partir da geometria gerada no CAD. O computador pode produzir instruções para fabricação de itens com reduzida necessidade de interação do operador (LEE, 1999).

A utilização do CAE, CAM e PR são importantes no projeto para PME, pois, se utilizados de forma adequada, podem acelerar o processo de projeto e reduzir custos na fabricação e testes de protótipos, além de limitar a ocorrência de erros de projeto e falhas de operação do produto. São ainda serviços que podem ser subcontratados, diminuindo os custos para a equipe de projeto.

Quanto à PR, ela é uma tecnologia empregada na avaliação do produto e será comentada no item 3.4.

3.3.3. REENGENHARIA PARA REPROJETO DE SOFTWARE

Na ERS e ERC, reengenharia de software equivale à etapa de reprojeto das ERE e ERM. Segundo Novaes e Prado (2002), a reengenharia tem por finalidade examinar e alterar um software existente para reconstituí-lo em uma nova forma e depois implementá-lo. A reengenharia tem como objetivo principal melhorar a qualidade global do software, mantendo, em geral, as funções do sistema existente. Mas, ao mesmo tempo, pode-se adicionar novas funções e melhorar o desempenho. A reengenharia consiste da engenharia reversa, seguida de mudanças no sistema (que podem ser mudanças de funcionalidade ou mudanças de técnica de

implementação) para o atendimento a novos requisitos dos clientes. Ou seja, "reengenharia é o processo de criar uma descrição abstrata do software, elaborar mudanças em alto nível de abstração e então implementá-las".

Assim como existem ferramentas de auxílio (CADs) dedicadas ao projeto mecânico e eletrônico, o desenvolvimento de software dispõe de ferramentas denominadas *Computer Aided Software Engineering* (CASE). Segundo Pressman (1995), o CASE permite a geração automática de programas a partir das especificações do projeto, surgidas dos requisitos identificados para o software. Semelhantemente ao que ocorre na etapa de reprojeto, na reengenharia de software, o projetista colhe os dados da ERS/ERC, os traduz em uma representação apropriada (p. ex.: gráfica), que pode ser mais facilmente analisada, e modifica as estruturas lógicas e de dados, a fim de obter um desempenho melhorado. A reengenharia a partir da ERS/ERC reimplementa a função do software original e também adiciona novas funções e/ou melhora o desempenho global. Entretanto, diferentemente do reprojeto a partir da ERM ou ERE, na reengenharia utilizando ER as ferramentas computadorizadas de auxílio reúnem as funções da ERS e desenvolvimento, como é o caso do aplicativo *Imagix 4D*. Tais ferramentas são capazes de identificar padrões reconhecíveis de operação e de reproduzi-los no desenvolvimento do novo software, gerando seu código fonte, identificando a arquitetura, estruturas de controle e fluxo de dados. Adicionalmente, as alterações e melhorias a serem implementadas podem ser efetuadas de forma semelhante ao uso de uma ferramenta CASE.

3.3.4. FERRAMENTAS PARA REPROJETO ELETRÔNICO

Na ERE, a etapa de reprojeto é semelhante à ERM, já que em ambos os casos se tratam de hardware. Entretanto, há duas abordagens distintas no projeto eletrônico, que também ocorrem no reprojeto após a ERE. O reprojeto para microeletrônica utiliza as informações provenientes da ERE e se dedica, caso necessário, à modelagem e simulação de semicondutores, utilizando ferramentas específicas, incluindo aplicativos para a simulação da fabricação de componentes por meio de diversos processos de fabricação (p. ex.: o software *IC Nanometer Design*). Uma outra situação, mais comum e certamente próxima da realidade de uma PME, é o reprojeto dos circuitos integrados, que utiliza programas do tipo *Electronic Computer Aided Design* (ECAD) para projetar e desenvolver circuitos eletrônicos a partir de componentes padrão. Dessa forma, o projetista pode montar os diagramas dos circuitos

elétricos e leiaute das placas de circuitos impressos. Os aplicativos de ECAD são também utilizados, por exemplo, para analisar os requisitos de carga necessários aos circuitos e projetar o leiaute de transistores, além de avaliar o desempenho geral e a compatibilidade dos componentes.

Segundo Patrick (1996), o uso do ECAD oferece muitos benefícios, tais quais os CADs para projeto mecânico, como precisão, a possibilidade de verificações a qualquer tempo, modificações mais fáceis e a disponibilidade vasta de bases de dados de componentes. Há, inclusive, alguns pacotes comerciais de CAD mecânico com extensões de ECAD, como é o caso do *Solidworks* e o seu ECAD denominado *Circuitworks*. É importante lembrar que o reprojetado das funções eletrônicas não se limita às placas de circuitos impressos, mas também a conexões, telas indicadoras, botoeiras e suportes para fixação, elementos que mantêm interseções com o projeto mecânico.

Patrick (1996) ressalta que uma das principais funções do ECAD é o roteamento dos componentes eletrônicos, isto é, organizar as suas interconexões na placa de circuito por meio de linhas de material condutivo impressas. Esse processo hoje pode ser conduzido de forma automática, a partir das informações colhidas na ERE.

Para as aplicações de projeto numa PME, é razoável estabelecer como regra a utilização de ferramentas ECAD para o projeto de placas de circuitos eletrônicos e não o desenvolvimento de circuitos integrados, já que as limitações de recursos humanos e técnicos invocam a necessidade do uso de dispositivos padrão disponíveis no mercado.

3.4. AVALIAÇÃO

Após a conclusão do projeto, uma fase de avaliação se segue. Nela, são realizados ensaios e testes em partes específicas do produto ou no todo, para verificar o atendimento a certos requisitos. Para Pressman (1995), na reengenharia do software, o teste é um conjunto de atividades que pode ser planejado antecipadamente e realizado sistematicamente. O teste do software deve ser capaz de garantir a verificação (Estamos construindo certo o produto?) e a validação (Estamos construindo o produto certo?) do código final. Segundo Mascarenhas (2000) ensaios são métodos preestabelecidos que objetivam levantar ou comprovar certas propriedades de um material ou produto (mecânicas, físicas, eletromagnéticas, de desempenho). Os ensaios e testes freqüentemente provocam alterações no projeto e são

importantes ferramentas para evitar futuros problemas na operação do produto.

Ao realizar o detalhamento do projeto na fase de reprojeto, a equipe de projeto deverá estar atenta a três situações: a necessidade de realização de ensaios para medir e/ou comprovar determinadas especificações do projeto (p. ex.: demonstrar as características ornamentais do produto quanto à sua forma, cores, textura, etc.), a fim de garantir o cumprimento dos requisitos; a obrigatoriedade contratual de atestar ao contratante do projeto o cumprimento de certos parâmetros (p. ex.: atestar uma pressão máxima de operação) ou ainda a obrigatoriedade de realizar ensaios e testes compulsórios para acesso ao mercado (p. ex.: ensaios de compatibilidade eletromagnética para acesso ao mercado europeu). Evidentemente, a combinação das três situações é possível e relativamente comum, até porque evita-se realizar ensaios e testes compulsórios antes que o produto tenha os principais requisitos devidamente cumpridos.

O uso de protótipos é muito comum nessa etapa, de forma a viabilizar a realização dos ensaios e testes necessários. Em geral, a construção de um protótipo realista e operacional é dispendiosa e demorada. Por isso, algumas tecnologias recentes permitem a elaboração de protótipos para utilização específica (p. ex.: protótipos de placas de circuitos eletrônicos, protótipos de um conjunto mecânico).

A Prototipagem Rápida (PR) mecânica está se tornando popular como meio de construção rápida e relativamente barata de protótipos. Segundo Lee (1999), a tecnologia possibilita a construção de protótipos depositando-se camadas de material (gesso, papel, polímero) da base até o topo em equipamentos específicos, fundamentalmente uma impressora em três dimensões. Isso permite a construção do protótipo a partir de seu modelo 3D em CAD, mediante a utilização de um padrão de transferência gráfico específico, o STL (*Stereo Lithography*). O padrão STL transfere as informações sobre o modelo 3D da peça para o software de controle do equipamento de PR. O protótipo assim produzido servirá para avaliações de formas, funções e operação.

A prototipagem rápida eletrônica permite a produção de pequenos lotes de placas de circuito impresso protótipo por meio de tecnologias convencionais (placas furadas) ou ainda utilizando a moderna tecnologia de componentes montados em superfície (*Surface Mounting Technology* - SMD), usando máquinas *pick and place* (máquina de montagem automatizada).

Após a prototipagem e teste de partes do produto, deve-se proceder a integração do mesmo, resultando em protótipos funcionais completos, utilizados para testes definitivos e avaliações de desempenho do conjunto, assim como aplicados em ensaios específicos

relacionados a certificações. Nessa fase, PR e métodos convencionais de fabricação são igualmente úteis.

Caso a legislação exija ou seja um requisito mandatário para o ingresso em mercados específicos (p. ex.: na Comunidade Européia), um processo formal de certificação do produto realizada por um Organismo de Certificação de Produto (OCP) deve ser providenciado. A certificação atesta por meio da avaliação sistemática dos resultados de ensaios e testes padronizados, o cumprimento aos requisitos específicos estabelecidos em uma norma técnica.

As normas para avaliação da conformidade de produtos apresentam os requisitos específicos (atributos ou parâmetros de desempenho) e trazem ainda os métodos para ensaios e testes. Por exemplo: um produto para uso residencial, emissor de radiofrequência, como um brinquedo radio-controlado, deve cumprir os requisitos da norma EN 50081-1: *Eletromagnetic compatibility – Generic emission standard* para acesso ao mercado europeu. Por outro lado, para ser comercializado no mercado brasileiro, o mesmo produto deve ser submetido a ensaios e testes e, caso cumpra aos requisitos especificados na norma NBR 11.786 – Segurança do Brinquedo, será certificado por um OCP.

Uma tendência crescente para a fase de avaliação do projeto é o uso da prototipagem virtual. Segundo Groover (2001), a prototipagem virtual baseia-se na tecnologia da realidade virtual e envolve o uso do CAD para construir um modelo digital do produto, propiciando ao avaliador ter a sensação do produto físico, sem, no entanto, construir qualquer protótipo real. A prototipagem virtual tem sido intensamente utilizada na indústria automobilística e em projetos militares.

Com as conclusões da fase de avaliação, o processo de projeto se fecha, mas as eventuais imperfeições ou falhas de operação, isto é, o descumprimento de requisitos estabelecidos, realimentam o processo e permitem corrigir e novamente testar as novas soluções encontradas. Para uso em projetos de PMEs, deve-se avaliar criteriosamente o custo da solução virtual em comparação com métodos de prototipagem convencionais. Em geral, por conta do hardware necessário, a solução virtual ainda se mostra razoavelmente mais cara.

3.5. RESULTADOS

Tendo atendido a todos os requisitos estabelecidos pelos clientes, comprovados na fase de avaliação do processo de projeto, o produto final encontra-se definido e todas as

etapas do seu desenvolvimento devem ser documentadas, gerando desenhos impressos, cadernos de especificações de materiais, procedimentos de montagem e fabricação, protótipos para apresentações, códigos fontes de programas, conjunto de arquivos de computadores contendo os modelos de CAD e os resultados das atividades de CAE e CAM e outras informações relevantes para a fabricação. A efetiva aprovação do novo produto se dá com a aceitação do contratante com base nas informações disponíveis sobre as etapas de desenvolvimento e, principalmente, de avaliação.

Quanto ao desenvolvimento do processo de projeto utilizando a ER, espera-se que na sua conclusão, tenha-se obtido um ganho considerável de tempo e custo para o lançamento do novo produto em comparação com métodos convencionais.

4. PROPOSTA DO MÉTODO PARA PROJETO

No capítulo anterior, o projeto de produto mecatrônico foi definido e contextualizado, inclusive associando a ER nas suas várias abordagens. Foram identificadas diversas necessidades específicas para o projeto de produto mecatrônico e as especificidades enquanto realizado na PME, tendo-se enfatizado o trabalho multidisciplinar, a sinergia entre as várias disciplinas envolvidas, o uso da modelagem em CAD e do CAE, de ferramentas específicas para ERS, ERC, ERM e ERE, da medição por coordenadas e da prototipagem rápida e as alternativas para viabilização do uso das tecnologias, redução de custos e diminuição dos prazos envolvidos.

Duas importantes constatações também puderam ser destacadas nos capítulos anteriores: hoje, a ER empregada especificamente para o desenvolvimento de programas de computador e dispositivos eletrônicos prescinde de recursos e métodos complexos e pode ser executada por análise e testes relativamente sistematizados, além de contar com recursos computacionais já bem disseminados. Já a abordagem de ER para o desenvolvimento mecânico é mais complexa, principalmente quando realizada na PME, pois implica na caracterização de elementos geométricos e topológicos diversos, além de requerer uso intensivo de recursos de CAD, medição, ensaios e digitalização, com forte dependência do fator humano.

Neste capítulo é apresentada uma proposta de método sistematizado para a realização do projeto de produto mecatrônico utilizando ER no âmbito da PME. O método considera as diversas abordagens de ER e, ao final, enfatizará a ERM nos seus pontos cruciais. Para que o método seja aplicado, será apresentada uma proposta que focaliza as etapas de planejamento, execução da ER e a interface entre o levantamento de informações a partir do produto matriz e o reprojeto. Dessa forma, é possível definir um conjunto de procedimentos, detalhando condições, parâmetros, regras, orientações e seqüências de operações cruciais do processo. O posicionamento deste método em relação a outros pode ser observado no Quadro 4.1.

Primeiro, uma equipe de projeto precisa ser consolidada ou criada (Figura 4.1) para que possa desenvolver o método de projeto. A formação da equipe de projeto deve garantir ao menos a disponibilidade das principais competências necessárias, como a aplicação do método de projeto em mecânica, eletrônica e software, a utilização de ferramentas de projeto

(p. ex.: o CAD e o CAE), o conhecimento sobre materiais e tecnologias de fabricação, o domínio sobre métodos de medição, ensaios em programas de computador e digitalização. De certo, algumas das competências citadas poderão estar reunidas em um único profissional, geralmente um projetista com maior experiência, mas com a utilização da ER em produto mecatrônico, não há como reduzir a equipe a um grupo menor do que um projetista mecânico, um especialista em eletrônica e software e um profissional dedicado à coleta de dados (testes, digitalização usando MC, medições). A necessidade de maior aprofundamento nas áreas de fabricação e materiais, por exemplo, pode exigir a participação ativa de um profissional especializado. Em relação à coleta de dados durante a ER, grande parte do trabalho pode ser feito pelo projetista ou um engenheiro de software, exceto quando necessária a operação de um sistema de medição ou teste mais complexo, como uma MMC.

Método	Autor	Descrição
Convencional	Shigley (1977)	Método que parte da concepção funcional, passa por uma proposta abstrata e chega a uma solução concreta.
ER associada a um método convencional	Aronson (1996), Pressman (1995), Ferneda (1999), Várady <i>et al</i> (1997) e Lee & Woo (2000)	ER como ferramenta utilizada em métodos convencionais. ER aplicada de forma estanque e a uma abordagem específica. ER limitada ao ato de copiar e fornecer dados ao projetista.
ER ampla em substituição ao método convencional	Ingle (1994)	ER aplicada a grandes projetos das áreas militar ou automobilística, associada a um método específico, amplo e dependente de soluções tecnológicas caras, como sistemas CAD/CAE/CAM e de digitalização dedicados.
Este método		Método focalizado em pequenos projetos para PMEs, construído a partir de métodos convencionais, mas usando uma abordagem mecatrônica de projeto. ER aplicada de forma unificada, numa abordagem integrada e ampla.

Quadro 4.1: Posicionamento do método.

Por conta das limitações de porte das empresas, parte dos serviços relativos ao projeto pode ser subcontratada, desde que a equipe, inclusive os colaboradores não diretamente envolvidos, assumam um forte compromisso para com os objetivos do projeto e esteja orientada pelo método. Um exemplo importante, é a utilização de um equipamento de medição (p. ex.: uma máquina de medição por coordenadas), que pode estar disponível em um condomínio de empresas ou em uma organização que possa suprir o serviço.

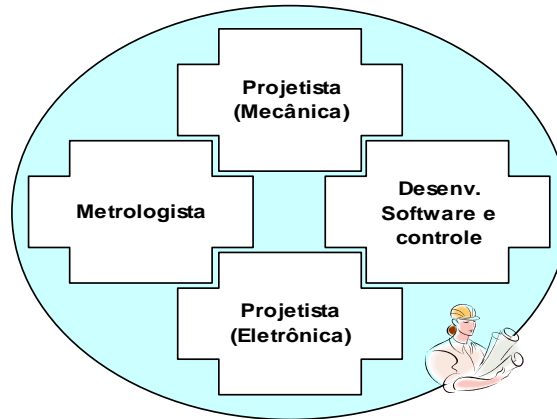


Figura 4.1: Competências da equipe básica de projeto.

A Figura 4.2 apresenta a visão geral do método e dos recursos que podem ser empregados para o atendimento a uma PME. O cliente normalmente está envolvido com o produto matriz e geralmente o conhece bem, pois convive ou compete com ele no mercado. O processo se inicia pela etapa de planejamento, na qual são selecionados os produtos matriz que serão investigados com maior detalhe e define a estratégia geral a ser adotada para a engenharia reversa. Em seguida, faz-se a ER a partir da desmontagem física do produto matriz, da sua observação, medição, ensaios e digitalização como demandado pelas suas várias abordagens (eletrônica, software de controle, software de informação, mecânica). Por fim, o reprojeto é levado a cabo utilizando-se intensivamente os respectivos CADs e, muitas vezes, ferramentas de CAE e de CAM.

Os estágios do método estão concebidos de maneira a abranger o planejamento (Estágio 1), a execução da ER (Estágio 2), o reprojeto (Estágio 3) e a integração do projeto e documentação (Estágio 4).

A primeira etapa do método consiste do planejamento das demais atividades, englobando a definição da estratégia geral para as técnicas de ER que serão utilizadas (observação, identificação de itens padronizados, ensaios, medições, digitalização em MC, mapeamento do comportamento do software). Como entrada a essa etapa, devem ser considerados quaisquer documentos e dados de computador disponíveis sobre o produto matriz, além de informações sobre patentes concedidas ou depositadas. Nessa etapa, é realizada uma pesquisa direcionada às melhorias a serem introduzidas ao produto final na etapa de reprojeto. A pesquisa incluirá a necessidade da introdução de novas funções ou atributos, aspectos de ergonomia e melhorias em função de inovações associadas aos

componentes do produto, conforme proposto por Otto & Wood (1996).

A ER deve buscar a identificação das funções básicas do produto utilizando uma seqüência de decomposição, inversa àquela proposta por Shen *et al* (2005) e ilustrada no exemplo da Figura 4.3. Com essa abordagem, é possível identificar oportunidades de melhoria para o produto, inclusive mediante a utilização de novas tecnologias ou novas combinações de princípios de solução. O método da Matriz Morfológica (Apêndice 1) é uma boa ferramenta nesta etapa. As informações obtidas nessa etapa devem ser cuidadosamente documentadas e serão utilizadas no estágio seguinte. O levantamento da estrutura de funções permite desdobrar o produto em seus módulos fundamentais pela função que exerce (p.ex.: sistema de informação e controle), o que possibilita uma melhor compreensão do produto e facilita a decisão sobre que abordagem de ER deverá ser planejada.

Na segunda etapa, Estágio 2, são realizadas as desmontagens físicas necessárias (desmontagem de placas eletrônicas, sensores, atuadores e componentes mecânicos) e aplicadas as técnicas de ER nas abordagens necessárias.

No Estágio 3 da Figura 4.2, o método propõe uma abordagem de reprojeção adaptativa e multidisciplinar, com a integração das etapas de ER e reprojeção em substituição parcial à fase conceitual dos modelos de projeto convencionais. Apenas os resultados da pesquisa realizada na primeira etapa e outros dados provenientes de documentação técnica acerca do produto são utilizados para definir melhorias ao produto.

O Estágio 4 contempla a integração do projeto, a prototipagem do conjunto e os testes finais do produto. Nesse momento, a documentação final e completa de todo o trabalho é produzida e organizada, gerando os desenhos, memoriais, esquemas e demais formas de armazenamento e apresentação.

Como visto no Capítulo 3, a interface entre a etapa de levantamento dos dados e o reprojeção (segundo e o terceiro estágios) é fundamental para o sucesso da ER. Revisitando a Figura 3.2, discutida no capítulo anterior, numa comparação entre as abordagens ERS/ERC, ERE e ERM, pôde-se constatar que a ERM possui um maior conjunto de elementos complicadores para o método e ainda forte dependência da interação entre pessoas para o sucesso da ER. Portanto, será enfatizado a ERM e os procedimentos dos 2º e 3º estágios. A partir daqui o método será tratado quanto à sua execução. Os quadros que se seguem contêm as orientações e procedimentos necessários à realização do trabalho.

Em função das particularidades da ERM, nos itens que se seguem há tratamentos específicos para este procedimento e sua interface com o reprojeção.

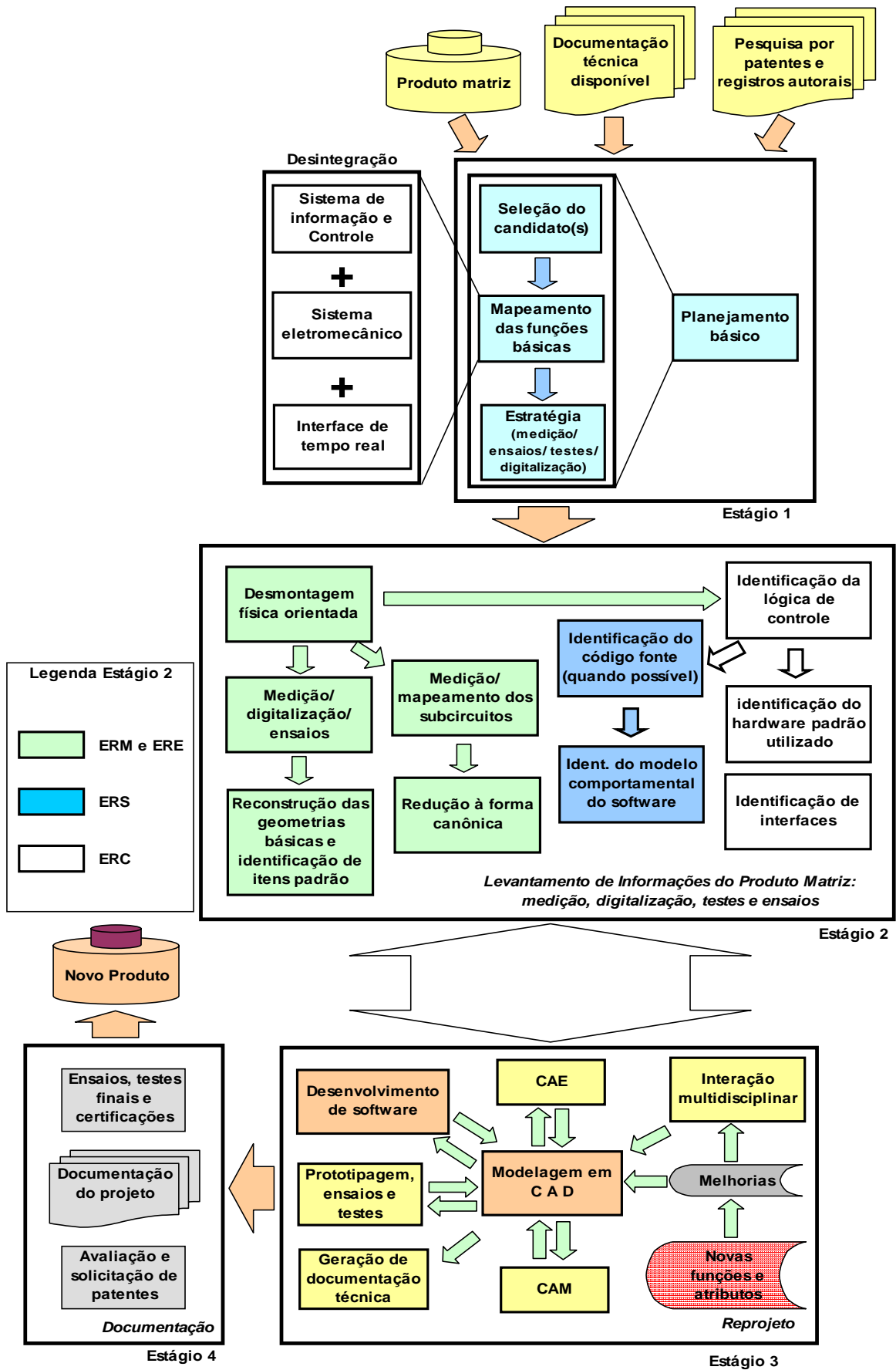


Figura 4.2: Representação gráfica do método.

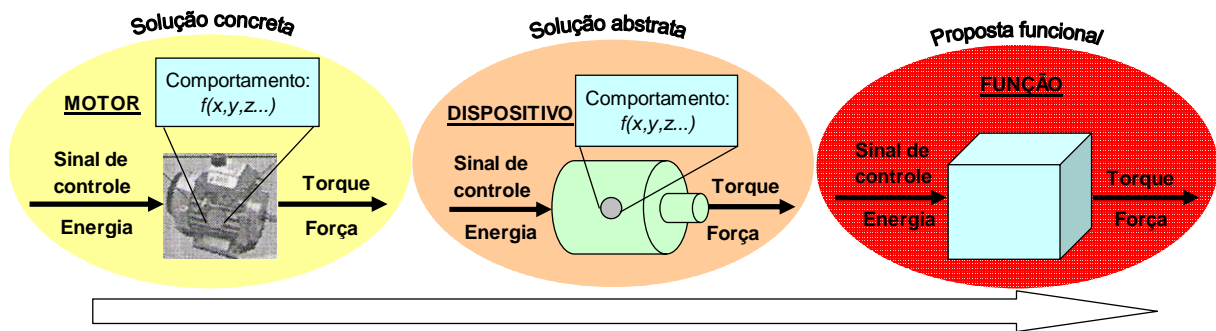


Figura 4.3: Abordagem a ser utilizada na ER.

4.1. ESTÁGIO 1: PLANEJAMENTO E ESTRATÉGIA DE ER

A etapa de planejamento é fundamentalmente multidisciplinar. Toda a equipe de projeto deve participar das definições que serão as referências para todo o trabalho. O primeiro movimento na etapa de planejamento deve focalizar a escolha dos itens candidatos à ER. O produto matriz deve reunir condições mínimas para o trabalho:

- Representar o modelo mais atual e aquele com melhor aceitação no mercado (avaliação por meio de índices de venda e de satisfação do cliente);
- Estar completo e operacional (circuitos eletrônicos, sensores e atuadores, sistema de controle);
- Ter condições de ser desmontado em suas subpartes;
- Ter programas de computador embarcados na última versão;
- Estar em boas condições quanto ao desgaste por atrito, choque ou manipulação freqüente.

A equipe de ER deve obter o máximo de informações sobre o produto matriz (documentos técnicos em geral: manuais, fotografias, certificados de ensaios, pesquisas de satisfação do cliente, depoimentos de clientes, depoimentos de distribuidores e dos vendedores, etc.). Como geralmente são produtos com pouco ou nenhum documento técnico disponível, a equipe deve observar o produto matriz em uso, para compreender a sua função global e detalhes da operação. Caso o produto matriz seja parte de um sistema maior, o acompanhamento e documentação detalhada da desmontagem em campo pode fornecer muitas informações, principalmente sobre a sua interação com o restante do sistema. Esta fase também exige a desmontagem, mesmo que parcial do produto, e o levantamento das suas funções conforme abordagem da Figura 4.3. Também aqui a pesquisa por melhorias

desejáveis ao produto deve ser planejada.

A segunda fase do Estágio 1 (da Figura 4.2) encontra-se detalhada no Quadro 4.2. No Apêndice 1 encontram-se resumos sobre alguns métodos aplicáveis. O Planejamento Básico deve reunir informações básicas para que se decida como será o tratamento dispensado ao sistema de informação e controle, sistema eletromecânica e interface de tempo real durante o estágio seguinte.

A terceira fase do Estágio 1 (Estratégia) definirá as estratégias e métodos que serão empregados no Estágio 2 (Levantamento de Informações do Produto Matriz). Evidentemente, durante a execução da ER, fatores não previstos, normalmente gerados a partir da análise mais detalhada do produto matriz, principalmente após a fase de Desmontagem Orientada, poderão sugerir mudanças na ER (alteração de um método ou ferramenta aplicada).

A Estratégia (Quadro 4.3) deve ser capaz de definir o que será submetido à ER e que abordagem e técnica serão utilizadas. A definição da estratégia precisa ser suficientemente detalhada para estabelecer quais ensaios, testes e métodos de medição e digitalização devem ser empregados e onde.

PLANEJAMENTO BÁSICO

1. Desenvolver um modelo de caixa preta do produto (função global do produto)

- representar em modelo do tipo entrada-saída.

2. Reunir e organizar as necessidades do cliente e definir requisitos para o produto.

2.1. Utilizar metodologia tradicional, reunindo o grupo do projeto e entrevistas a clientes.

2.1.1. Utilização do produto matriz (experimentação). Testar o produto ou acompanhá-lo quando em utilização.

2.1.2. Entrevistar grupo de usuários (Apêndice I)*

2.2. Identificar e conferir requisitos legais do produto matriz (regulamentos técnicos e normas de certificação) e realizar pesquisa por patentes e direitos autorais de software.

2.3. Organizar as necessidades dos clientes (adicionais) em grupos de acordo com a sua importância (Apêndice I).*

2.4. Mapear e detalhar os desdobramentos da função global em funções unitárias.

2.5. Definir e documentar os requisitos complementares do produto matriz (Apêndice I).*

3. Desmontar e documentar o produto matriz (estas atividades podem ser feitas em paralelo com 2)

3.1. Realizar desmontagem básica (separar partes conectadas por cabos de comunicação, de força, conexões pneumáticas, hidráulicas e mecânicas).

3.1. Criar esboços e vista explodida (para identificação de partes). Buscar a identificação do sistema eletromecânico e interface de tempo real. Documentar toda a desmontagem básica.

3.1.1. Verificar a configuração do sistema computacional (processamento: controle e informações - realizados por circuitos eletrônicos no próprio produto ou por um computador externo).

3.1.4. Verificar o nível de detalhamento/miniaturização das placas de circuitos.

3.1.5. Documentar os softwares (funções, código fonte, operação).

4. Definir onde será aplicada a ER e em que nível de profundidade (p. ex.: no circuito eletrônico responsável pelo controle: apenas identificando suas funções e características dos sinais, pois ele terá grande parte de suas funções reunidas em um chip programável).

* *pode-se utilizar um outro método equivalente para esta tarefa.*

Quadro 4.2: Planejamento Básico.

ESTRATÉGIA

1. Identificar a necessidade de aplicar diferentes abordagens de ER a partir da análise da operação do produto matriz e da observação de suas partes.

1.1. O Software de controle precisará ser submetido à ER? É possível obter uma solução alternativa?

1.1.1. As funções de controle estão reunidas em chips programáveis? É possível identificá-los?

1.1.2. As funções de controle estão reunidas em um sistema computacional separado (p. ex.: em um software compatível com um PC)?

1.2. O software de processamento de informações precisa ser submetido à ER? Existe um pacote comercial viável?

1.3. Que nível de ERE deverá ser empregado? São visíveis os circuitos padrões (p. ex.: circuito de acionamento de motor DC)?

1.4. Verificar a necessidade do emprego da digitalização de curvas e superfícies, principalmente em carcaças, elementos de fixação, zonas de interseção, janelas para ventilação, acesso a conectores, sensores e atuadores, alças e dispositivos para transporte e outros elementos que exigem detalhes topológicos.

1.5 Identificar a necessidade da medição de elementos geométricos padrão (p. ex.: sedes de mancais, eixos, furos, distâncias, etc.) por meio de instrumentação convencional (escalas, paquímetros, micrômetros, goniômetros, etc.).

2. Verificar se é viável obter sinais de respostas a partir dos circuitos eletrônicos (sinais de comandos para atuadores, sinais de sensores) durante a operação simulada do produto matriz.

3. Decidir pela utilização das abordagens de ER:

3.1. Decidir pelo uso de ferramentas estáticas ou dinâmicas ou ambas para a ERS (Braga, 1998);

3.2. Decidir pelo uso de ferramentas semânticas ou sintáticas ou ambas na ERE (Chisholm *et alli*, 2000).

3.3. Decidir pela utilização de métodos de digitalização ou medições convencionais ou ambos na ERM .

3.4. Definir e documentar quais ferramentas para levantamento de informações utilizar em cada abordagem de ER (ver capítulos 2 e 3).

P. ex.: método FusionRE para ERS, método patenteado de Chisholm *et alli*, 2000 para a ERE, medição por coordenadas para ERM.

Quadro 4.3: Estratégia.

4.1.1. ESTÁGIO 1: PLANEJAMENTO E ESTRATÉGIA NA ABORDAGEM MECÂNICA

Encontra-se abaixo (Quadro 4.4) os procedimentos e orientações necessários ao planejamento e estratégia de levantamento dos dados do produto matriz especificamente para a ERM.

PLANEJAMENTO E ESTRATÉGIA DA ERM
<p>1. Identificar o que pode ser medido utilizando instrumentação convencional (paquímetros, micrômetros, escalas, trenas, etc.)</p> <p>1.1. Identificar quais informações precisam ser fornecidas: dimensões, distâncias, ângulos e como serão informadas.</p> <p>2. Identificar criteriosamente o que precisa ser digitalizado utilizando MC.</p> <p>2.1. Ponderar sobre a necessidade de um sistema de coordenadas único (precisão na localização de itens).</p> <p>2.2. Avaliar a necessidade de digitalizar curvas ou superfícies complexas e suas interseções.</p> <p>2.3. Ponderar sobre a digitalização de elementos geométricos comuns cujas dimensões e localização são importantes zonas de interseção, elementos de suporte ou fixação, janelas para ventilação, ou instalação de sensores, conectores, atuadores e alças e dispositivos para transporte).</p> <p>2.4. Ponderar sobre as exigências de fixação, espaço e interação entre sensores, atuadores e módulos eletrônicos para controle e acionamento.</p> <p>2.5. Identificar quais informações precisam ser fornecidas:</p> <p>2.5.1. Identificar em croquis todos os elementos geométricos padrão a serem digitalizados (Ex.: furos, pinos cilíndricos, oblongos, esferas, etc.);</p> <p>2.5.2. Identificar as zonas a serem digitalizadas por nuvem de pontos (curvas ou superfícies);</p> <p>2.5.3. Definir dimensões, distâncias, parâmetros geométricos (palalelismo, planicidade, cilíndricidade, etc.) que precisam constar de relatórios;</p> <p>2.5.4. Negociar com a equipe como disponibilizar os dados (arquivo gráfico padrão ou relatórios de medição).</p> <p>2.5.5. Estabelecer o nível de detalhamento necessário a cada medição (número de pontos, densidade da nuvem de pontos, número de repetições).</p> <p>2.5.6. Decidir sobre o tipo de arquivo gráfico padrão a ser utilizado. Dar preferência ao STEP. Caso não esteja disponível, utilizar o IGES.</p> <p>3. Identificar a necessidade de ensaios mecânicos, físicos e químicos (identificação do material, proteção superficial, testes de resistência e desgaste, etc.)</p> <p>3.1. Caso haja disponibilidade de espécimes do produto matriz com falhas, efetuar a análise de falha específica.</p> <p>4. Planejar as medições, ensaios e digitalizações necessárias.</p> <p>4.1. Realizar ou subcontratar os ensaios (mecânicos, químicos, metalográficos) para definição de materiais.</p> <p>4.2. Definir instrumentação a ser utilizada para a medição e digitalização.</p> <p>4.3. Elaborar formulários para coleta de dados das medições.</p> <p>4.4. Para medição por coordenadas, definir em conjunto com o projetista a estratégia de medição/digitalização. Marcar na(s) peça(s) os locais a serem digitalizados, grid, direções, interseções, elementos padrão.</p>

Quadro 4.4: Planejamento/estratégia na ERM.

4.2. ESTÁGIO 2: LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES DO PRODUTO MATRIZ

Como visto nos capítulos 2 e 3, este estágio é o cerne da ER e, juntamente com o estágio de reprojeto e a interface entre os dois, representa grande parte do esforço dedicado ao desenvolvimento do novo produto. Aqui são levantados e reunidos os dados de diversas naturezas (p. ex.: anotações, fotografias, arquivos de computador, códigos fonte, registros de medição, relatórios de ensaios).

Existem duas formas de extrair os dados do produto matriz. Na primeira é possível coletar os dados sem que alterações significativas sejam impostas ao produto matriz. Após ser remontado, normalmente ele continuará operacional. Entretanto, principalmente nas abordagens ERE e ERM, é comum haver a necessidade de destruir partes do produto matriz, para se ter acesso a locais específicos (p. ex.: geometrias em locais inacessíveis, placas de circuitos em locais lacrados). Nesses casos, a equipe de projeto deverá sacrificar um ou mais espécimes do produto matriz a fim alcançar os dados necessários.

No Quadro 4.5 encontra-se o detalhamento do estágio de levantamento dos dados do produto matriz. Inicialmente é apresentado um procedimento para desmontagem detalhada do produto matriz. Efetivamente, a desmontagem não é apenas uma atividade mecânica, mas nela serão reunidos importantes dados e muitos deles podem resultar em algumas alterações na etapa de planejamento e definição das estratégias de ER. Ao final da etapa de desmontagem orientada (Quadro 4.5), é sugerido o levantamento da estrutura de funções do produto matriz, utilizando-se a abordagem inversa, conforme ilustrado na Figura 4.3. Tal atividade somente deve ser implementada se há dúvidas sobre princípios de solução empregados no produto matriz ou se as alterações provenientes de melhorias a serem introduzidas são representativas. Apesar de custar um tempo precioso, o levantamento da estrutura de funções permite conhecer melhor a função de cada parte do produto matriz e, assim, possibilita identificar possíveis pontos de melhoria (p. ex.: emprego de nova tecnologia em um sensor, substituição de chicote de cabos por inserções diretas de condutores nas paredes da carcaça de material plástico).

LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES DO PRODUTO MATRIZ

1. Desmontagem orientada

Executar os itens 1.1 a 1.6 de acordo com a necessidade e na seqüência apresentada.

- 1.1. Observar a operação do produto matriz e registrar detalhes de montagem, posicionamento, interligação com acessórios, conexões (elétricas, hidráulicas, pneumáticas, mecânicas), condições ambientais de operação e interação com o operador.
- 1.2. Verificar e documentar a configuração do sistema computacional (processamento: controle e informações - realizados por circuitos eletrônicos no próprio produto ou por um computador externo).
- 1.3. Identificar e documentar como ocorrem as interfaces entre sistema computacional e sensores e atuadores onde se localizam e como se configuram os conversores A/D e D/A.
- 1.4. Desmontar, identificar e documentar o sistema eletromecânico (funções de potência: movimentação, acionamento elétrico, posicionamento mecânico, refrigeração/ventilação, acionamento pneumático, etc.).
 - 1.4.1. Identificar sensores e atuadores individualmente (elétricos, hidráulicos, pneumáticos, piezoelétricos, mecânicos):
 - 1.4.1.1. Detalhar funcionalmente sensores e atuadores (princípio de operação, sinais de entrada e saída - tipo, faixa de operação, resolução necessária, possíveis fabricantes, modelos);
 - 1.4.2. Identificar e documentar conectores elétricos e cabos de força e de comunicação (tipo, se padronizado - norma, técnica, fabricante, modelo);
 - 1.4.3. Identificar e documentar elementos de máquinas (polias, correias, rodas dentadas, mancais, etc.) e as conexões com atuadores e sensores. Verificar em normas técnicas e catálogos o tipo e dimensões utilizadas.
 - 1.4.4. Identificar e documentar os princípios físicos utilizados (p. ex.: princípio físico utilizado em um atuador).
 - 1.5. Revisar/detalhar a estrutura de funções do produto. Verificar o Apêndice I:
 - 1.5.1 Utilizar abordagem inversa, conforme Figura 4.3.
- 1.6. Avaliar princípios de solução alternativos e suas combinações. Caso necessário, utilizar Matriz Morfológica (Apêndice I).

Realizar o Item 2 se a ERM for necessária.

Realizar o Item 3 se a ERE for necessária.

Realizar o Item 4 se a ERC/ERS for necessária.

2. Abordagem ERM - verificar Quadro 4.6.

3. Abordagem ERE

- 3.1. Verificar quais circuitos serão mapeados pela abordagem sintática.
- 3.2. Obter base de dados de circuitos padrão e comparar os circuitos identificados no produto matriz com os padrões. Documentar todas os padrões identificados e suas relações com os demais circuitos (sinais de entrada e saída).
- 3.3. Verificar que circuitos somente poderão ser identificados pela abordagem semântica.
- 3.4. Planejar e realizar ensaios nos circuitos (a partir dos sinais gerados na entrada, verificar as respostas nas saídas).
- 3.5. Reduzir os circuitos e subcircuitos às suas formas canônicas, segundo metodologia de Chisholm *et alli* (2000).
- 3.6. A partir das formas canônicas e tendo em mãos uma base de dados de circuitos padrão, verificar e documentar a solução padrão para cada caso.

4. Abordagem ERS e ERC

- 4.1. Verificar a disponibilidade de documentação do software (código fonte).
- 4.2. Identificar software para realização da ERS (análise estática e dinâmica).
- 4.3. Realizar análise estática a partir do código fonte, identificando a arquitetura do programa, estrutura de controle, fluxo lógico, estrutura de dados e fluxo de dados.
- 4.4. Quando não disponível o acesso ao código fonte, identificar as entradas de dados e saídas (respostas) do software.
- 4.5. Realizar os ensaios para a análise dinâmica do software, operando o produto matriz e coletando os dados de saída do software, identificando o modelo comportamental do software.
- 4.6. Identificar a lógica de controle levando-se em consideração também as características operacionais (faixa de operação, resolução estimada, tempo de resposta, linearidade e outras) dos sensores e atuadores.
- 4.7. Mapear as malhas de controle existentes.
5. **Identificar todas as interfaces** (entre placas de circuitos, entre placas de circuitos e atuadores, entre placas de circuitos e sensores, entre dispositivos mecânicos e aqueles dispostos ao meio exterior). Documentar conexões padrão. Verificar alternativas padrão para os não padronizados (submeter soluções ao cliente).
6. Caso protocolos de comunicação proprietários ou sinais criptografados impossibilitem a coleta de dados na ERS, ERC e/ou ERE, verificar alternativas:
 - 6.1. Desenvolver softwares/circuitos a partir das funções básicas (caso necessário, aprofundar pesquisa por requisitos dos clientes).
 - 6.1. Verificar a possibilidade de adotar uma alternativa padrão (pacote de software ou chip pré-programado disponível no mercado).

Quadro 4.5: Estágio 2 – coleta de dados do produto matriz.

4.2.1. ESTÁGIO 2: LEVANTAMENTO DOS DADOS DO PRODUTO MATRIZ NA ABORDAGEM MECÂNICA

No Quadro 4.6 encontram-se as orientações para a etapa de levantamento de dados na abordagem ERM.

Para realização da digitalização, adota-se o mesmo equipamento que pode executar a medição convencional, uma MMC ou um BM, sendo que no caso do segundo não é possível realizar o trabalho de forma programável e automática.

No item 4.6 encontram-se dois exemplos do levantamento de dados do produto matriz utilizando MC.

LEVANTAMENTO DE DADOS DO PRODUTO MATRIZ NA ERM

1. Planejar as medições, ensaios e digitalizações necessárias.

1.1. Realizar ou subcontratar os ensaios (mecânicos, químicos, metalográficos) para definição de materiais.

1.2. Definir instrumentação a ser utilizada para a medição e digitalização.

1.3. Elaborar formulários para coleta dos dados das medições.

1.4. Para medição por coordenadas, definir em conjunto com o projetista a estratégia de medição/digitalização.

2. Se forem necessárias medições com instrumentação convencional (p. ex.: comprimentos, ângulos, diâmetros, espessuras), realizá-las e gerar relatórios de medição com todos os resultados necessários ao projetista.

Se for necessária, realizar a medição por coordenadas ou digitalização (Item 3 ao 3.4).

3. Elaborar o programa básico de medição da MMC/BM (baseado nas necessidades do projetista).

3.1. Programar o alinhamento da peça sobre a mesa e submeter à aprovação do projetista (alinhamento nos eixos coordenados e origem do sistema de coordenadas).

3.2. Programar a medição dos elementos geométricos padrão (cilindros, cones, oblongos, planos, esferas) que podem ser reconhecidos automaticamente pelo software da MMC/BM.

3.3. Programar a execução de digitalizações:

3.3.1. Coletar pontos independentes (pontos limites, pontos de referência);

3.3.2. Digitalizar curvas (locais onde há a necessidade de maior detalhamento - muitas interseções entre curvas, superfícies e elementos geométricos euclidianos);

3.3.3. Digitalizar superfícies em locais onde não há muitas alterações na topologia;

3.3.4. Executar o programa de medição em modo CNC;

3.3.5. Submeter as nuvens de pontos a uma primeira análise do projetista. Refazer locais onde há dúvidas.

3.4. Gerar o arquivo gráfico padrão, utilizando o sistema de coordenadas criado. Optar pelo STEP. Caso não esteja disponível, utilizar o IGES.

3.5. No CAD onde a geometria será reconstruída, importar o arquivo gráfico padrão. Manter sistema de coordenadas original. Se não houver MC, desconsiderar este item.

3.6. Reconstruir em CAD as geometrias padrão, curvas e superfícies. Utilizar preferencialmente a construção de superfícies por meio de curvas limítrofes, a não ser nos casos onde a digitalização tenha sido efetuada diretamente na superfície. Os CADs comerciais possuem a função de construção de superfícies a partir de quatro curvas.

3.7. Identificar as zonas inadequadas (distorções nas superfícies ou interseções, elementos geométricos padrão não identificados pelo CAD, zonas com resolução inadequada - degraus, pontos perdidos - em locais não previstos, curvas que não se ligam - sem pontos de interseção).

3.8. Repassar ao metrologista as conclusões da reconstrução e solicitar as alterações e detalhamentos necessários.

3.9. Repetir a seqüência de 3.3 a 3.8 até que o projetista tenha conseguido reconstruir todos os elementos geométricos necessários sem distorções ou perda de informações.

3.10. Manter todos os registros das medições e digitalizações executadas (programas da MMC/BM, registros de medição, arquivos gráficos padrão, arquivos em CAD).

Quadro 4.6: Levantamento de dados na ERM.

A transferência dos dados obtidos na MC deve ser realizada por meio do arquivo gráfico padrão. É comum nos pacotes comerciais de CAD haver grande variedade de padrões disponíveis (padrões exclusivos criados pelos desenvolvedores de CADs), mas isto dificulta a portabilidade dos arquivos. Sugere-se utilizar o STEP ou o IGES, desde que observadas as limitações do segundo. Na geração do arquivo gráfico padrão no software da MMC/BM é preciso manter o sistema de coordenadas original criado durante a programação da medição CNC, a fim de garantir o alinhamento adequado da peça e a manutenção de todas as relações geométricas.

4.3. INTERFACE ENTRE O LEVANTAMENTO DE DADOS DO PRODUTO MATRIZ E O REPROJETO

Para a ERE e ERS, como discutido no Capítulo 3 (Figura 3.2), a interface entre a coleta de dados do produto matriz e a etapa de reprojeto é comparativamente mais simples e seus pontos críticos de sucesso se encontram tratados nos quadros 4.7 e 4.8. A interface específica para a ERM será tratada adiante. É importante notar que aspectos importantes da interface afetam toda a execução do método, desde o planejamento até o reprojeto. Por isso a interface específica para a ERM, por ser a mais complexa, é tratada em separado.

INTERFACE ENTRE OS ESTÁGIOS 2 E 3 PARA ERE

1. Reunir todos os dados provenientes do Estágio 1 e disponibilizá-los ordenadamente para o reprojeto: requisitos adicionais do produto (novas funções e atributos), novos requisitos legais, croquis e sequência de desmontagem, estrutura básica de funções.
 2. Transferir os dados oriundos da ERE para o software de reprojeto dos circuitos eletrônicos (circuitos padrões identificados e suas interrelações).
 3. Reunir todos os dados sobre interfaces (conexões elétricas de força e comunicação, conexões mecânicas, conexões eletromecânicas), os padrões normalizados identificados e ordená-los para uso no reprojeto.
-

Quadro 4.7: Interface para a ERE.

INTERFACE ENTRE OS ESTÁGIOS 2 E 3 PARA ERS e ERC

1. Reunir todos os dados provenientes do Estágio 1 e disponibilizá-los ordenadamente para o reprojeto: requisitos adicionais do produto (novas funções e atributos), novos requisitos legais, croquis e sequência de desmontagem, estrutura básica de funções.
 2. Transferir dos dados oriundos da ERS para as ferramentas de desenvolvimento (padrões identificados: arquitetura, estrutura de controle, fluxo de dados, fluxo lógico e estrutura de dados).
-

Quadro 4.8: Interface para a ERS e ERC.

É importante lembrar que as tratativas apresentadas nos quadros 4.7 e 4.8 são aplicáveis aos casos onde a sistemática de ERE e ERS não são totalmente automatizadas. Nos casos onde os aplicativos utilizados permitem um bom nível de automatização (como comentado no Capítulo 3), a interface é mais fluida, já que o mesmo software integra o estágio de levantamento de dados e o estágio de reprojeção, ou reengenharia para a ERS.

4.3.1. PARTICULARIDADES PARA A ABORDAGEM MECÂNICA

Para a ERM, a inspeção visual do produto desmontado é importante para que a equipe de projeto possa definir que elementos geométricos e detalhes da topologia precisam ser digitalizados por meio de MC e quais podem ser medidos utilizando instrumentação convencional.

O primeiro ponto na definição da estratégia da ERM é separar os elementos que podem ser identificados visualmente ou utilizando instrumentação convencional daqueles que necessitam de digitalização utilizando a MC. A seguir, estratégias de medição e procedimentos devem ser definidas em comum acordo com a participação de toda a equipe de projeto. Dessa forma, evita-se a perda de tempo em medições desnecessárias ou o retrabalho por conta de dados incompletos.

Em linhas gerais, quando o posicionamento, dimensões ou referências geométricas entre elementos são importantes, como em geral é o caso, a MC deve ser empregada, de forma a manter as localizações referenciadas a um sistema de coordenadas único e obter resultados mais confiáveis.

A interface entre a etapa de coleta de dados do produto matriz e o reprojeção na ERM afetará de forma decisiva todos os demais estágios do método. Como a influência das decisões e atitudes dos projetistas e metrologistas é maior aqui, a comunicação entre os componentes da equipe de projeto e o fluxo de informações entre a medição/digitalização e a etapa de reprojeção são elementos que precisam de atenção especial nesta fase.

A interface não permite apenas o trânsito de informações provenientes da MC para o CAD, mas também deve organizar todos os dados coletados na desmontagem do produto matriz, assim como aqueles originários da observação, da medição com o uso de instrumentos convencionais, e dos ensaios mecânicos, físicos e químicos. Por isso não apenas a transferência de arquivos gráficos padrão é importante, mas a criação de formulários ou bases

de dados para o trânsito de todas as informações disponíveis.

No quadro 4.9 encontram-se as principais informações que trafegam na interface entre a etapa de medição/digitalização e o reprojeto e as orientações necessárias.

Ação	Entradas	Saídas	Procedimento/ orientações
Observação do produto matriz.	Produto matriz funcional.	Identificação de itens padronizados (sedes de mancais, eixos, correias, molas, botões, conectores, sensores, atuadores, etc.).	As informações devem ser registradas em relatórios de inspeção.
Medição com instrumentação convencional.	Identificação dos elementos geométricos necessários do produto matriz (croquis).	Dimensões (p. ex.: comprimentos, diâmetros, ângulos), relações geométricas (p. ex.: planeza, paralelismo).	Devem ser registradas em relatórios de medição.
Medição por coordenadas.	Identificação dos elementos geométricos necessários do produto matriz (croquis). Identificação de relações geométricas entre elementos.	Poliedros, Nuvens de pontos, Sistema de coordenadas referenciado ao produto matriz, Dimensões, Relações geométricas.	As duas últimas saídas devem ser registradas em relatórios de medição. Os demais por arquivo gráfico padrão.
Arquivos gráficos padrão	Poliedros, Nuvens de pontos, Sistema de coordenadas referenciado ao produto matriz.	Arquivo gráfico padrão para o CAD.	Informações digitais sobre cada elemento geométrico digitalizado.
Necessidade de correções/ detalhamento na medição/ digitalização.	Identificação do parâmetro e elemento geométrico, Densidade de grid insuficiente, Zona de digitalização inadequada, Zonas de interseção com detalhamento insuficiente.	Poliedros, Nuvens de pontos, Sistema de coordenadas referenciado ao produto matriz, Dimensões, Relações geométricas.	Informações digitais sobre cada elemento geométrico digitalizado. Algumas informações devem ser registradas em relatórios de medição.

Quadro 4.9: Interface na ERM.

4.3.2. DIGITALIZAÇÃO DE GEOMETRIAS: EXEMPLOS

Na Figura 4.4 pode-se observar uma nuvem de pontos (parte das superfícies da carcaça de um *mouse*), um triângulo (representando um plano sobre a peça), uma reta e uma circunferência, os três últimos utilizados para alinhamento da peça na MMC. Eles são o resultado, visto aqui na tela do CAD da MMC, da digitalização de parte de uma superfície livre.

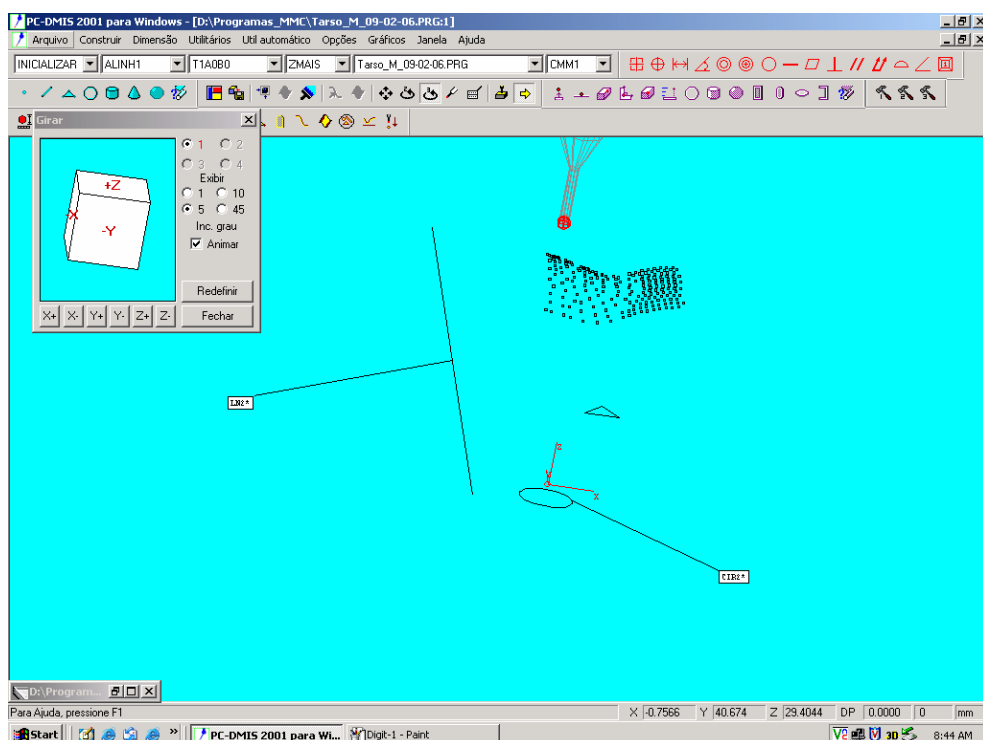


Figura 4.4: Elementos geométricos no CAD de uma MMC.

Na Figura 4.5, a nuvem de pontos coletada na operação da MMC foi convertida num conjunto de curvas no CAD *Solidworks*. Nesse CAD, a criação de superfícies a partir de uma nuvem de pontos não é exequível. É possível apenas transformar um conjunto de curvas em uma superfície. Já na Figura 4.6, observa-se a criação de uma superfície diretamente da nuvem de pontos no CAD *Rhinoceros*. Em algumas situações, a criação de uma superfície diretamente da nuvem de pontos é algo desejável, de forma a poupar tempo com a manipulação de um conjunto de curvas.

A MMC usada para digitalização da superfície e conversão do arquivo IGES é uma

Brown & Sharpe DEA, modelo Scirocco NT 100907. Foi utilizado o software PC-DMIS versão 3.206, conversor IGES versão 5.3 e sensor de medição Renishaw SP 600 por contato contínuo (melhor adaptável à formas livres). Seus dados de calibração encontram-se no Quadro 4.10.

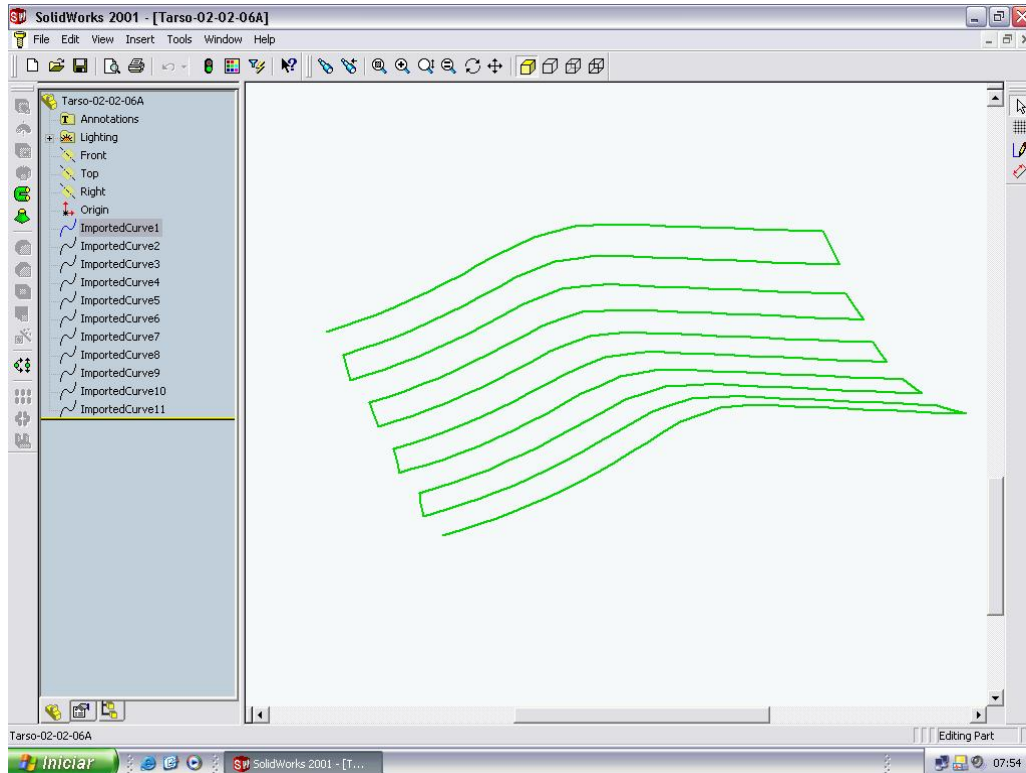


Figura 4.5: Nuvem de pontos transformada em curvas no Solidworks.

Parâmetro	Valor obtido
Incerteza de medição (fator de abrangência de 95%) para todo o volume da máquina:	$U_3 = (2,5 + L/900) \mu\text{m}^*$
Maior erro identificado no volume da máquina:	3,6 μm para deslocamento de 1000 mm 1,8 μm para deslocamento até 400 mm

* L = deslocamento realizado pelo cabeçote de medição em qualquer direção.

Quadro 4.10: Principais resultados da calibração da MMC.

Os valores apresentados no Quadro 4.10 são típicos de uma MMC utilizada na indústria. Se avaliado o caso apresentado na Figura 4.5, cuja maior dimensão é inferior a 100 mm, pode-se ter uma idéia do significado da incerteza de medição para os resultados da ER:

- Considerando a maior dimensão de 100 mm, a máxima incerteza identificada durante a calibração da MMC para esse deslocamento é de $U_3 = (2,5 + 300/900) = 2,8 \mu\text{m}$;
- para um deslocamento de 100 mm, o erro de medição da MMC é de $1,8 \mu\text{m}$;

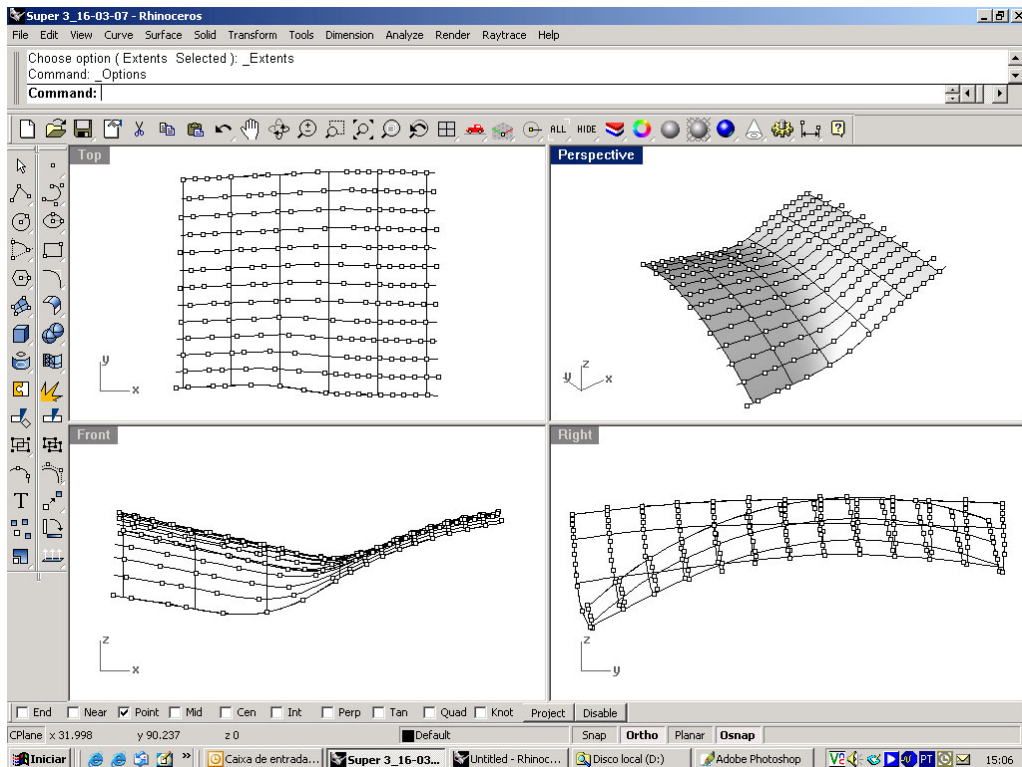


Figura 4.6: Nuvem de pontos transformada em superfície no Rhinoceros.

Portanto, na pior condição possível (erro da máquina presente na sua totalidade e somado a incerteza proveniente do processo de calibração) se teria uma contribuição de $4,6 \mu\text{m}$, isto é, aproximadamente $0,005 \text{ mm}$. Isto significa que a reconstrução em CAD do produto teria uma zona de incerteza de $0,005 \text{ mm}$ em torno de cada ponto, o que é um valor bastante bom para os propósitos de um projeto em desenvolvimento (cerca de $0,005\%$ da máxima dimensão da peça).

Na Figura 4.7, pode-se verificar um exemplo de digitalização executada de forma sistematizada com a interação permanente entre o projetista e o metrologista. O aspecto da nuvem de pontos apresentada (pontos representados pelo sinal +) se refere à digitalização de uma ferramenta (parte do molde para injeção de uma peça plástica) com um peculiar conjunto de superfícies complexas.

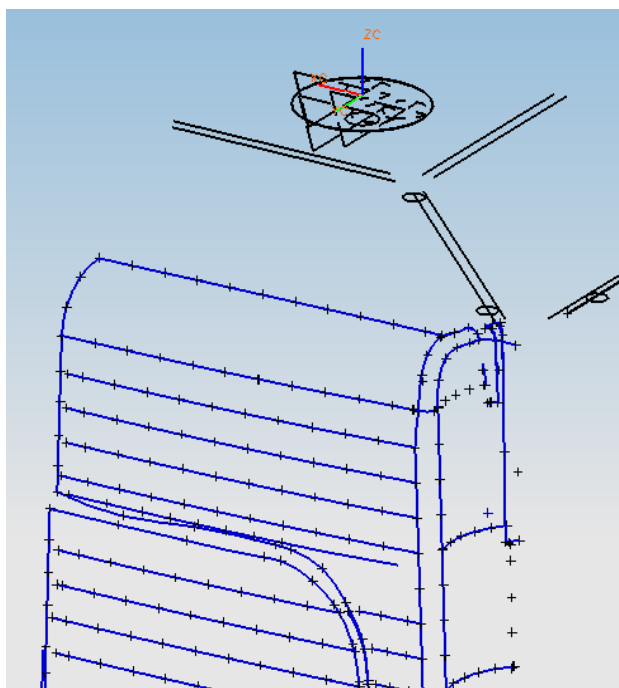


Figura 4.7: Parte da nuvem de pontos gerada numa MMC.

Na Figura 4.8 pode-se verificar o tratamento das curvas e superfícies digitalizadas no software Unigraphics NX. Após o término das operações de digitalização utilizando a MMC, a transferência dos dados foi realizada por meio de arquivo padrão IGES. $\frac{1}{4}$ da peça (Figura 4.9) foi submetida à coleta de dados e utilizada a simetria da mesma para a modelagem em CAD do restante. O planejamento da digitalização e sua execução foram feitos em cinco etapas, totalizando pouco mais de 36 h de trabalho dos dois técnicos. Inicialmente, foram determinados pelo projetista os pontos a serem coletados individualmente e as curvas a serem identificadas. Coletado o primeiro conjunto de pontos, o projetista montou no CAD as curvas e com essas as superfícies. A partir desses primeiros resultados, o projetista repassou ao operador da MMC os locais que precisariam de detalhamento (maior número de pontos), locais com pontos inúteis (que causaram distorções) e zonas de interseção entre curvas e superfícies que necessitaram de detalhamento específico. A partir dessas orientações, o operador da MMC realizou novas digitalizações e o projetista montou as curvas e superfícies necessárias. Essas foram construídas a partir da sua periferia, isto é, de um conjunto de curvas que a delimitou. Realizadas outras seções de digitalização e remontagem no CAD, por fim a parte reconstruída foi espelhada para os outros três lados da peça.

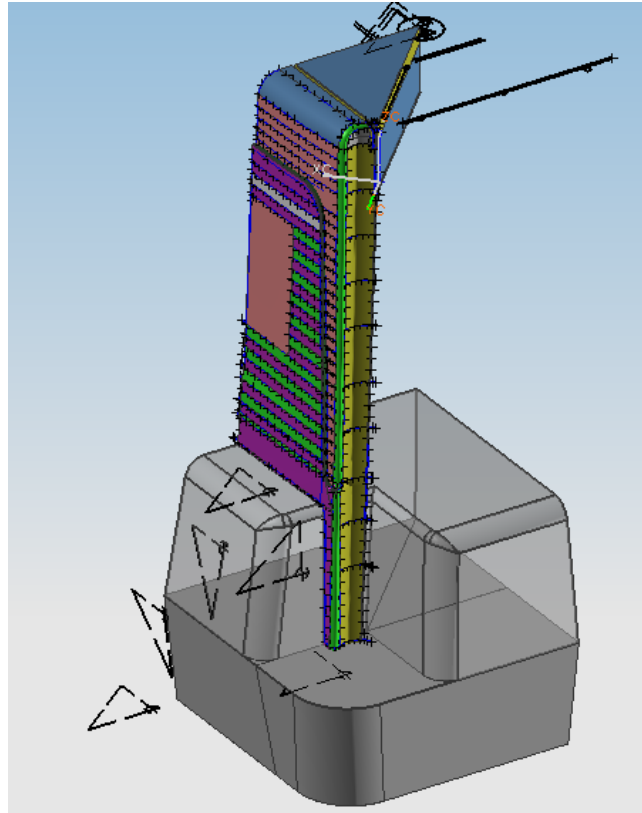


Figura 4.8: 1/4 da peça submetida à digitalização nas suas principais curvas e superfícies.

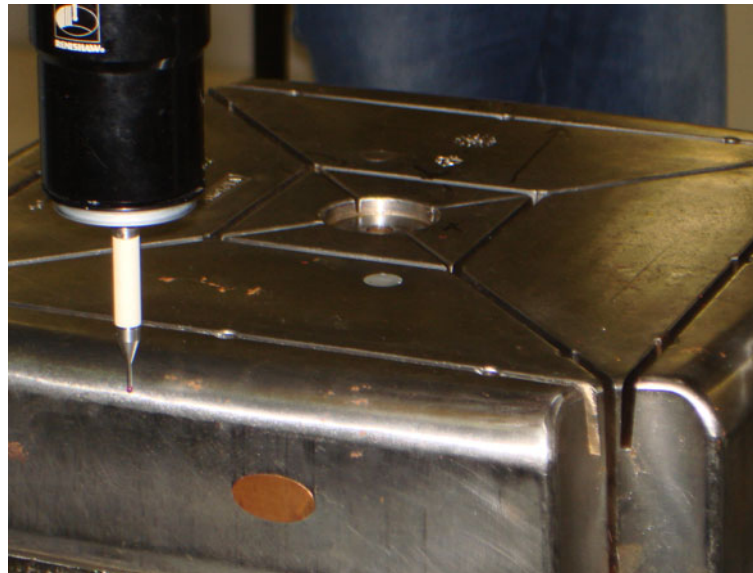


Figura 4.9: Peça em digitalização na MMC.

4.4. ESTÁGIO 3: REPROJETO

O estágio de Reprojeto, também denominado de reengenharia quando aplicado em programas de computador, equivale à etapa de Detalhamento do Projeto nos processos convencionais de projeto de produto. Neste trabalho, não se pretende propor um método específico para o reprojeto, mas, baseado na etapa de Detalhamento do Projeto dos modelos convencionais, adicionar uma série de orientações procedimentais para que a ER possa efetivamente resultar em ganhos para o produto (apresentadas no Quadro 4.11).

Antes de avançar no detalhamento do projeto, sugere-se a realização de uma busca detalhada por patentes. A amplitude da busca depende do mercado a atingir com o novo produto. Se a intenção é alcançar o mercado internacional sem qualquer restrição, uma busca ampla deve ser realizada. A equipe de projeto deve buscar o apoio técnico de um Agente de Propriedade Industrial. Nas principais universidades, centros de pesquisa e prestação de serviços tecnológicos, existem profissionais capacitados pelo INPI.

Neste estágio podem ser detectados pontos falhos (falta de dados, dados distorcidos ou incompletos) na etapa de coleta de dados do produto matriz, mesmo que garantidas as condições adequadas de integração da equipe técnica, e novas seções para coleta de dados necessárias. O bom planejamento no Estágio 1 e a execução sistematizada no Estágio 2 garantirão um reduzido número de ciclos na ER.

Ao final do reprojeto, avaliações do produto devem ser executadas sob supervisão do cliente e ensaios e testes de desempenho realizados sempre que possível e aplicável (p. ex.: ensaio de compatibilidade eletromagnética, ensaio acústico, ensaios de fadiga). Antes de passar ao estágio seguinte, a equipe de projeto deve se certificar que o produto atende a todos os requisitos técnicos e legais.

REPROJETO

1. Reconstrução do projeto

- 1.1. Reconstruir parcialmente o produto matriz a partir das informações da ER
- 1.1.1. Decidir pela manutenção ou alteração dos princípios físicos identificados nos estágios 1 e 2.
- 1.1.1.1. Decidir o que manter inalterado e o que deve ser mudado. Analisar, pelo menos:
 - a) Que funções do hardware podem passar para o software?
 - b) Que funções permanecerão no produto novo e quais podem ser transferidas para um hardware ou software de apoio?
 - c) Que funções podem ter seu princípio físico alterado (o que será mecânico, hidráulico, elétrico, pneumático)?
 - d) Como os atributos e funções inalterados podem cumprir os novos requisitos dos clientes? O que precisa mudar? (p. ex.: tolerâncias, forma, esquema eletrônico, menu em um software)
- 1.2. Identificar e implementar novos princípios de solução (materiais, princípios físicos, padrões industriais).
Ver Apêndice I, item I.2.

Antes de realizar os itens 1.3 e 1.4, realizar busca por patentes. Contratar Agente de Propriedade Industrial e verificar contornos apropriados às patentes existentes. Implementar orientações no projeto.

- 1.3. Identificar e especificar itens padrão equivalentes no mercado (sensores, atuadores, placas de circuito, elementos de máquinas).
- 1.4. Testar sempre que possível os novos princípios de solução estabelecidos.
- 1.5. Integrar todas as soluções, utilizando a matriz morfológica (Apêndice I, item I.2).
- 1.6. Verificar com o contratante a necessidade e viabilidade econômica da elaboração de protótipos.
- 1.6.1. Verificar a necessidade de protótipos funcionais para testes e ensaios.

2. Remodelagem mecânica

- 2.1. Modelar em CAD a geometria de todos os componentes do produto (placas eletrônicas, peças mecânicas, elementos de fixação, carcaça, conjunto), utilizando:
 - 2.1.1. os dados coletados por meio de medições e ensaios;
 - 2.1.2. os dados coletados por meio de digitalizações;
 - 2.1.3. os dados provenientes da observação do produto matriz (estágios 1 e 2);
 - 2.1.4. dados referentes a elementos padrão (normalizados) identificados;
 - 2.1.5. novas concepções oriundas dos novos requisitos;
- 2.2. Redimensionar tolerâncias dimensionais, de forma e posição e ajustes (com base nas definições do item 1).

3. Remodelagem eletrônica

- 3.1. Modelar em ECAD os circuitos eletrônicos necessários utilizando:
 - 3.1.1. os circuitos padrão identificados na ERE;
 - 3.1.2. circuitos padrão disponíveis no mercado sempre que possível;
 - 3.1.3. chips programáveis em substituição a circuitos dedicados sempre que possível.

4. Reengenharia do software

- 4.1. Realizar a reengenharia dos softwares utilizando um CASE, incluindo as melhorias definidas no estágio 1 e usando:
 - 4.1.1. modelos comportamentais definidos na ERS;
 - 4.1.2. estruturas identificadas na ERS (arquitetura do programa, estrutura de controle, fluxo de lógica, fluxo de dados, estrutura de dados).
 - 4.1.3. programação em chips, quando necessário.

5. Reintegração e avaliação

- 5.1. Realizar análises de engenharia necessárias utilizando softwares de CAE apropriados.
- 5.2. Definir os processos de prototipagem (mecânica e eletrônica);
- 5.3. Definir os ensaios e testes necessários (inclusive testes para validação de softwares).
- 5.4. Contratar/construir os protótipos e realizar os ensaios e testes necessários.
- 5.5. Avaliar os resultados dos ensaios e testes.
 - 5.5.1. Caso os resultados exijam alterações no projeto, retornar ao Estágio 1, revisar os passos e decisões e proceder as mudanças necessárias.
- 5.6. Definir a sequência de montagem do produto, os processos de fabricação e recursos que serão empregados.
- 5.7. Gerar programações de máquinas operatrizes para fabricação de peças mecânicas e montagem de circuitos por meio de ferramentas apropriadas de CAM.

6. Documentação do reprojeto

- 6.1. Documentar de forma sistemática todas as etapas do reprojeto, gerando cadernos de especificação, desenhos 2D, arquivos eletrônicos de CAD, CAE e CAM, programas de medição, relatórios de ensaios e medições, fotografias, protótipos.
-

Quadro 4.11: Reprojeto.

4.5. ESTÁGIO 4: CERTIFICAÇÕES E DOCUMENTAÇÃO DO PRODUTO

Nesta etapa, a equipe de projeto deve verificar as certificações de produto necessárias e, para tanto, providenciar os protótipos apropriados. Nesta fase é importante retornar ao estágio de planejamento, para verificar se o produto deve passar por testes e certificações compulsórias (p. ex.: testes de impacto, avaliação de compatibilidade para uso infantil, teste hidrostático). Caso a certificação compulsória seja necessária, a equipe de projeto deve submeter o novo produto a um Organismo de Certificação de Produto (OCP). Ao final das certificações, o produto deve ainda ser documentado de forma definitiva, considerando, se aplicável, a possibilidade dos devidos registros de propriedade industrial e direito de autoria dos programas de computador. Uma instrução geral sobre esta etapa encontra-se no Quadro 4.12.

CERTIFICAÇÕES E DOCUMENTAÇÃO

1. Verificar a necessidade de certificações compulsórias e/ou voluntárias.
2. Definir o Organismo de Certificação de Produtos e os laboratórios para realização dos ensaios e testes.
3. Contratar/construir protótipos e realizar os ensaios e testes previstos.
4. Avaliar os resultados dos ensaios e testes.
 - 4.1. Caso os resultados exijam alterações no projeto, retornar ao Estágio 1, revisar os passos e decisões e proceder as mudanças necessárias.
5. Documentar o projeto de forma integrada, incluindo:
 - 5.1. Código-fonte de softwares:
 - 5.1.1. Providenciar registro do direito autoral se aplicável;
 - 5.2. Catálogos e folhetos técnicos para venda;
 - 5.3. A formalização das certificações obtidas (certificados e selos);
 - 5.4. Os documentos provenientes da etapa de reprojeção;
 - 5.5. Resumo do estado da técnica para fins de registro de patentes (se aplicável);
 - 5.6. Memória descritivo do produto, focalizando suas vantagens em relação ao estado da técnica.
6. Caso necessário, contratar um agente de propriedade industrial para registro de patentes.

Quadro 4.12: certificações e documentação do produto.

4.6. FLUXOGRAMAS DO MÉTODO

Os fluxogramas apresentados a seguir orientam a aplicação dos procedimentos estabelecidos nos quadros anteriores. Os fluxogramas são classificados por letras (de A até M). As ligações entre fluxogramas são demarcadas por números. Alguns fluxogramas estão vinculados a outros.

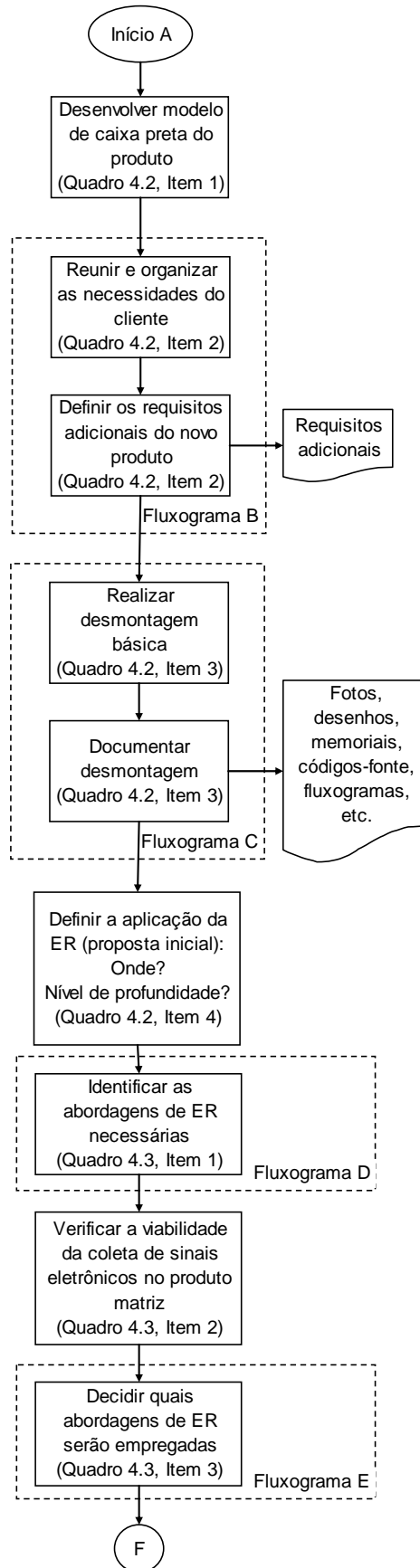


Figura 4.10: Fluxograma A (Planejamento Básico e Estratégia)

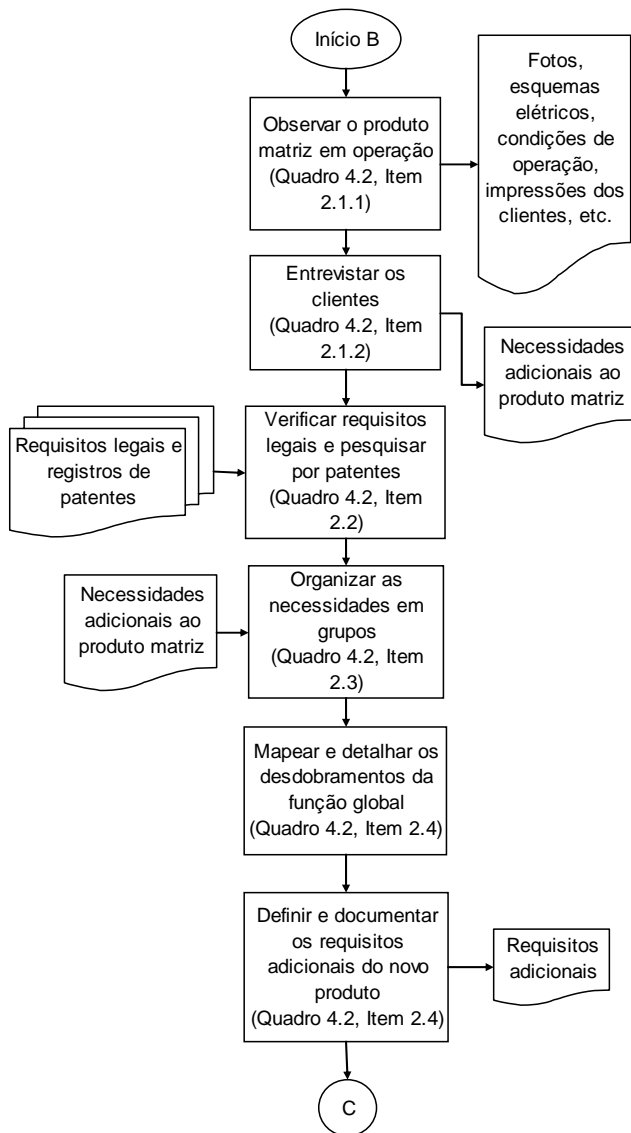


Figura 4.11: Fluxograma B

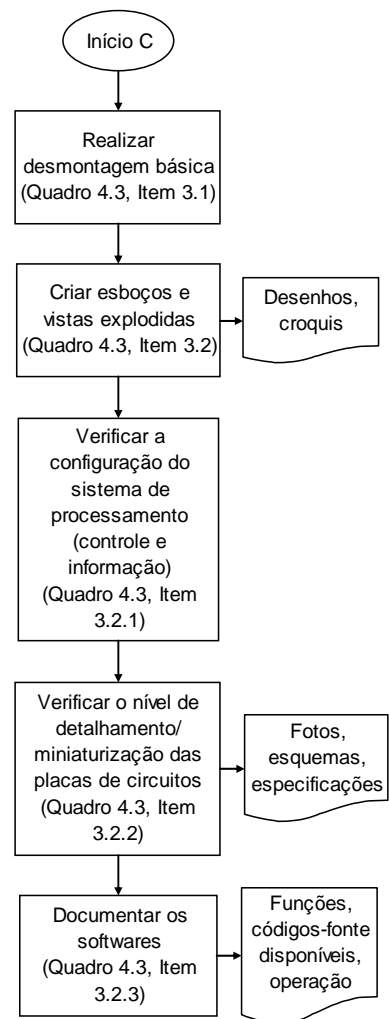


Figura 4.12: Fluxograma C

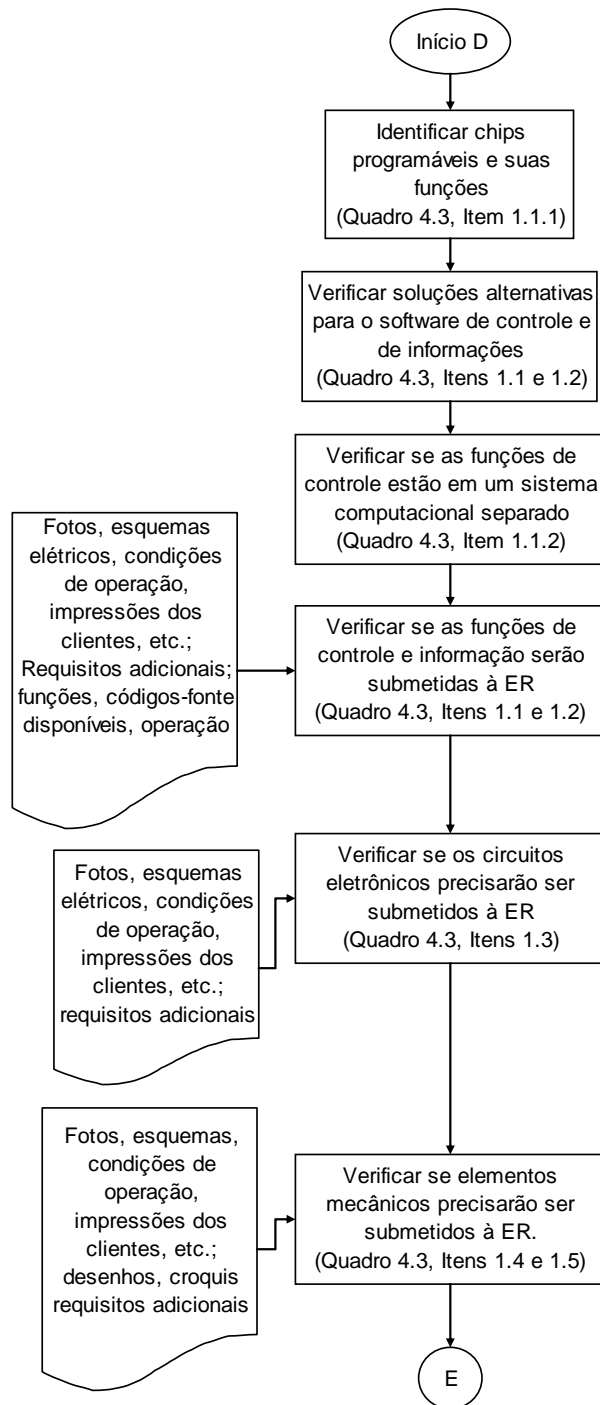


Figura 4.13: Fluxograma D

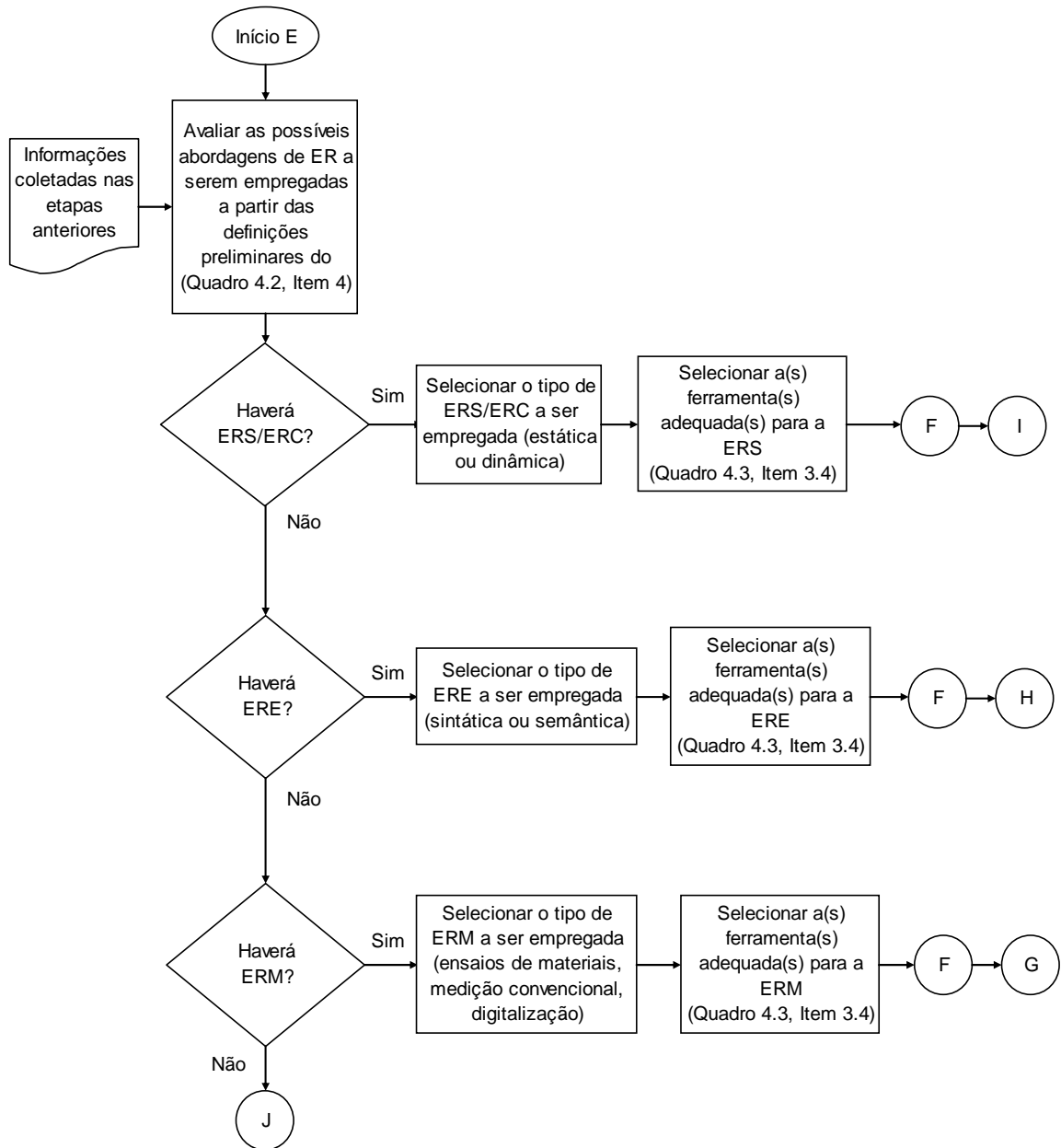


Figura 4.14: Fluxograma E

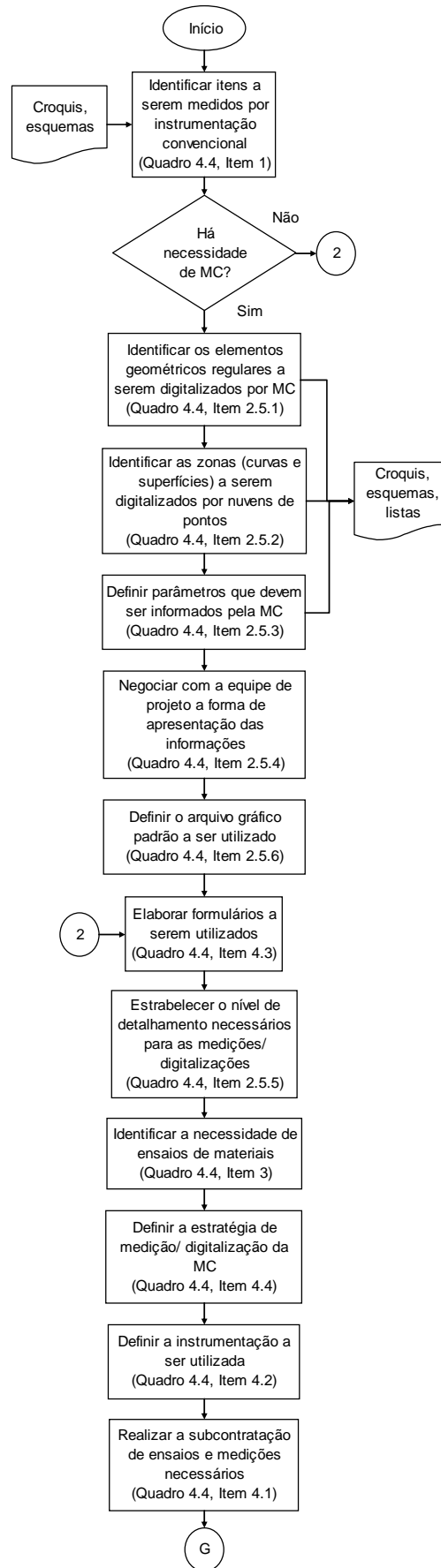


Figura 4.15: Fluxograma específico do Planejamento e Estratégia da ERM

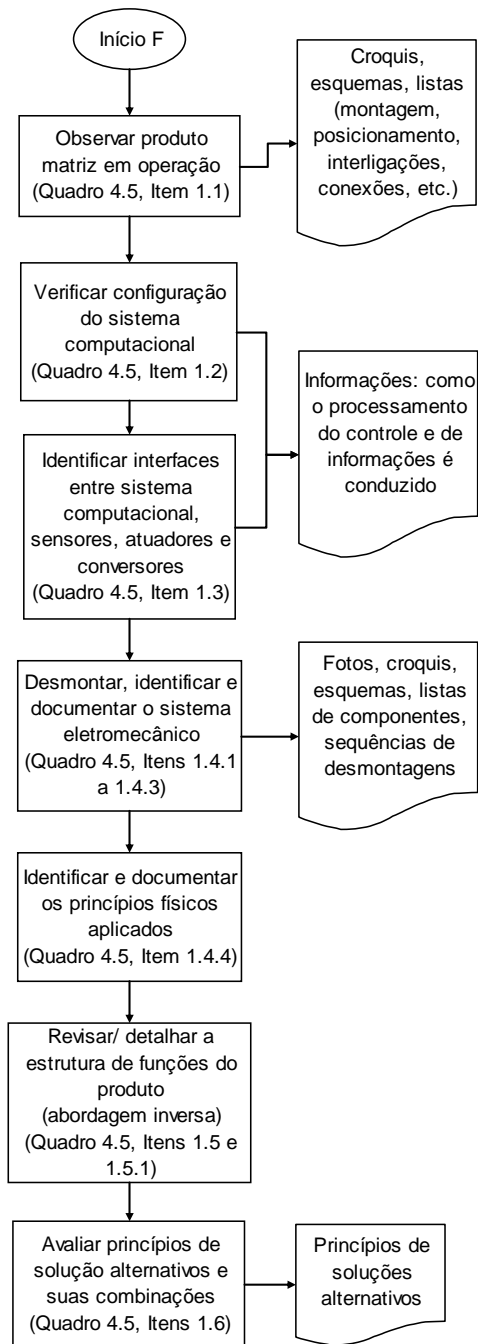


Figura 4.16: Fluxograma F

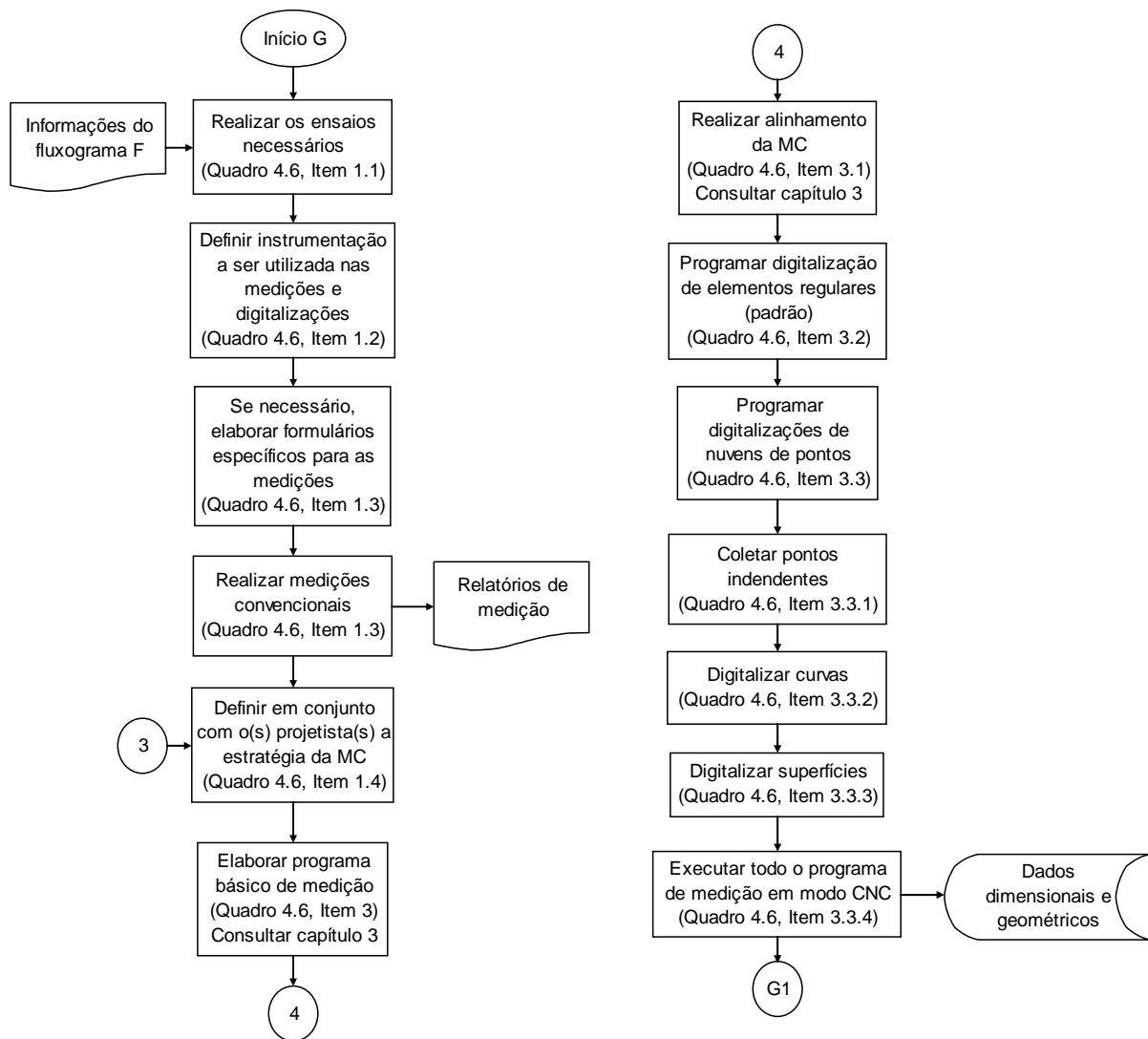


Figura 4.17: Fluxograma G

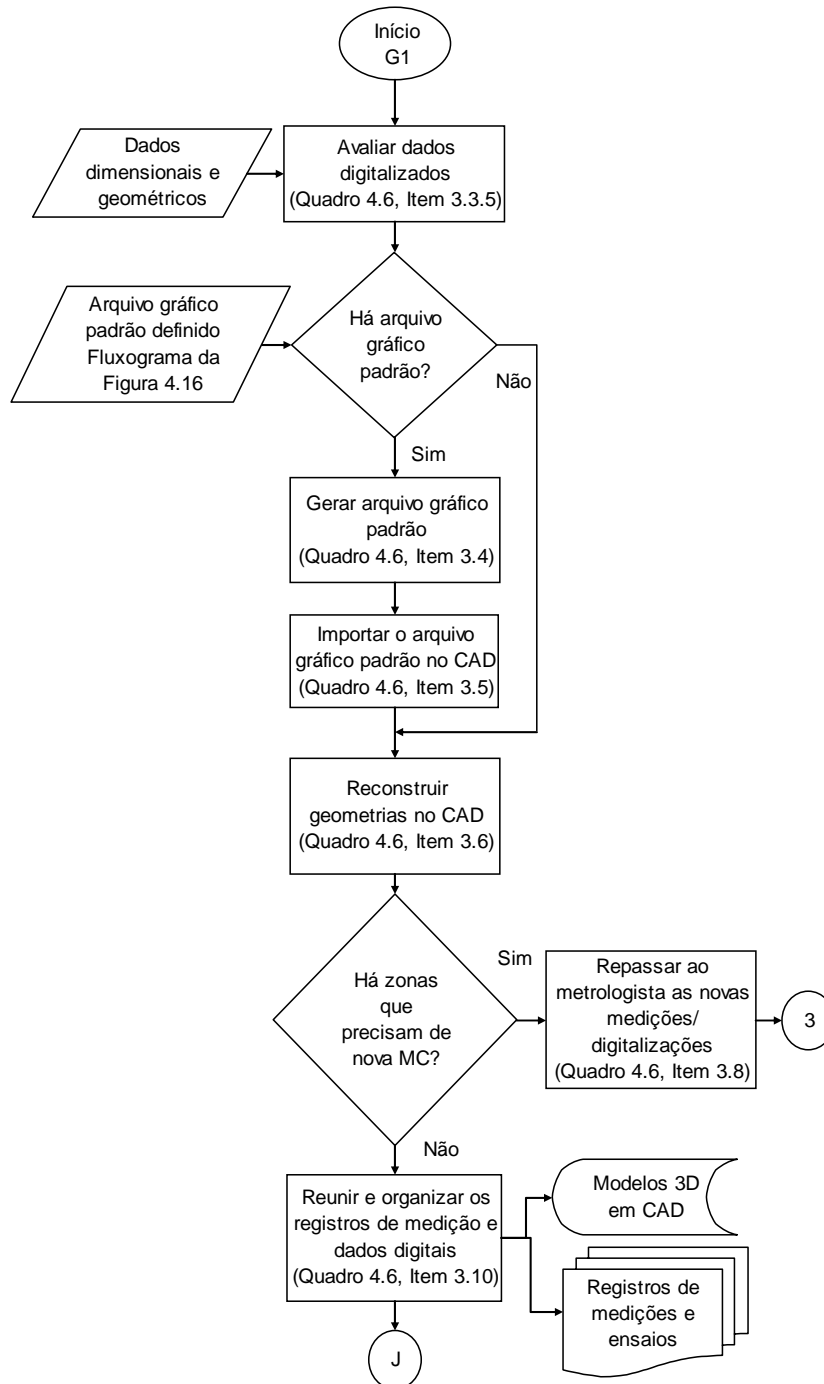


Figura 4.18: Fluxograma G1

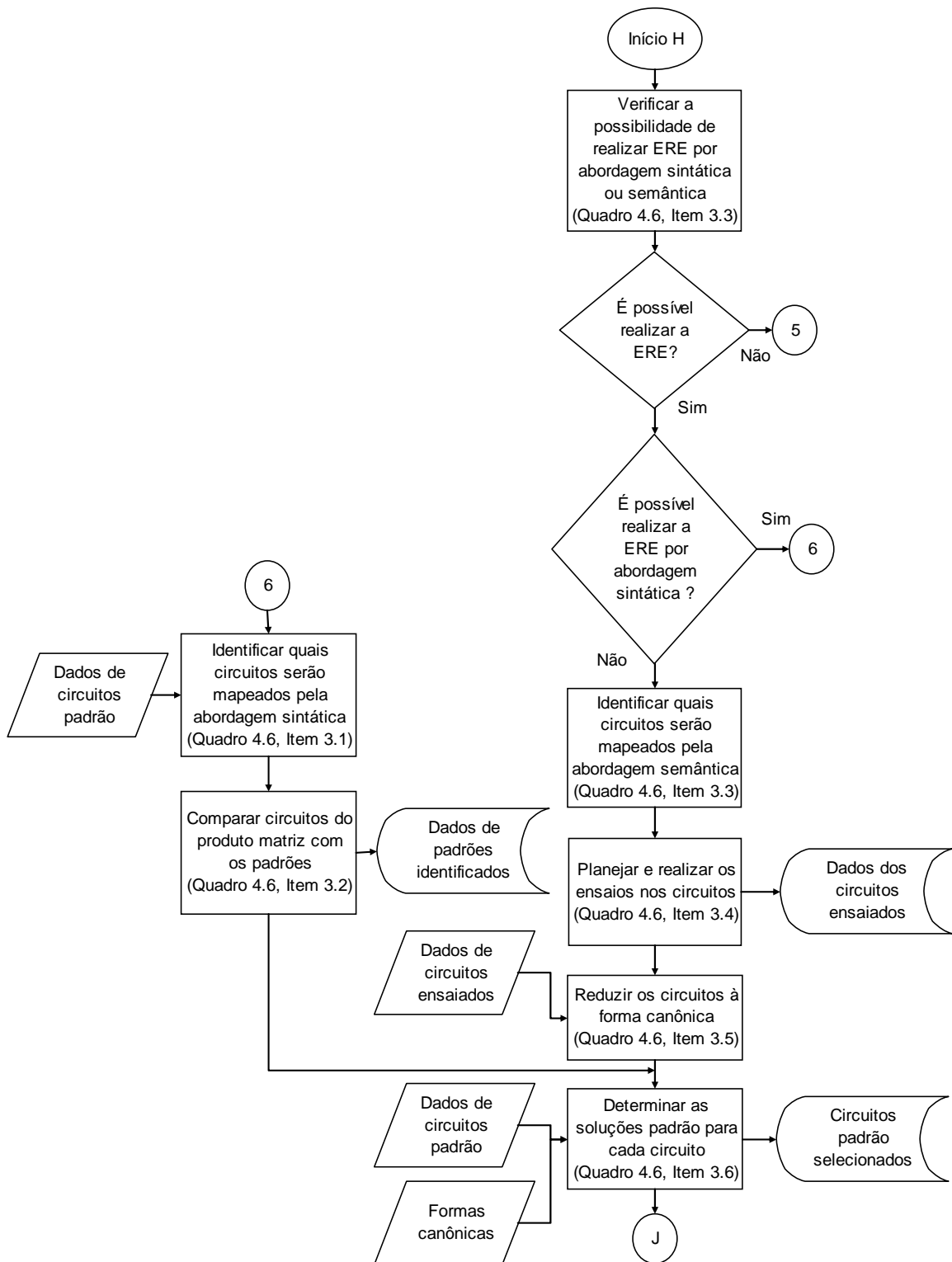


Figura 4.19: Fluxograma H

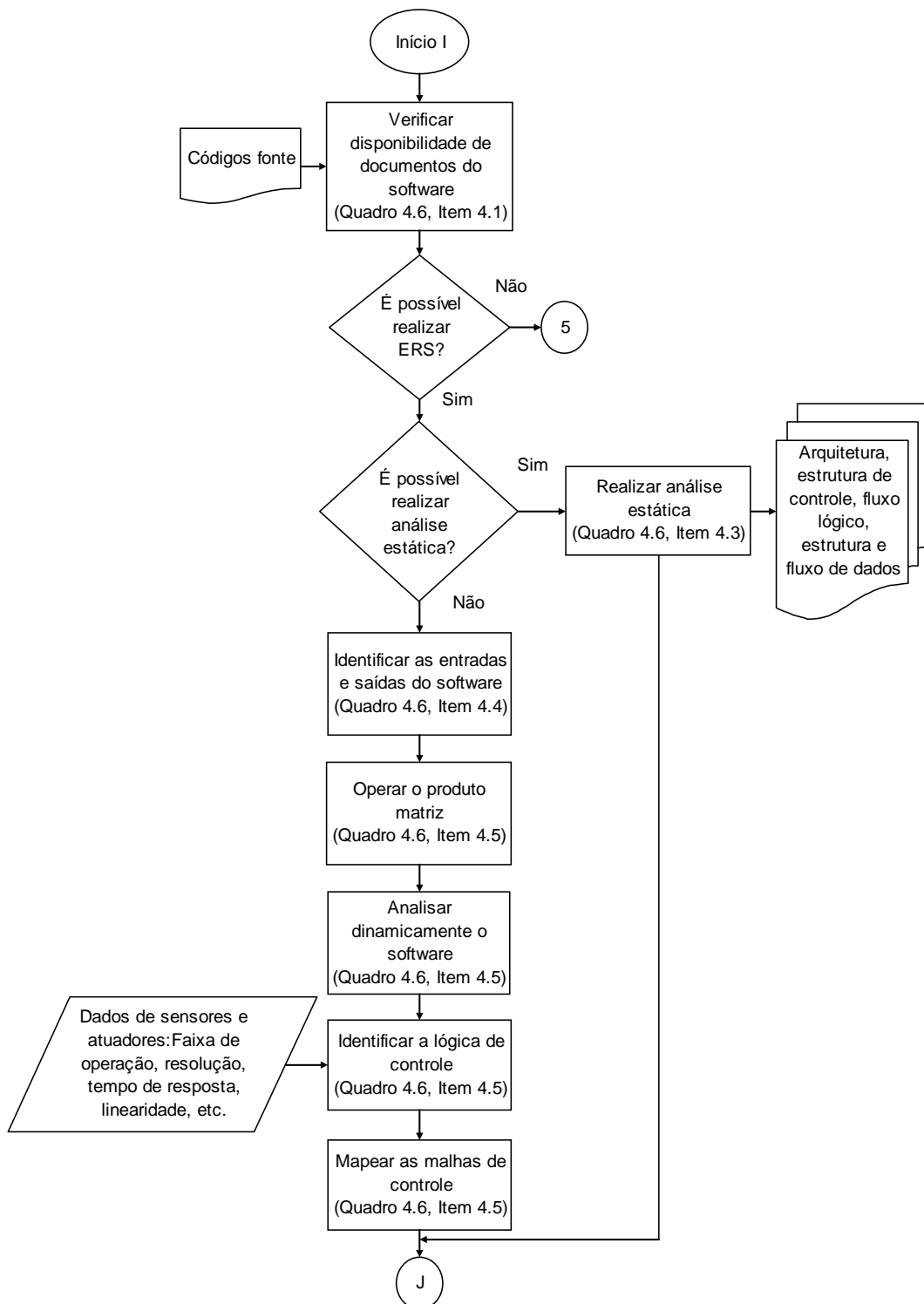


Figura 4.20: Fluxograma I

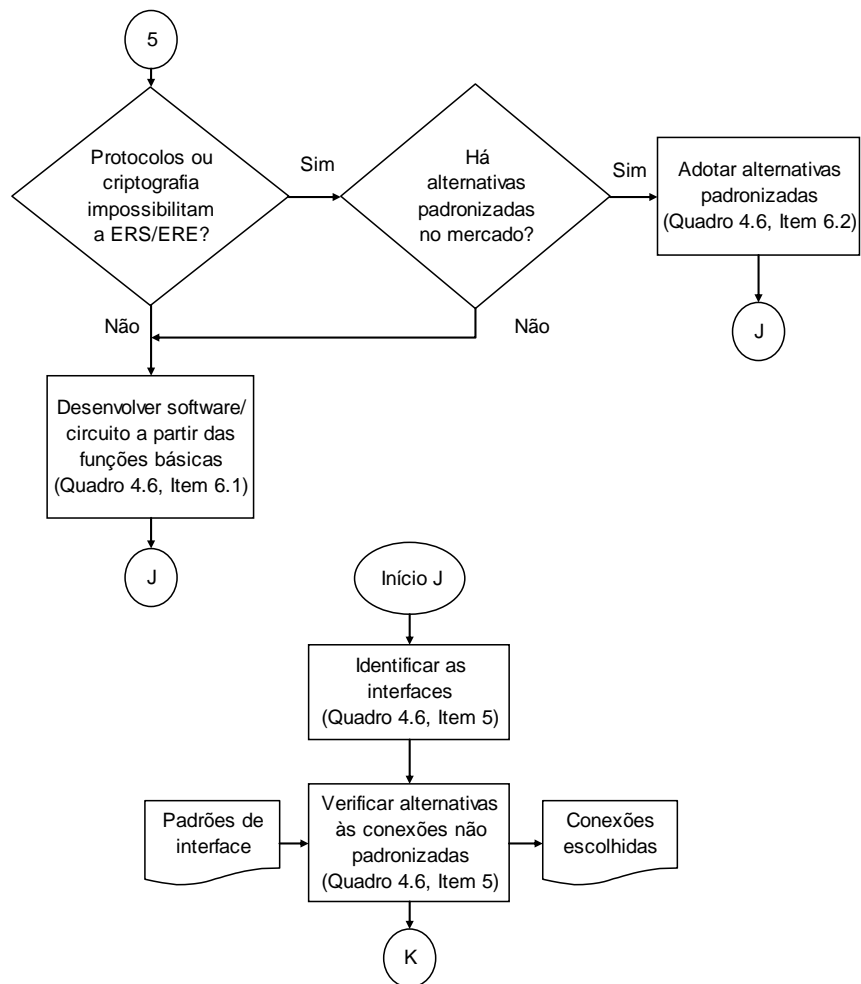


Figura 4.21: Fluxograma J

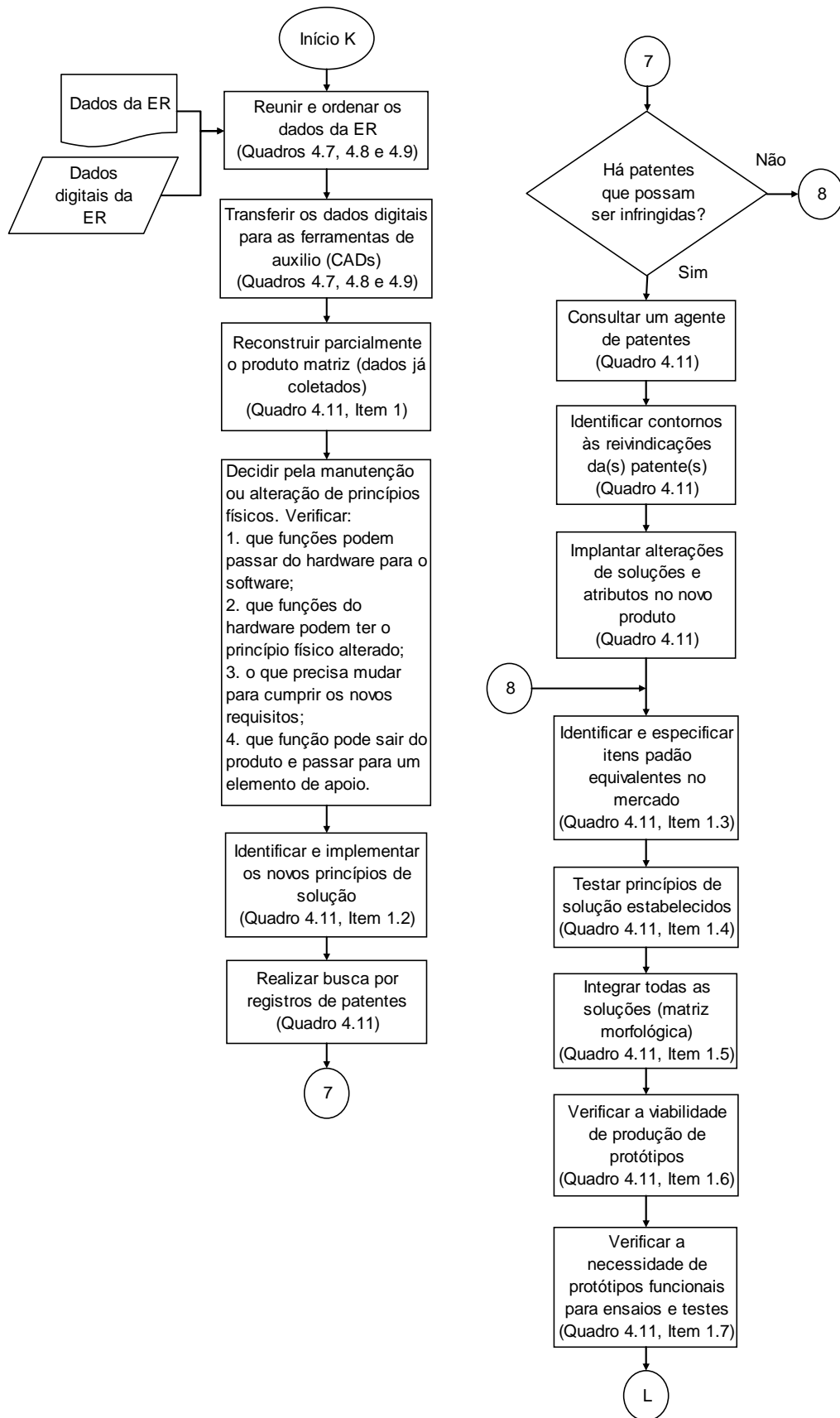


Figura 4.22: Fluxograma K

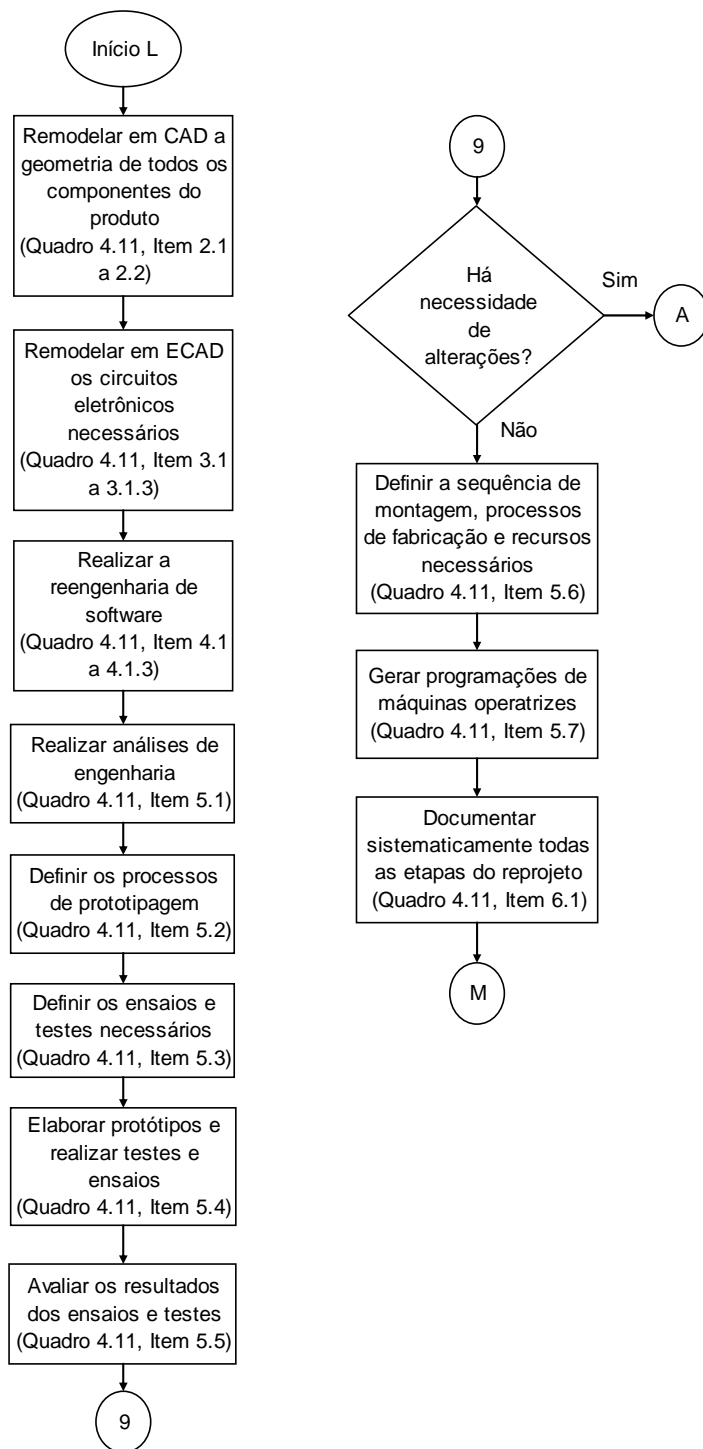


Figura 4.23: Fluxograma L

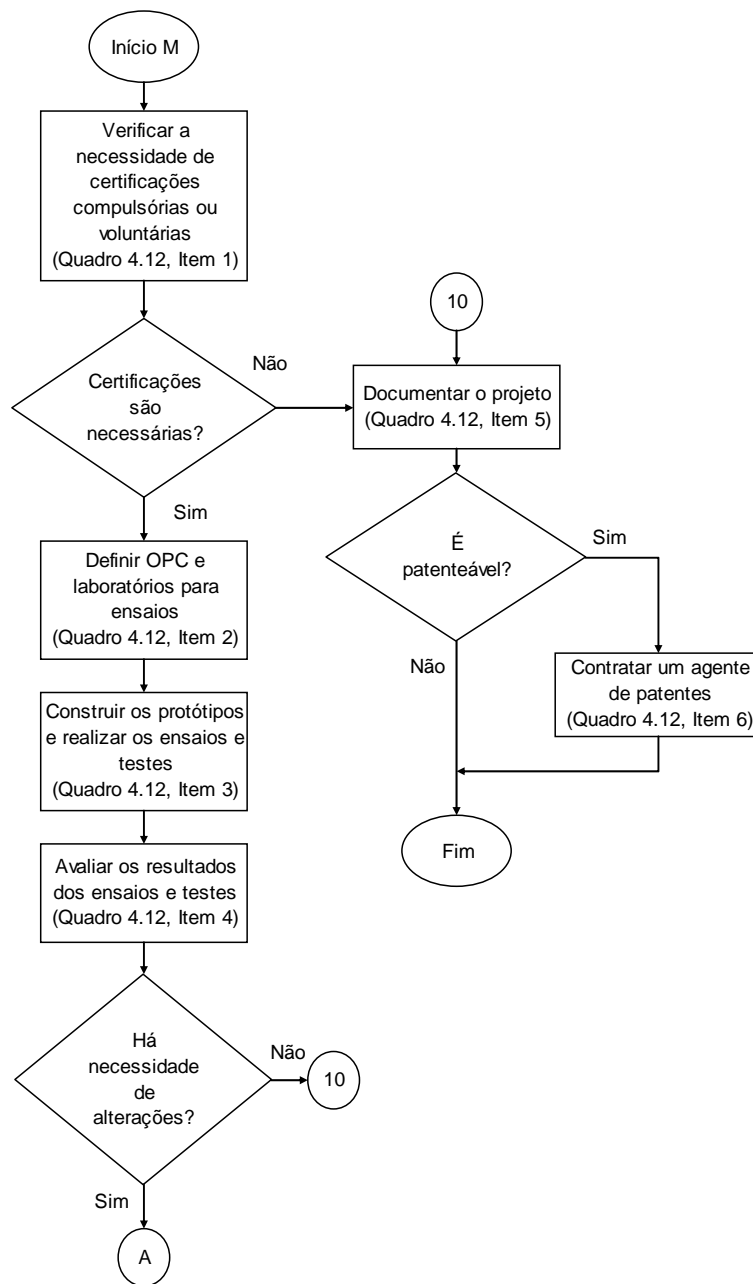


Figura 4.24: Fluxograma M

5. ESTUDO DE CASO

Este capítulo apresenta um caso de projeto de produto utilizando o método proposto. O nível de detalhamento deste capítulo procura equilibrar a necessidade de compreensão do produto e do método de projeto utilizado com as limitações impostas pelo acordo de confidencialidade mantido entre projetistas e contratante.

O objeto de estudo não é um produto mecatrônico, pois falta-lhe a função de atuar na correção de uma variável (p. ex.: pressão), a fim de contrapor uma situação fora da especificada, detectada pelo sistema de controle. Por outro lado, o produto escolhido para este estudo de caso foi definido em função das características da empresa produtora, da existência de similar importado e por possuir uma aplicação que exige requisitos bastante criteriosos. Apesar de possuir nível de complexidade moderado, seu projeto assemelha-se a qualquer outro produto mecatrônico, principalmente se analisada a associação entre os componentes elétricos e mecânicos do conjunto completo (sensor e unidade de monitoramento).

O produto em questão é um transdutor de pressão sangüínea para medição direta (TPS). Na Figura 5.1, pode-se observar o aspecto geral de um TPS típico.



Figura 5.1: Transdutor de pressão sangüínea.

O TPS é um equipamento utilizado para monitoramento da pressão sangüínea de forma invasiva. Ele é normalmente utilizado em centros cirúrgicos, unidades de terapia intensiva ou em situações onde o uso de equipamentos convencionais é pouco eficaz ou afeta

a qualidade do tratamento. Por se tratar de material descartável (uso máximo de 72 h), é gerada uma alta demanda do produto, chegando a uma média de 10.000 unidades/mês para um determinado importador nacional.

A unidade típica de TPS é formada por:

- a) carcaça plástica injetada em material plástico translúcido;
- b) micro sensor eletromecânico;
- c) chicote elétrico e conectores;
- d) suporte para o sensor/transdutor.

O equipamento é conectado a um monitor padrão por intermédio de conector específico, que varia em função do fabricante. Na Figura 5.2, é possível identificar a principal parte do TPS, a placa que contem o micro sensor de pressão e a carcaça que o abriga.



Figura 5.2: detalhe do TPS sem a tampa do sensor após a desmontagem.

O TPS é acoplado por meio de conexões munidas de rosca ao soro numa posição apropriada na altura do leito, como ilustrado nas figuras 5.4 a 5.6. Dessa forma, a pressão na linha do TPS é idêntica à do paciente. O TPS precisa ocupar pouco espaço e deve ser facilmente conectável à placa de fixação e às mangueiras de suprimento do soro. Com a sua utilização, mantém-se o monitoramento contínuo da pressão sanguínea, sem a necessidade de intervenções constantes e movimentação do paciente, além de ser possível, sobretudo nos casos mais graves, verificar imediatamente variações bruscas da pressão.

5.1. CONTEXTO DO PROJETO

A empresa contratante do projeto pode ser caracterizada como de médio porte, pois, apesar de possuir um número pequeno de funcionários (ver Quadro 5.1), seu faturamento anual ultrapassa o limite característico de pequena empresa (limite estabelecido pelo Governo Federal). O Quadro 5.2 apresenta o faturamento anual da empresa nos últimos anos.

Como a empresa importadora possui acesso ilimitado a alguns TPS de diferentes fabricantes, por ser distribuidora de produtos para uso médico há mais de 20 anos, ela já dispunha de vasto conhecimento sobre os pontos fortes e fracos de cada equipamento por intermédio do contato direto com os seus principais clientes e fornecedores. Isto motivou a empresa a desenvolver seu próprio produto, adicionando algumas alterações com a finalidade de atrair a atenção do mercado consumidor. O objetivo final é a substituição gradual dos equipamentos importados pelo similar nacional. Três objetivos iniciais foram estabelecidos pela empresa: operar com baixo custo de projeto para diminuir o risco, desenvolver um produto mais atrativo para o mercado que os similares importados, garantir baixos custos de produção.

Perfil	Nº de funcionários
Técnico de nível médio	2
Técnico de nível superior	3
Dedicados exclusivamente a P&D	2
Total de funcionários	7

Quadro 5.1: perfis e número de colaboradores.

Ano	Faturamento
2003	R\$ 2,6 mi
2004	R\$ 3,3 mi
2005	R\$ 5,5 mi

Quadro 5.2: nível de faturamento da empresa.

Em 2005, a empresa decidiu investir na substituição de importações, iniciando o desafio a partir do medidor de pressão sanguínea descartável. Os dispositivos importados eram fabricados por empresas estadunidenses (SMITHS, 2006 e WELCHALLYN, 2006).

O prazo inicial pactuado foi de 5 meses. Entretanto, o projeto foi concluído após 12 meses da contratação. Foram investidas 671 h no projeto, o que equivale a um custo de pouco mais de R\$ 35 mil.

A seguir, o processo de desenvolvimento do TPS será comparado criteriosamente ao método proposto no Capítulo 4.

5.2. EXECUÇÃO DO PROJETO SEGUNDO O MÉTODO PROPOSTO

Em função das características da contratante e de suas limitações orçamentárias, toda a equipe de projeto foi subcontratada. O escritório de projetos do Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia (CIMATEC) do SENAI BA assumiu o trabalho, sendo as medições e prototipagem rápida executadas também pelo contratado.

O processo de projeto foi iniciado com a etapa de Planejamento Básico (Quadro 5.3) e Estratégica (Quadro 5.4), que equivalem aos fluxogramas ilustrados nas figuras 4.10 a 4.13. No Apêndice 2, pode-se verificar como ocorreu o fluxo do processo deste estudo de caso.

Item do Quadro 4.2	Descrição
1	Desenvolvido modelo da função global conforme Figura 5.3
2	As necessidades dos clientes foram identificadas e traduzidas.
2.1 e 2.1.2	realizadas entrevistas com os clientes;
2.1.1	o produto foi acompanhado em operação;
2.2	requisitos legais foram identificados e normas e patentes pesquisadas e identificadas
2.3	Levantadas as necessidades adicionais dos clientes (Quadro 5.4)
2.4	Não necessária.
2.5	Os requisitos forma identificados e documentados para apresentação aos contratantes (Quadro 5.4).
3 e 3.1	O produto matriz foi desmontado (mangueiras, válvulas, cabos elétricos) e o sensor foi removido.
3.2	Foi elaborado esquema de ligação do TPS ao monitor e conexões Não foi necessária vista explodida. A desmontagem foi fotografada conforme Figura 5.2.
3.2.1	Identificado que o sistema de processamento da informação fica localizado no monitor (que não foi objeto do projeto).
3.2.2	Placa do sensor com componentes integrados, apresentando grande compressão.
3.2.3	O software não fez parte do objeto contratado, apenas o sensor.
4	Em princípio, definido que a ER será conduzida em toda a parte mecânica e na placa de circuito do sensor/transdutor.

Quadro 5.3: Planejamento Básico para o TPS.

Inicialmente, foi feito o mapeamento das funções básicas do produto e o planejamento da ER. As funções do produto foram estudadas e estabelecido um modelo geral para referência, conforme Figura 5.3.

Uma pesquisa por normas técnicas associadas ao tema foi efetuada. Concluiu-se que o TPS deve cumprir os requisitos dos seguintes documentos normativos:

1. Norma NBR IEC 60.601-1 Equipamento Eletromédico – parte 1: prescrições gerais para segurança;
2. Norma NBR IEC 60.601-2-34 Equipamento eletrônico – parte 2: prescrições particulares para a segurança de equipamento para monitoramento da pressão sanguínea direta;
3. AAMI – TIR9 Evaluation of clinical systems for invasive blood pressure monitoring e
4. ANSI – AAMI BP 22 Blood pressure transducers.

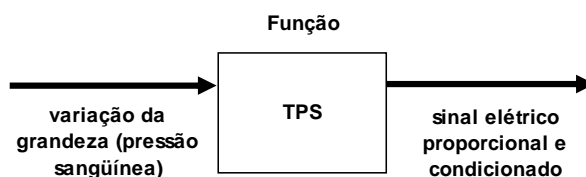


Figura 5.3: Modelo de caixa preta do produto.

Uma pesquisa por patentes indicou a existência de uma concessão no território americano (Muller, 2000). Ao se estudar a patente, nota-se que sua proteção é bastante ampla, dificultando o contorno das suas reivindicações. A decisão da contratante foi resumir a comercialização do novo produto exclusivamente no mercado brasileiro.

Uma importante etapa do planejamento foi a verificação das necessidades dos clientes e a definição de requisitos adicionais ao produto matriz, resumidas no Quadro 5.4. O contratante e a equipe de projeto identificaram quatro necessidades adicionais ao produto matriz.

Necessidade do cliente	Requisito	Alternativa
Forma do produto atraente	Forma da carcaça	Formato em gota
Liberção do fluxo sanguíneo – operação mais segura	Posição da válvula de fluxo	Posição de abertura da válvula empurrando o TPS
Intercambialidade entre diferentes monitores	Tipo de Conector	Utilização de sensor e conector padrão
Condições para embalagem e manipulação	Tipo de sensor	Superfície lisa, sem arestas vivas ou rebarbas
Intercambialidade em diferentes placas suporte	Elementos de fixação	Fixadores e zonas de fixação que permitem maior folga

Quadro 5.4: Necessidades e requisitos para o novo produto.

A equipe de projeto observou o equipamento em operação numa unidade hospitalar (figuras 5.4, 5.5 e 5.6). Nesse momento, alguns usuários foram entrevistados sobre a operação do TPS, seus pontos fortes e fracos e as diferenças entre os diversos fabricantes. Foi indicado o TPS da Edwards como produto matriz.

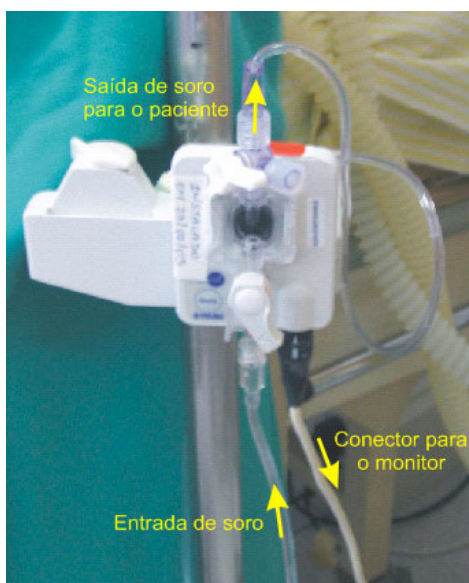


Figura 5.4: TPS em operação.

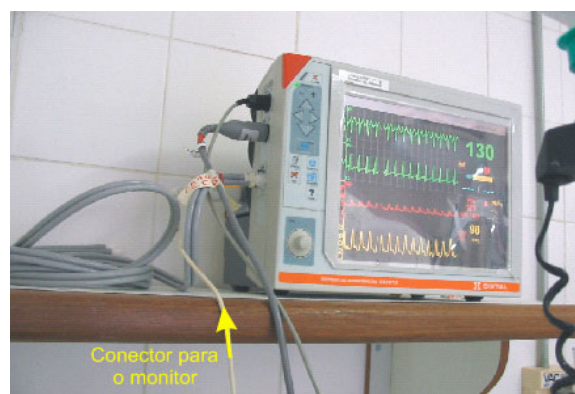


Figura 5.5: conexão do TPS com o monitor.

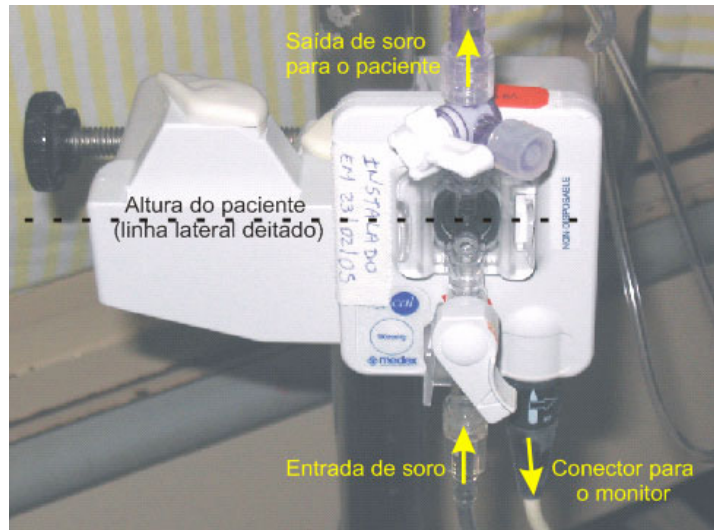


Figura 5.6: TPS – referências de operação.

No Quadro 5.5 pode-se verificar as ações para definição da estratégia da ER.

Item do Quadro 4.3	Descrição
1	Avaliada a necessidade da aplicação das abordagens de ER.
1.1	Não aplicável. O software encontra-se no monitor.
1.1.1 e 1.1.2	Não aplicável. Não há software de controle.
1.2	Não aplicável. O software encontra-se no monitor.
1.3	Nível de miniaturização é razoável. Não é possível identificar componentes pela simples observação. ERE poderá ser Semântica.
1.4	Identificada a necessidade de digitalização dos limites da carcaça, e localização de tubos para conexões.
1.5	Será necessária a realização de medições convencionais, principalmente na sede do sensor/transdutor.
2	Confirmada a possibilidade de testar o sensor para identificar os sinais de saída.
3	Decididas as abordagens de ER a serem utilizadas.
3.1	Não aplicável.
3.2	Em princípio será utilizada uma abordagem semântica.
3.3	Na ERM serão utilizadas medições convencionais com paquímetro digital e digitalização numa MMC.
3.4	Definidas as ferramentas a serem aplicadas.

Quadro 5.5: Estratégia para a ER do TPS.

No Quadro 5.6, encontra-se o planejamento da ERM.

Item do Quadro 4.4	Descrição
1	Identificados itens a serem medidos com instrumentação convencional.
1.1	Conforme Quadro 5.8.
2.1 a 2.5	Definidos e identificados os elementos a serem digitalizados: limites da carcaça (curvas do lado contrário à tampa do sensor), localização dos furos para as conexões das mangueiras, localização dos elementos de fixação.
2.5.1 a 2.5.3	Marcados com marcador a tinta sobre a peça os elementos a serem medidos e digitalizados na MMC.
2.5.4 e 2.5.6	Decidida a utilização do padrão IGES. STEP não disponível no pacote de software da MMC empregada. Montada relação de itens a serem medidos por medição convencional (conforme Quadro 5.8).
2.5.5	Interação entre projetista e metrologista: decidido o uso de um grid de 1 ponto a cada 1,5 mm para as digitalizações por pontos e duas repetições em modo CNC para refinar os resultados.
3 e 3.1	Não há necessidade. Materiais definidos em norma.
4 e 4.1	Decidida pela subcontratação das medições junto ao SENAI.
4.2	Será utilizada MMC, paquímetro digital e compassos.
4.3	Elaborado formulário de coleta de dados conforme Quadro 5.8.
4.4	Marcados na peça locais a serem medidos e criado croquis para ilustração das direções, grid e locais com necessidade de maior detalhamento. Os elementos padrão são cilindros.

Quadro 5.6: Planejamento da ERM para o TPS.

No Quadro 5.7 pode-se observar um conjunto de dados obtidos por meio de medição convencional (utilizando paquímetro e compasso), após a desmontagem do TPS e incluindo a destruição de partes da carcaça.

Descrição do Item	Observação
Dimensões do sensor (posição transversal)	Posição de montagem no gabinete do TPS
Espessura da placa do sensor	
Espessura total do sensor	Incluindo o sensor de carga
Dimensões do gabinete	O sensor é fixado com resina
Janela para o sensor	Ponto de contato entre o sensor e o fluido
Diâmetro da válvula	Válvula manual que controla o fluxo
Diâmetro interno 1	Na saída do fluxo
Comprimento do cone	Zona de contato entre o sensor e o fluido
Diâmetro interno 2	Antes do sensor
Diâmetro interno 3	Após o sensor

Quadro 5.7: Informações obtidas por medição convencional.

Item do Quadro 4.5	Descrição
1.1	O TPS foi observado em operação e alguns parâmetros importantes foram determinados (importância da localização dos fixadores e dos tubos de entrada e saída do fluido).
1.2	Não se aplica.
1.3	Não há conversão e nem tratamento de sinal no TPS.
1.4	As conexões elétricas foram desmontadas.
1.4.1	O sensor foi desmontado, identificado e sua função esclarecida.
1.4.2	Os cabos e conetores foram localizados geometricamente, identificados e fotografados.
1.4.3	A válvula de controle de fluxo foi identificada.
1.4.4	O princípio de funcionamento do sensor foi identificado por meio de gravações na periferia de sua carcaça e comparadas à uma norma técnica.
1.5	Não houve necessidade. O detalhamento já estava adequado.
1.6	Foram concebidas alternativas para a carçada, sede do sensor, válvula e elementos de fixação.
3 e 4	Não necessários para o TPS.
2	Quadro 4.6

Quadro 5.8: 1ª parte do levantamento de dados do TPS.

A seleção do produto matriz foi feita entre os produtos disponíveis no mercado brasileiro. O produto escolhido é fabricado nos EUA e importado pela contratante do projeto, possui boa aceitação entre os usuários e grande penetração no mercado nacional. O produto matriz escolhido foi o Edwards pela sua intercambialidade com as placas de fixação e os monitores disponíveis no Brasil, além de ter excelente conceito entre os usuários.

A Figura 5.7 apresenta um aspecto do TPS após a desmontagem da carcaça sobre o sensor. Na desmontagem foi necessária a destruição de parte da carcaça, já que a tampa foi originalmente montada com o uso de adesivo. O local escuro na carcaça é o ponto de contato entre o sensor e a linha de pressão, preenchido com um material vedante à base de silicone, de forma a permitir o correto ajuste do sensor/transdutor na sua sede e garantir a vedação.

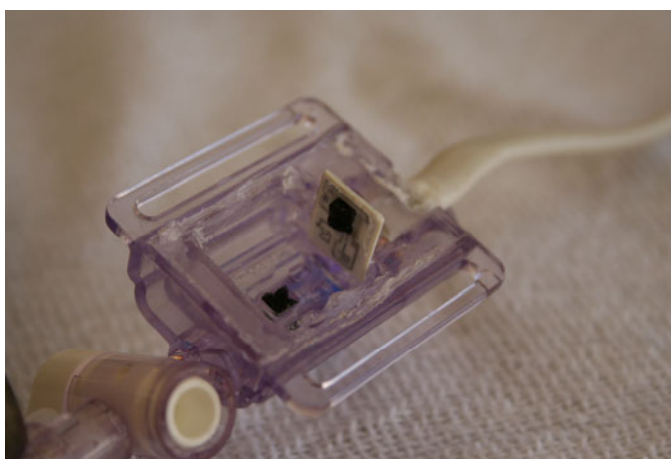


Figura 5.7: Desmontagem do sensor do TPS.

Como uma das premissas básicas determinadas pelo contratante é a intercambialidade com os diferentes tipos de monitor, o sensor a ser utilizado deveria ser capaz de cumprir esse requisito, convertendo o sinal de pressão em sinal elétrico devidamente condicionado. Dessa forma a ERE na parcela eletrônica acabou não sendo necessária, pois a identificação criteriosa do sensor utilizando no produto matriz permitiu a busca por uma solução padronizada no mercado, como, aliás, é a estratégia orientada nesses casos (Figura 5.7). Quanto ao software para coleta de dados e interpretação, este encontra-se gravado no monitor do sistema, que não fez parte do projeto. O monitor é um equipamento expressivamente mais complexo e de extensa vida útil, não atraindo o interesse imediato da contratante. Portanto, não houve necessidade de ERS/ERC, limitando o trabalho a seleção de um sensor/transdutor compatível com os monitores padrão encontrados no mercado.

A empresa GE foi identificada como fornecedora do sensor/transdutor, já dispondo de um modelo específico para o atendimento aos requisitos do projeto. Para poupar tempo e custo, a equipe de projeto adotou a proposta da General Electric (GE), cujo produto encontra-se ilustrado na Figura 5.8.



Figura 5.8: Sensor/transdutor de pressão para o TPS.

Como a solução para a parte eletrônica do produto é limitada a um sensor/ transdutor disponível no mercado e compatível com as características do produto e o software para interpretação do sinal e apresentação gráfica (disponível nos monitores) não foi objeto do contrato, a ER está focalizada nas geometrias necessárias para a integração do sensor/transdutor e o cumprimento dos novos requisitos estabelecidos. Esta é uma limitação deste estudo de caso em função das características do produto matriz e de sua aplicação. A equipe de projeto geralmente não é capaz de identificar no início do trabalho quais serão as abordagens de ER aplicáveis em função da falta de conhecimento acerca do produto, tanto sua como da contratante.

A 2ª parte da etapa de levantamento de dados do TPS (ERM), encontra-se no Quadro 5.9. Alguns aspectos cruciais permearam todo o estágio de levantamento dos dados do produto matriz. Dimensões reduzidas, material translúcido e posicionamento correto do sensor/transdutor na carcaça foram aspectos importantes para o sucesso do projeto. As dimensões reduzidas obrigaram o uso de um sensor de medição da MMC de apenas 0,3 mm de diâmetro, o que exigiu um grande esforço do metrologista, além de forte interação com o projetista a fim de determinar exatamente o que se desejava medir. Como o sensor/transdutor que seria utilizado no novo produto era muito semelhante ao original, as dimensões da sua sede foram medidas. Após a definição do modelo do sensor/transdutor a ser utilizado, o projetista o modelou em CAD e fez algumas alterações na abertura de acesso à linha de fluido.

Item do Quadro 4.6	Descrição
1.1	Não necessário
1.2	Foi definido o sensor e ponta de medição a serem utilizados na MMC e o paquímetro a ser empregado nas medições convencionais.
1.3	O formulário anteriormente elaborado foi mantido.
1.4	A estratégia de medição foi estabelecida (velocidade, grid, sensor, ponta de medição e dados de saída necessários).
2	Medições convencionais realizadas e relatório (planilha) gerada.
3	O programa da MMC foi elaborado (programação <i>on line</i>).
3.1	O alinhamento foi feito tendo como referência a base de fixação do TPS e seus pontos de ancoragem.
3.2	Os elementos geométricos padrão foram programados (oblongos, pontos, retas e cilindros).
3.3 a 3.3.3	As digitalizações por pontos foram programadas conforme indicações do projetista.
3.3.4	O programa de medição foi executado para verificações.
	O programa foi executado mais duas vezes para coleta dos dados.
3.3.5	Os dados foram submetidos à análise do projetista ainda no CAD da MMC.
	Alterações nas posições das curvas da carcaça foram implementadas
3.4	O arquivo IGES foi gerado.
3.5	Arquivo gráfico importado no CAD NX
3.6	Os elementos digitalizados foram recriados no CAD a partir dos dados da ERM.
3.7	Um dos cilindros que representam parte da tubulação de entrada encontrava-se desalinhado em relação à base.
3.8	O problema acima foi repassado ao metrologista.
3.9	Executada alteração na programação, novas execuções do programa e geração de novo IGES.
3.10	Todos os registros, inclusive em meio físico, foram arquivados em computador e organizados segundo as etapas do método.

Quadro 5.9: 2ª parte do levantamento de dados do TPS – ERM.

Em função da necessidade do cliente de diferenciar a forma do produto, para, segundo o mesmo, transmitir uma idéia “mais espacial” (...) “associada à tecnologia embarcada” (...) “formato de gota”, a equipe de projeto resumiu a medição 3D, mantendo apenas o levantamento da posição dos oblongos para fixação do TPS na placa, os limites dimensionais das superfícies da carcaça e, principalmente a posição relativa dos três cilindros (entrada e saída de fluido), já que os mesmos estão em direções e cotas diversas. Para simplificar as medições e diminuir os custos envolvidos, as dimensões da sede do sensor e algumas outras de menor responsabilidade foram realizadas com o uso de um paquímetro digital.

Na Figura 5.9 é mostrado o TPS em digitalização na MMC. Na Figura 5.10 tem-se a tela da MMC com o resultado da digitalização de geometrias do produto matriz. Pode-se notar algumas referências geométricas dos furos para as conexões do TPS, os oblongos para fixação da peça e curvas de zonas específicas da carcaça, obtidas conforme a orientação da equipe projetista. Uma questão fundamental foi a localização correta da base em relação aos tubos para entrada e saída de fluídos, cujas tolerâncias geométricas são importantes, além dos oblongos para fixação do TPS nas placas de base.



Figura 5.9: TPS em digitalização na MMC.

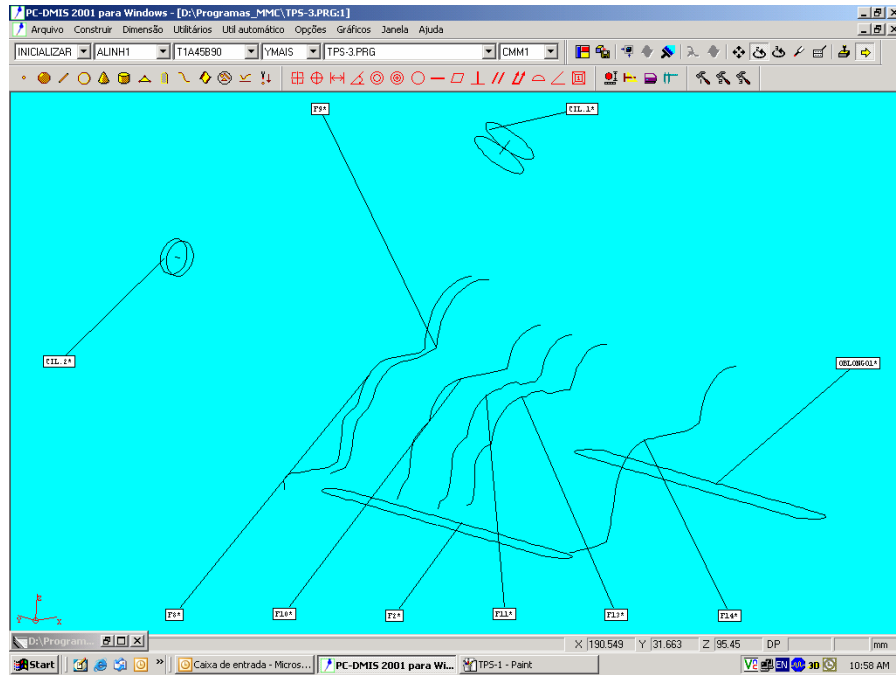


Figura 5.10: Levantamento de dados do produto matriz na ERM utilizando MMC.

Todas as dificuldades características da interface entre medição 3D e o reprojetado foram atenuadas por um planejamento cuidadoso, programação conforme detalhado no Capítulo 4 e orientação da equipe (metrologista/projetista) segundo os passos previstos nos quadros 4.6 e 4.9. A digitalização foi planejada pelo projetista e metrologista e executada sob supervisão do primeiro. Inicialmente, a intenção era digitalizar toda a carcaça e alguns elementos internos, mas como a geometria externa seria alterada, por conta de um dos requisitos estabelecidos pelo cliente, o planejamento da digitalização foi alterado, diminuindo a quantidade de informações necessárias e o tempo de uso da MMC.

A partir das informações obtidas na fase de levantamento de dados e tendo como referência os novos requisitos estabelecidos pelas necessidades dos clientes, deu-se prosseguimento ao processo com o reprojetado. Os cinco novos requisitos para o produto dependiam basicamente da modelagem geométrica em CAD, com exceção da utilização do sensor padrão, comentado anteriormente. O Quadro 5.10 apresenta a execução desta etapa.

Tendo-se atingido os requisitos técnicos necessários, o diferencial mais visível do produto em relação aos similares existentes no mercado, foi a sua forma. Foi solicitado que o aspecto de *design* fosse inovador, e utilizasse as menores dimensões possíveis. O produto foi criado de forma a ser menor que os similares do mercado. Atendeu-se a esse requisito, utilizando-se uma forma orgânica de *gota* referenciando-se semioticamente com a sua utilização (sangue). Também foi adicionada uma outra função: a capacidade de ser montado

em placas suporte de produtos já existentes (importados). O resultado da modelagem em CAD (Unigraphics NX) do produto pode ser observado nas figuras 5.11 a 5.14.

Item do Quadro 4.11	Descrição
1.1	O produto matriz foi reconstruído parcialmente, com suas principais referências geométricas.
1.1.1	Os princípios físicos foram mantidos.
1.1.1.1 e 1.2	Foram alterados os itens necessários ao cumprimento dos novos requisitos: forma e dimensões da carcaça, posição da válvula, forma, dimensões e posicionamento da sede do novo sensor.
1.2 e 1.3	A nova válvula e o sensor foram modelados e adicionados ao conjunto no CAD.
1.4	A nova válvula (abertura na direção da carcaça foi testada virtualmente no CAD).
1.5	Não foi necessária.
1.6	Contratante decidiu pela confecção de um protótipo apenas para avaliar dimensões, integração aos suportes e estética. Foi realizada prototipagem rápida, subcontratada ao SENAI.
2.1 a 2.2	A modelagem utilizou os parâmetros avaliados durante a observação do produto em operação, dados da ER, informações sobre os novos componentes padronizados e as novas soluções adotadas, gerando o modelo 3D para avaliação.
3 e 4	Não necessários.
5.1	Não necessárias.
5.2	Definido o processo FDM para a parte mecânica.
5.3	Definido um ensaio funcional no produto final, com o sensor integrado e comunicação com o monitor.
5.4	Protótipo realizado.
5.5	O protótipo foi avaliado pelos clientes inicialmente entrevistados.
5.5.1	Pequenas alterações na carcaça forma solicitadas, assim como nos oblongos utilizados para fixar o TPS na placa de sustentação.
5.6	Todas as peças mecânicas serão fabricadas por injeção de plástico. Os parâmetros gerais de fabricação, assim como o projeto dos moldes para injeção foram definidos, mas não detalhados.
5.7	O CAM não foi empregado nessa fase. A contratação dos projetos e fabricação dos moldes de injeção ficaram para uma outra etapa. Foi definido o processo de montagem dos cabos de comunicação do sensor e do fechamento (lacre) do mesmo na carcaça.
6 e 6.1	Um conjunto de arquivos de computador, denominado HE-05-0020, foi classificado, organizado e disponibilizado sob autorização, contendo: modelos 3D em CAD, documentos de comunicação (e-mails, ofícios, cópias de fax), cópias de formulários, fotografias, apresentações, normas, artigos, cópias de patentes, memoriais e modelos de impressão.

Quadro 5.10: Reprojeto do TPS.

Como resultados da observação em operação, foram propostas mudanças em aspectos não relacionados pelo cliente, como por exemplo, a facilidade de leitura e identificação dos elementos marcadores (coloridos), presentes na placa suporte desenvolvida

para o produto. Mudou-se a geometria dos planos, de modo a evitar que eles fossem encobertos pelos tubos e conexões presentes no sistema, bem como adequados para uma fácil leitura visual, da altura média de onde eles seriam utilizados nas hastes de suportes de soró.

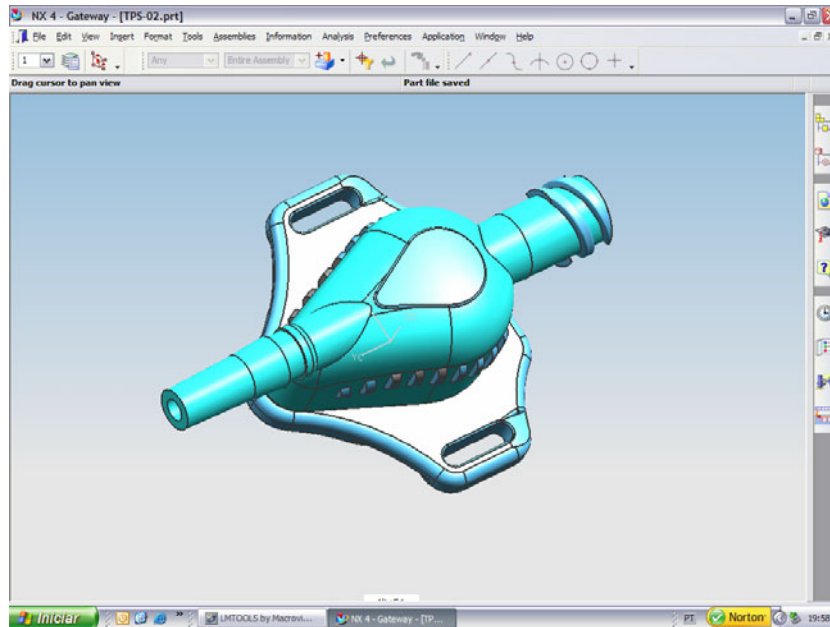


Figura 5.11: Conjunto modelado no CAD Unigraphics NX.

Na Figura 5.12, pode-se observar a nova interface entre sensor e linha de fluido, que ganhou uma nova forma (circular) para facilitar a vedação e permitir a adaptação do sensor.

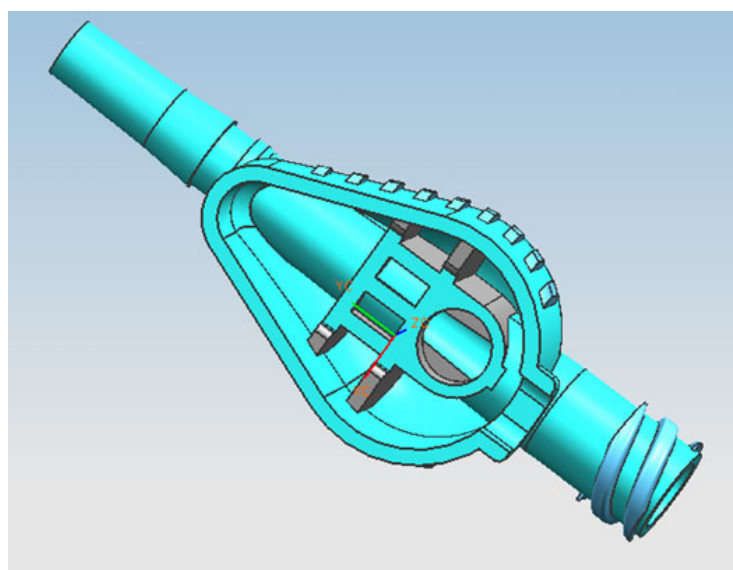


Figura 5.12: Parte interna da carcaça – abertura para o sensor de pressão.

Na Figura 5.13, pode-se ver a tampa da base do TPS, o local de encaixe da parte superior da carcaça e a sede para o sensor.

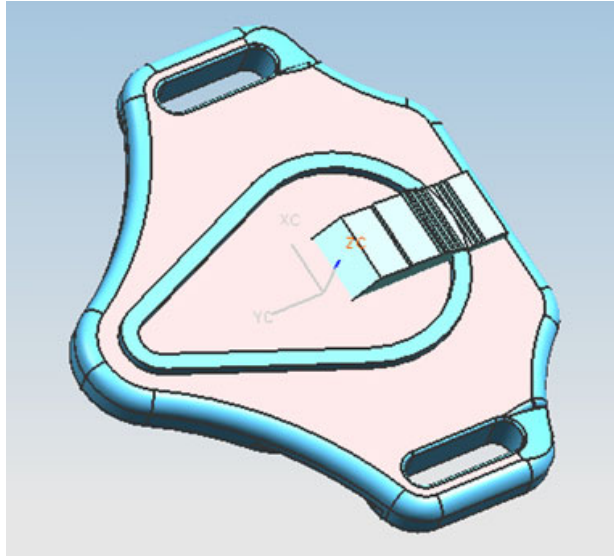


Figura 5.13: Tampa e sede do sensor.

Na Figura 5.14 pode-se observar a base do TPS com o arranjo geométrico para o sensor e cabo de comunicação (em bege – sensor e branco – cabo de comunicação).

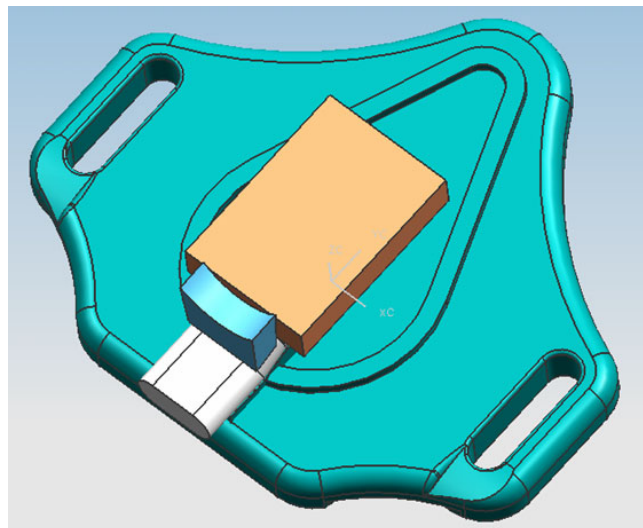


Figura 5.14: Sensor de pressão e cabo de comunicação.

Já no estágio de avaliação do reprojeto, decidiu-se pela realização de um protótipo em tamanho real, para que o cliente tivesse condições de avaliar dois dos principais requisitos

do produto: a forma em gota e o menor tamanho. Na Figura 5.15 apresenta-se o aspecto das peças prototipadas antes do acabamento. Foi utilizada uma máquina de prototipagem rápida que utiliza a tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM), do fabricante Stratasys Corp., modelo FDM 3000.

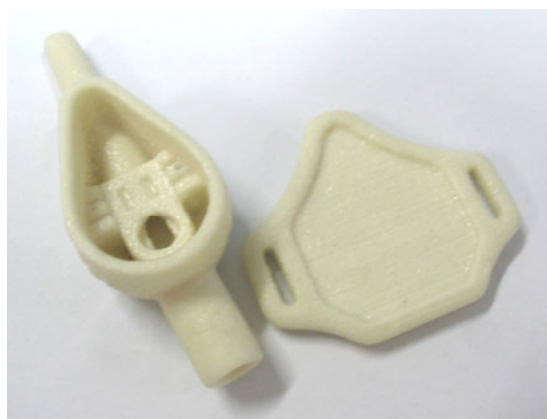


Figura 5.15: Protótipo rápido em plástico.

Os testes e avaliações resultantes foram realizados pelo contratante do serviço, que também ficou responsável pelos trâmites relacionados às certificações. Para uso no mercado nacional, as aprovações do Ministério da Saúde e da Agência Nacional de Vigilância Sanitária foram necessárias. Entretanto, a análise se resume à observação do produto em operação, pois não existe certificação compulsória organizada no Brasil. No Quadro 5.11, pode-se verificar as ações referentes à etapa de documentação.

Item do Quadro 4.12	Descrição
1 e 2	O produto deve cumprir a uma portaria da Anvisa, mas não há certificação compulsória estruturada no Brasil.
3 e 4	Testes adicionais seriam realizados após fabricação do primeiro lote de peças (testes de operação). O contratante assumiu a realização dos testes.
5.1	Não se aplica.
5.1.1	O contratante foi instruído pelo escritório de projetos a solicitar o registro como modelo de utilidade.
5.2 a 6	Foram elaborados os documentos técnicos para registro do modelo de utilidade (resumo do estado da técnica, memorial descritivo e reivindicações). Todos os documentos e arquivos de computador foram organizados, e cópias foram distribuídas ao contratante e ao arquivo do escritório de projetos do SENAI CIMATEC.

Quadro 5.11: Documentação para o TPS.

5.3. RESULTADOS

O projeto do TPS tornou-se viável para uma empresa de médio porte por conta da subcontratação de praticamente todas as etapas envolvidas. A equipe da empresa contratante não dispunha de pessoal, equipamentos e programas de computador para a realização do trabalho. Contudo, sua importância para o projeto foi fundamental, já que as informações sobre o mercado e os produtos já existentes permitiram reduzir a expectativa de prazo para o desenvolvimento do TPS.

Pôde-se observar que a inclusão de itens inovadores ao projeto se deu a partir das necessidades dos clientes e de constatações da equipe de projeto, o que permite validar o bom uso da ER associada aos métodos convencionais de projeto.

A utilização da medição por coordenadas e outros serviços dispendiosos para o projeto foi limitada ao mínimo a fim de reduzir custos. Em função das condições específicas do projeto contratado e da aplicação do novo produto, as abordagens de ERS/ERC não foram aplicadas por serem desnecessárias ao cumprimento dos objetivos do trabalho. Quanto à ERE, esta se limitou ao estudo da solução padrão mais adequada para o sensor/transdutor e a sua integração ao conjunto mecânico. Mesmo não tendo utilizado plenamente o método proposto em todas as abordagens de ER, a sua estrutura básica foi avaliada e comprovada.

O método utilizado foi capaz de criar um produto inovador tendo como ponto de partida um outro produto já existente e reconhecido pelo mercado. Apesar do prazo inicial não ser cumprido (5 meses), por conta principalmente da demora do contratante em responder aos questionamentos da equipe de projeto, o total de horas investidas foi bastante reduzido para um trabalho dessa magnitude (pouco mais de 670 h), proporcionando um custo bastante acessível ao contratante (R\$ 35 mil). Isto se deu em função do reduzido tempo empregado em pesquisa de mercado, pesquisa de normas técnicas e regulamentos técnicos e análise ampla de necessidades dos clientes e concepção de soluções, todas etapas substituídas pela ER.

6. CONCLUSÕES

O mercado para produtos mecatrônicos tem se mostrado extremamente competitivo e de difícil penetração para as pequenas e médias empresas. A inovação é parte primordial para o crescimento nesse ambiente altamente seletivo, o que resulta na importância de prazos curtos no lançamento de novos produtos e custos reduzidos na elaboração de projetos.

O presente trabalho analisou os métodos de projeto convencionais e compará-los com a abordagem por engenharia reversa tendo como foco o produto mecatrônico. Visando a embasar uma proposta metodológica, chegou-se, como resultado, a uma abordagem simples, mas com características promissoras, principalmente quando aplicada ao universo das pequenas e médias empresas.

O método apresentado no Capítulo 4 sistematiza as principais ações necessárias à realização do projeto utilizando-se um método de ER e o direciona às melhores técnicas para as suas várias abordagens, o que permite ao projetista utilizar melhor as informações disponíveis diretamente a partir do produto matriz.

O estudo de caso apresentado no Capítulo 5 comprova que a engenharia reversa é uma opção viável para a PME, principalmente quando sistematizada e organizada com o objetivo de reduzir prazos e custos. A utilização do CAD em associação com a medição por coordenadas viabiliza prazos menores e mais agilidade nas alterações e na interação com o cliente. Os resultados relatados produziram um produto menor, mais atraente visualmente e mais flexível, capaz de atender plenamente os requisitos identificados. Portanto, a despeito das restrições encontradas no estudo de caso, pode-se concluir que o método abordado aqui é uma opção atraente e praticável para uma PME, como meio de se desenvolver produtos competitivos de forma rápida, econômica e efetiva.

Além disso, é possível afirmar que:

- a) é crível adotar um método unificando as várias abordagens de engenharia reversa (mecânica, elétrica, de controle, de software);
- b) é viável para uma PME realizar o projeto de produto usando recursos de CAD e de equipamentos de digitalização e de medição com pequenos orçamentos, desde que o planejamento do processo de projeto e a definição das estratégias de ER sejam realizadas de forma eficaz.

6.1. CONTRIBUIÇÕES

Este trabalho contribuiu inicialmente com a avaliação sistemática do problema de projeto permitindo sua análise na perspectiva do produto mecatrônico. O uso da ER nas suas várias abordagens (ERS, ERC, ERM, ERE) como meio de poupar tempo e recursos, principalmente no contexto desafiador das PMEs, e a análise integrada das tecnologias mecatrônicas proporcionaram uma visão ampla e inovadora do desenvolvimento de produto. A estruturação do método e os exemplos apresentados alertaram sobre os ganhos econômicos com a aplicação da ER, mesmo que associada aos métodos convencionais de projeto.

A estruturação do método possibilitou também discutir e aplicar a integração de competências no projeto e ressaltou o importante papel dos fornecedores de serviços tecnológicos como alternativa ao investimento direto nos recursos necessários ao desenvolvimento do produto.

O fato deste trabalho discutir o desenvolvimento do produto como agente de diferenciação no mercado e, portanto, um fator de aumento da competitividade da empresa o torna um muito útil aporte para a indústria de pequeno e médio porte, mas o fato de oferecer um método com aplicação específica nas PME, utilizando recursos limitados é, sem dúvida, a maior contribuição desta dissertação.

6.2. LIMITAÇÕES

O presente trabalho focalizou a aplicação do projeto de produto utilizando ER especificamente para a PME. Portanto, a estruturação do método, as ferramentas de projeto e de ER utilizadas e as considerações adotadas para as diferentes abordagens da ER limitam o seu uso a situações onde os recursos humanos, financeiros e técnicos se assemelhem àqueles presentes numa PME.

O método proposto pressupõe a existência de recursos para medição, digitalização e prototipagem rápida pelo menos em organizações prestadoras desses serviços e a custos competitivos para que a PME tenha condições de desenvolver e evoluir em sua linha de produtos.

As seqüências de orientações e recomendações propostas para o método (Capítulo 4) não são exaustivas e sua aplicação pode ensejar a complementação, o aprofundamento e a

investigação de alternativas, principalmente em função das particularidades de um dado produto ou ainda como resultado da realização plena e simultânea das três abordagens de ER aqui estudadas.

6.3. TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho abrangeu o projeto de produto mecatrônico de forma ampla, apesar de dedicado ao espectro da pequena e média empresa. Uma oportunidade direta dos resultados aqui relatados é a aplicação de método semelhante a projetos maiores, principalmente àqueles dedicados à nacionalização de equipamentos, não se limitando às PMEs. Diversas indústrias adquirem equipamentos diretamente de fornecedores no exterior, sem que sejam transferidas informações sobre o projeto. Ao realizar a manutenção de tais itens, a empresa acaba sendo obrigada a manter uma única e cara linha de fornecimento de itens de reposição. Uma alternativa a essa dependência é a realização do método para desenvolvimento próprio dos itens prioritários, em função do custo e complexidade de importação e da oportunidade de se desenvolver localmente a tecnologia pretendida.

O aprofundamento de determinados aspectos do método é uma necessidade específica para atender ao projeto de produtos com características muito marcantes, como por exemplo, aqueles onde o controle em tempo real é crítico ou onde a extrema complexidade dos circuitos eletrônicos exige um tratamento particular.

O trabalho permitiu também ensejar a discussão sobre as saídas para o desenvolvimento de produtos a partir de outros tendo como alternativa, por exemplo, a relocação de funções sob responsabilidade do hardware para o software ou ainda o deslocamento de funções de um sistema mecânico para um outro eletrônico.

Uma outra questão recorrente sobre a engenharia reversa é a compreensão em relação aos limites legais nos quais o trabalho pode ser realizado sem que se configure uma situação de litígio em relação ao direito do autor. É uma questão difusa para a PME e mais ainda para o projetista. Esclarecer esse dilema de forma clara é um outro desafio que merece um tratamento tanto pelo lado da Engenharia como no que tange ao Direito.

Novas preocupações têm se tornado relevantes nos últimos anos para o projeto de novos produtos, particularmente os mecatrônicos e no que se refere às características de projeto sustentável, o que traz novas perspectivas de estudo para integração ao método aqui

proposto no que tange aos aspectos de confiabilidade e de impacto ambiental.

REFERÊNCIAS

- [1] ABNT. NBR 6409. **Tolerâncias Geométricas – Tolerâncias de Forma, Orientação, Posição e Batimento – Generalidades, Símbolos, Definições e Indicações em Desenho**. Rio de Janeiro, 1997.
- [2] ABNT & INMETRO. **Guia para Expressão da Incerteza de Medição (ISO GUM)**. Terceira edição brasileira em língua portuguesa. Rio de Janeiro, 2003. 120 p.
- [3] ADAMOWSKI, J. C. & FURUKAWA. **Mecatrônica: Uma Abordagem Voltada à Automação Industrial**. Mecatrônica Atual N°1/Outubro-Novembro 2001.
- [4] AGUIAR, A. F. S., **Sistemática para Seleção de Sistemas Computacionais para Auxílio às Atividades de Engenharia**. São Carlos, 139 p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. 1995.
- [5] AMERONGEN, J. **Mechatronic Design**. Mechatronics n° 13, 2003. p. 1045 – 1066.
- [6] ANSI-DMIS. http://www.dmis.com/dmis_part1.html. 2005. visto em 31 de março de 2006.
- [7] ANTONSSON, E. K. & OTTO, K. N. **Imprecision in Engineering Design**. ASME, Journal of Mechanical Design, vol. 117, 1995. p. 25-32.
- [8] ARENCIBIA, R. V., **Equacionamento das Componentes do Erro Volumétrico em Máquinas de Medição a Três Coordenadas**. Tese de Mestrado. São Carlos, 1999. 185 p.
- [9] ARONSON, R. B., **Forward Thinkers Take to Reverse Engineering**. *Manufacture Engineering*. V. 117, n. 5. 1996. p.34-44.
- [10] ASTRÖM, K. J. & WITTENMARK, B. **Computer-controlled Systems – Theory and Design**. 3rd Edition. Prentice-Hall, 1997. p. 11 – 28.
- [11] BACK, N. & FORCELLINI, F. A., **Projeto de Produtos**. Apostila do curso de pós-graduação em engenharia mecânica da UFSC. 2003.
- [12] BARBOSA, R. & FARINHAS, E. **Entrevista técnica**. Realizada nos dias 21 e 22 de maio de 2007.

- [13] BENDERSKY, D. *et al.* **Advanced Protection Software Now**. Departamento de Computacion, Universidad de Buenos Aires (UBA), 2003, 20 p.
- [14] BRAGA, R. T. V. **Padrões de Software a partir da Engenharia Reversa de Sistemas Legados**. Dissertação de Mestrado. USP, São Paulo, 1998.
- [15] BREUNESE, A. P. J. **Automated Support in Mechatronic Systems Modeling**. PHD Thesis. Department of Electrical Engineering, University of Twente, Enschede, 1996.
- [16] BROWN & SHARP, Catálogo PC-DMIS. 1998.
- [17] CHAN, L. W. & LEUNG, T. P., **Spiral Design Model for Consumer Mechatronic Products**. *Mechatronics*, v. 6, n° 1, 1996. p. 35 – 51.
- [18] CHISHOLM, G. H. *et al.* **Reverse Engineering of Integrated Circuits**. Patente número 6536018, depositada em junho de 2000. The University of Chicago.
- [19] COELINGH, E.; DE VRIES, T. & AMERONGEN, J. **Automated Conceptual Design of Mechatronic Systems**. *A Journal*, v. 38, no. 3, 1997.
- [20] COX, M. G. **The Numerical Evaluation of B-splines**. *Journal Inst. Maths. Applications*, vol. 15, 1972. p. 95 – 108.
- [21] DE ALMEIDA, F. J. **Estudo e Escolha de Metodologia para o Projeto Conceitual**. *Revista de Ciência e Tecnologia*, vol. 8, n° 16, 2000, p. 31-42.
- [22] DE BOOR, C. **On Calculating with B-splines**. *Journal of Approx. Theory*, vol. 6, 1972. p. 52 – 60.
- [23] DE VRIES, T. J. A. & BREUNESE, P. J. **Structuring Product Models to Facilitate Design Manipulations**. *Anais International Conference on Engineering Design (ICED)*, 1995. p 1430 – 1436.
- [24] DEA, Catálogo SURFER. 1996, 12 p.
- [25] DI BLASI, G. **A Propriedade Industrial**. 2ª Edição, Editora Forense. Rio de Janeiro, 2005.
- [26] DIAZ, C. & HOPP, T. H. **Testing of Coordinate Measuring System Software**. *Control Measurement Quality Conference, ASQ*. 1993. 12 p.
- [27] DONATELLI, G. D. *et al.* **Metrologia Geométrica na Indústria: Tendências e Desafios**. *O Futuro da Indústria: A Importância da Metrologia para o*

- Desenvolvimento Industrial – coletânea de arquivos. MDIC/SENAI, Brasília, 2005. p. 9 – 27.
- [28] ECKERT, C. M. *et al.* **Supporting Change Processes in Design: Complexity, Prediction and Reliability**. Science Direct , 2006. 13 p.
- [29] FARO, **Folheto de publicidade**, 2004.
- [30] FENG, C-X & PANDEY, V., **Experimental Study of the Effect of Digitizing Parameters on Digitizing Uncertainty with a CMM**. International Journal of Production Research, Volume 40, nº 3, 2002. p. 683 – 697.
- [31] FERNEDA, A. B., **Integração Metrologia, CAD e CAM: Uma Contribuição ao Estudo de Engenharia Reversa**. Dissertação apresentada à USP como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre. São Carlos, USP, 1999. 95 p.
- [32] FERREIRA, A. S. **Enfoque da Pesquisa Qualitativa no Planejamento de Novos Produtos**. COPPE/UFRJ, 7 p. 2002.
- [33] FRIEDMAN, T. L. **O Mundo é Plano: Uma Breve História do Século XXI**. Tradução de Cristiana Serra e S. Duarte. Rio de Janeiro, Editora Objetiva, 2005.
- [34] FRUCHTER, R. *et al.* **Collaborative Mechatronic System Design**. Stanford Integrated Manufacturing Association (SIMA), 15 p., 1995.
- [35] GONZÁLEZ, E. V., **Integración Máquina de Mediciones de Tres Coordenadas com Sistema CAD/CAM**. Jornadas Internacionales de Mecânica Computacional e CAD/CAM. Universidad de Concepcion – Chile. P. 309-316. 1995.
- [36] GROOVER, M. P. **Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing**, 2nd Edition. Upper Saddle River, New Jersey. Ed Prentice-Hall, 2001.
- [37] GROOVER, M. P. & ZIMERS, E. W., **CAD/CAM: Computer Aided Design and Manufacturing**. Englewood Cliffs, New Jersey: Ed Prentice-Hall, 1984.
- [38] HEIDENHAIN, **Catálogo Geral**. 1999, 21 p.
- [39] HEWIT, J., **Mechatronics Design: The Key to Performance Enhancement**. Robotics and Autonomous Systems, nº 19, 1996. p. 135 – 142.
- [40] HISTAND, M. B. & ALCIATORE, D. G., **Introduction to Mechatronics and Measurement Systems**. McGraw-Hill International Editions. 1999. 400 p.

- [41] INGLE, K. A., **Reverse Engineering**. MacGraw Hill: 1994. 239 p.
- [42] MÜLLER, D. **Invasive Blood Pressure Measurement Device**. US Patent, number 6.539.603. Concedida em 31/10/2000.
- [43] INMETRO, CNI. **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia**. 2ª Edição, Brasília, 2000. 75 p.
- [44] ISO 10.360-2:2000. **Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) - Part 2: CMMs used for measuring size**.
- [45] JURAN, J. M. **A Qualidade desde o Projeto**. Editora Pioneira, 1992.
- [46] KANNAPAN, S. M. & MARSHEK, K. M. **A Comparative Analysis of Techniques in Engineering Design**. 1992. 21 p.
- [47] KEMMERER, S. J. **Initial Graphics Exchange Specifications**. NIST Publication, 1999. 4 p.
- [48] KERN, V. M. **Manutenibilidade da Semântica de Modelos de Dados de Produtos Compartilhados em Rede Interoperável**. Tese de Doutorado apresentada à UFSC como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor. Florianópolis, UFCS, 1997. 258 p.
- [49] KRISHNA, K. K. *et al*, **Reduction in Number of Data Collected for Reverse Engineering of Free-Form Surface**. NAMRC XXVIII Conference, Society of Manufacturing Engineerings. 2000. 6 p.
- [50] LEE, K. **Principles of CAD/CAM/CAE Systems**. Addison Wesley Longman Inc. 1999. p. 180 – 210.
- [51] LEE, K. H.; WOO, H., **Direct Integration of Reverse Engineering and Rapid Prototyping**. Computers & Industrial Engineering, n. 38. 2000. p. 21 – 38.
- [52] LK, **3D Catalog**, 1998, 6 p.
- [53] LUCA, C. J. G., **Calibração de Erros Geométricos em Centros de Usinagem Assistida por Computador**. Dissertação de Mestrado. USP-EESC, 1992. 106 p.
- [54] MAAS, G. A., **A Tecnologia de Medição por Coordenadas na Solução de Problemas da Indústria: Sistematização de Informações e do Processo Metrológico do Laboratório Prestador de Serviços**. Dissertação. Florianópolis:

- UFSC, 2001. 103 p.
- [55] MASCARENHAS, A. P. F. **Metodologia para Desenvolvimento de Produtos Mecatrônicos Integrando Engenharia de Softwares e Engenharia de Produtos.** Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Mecatrônica, Escola Politécnica / Instituto de Matemática, Universidade Federal da Bahia. Salvador: 2007, 172 p.
- [56] MASCARENHAS, L. A., **Prototipagem Rápida: Conceitos e Aplicações no Processo de Desenvolvimento de Protótipos.** Trabalho final do Curso de Especialização em Tecnologias de Integração da Manufatura (CETIM). Salvador: 2000. 42 p.
- [57] MASLOW, A. H. **Motivation and Personality.** New York, Harper (2ª Ed.), 1970.
- [58] MAVROMIHALES, M. MASON, J. & WESTON W., **A Case of Reverse Engineering for the Manufacture of Wide Chord Fan Blades (WCFB) Used in Rolls Royce Aero Engines.** Journal of Materials Processing Technology. N. 134. 2003. p. 279-286.
- [59] MISHRA, P. *et al.* **A Top-Down Methodology for Microprocessor Validation.** IEEE Design & Test of Computers. March-April 2004.
- [60] NORONHA, J. L., **Qualificação de Máquinas de Medir por Coordenadas com Padrões Corporificados.** Dissertação submetida à UFSC para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Florianópolis, 1994, 133 p.
- [61] NOVAES, E. & DO PRADO, A. **Reengenharia de Software Orientada a Componentes Distribuídos.** XV Simpósio Brasileiro de Engenharia de Software, 2002, 15 p.
- [62] OMPI. **Manual de Redação de Patentes da Organização Mundial da Propriedade Intelectual.** Apostila do curso: Redação de Patentes, Rio de Janeiro, agosto de 2007.
- [63] OSHANA, R. **DSP Software Development Techniques for Embedded and Real-time Systems.** Elsevier Inc. 2006, p. 1-18.
- [64] OTTO, K. N. & WOOD, K. L. **A Reverse Engineering and Redesign Methodology for Product Evolution.** ASME Design Engineering Technical Conferences, 15 p. 1996.

- [65] PAHL, G. & BEITZ, W., **Engineering Design: A Systematic Approach**. Spring Verlag, Berlin, 1988
- [66] PATRICK, G. H. **The PCB Design Process**. <http://home.comcast.net/~pcb.george>, visto em 8 de julho de 2007.
- [67] PEREIRA, L. V. **Sistema de Propriedade Industrial no Contexto Internacional**. Estudo publicado pela Fundação Getúlio Vargas, 1995, p. 82 – 113.
- [68] PRATT, M. J. **Introduction to ISO 10303 – The STEP Standard for Product Data Exchange**. NIST Publication, 2000. 5 p.
- [69] PRESSMAN, R. S. **Engenharia de Software**. Makron Books. São Paulo, 1995. p. 318 – 340, 961 – 973.
- [70] RENISHAW., **Probing Systems for Coordinate Measuring Machines – Technical Specifications**. 1996.
- [71] RIKER, R. B. **DMIS – The Dimensional Measuring Interface Standard**. Conference of Precision Metrology with Coordinate Measuring Systems, June 1993. 9 p.
- [72] SCHELLEKENS, P. *et al.* **Design for Precision: Current Status and Trends**. Annals of the CIRP. Vol 47, 1998. p. 557 – 586.
- [73] SCHILD, P. J. *et al.* **Open Data Exchange with HP PE / SolidDesigner**. Hewlett Packard Journal, October, 1995. p. 35 – 50.
- [74] SCHMIDT, A. *et al.* **Avaliação em Máquinas de Medir por Coordenadas Usando Tecnologia de Scanning**. Metrologia e Instrumentação, Edição 44, 2006.
- [75] SCHOELER, N. & FIDELIS, G. C., **Qualificação e Certificação de Instrumentos de Medição**. Apostila do curso de graduação em engenharia mecânica da UFSC. Florianópolis: Fundação CERTI, 1992. 245 p.
- [76] SCHWARTZ & KARADAYL. **Making the CAD to CMM Interface More Effective**. Precision Metrology with CMM Clinic Conference. 1989, 8p.
- [77] SHEN, Q *et al.* **A Cooperative Virtual Prototyping System for Mechatronic Solution Elements Based Assembly**. Advanced Engineering Informatics n° 19, 2005. p. 169 – 177.
- [78] SHETTY, D. & KOLK, R. A., **Mechatronics Systems Design**. PWS Publishing

- Company. Boston, 1997. 422 p.
- [79] SHIGLEY, J. E., **Mechanical Engineering Design**. McGraw Hill. New York. 1977.
 - [80] SLOCUM, A. H. **Precision Machine Design**. SAE, 800 p., 2002.
 - [81] SMITH, B. *et al*, **Initial Graphics Exchange Specification (IGES), version 4.0**. Society of Automotive Engineers. Warrendale-USA. 1998.
 - [82] SMITHS. <http://www.smiths-medical.com/catalog>. Visto em 25 de junho de 2006.
 - [83] SOUTO-MAIOR, J. C. C. **Entrevista técnica**. Realizada no dia 5 de julho de 2006.
 - [84] UHL, T. *et al*. **Rapid Prototyping of Mechatronic Systems**. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, no. 38, p. 645 – 668. 2000.
 - [85] VARÁDY, T.; MARTIN, R. & COX J., **Reverse Engineering of Geometric Models – an introduction**. Computer Aided Design , v. 29, nº 4, 1997. 13 p.
 - [86] WECKENMANN, A. *et al*, **The Influence of Measurement Strategy on the Uncertainty of CMM Measurements**. CIRP Annals n. 47, 1998. p. 451 – 454.
 - [87] WELCHALLYN. <http://www.welchallyn.com/medical>. Visto em 25 de junho de 2006.

APÊNDICE 1: MÉTODOS PARA O LEVANTAMENTO DE DADOS DO PRODUTO MATRIZ E REPROJETO

Inicialmente, este apêndice trata de um método para identificação das necessidades do cliente e sua organização para definição de novos atributos e funções do produto. Em De Almeida (2000) são apresentadas considerações sobre a escolha de métodos para a fase conceitual do projeto.

Segundo Ferreira (2002) deve-se definir os atributos semânticos do produto a partir dos valores do consumidor. Para que esses atributos sejam definidos, pesquisas exploratórias baseadas na expressão do usuário são usadas a fim de coletar dados dos consumidores e usuários do produto, tentando identificar os problemas existentes no uso do produto e a satisfação dos consumidores, para que possam ser propostas melhorias e revisões nos produtos existentes.

A próxima etapa consiste na criação de manifestações concretas ou configurações capazes de assegurar os atributos desejados, usando recursos como forma, textura e cor. Essas manifestações devem expressar o conceito de design que o produto irá ter (FERREIRA, 2002).

Por fim, a etapa de avaliação das compatibilidades e da viabilidade do produto em relação aos requisitos técnicos e econômicos, permite a consistência quanto à adequação do produto ao consumidor.

O método de pesquisa denominado Focus Group é uma abordagem sistematizada e estruturada voltada à coleta de informações do usuário sobre o produto. O método lida com dados subjetivos em um ambiente controlado e mensurável e é executado mediante entrevistas a grupos em sessões cuidadosamente planejadas.

Ferreira (2002) trabalham com uma variante desse método denominado de Entrevista Exploratória. Ela é aberta, não diretiva e visa levar o interlocutor a exprimir a sua vivência ou a percepção que tem do objeto de estudo. Trata-se de um método relativamente simples e onde o entrevistado é deixado livre para expressar as suas percepções.

Um método mais tradicional e reconhecido é tratado por Maslow (1970) *apud* Back & Forcellini (2003). Inicialmente, ele descreve a Hierarquia das Necessidades. Segundo essa teoria, as necessidades dos indivíduos existem em diferentes populações e culturas e estão dispostas de forma hierárquica e seqüencial. Dessa forma, as necessidades se apresentam

segundo a seguinte hierarquia: fisiológicas, de segurança, sociais, de estima e de auto-realização. Com base nessas necessidades individuais, pode-se partir para as necessidades dos clientes, as quais, segundo Juran (1992) *apud* Back & Forcellini (2003) podem ser descritas da seguinte forma: necessidades manifestas, reais, latentes, culturais, atribuíveis a usos inesperados, relativas à satisfação do produto.

Para Back & Forcellini (2003), os clientes manifestam suas necessidades segundo seus pontos de vista e de acordo com a sua linguagem. No Quadro I.1 (BACK & FORCELLINI, 2003) pode-se ver dois exemplos.

O desejo de compra do cliente:	O que realmente o cliente quer:
Alimentos	Nutrição e sabor agradável
Automóvel	Transporte, conforto e status

Quadro I.1: Exemplos da relação entre necessidades manifestas e reais.

Back & Forcellini (2003) alertam que a não observação das diferenças entre as necessidades manifestas e as reais, pode acarretar sérios problemas no desenvolvimento de um produto. Os autores concluem que, para o entendimento das necessidades dos clientes, deve-se sempre procurar saber qual a motivação para a compra do produto e quais benefícios são esperados.

As necessidades também podem ser latentes, isto é, o consumidor ainda não sabe que precisa de algo. Back & Forcellini (2003) descrevem que o fato de ser latente não significa que a necessidade não seja importante, mas apenas inibida, sem uma forma oportuna de se manifestar.

Segundo Juran (1992) *apud* Back & Forcellini (2003), as necessidades dos clientes vão além de produtos e processos. Elas incluem o auto-respeito, respeito dos outros, continuidade de padrões de hábitos e outros elementos do padrão cultural do indivíduo. O padrão cultural consiste de crenças, hábitos, práticas, etc., baseadas na experiência acumulada no meio social. O padrão cultural fornece ao indivíduo certos elementos de estabilidade: um sistema de leis e ordem, um código moral, rituais, tabus, símbolos de status e outros. É importante para o projetista conhecer tais valores e compreender a resistência a mudanças por traz do padrão cultural.

Back & Forcellini (2003) explicam também as necessidades atribuídas a usos inesperados. Não é incomum o cliente utilizar o produto de maneira diferente daquela

projetada. Portanto, deve-se sempre determinar qual o uso real (ou mal uso), quais os custos associados e quais as conseqüências das possíveis formas de utilização do produto.

Para Back & Forcellini (2003) a satisfação do cliente é alcançada quanto às características do produto correspondem às necessidades do cliente. A satisfação do cliente é, em geral, sinônima da satisfação com o produto. Por outro lado, a deficiência de um produto é uma falha que gera insatisfação. As deficiências podem ser: interrupção no fornecimento de peças, entrega fora do prazo, má aparência, desconformidade com as especificações e outras.

Para finalizar, Back & Forcellini (2003) descrevem como descobrir as necessidades dos clientes. Na prática, os conhecimentos dos clientes podem ser bastante incompletos e, em alguns casos, o cliente pode ser a última pessoa a descobrir as suas necessidades. Portanto, não apenas uma pesquisa direta pode ser necessária. É importante obter informações sobre a satisfação dos produtos já disponíveis, se existem tarefas ou atributos não previstas e se existem mudanças nos hábitos dos clientes. Formas complementares de identificar as necessidades dos clientes são: ser um cliente (adotar o papel e a postura do cliente), estudar o seu comportamento, comunicar-se com ele e simular o uso do produto pelo cliente.

Andrade (1991) *apud* Back & Forcellini (2003) trazem um questionário padronizado cujo objetivo é determinar as necessidades dos clientes, organizando-as em tópicos, conforme Quadro I.2 (ANDRADE, 1991 *apud* BACK & FORCELLINI, 2003). As respostas dessas e outras questões gerarão um conjunto de necessidades cuja avaliação suportará o estabelecimento dos requisitos de projeto.

Conhecidas as necessidades dos clientes, o próximo passo da equipe de projeto é estabelecer os requisitos ou características que o produto deverá ter para corresponder às expectativas dos clientes. Para as finalidades do método proposto, devem-se focalizar aqueles requisitos ainda não contemplados pelo produto matriz, de forma a adicioná-los na etapa de reprojeto.

Back & Forcellini (2003) ressaltam que as necessidades dos clientes são relatadas na forma qualitativa e, em alguns casos, em termos subjetivos e vagos. Portanto, tais informações precisam ser transformadas em linguagem própria de engenharia, isto é, traduzi-las em números e mensuráveis. Back & Forcellini (2003) apresentam um outro conjunto de questões que facilitam a obtenção dos requisitos a partir das necessidades dos clientes, conforme Quadro I.3.

Voltando-se ao Quadro I.1, para o caso do automóvel por exemplo, é preciso que o projetista transforme o desejo do cliente (p. ex.: conforto) em parâmetros que possam ser

medidos e avaliados (p. ex.: medidas da posição de pilotagem do motorista, nível de ruído do habitáculo, etc.).

Tópico	Questões
Clientes e Mercado	<p>Quem são os principais clientes, aqueles que são afetados diretamente pelo produto? Quem são os clientes secundários, aqueles de alguma forma relacionados com o produto? O que os clientes podem obter com o produto mas não sabem? O que os clientes gostariam de conseguir com o produto? Desempenho, custo, níveis de qualidade, etc.. O que os clientes gostariam de obter com o produto? Quem são os clientes que estão comprando, e de quem? Como pode ser a empresa mais atrativa que os concorrentes? Quantos clientes a empresa tem, e qual o tamanho do mercado? Como pode a empresa aumentar a sua participação no mercado?</p>
Uso e Desativação	<p>Quais devem ser as funções principais do produto? Quais devem ser as funções secundárias do produto? Quais são as habilidades daqueles que irão usar o produto? Qual será a frequência de uso, e os períodos de utilização e não utilização? Qual será o tempo de vida do produto? Em que ambiente o produto será utilizado? Quais são as condições de segurança relacionadas com as pessoas, produto e ambiente? Quais serão os efeitos da desativação ou abandono temporário ou permanente? Quais são as habilidades daqueles que irão reaproveitar o produto desativado?</p>
Produção, Distribuição e Instalação	<p>Quantos produtos serão produzidos? Qual deverá ser o tempo de produção do produto? Qual será a frequência de produção? Quais materiais serão processados? Quais processos de fabricação e montagem serão necessários e quais os disponíveis? O que será exigido do processo? Quais serão as habilidades daqueles envolvidos com a produção, distribuição e instalação? Como o produto será testado? Como o produto será embalado? Como o produto será transportado?</p>
Empresa	<p>Como a empresa pretende custear o empreendimento? Qual a posição que a empresa pretende ocupar entre os concorrentes? Quais as metas da empresa? Que recursos financeiros estão disponíveis? Qual é o tempo disponível? Qual é o máximo custo aceitável para o produto? Quais são os fornecedores preferenciais?</p>
Fatores Externos	<p>Quais os conhecimentos científicos e tecnológicos necessários, e quais são os disponíveis? Como está e como estará a situação de desenvolvimento econômico no ambiente da empresa e do cliente? Existem decisões políticas por parte de autoridades, que podem afetar o produto? Qual é a legislação associada com o produto, os clientes e a empresa? Quais são as demandas e limitações sociais, culturais e religiosas? Como pode o produto perturbar o meio ambiente?</p>

Quadro 1.2: Questões para identificação das necessidades dos clientes.

Identificação dos requisitos

- O que o produto deve realizar em termos de características de desempenho funcional e operacional (faixa de operação, capacidade, fluxo, potência, consumo, etc.)?
 - Qual é a vida útil esperada para o produto?
 - Como o produto será usado em termos de horas de operação por dia, número de ciclos por mês, etc.?
 - Como o produto será distribuído?
 - Quais as características relativas à eficiência que o produto deverá exibir? Custo, disponibilidade, confiabilidade, manutenibilidade, etc.?
 - Quais as características relacionadas ao meio ambiente que o produto deverá possuir (temperatura, umidade, vibrações, etc.)? Em que ambiente o produto deverá operar? Como o produto será transportado, armazenado e manipulado?
 - Como será o descarte do produto? O produto ou partes dele poderão ser reciclados? Quais os efeitos sobre o meio ambiente?
-

Quadro I.3: questões para estabelecimento dos requisitos.

I.1 IDENTIFICAÇÃO DA ESTRUTURA DE FUNÇÕES DO PRODUTO

Para Pahl & Beitz (1988) os requisitos determinam a função, que é a relação entre as entradas e saídas de uma planta, máquina ou sistema.

Back & Forcellini (2003) fazem uma síntese do método para o estabelecimento da função síntese do produto, isto é, da sua função global e da estrutura de funções correspondente.

Inicialmente busca-se a formulação da função total do produto (global). Depois é estabelecida a estrutura de funções ou um fluxo de funções do produto. A seguir são pesquisados princípios de solução para cada função e combinado um princípio de cada função para formar concepções alternativas para o problema global e, por fim, são selecionadas as concepções viáveis.

Na Figura I.1 pode-se observar a função global de um transdutor de pressão sanguínea (TPS). A variação da grandeza a medir (pressão) é um sinal de entrada (variação da energia de entrada) e transformada adequadamente em um sinal elétrico proporcional.

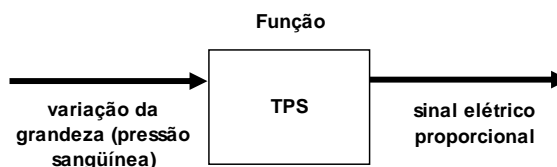


Figura I.1: Função global do produto.

Segundo Pahl & Beitz (1988), duas outras características podem ser observadas no produto: são considerados como processos de transformação sucessivas do estado e das propriedades de grandezas de entrada nas de saída; são processos de transformação de grandezas do tipo energia, material e informação.

Para Back & Forcellini (2003), inicialmente deve-se estabelecer a declaração da função do produto (medir continuamente a pressão sanguínea do paciente de forma invasiva). O passo seguinte é a definição das interfaces, destacando-se: interfaces com sistemas periféricos (p. ex.: monitor médico padrão); interfaces com o meio ambiente (p. ex.: micro-tubo que acessa a corrente sanguínea do paciente).

Back & Forcellini (2003) lembram que dificilmente a função global do produto é capaz de transformar diretamente as entradas nas saídas desejadas. Sendo assim, é necessário decompor a função global em funções mais simples até o nível de funções elementares. Em um sistema existente, como no caso do método proposto, não é tarefa difícil decompor a função global nas suas funções parciais ou elementares, basta seguir o fluxo de energia, material e ou informação.

Back & Forcellini (2003) detalham o método para decomposição da função global. Algumas diretrizes que podem ser seguidas são as seguintes:

a) Decompor a função global numa estrutura com sub-funções, ou funções parciais, identificadas nas especificações de projeto ou nas interfaces como mostra a Figura I.2 (Adaptada de Back & Forcellini, 2003). Nessa decomposição, num segundo nível de complexidade, além de decompor o bloco, deve-se procurar decompor a declaração da função global e para isto as sub-declarações devem ser as mais condensadas, na medida do possível limitar-se ao par de verbo e substantivo.

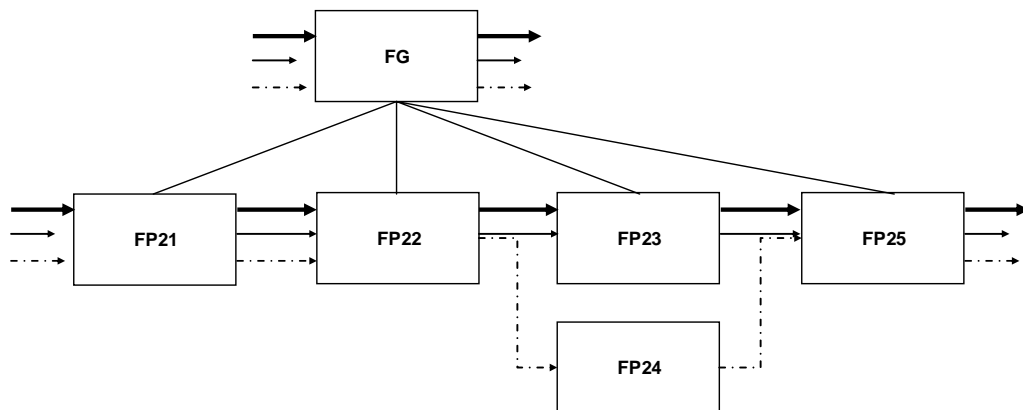


Figura I.2: Desdobramento da função global.

b) Se o apropriado entendimento, de uma função parcial no segundo nível de complexidade, não for alcançado ou não permite a identificação de um princípio de solução da função, esta deve ser decomposta em níveis de complexidade cada vez menor, se necessário, até ao nível de funções elementares.

c) As entradas e saídas de cada bloco devem ser identificadas na medida do possível quanto ao tipo, mas neste estágio não é necessário identificá-las quantitativamente.

d) É adequado iniciar o trabalho com atenção no fluxo principal do sistema o qual, em geral, determina a função do sistema e é mais facilmente identificado a partir das especificações de projeto. Os fluxos auxiliares ajudam na elaboração futura da estrutura. A estrutura completa pode ser obtida por um processo iterativo, ou seja, parte-se do fluxo principal de energia, material e informação, retomando e complementando a estrutura com fluxos auxiliares.

e) Nas declarações de funções parciais e até ao nível de funções elementares, usar o mínimo possível de diferentes pares de verbo-substantivo para declaração das funções. Ao examinar os sistemas técnicos em geral, as ações ou funções podem ser descritas com poucos verbos técnicos. No próximo item este aspecto será estudado em mais detalhes, quando serão apresentadas sugestões de normalização e representação de funções típicas de sistemas técnicos.

f) No desdobramento sucessivo da função global esquematizada na Figura I.2, deve-se considerar os seguintes aspectos. Em cada nível de complexidade da seqüência de desdobramento, verificar se não existem princípios de solução ou módulos já usados em outros sistemas, que podem ser adaptados ou empregados para uma dada função parcial. Por exemplo, se para a função parcial FP21 da Figura I.2, já existe um subsistema que pode ser adaptado ou usado diretamente, então não há necessidade de continuar com o desdobramento desta função. Por análise ou analogia de sistemas conhecidos é possível: derivar variantes adicionais da estrutura funcional total ou parcial, dividir ou combinar sub-funções; variar o arranjo destas funções e variar as ligações, em paralelo, em série ou em ponte.

g) Como já foi observado existe a possibilidade de obter diversas estruturas funcionais alternativas, ao menos parcialmente. Cada uma destas estruturas é uma potencial concepção alternativa do sistema em desenvolvimento, deve-se então compará-las com as especificações de projeto, selecionar e otimizar a melhor estrutura.

I.2 MÉTODO DA MATRIZ MORFOLÓGICA

A Matriz Morfológica é um método para o desenvolvimento de concepções alternativas. Seus principais passos são (Back & Forcellini, 2003):

a) Determinação da seqüência de funções: as funções mais gerais podem ser desdobradas quanto à forma em que são atendidas e que tipos de dispositivos e princípios poderão ser utilizados.

b) Preenchimento da primeira coluna da matriz com a seqüência de funções. Na Figura I.3 pode-se observar a construção da matriz.








Alimentação	Posição do quadro				
	Sentido da alimentação				
Transporte	Tipo de dispositivo	correia	caçambas	gravidade	parafuso
	Sentido do transportador	horizontal	vertical		
	Acionamento do transportador	por mola	por massa	corrente	correia
Controle	Tipo de controle	contínuo	discreto		
	Forma de controle	mecânico	eletrônico	software	
⋮					

Figura I.3: Matriz morfológica.

c) Busca de princípios de função alternativos: para cada função listada na primeira coluna, busca-se formas ou princípios para atender àquela função, de forma independente, sem se preocupar com as demais funções. Em cada linha da matriz nas diversas colunas, registram-se as soluções por meio de descrições literais ou representações gráficas. Essas soluções podem ser o resultado de pesquisa bibliográfica, utilização de mecanismos já existentes, soluções provenientes de métodos criativos, como o *brainstorming*, analogias ou outras formas.

d) Busca de soluções ou concepções alternativas: uma vez estabelecida a matriz, procura-se escolher as combinações, associando o princípio de solução de uma linha com os princípios das demais linhas.

e) Avaliação e seleção das concepções: muitas das combinações podem ser eliminadas de imediato por não serem compatíveis ou viáveis. As demais devem ser avaliadas quanto ao custo e facilidade de implementação.

APÊNDICE 2: FLUXOGRAMAS DO ESTUDO DE CASO

Este Apêndice é um complemento do Capítulo 5, apresentando o Estudo de Caso comparado ao Método por meio dos seus fluxogramas.

Na Figura II.1 pode-se verificar em azul o fluxo de ações específicas do Estudo de Caso, conforme relatado no Capítulo 5. É possível notar que todas as etapas do Fluxograma A foram realizadas. Para facilitar o acompanhamento dos fluxogramas e a comprovação do uso do método, serão comentados apenas os casos onde o mesmo não tenha sido plenamente utilizado, como já exposto no Capítulo 5.

Quando se observa a Figura II.2, é possível identificar o primeiro desvio do Fluxograma B original. Em função de dispor apenas de uma função principal, não foi necessário realizar o desdobramento da função global do produto em suas funções elementares.

Na Figura II.3, encontra-se o Fluxograma C. Para ele, são necessários dois comentários. O primeiro se refere à configuração do sistema de processamento. Como a contratante não se interessou pela inclusão do monitor no projeto, não se mostrou necessário o estudo do sistema de processamento de dados. O segundo comentário se refere também ao software. A ação demarcada em vermelho no Fluxograma (Comentário 2) não foi necessária em função do não emprego de software embarcado no TPS.

Para as figuras II.4 há um comentário necessário. Como comentado no Capítulo 5, inicialmente se cogitou a realização da ERE no sensor/transdutor do TPS. Contudo, com a descoberta de um dispositivo similar padronizado, a ERE foi descartada.

Observando-se a Figura II.5, verifica-se as suas duas partes não executadas (em preto), se referem às ações e decisões associadas às ERS/ERC e ERE.

A Figura II.6 apresenta o fluxograma específico para o planejamento e estratégia da ERM, que se mostrou muito útil ao projeto do TPS.

Na Figura II.7 encontra-se o início do levantamento de informações do produto matriz, especificamente as ações de preparação. Nota-se que parte do fluxograma não realizado se deve às ERE e ERS/ERC.

Na Figura II.8 pode-se observar um comentário relativo à digitalização de superfícies. Ela não foi necessária. Apenas a digitalização livre de algumas curvas sobre a carcaça do produto matriz foram efetuadas, além de outras medições necessárias por MC.

A interação entre o metrologista responsável pela MC e o projetista exigiu no fluxograma da Figura II.9 um desvio para a passagem 3, a fim de refazer algumas digitalizações realizadas.

Não constam deste Apêndice os fluxogramas H e I, por não terem sido empregas as ERE e ERS/ERC.

Na Figura II.10 pode-se verificar a conclusão da etapa de levantamento de dados do produto matriz.

A Figura II.11 apresenta o fluxograma do início da etapa de reprojeção.

Na Figura II.12 encontra-se o Fluxograma L. Aqui um comentário é necessário nas etapas de ensaios e testes, já que, como comentado no Capítulo 5, o próprio contratante assumiu a realização posterior de ensaios e testes complementares.

Finalmente, na Figura II.13, observam-se as últimas ações necessárias ao projeto do TPS.

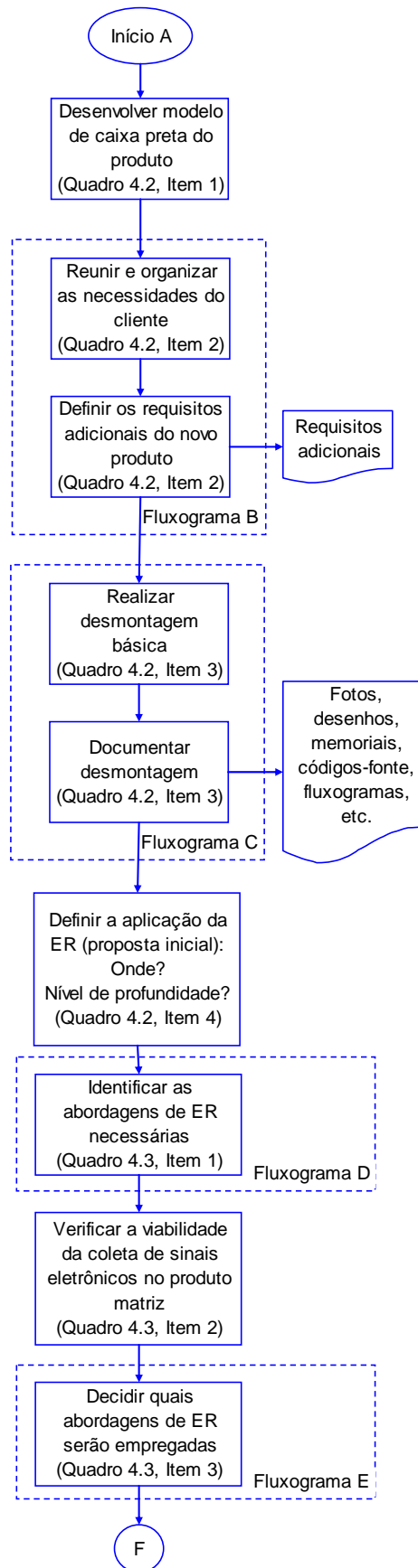


Figura II.1: Fluxograma A para o estudo de caso

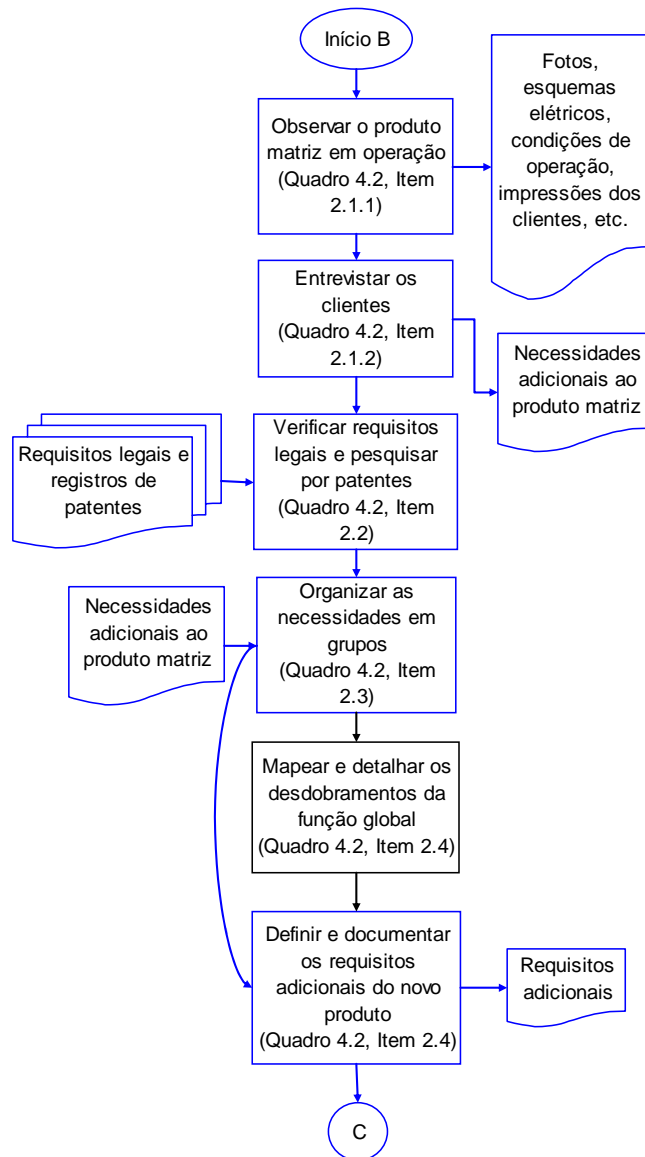


Figura II.2: Fluxograma B para o estudo de caso

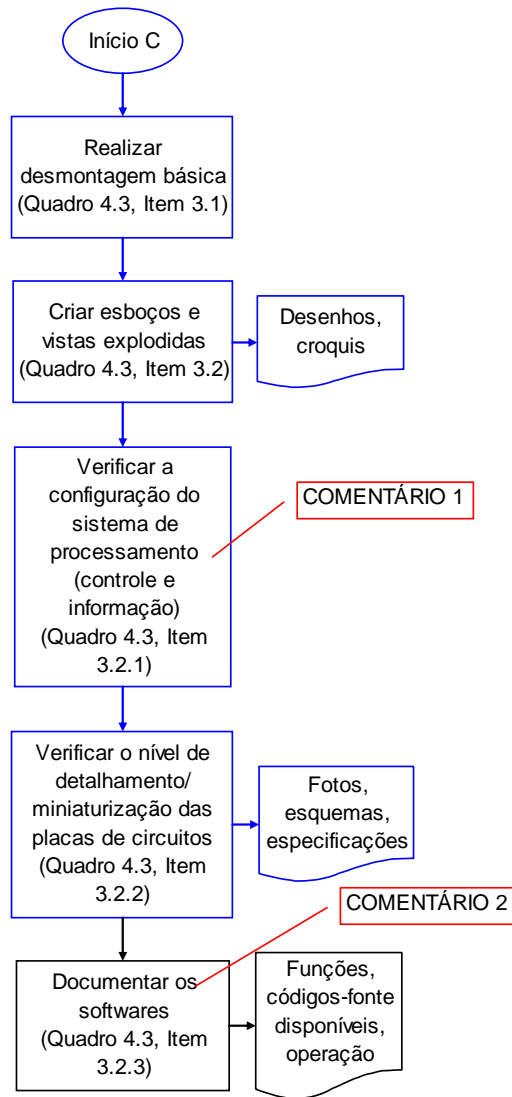


Figura II.3: Fluxograma C para o estudo de caso

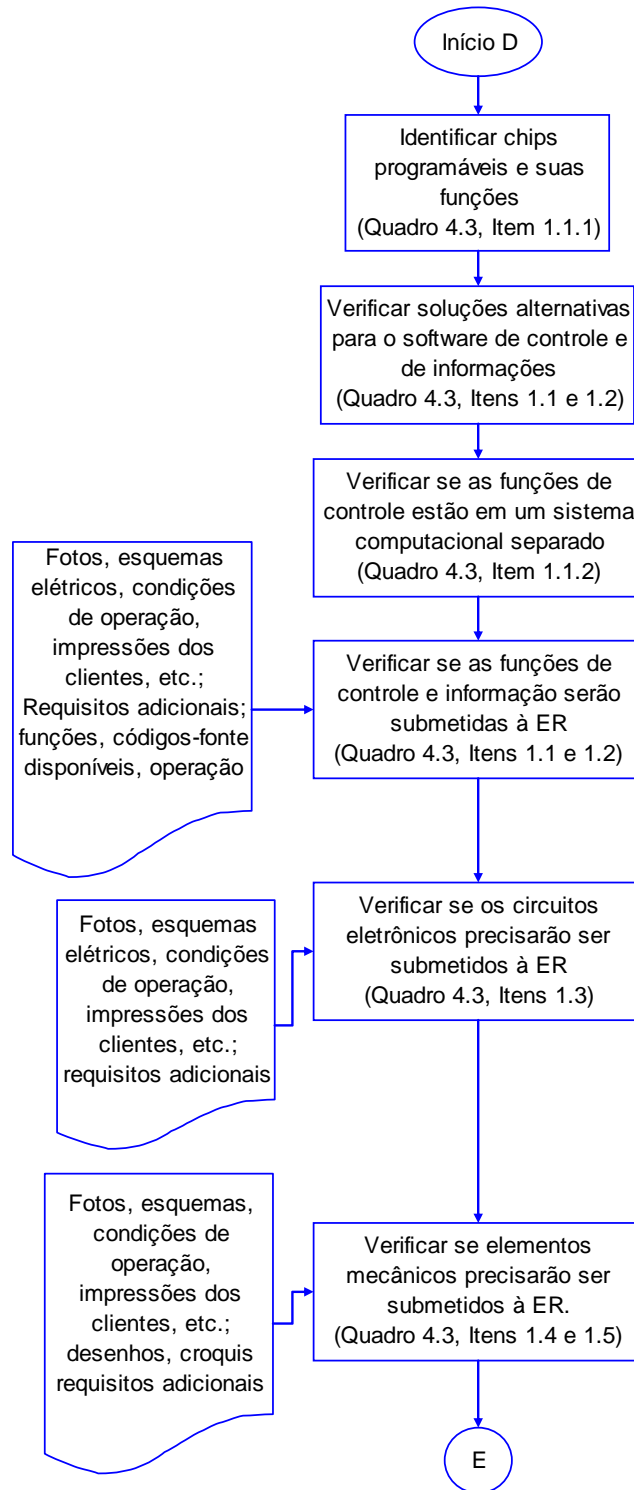


Figura II.4: Fluxograma D para o estudo de caso (1ª parte)

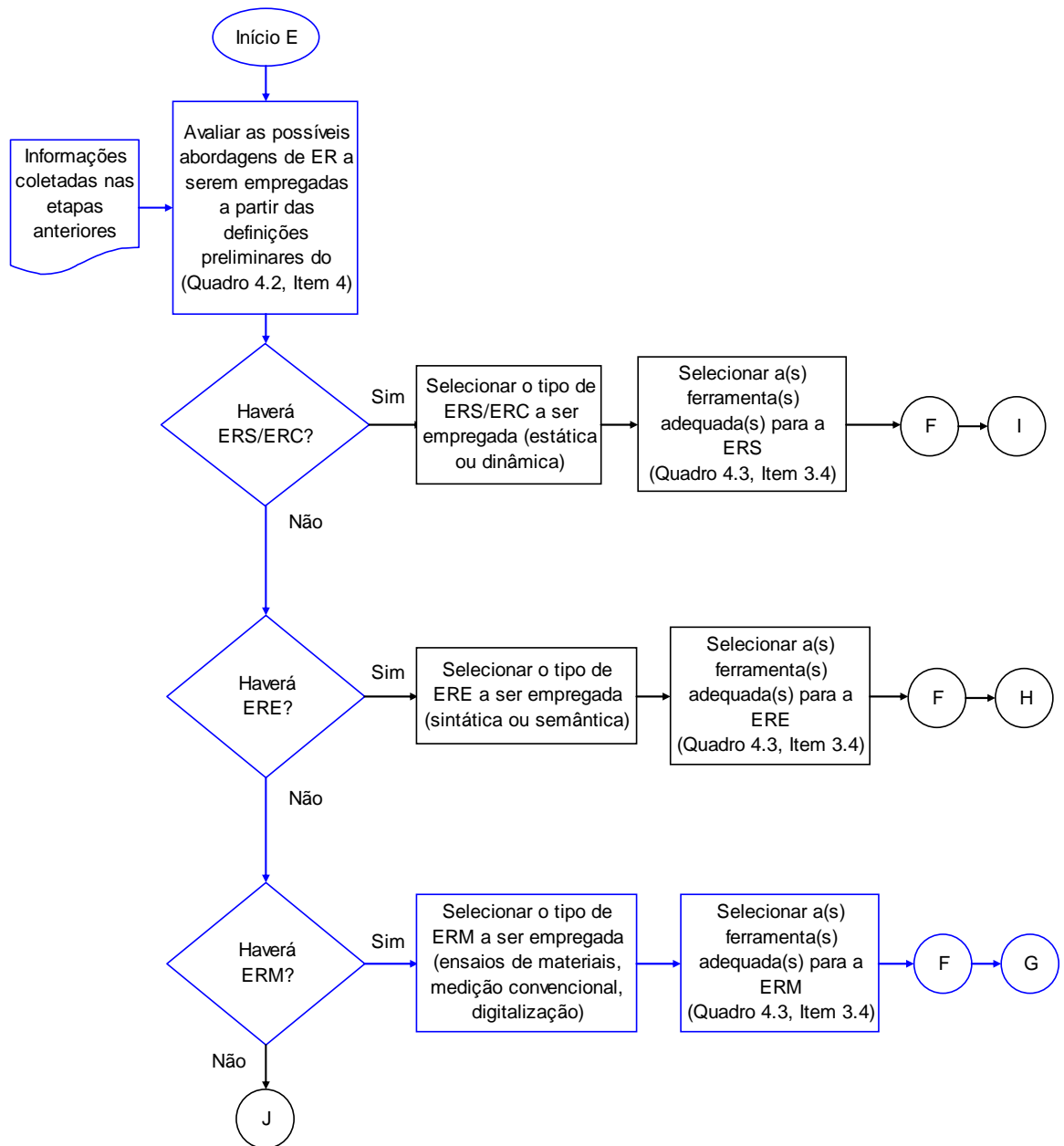


Figura II.5: Fluxograma E para o estudo de caso

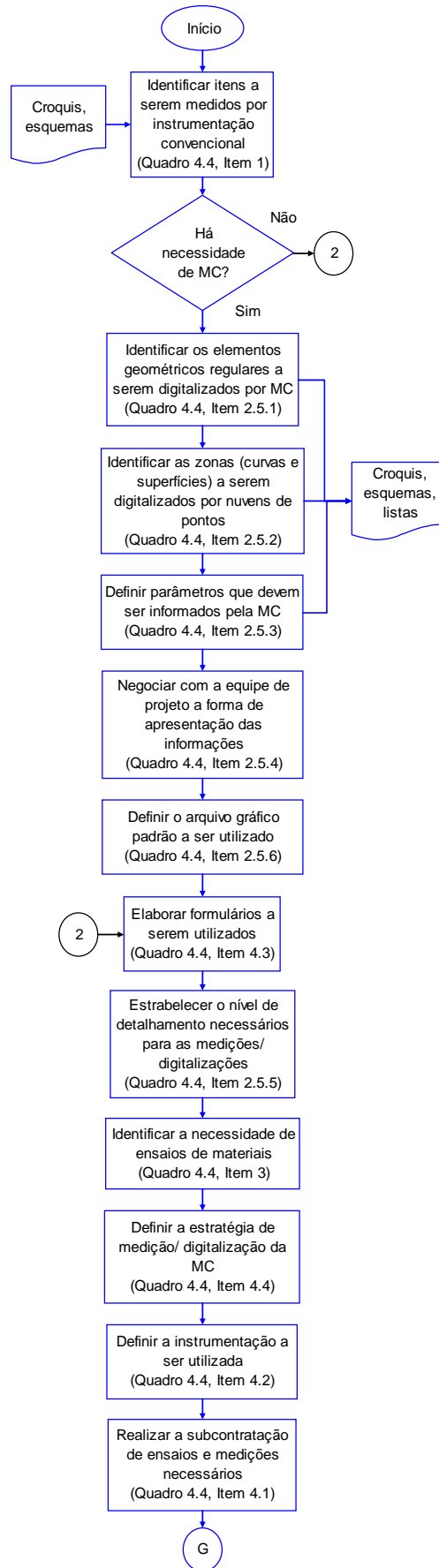


Figura II.6: Fluxograma do planejamento e estratégia da ERM para o estudo de caso

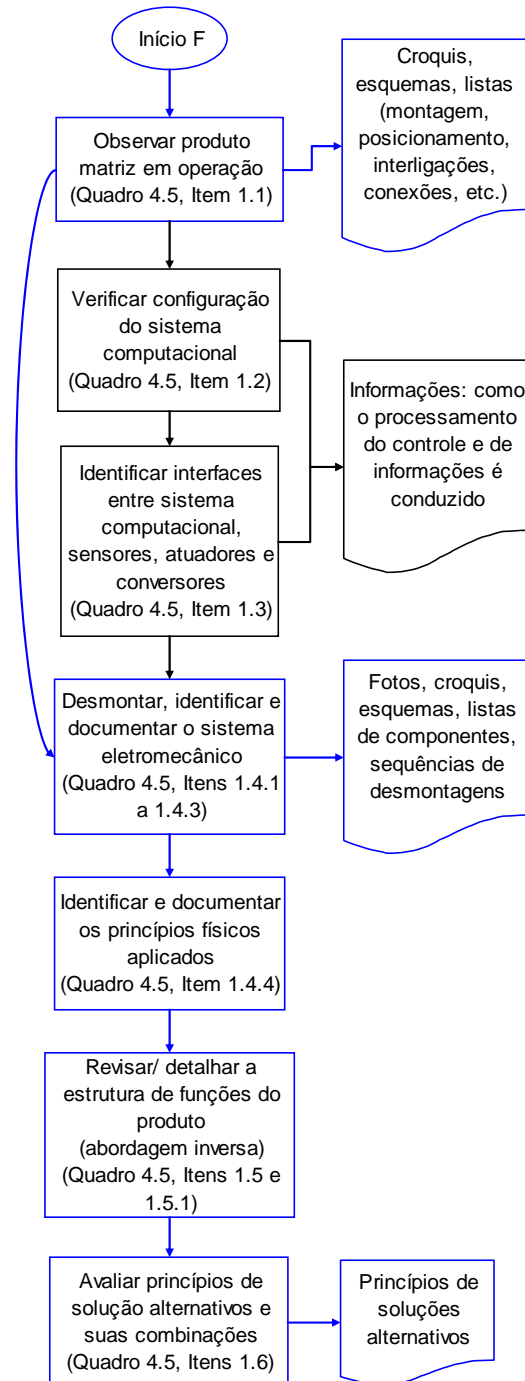


Figura II.7: Fluxograma F para o estudo de caso

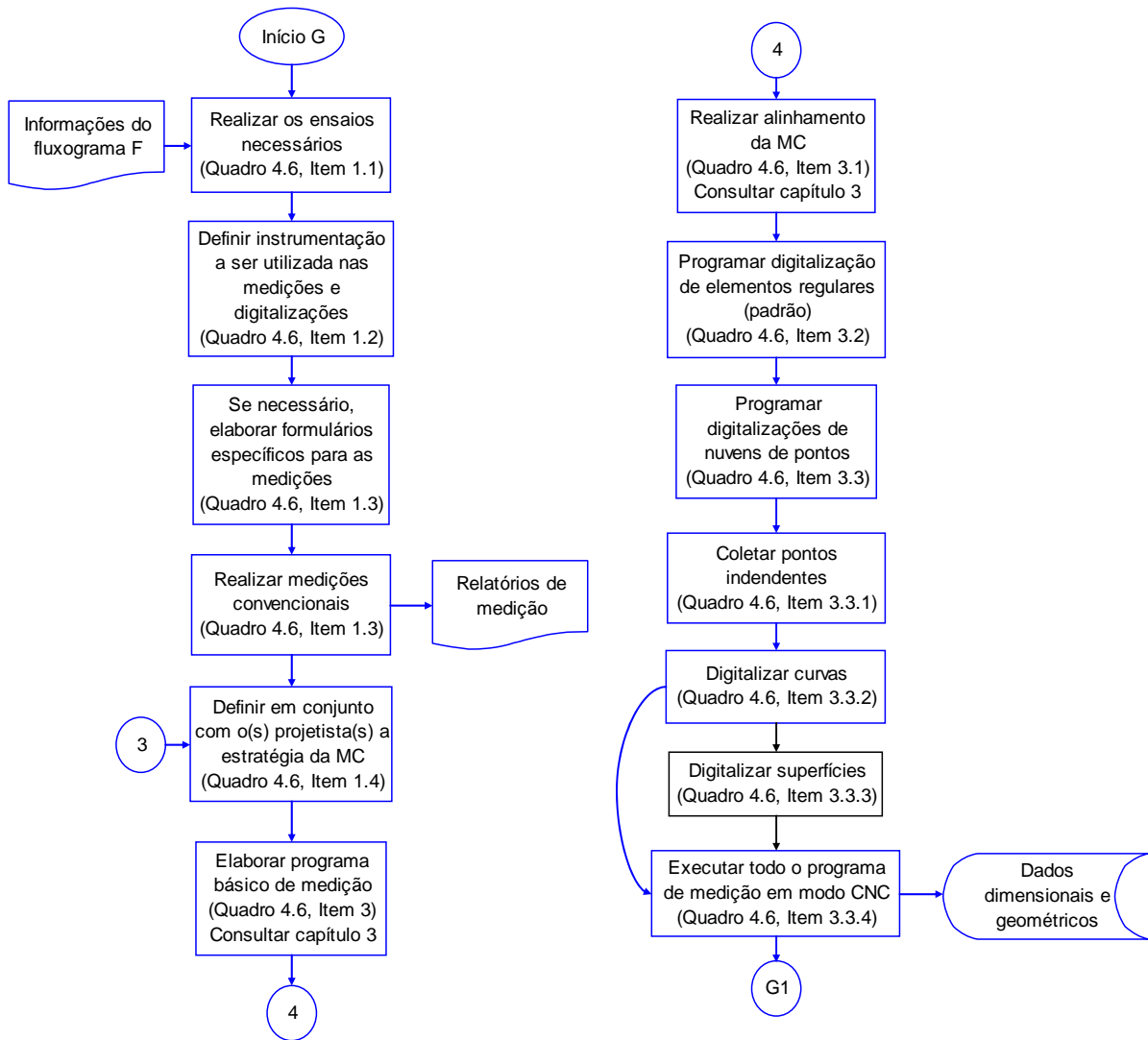


Figura II.8: Fluxograma G para o estudo de caso

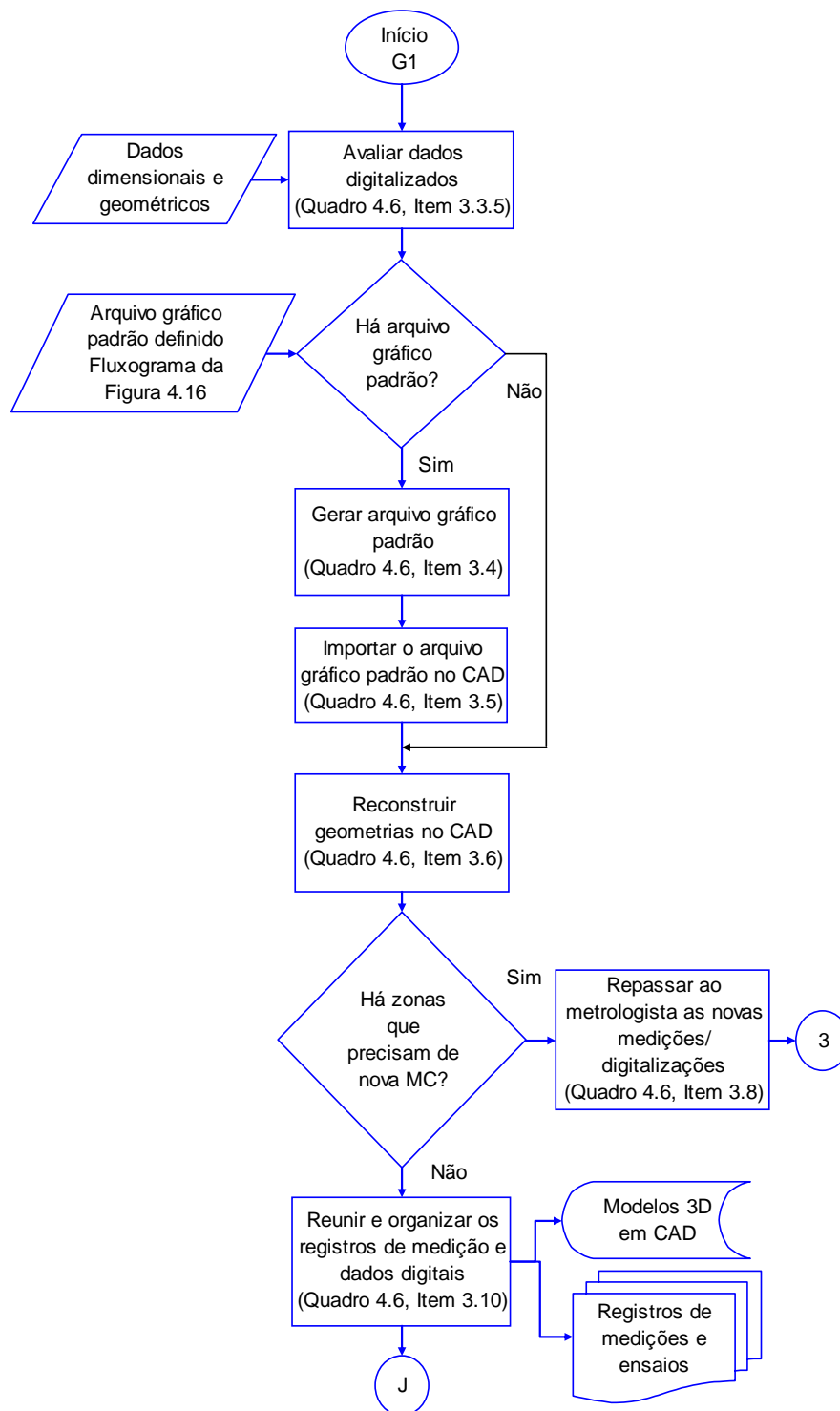


Figura II.9: Fluxograma G1 para o estudo de caso

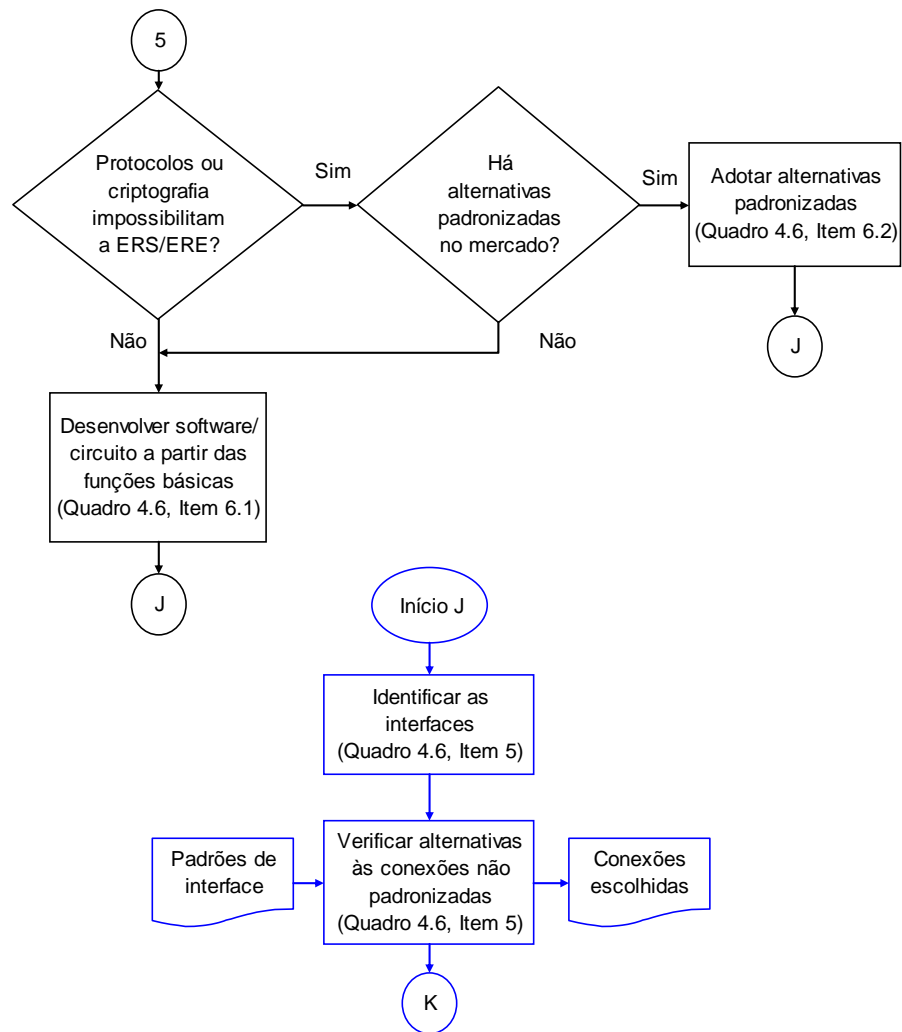


Figura II.10: Fluxograma J para o estudo de caso

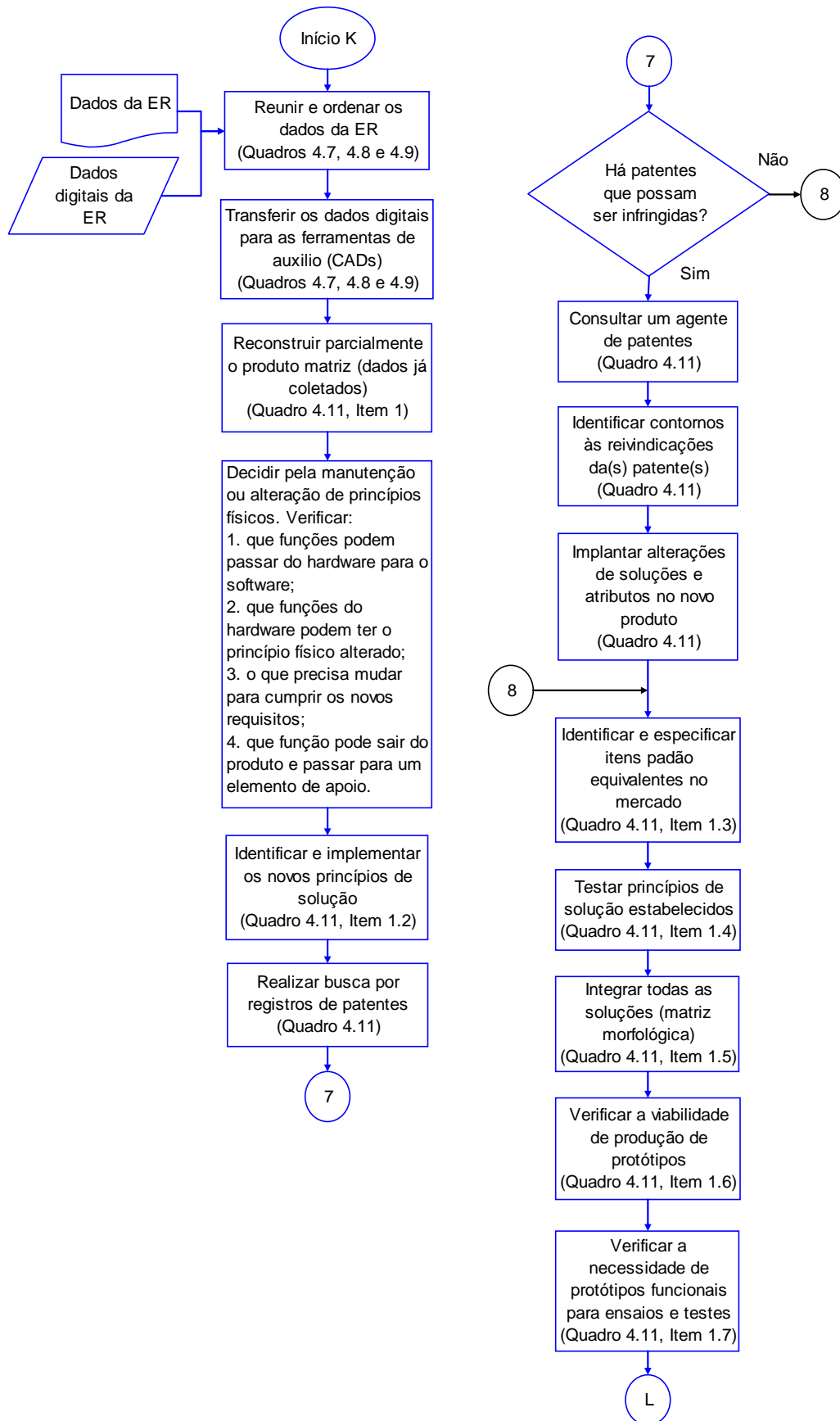


Figura II.11: Fluxograma K para o estudo de caso

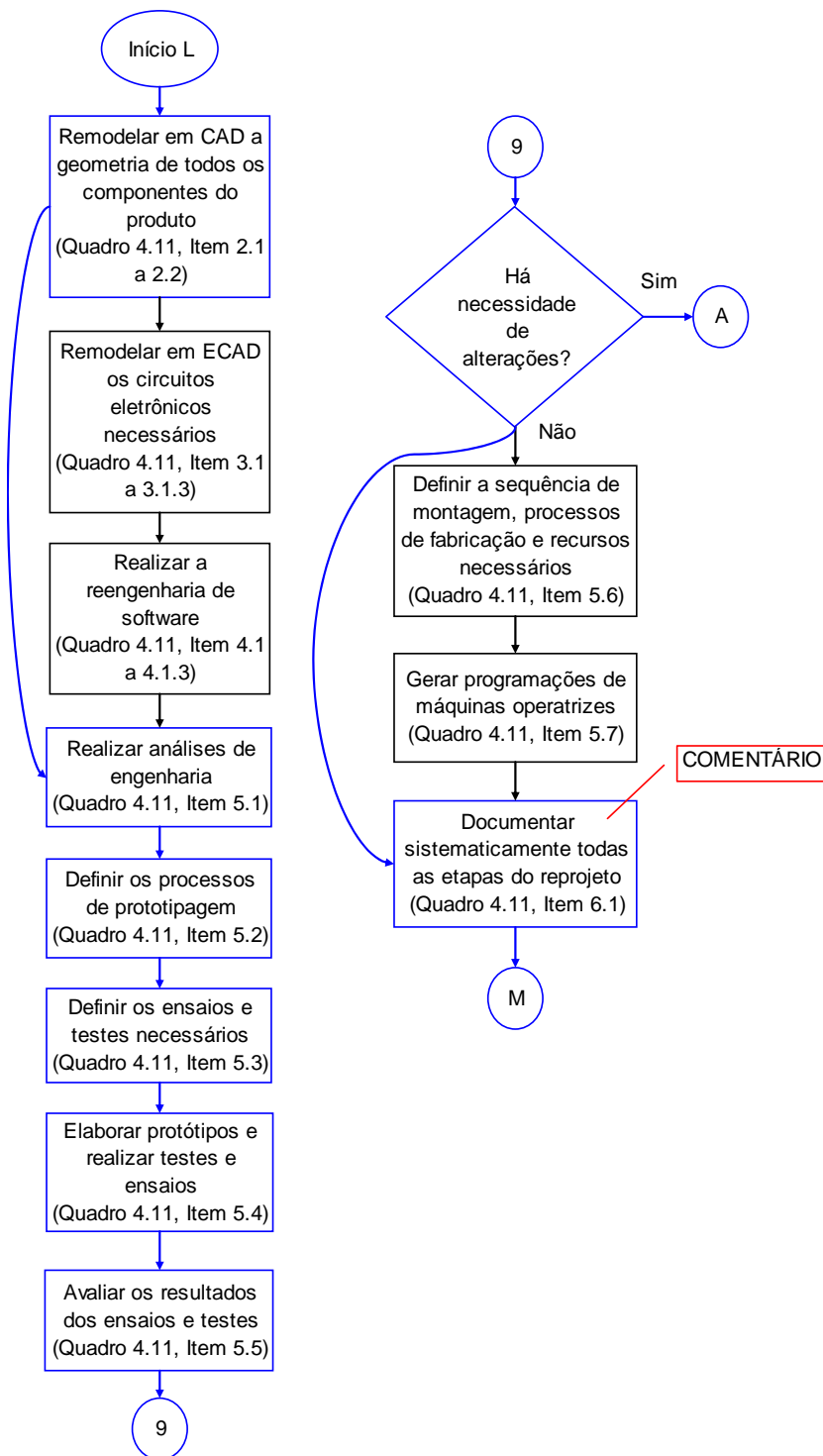


Figura II.12: Fluxograma L para o estudo de caso

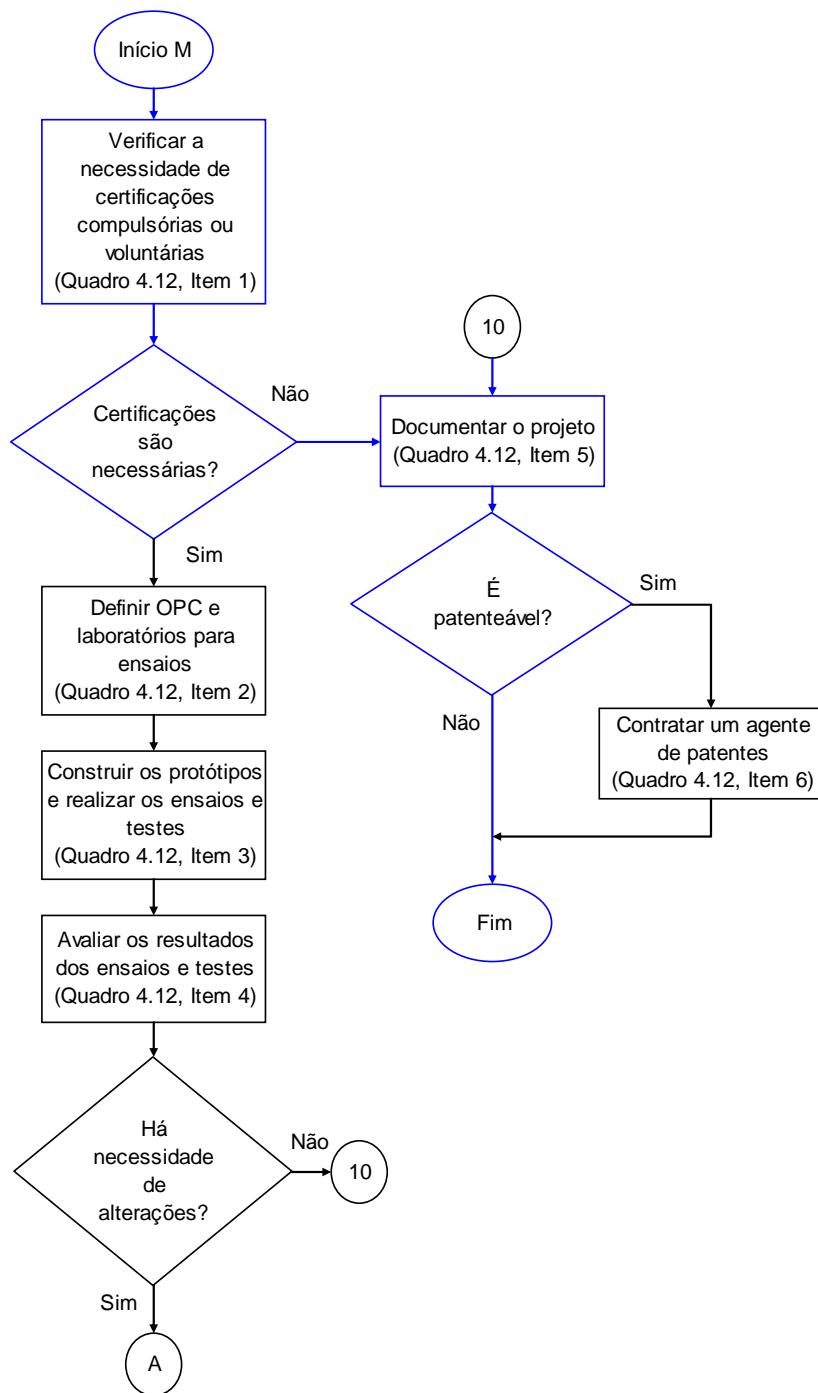


Figura II.13: Fluxograma M para o estudo de caso