



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Mecânica

Gustavo dos Santos Gioria

Proposta de modelagem funcional integral do produto aplicável a projetos derivativos

CAMPINAS
2016

Gustavo dos Santos Gioria

Proposta de modelagem funcional integral do produto aplicável a projetos derivativos

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, na Área Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO GUSTAVO DOS SANTOS GIORIA, E ORIENTADO PELO PROF. DR. FRANCO GIUSEPPE DEDINI.


.....
ASSINATURA DO ORIENTADOR

Prof. FRANCO GIUSEPPE DEDINI
Matric. 06063 - 1
FEM - UNICAMP

CAMPINAS
2016

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

G437p Gioria, Gustavo dos Santos, 1983-
Proposta de modelagem funcional integral do produto aplicável a projetos
derivativos / Gustavo dos Santos Gioria. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.

Orientador: Franco Giuseppe Dedini.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Mecânica.

1. Análise funcional. 2. Produtos novos - Desenvolvimento. 3. Projeto -
Metodologia. I. Dedini, Franco Giuseppe, 1957-. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Proposal of entire product function modeling applicable to
derivative projects

Palavras-chave em inglês:

Functional analysis

New products - Development

Project - Methodology

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Franco Giuseppe Dedini [Orientador]

Ludmila Corrêa de Alkmin e Silva

Helio Fiori de Castro

Klaus Schützer

Cláudia Regina Garcia Vicentini

Data de defesa: 21-10-2016

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO
TESE DE DOUTORADO

Proposta de modelagem funcional integral do produto aplicável a projetos derivativos

Autor: Gustavo dos Santos Gioria

Orientador: Franco Giuseppe Dedini

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini, Presidente
DSI/FEM/UNICAMP

Prof. Dr. Ludmila Corrêa de Alkmin e Silva
DSI/FEM/UNICAMP

Prof. Dr. Helio Fiori de Castro
DSI/FEM/UNICAMP

Prof. Dr. Klaus Schützer
SCPM/FEAU/UNIMEP

Prof. Dr. Cláudia Regina Garcia Vicentini
EACH/USP

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 21 de Outubro de 2016.

Dedicatória

À minha esposa, Camila, ao meu irmão, Rafael, aos meus pais, Selme e Celso, e ao meu primo, Mauro. Pessoas pelas quais tenho grande estima, por me inspirarem nos momentos difíceis e por compartilharem espontaneamente da minha alegria nos bons momentos.

Agradecimentos

À empresa Schaeffler Brasil Ltda., pelo incentivo e valorização da formação de seus profissionais.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini, pela orientação neste trabalho.

À Prof. Dr. Ludmila Corrêa de Alkmin e Silva, pela inúmeras contribuições, inclusive como membro da banca de qualificação.

Ao Prof. Dr. Helio Fiori de Castro, membro da banca de qualificação, pelas críticas construtivas.

À Gabrielly Araújo Cordeiro e aos demais colegas do Laboratório de Sistemas Integrados, pelo auxílio durante a execução da pesquisa.

Ao André Fernandes da Silva e aos demais colegas de trabalho, pela colaboração no levantamento de dados.

Ao Leonardo Melo da Silva, pelo incentivo para trilhar o caminho do doutorado.

Ao meu pai, Celso Gioria, pela revisão do texto.

Ao meu irmão, Rafael dos Santos Gioria, pelo suporte na compilação da tese.

À minha esposa, Camila Tancredo Iesca Gioria, pela compreensão e parceria em todos os momentos.

*Na natureza, nada se cria, nada se perde,
tudo se transforma.*

Antoine Laurent de Lavoisier

Resumo

GIORIA, G. S. Proposta de modelagem funcional integral do produto aplicável a projetos derivativos. 2016. 159p. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

Modelagem funcional é o nome dado para a atividade de desenvolver modelos de produtos baseados nas suas funcionalidades, esta atividade está estabelecida em diversas ferramentas de desenvolvimento de produto. A tese propõe um procedimento para modelagem funcional do produto que contemple o produto de forma integral, pois o risco de não se tratar o produto integralmente é ter omissões na identificação das funções e as falhas serem identificadas em fases avançadas do projeto, as quais demandam a implementação de alterações, cujos custos são elevados e podem comprometer a viabilidade do projeto. A abordagem funcional integral do produto pressupõe a identificação de todos os seus clientes, pois são eles que dão origem às necessidades que são traduzidas em funções do produto. Propõe-se o mapeamento dos clientes a partir da análise do ciclo de vida do produto, que, no caso de projetos derivativos, está basicamente definido com o produto base. O projeto derivativo não só viabiliza o procedimento proposto por ter disponível muitas informações do produto base desde o início do projeto, mas também motiva o desenvolvimento do tema por ser o tipo de projeto mais frequentemente desenvolvido. A modelagem funcional integral do produto proposta apresenta uma maneira prática e intuitiva de se compor o domínio funcional e o domínio físico, além de mapear a correlação entre eles. O resultado desta modelagem é uma descrição funcional ampla do produto que minimiza o risco de omissões e suporta o desenvolvimento de projetos derivativos, tanto para a incorporação de novas funções ao produto base, quanto para a melhoria de algum requisito de desempenho do produto.

Palavras-chave: Modelagem Funcional, Projeto Derivativo, Desenvolvimento de Produto.

Abstract

GIORIA, G. S. Proposal of entire product function modeling applicable to derivative projects. 2016. 159p. Thesis (Doctoral). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

Function modeling is the activity of developing product models based on their functionalities, this activity is established on several product development tools. This thesis proposes a procedure of product function modeling that contemplates the entire product, since the risk of not having the product entirely contemplated is to have omissions on the functions identification and to have failures identified on latter project phases, which demand implementation of project changes, whose costs are high and may commit the project viability. The entire product functional approach presupposes the identification of all of its customers, since they give origin of the needs that will be translated into product functions. It is proposed the customers mapping through the product life cycle analysis, which is basically defined on the case of derivative projects. The derivative project does not only enable the proposed procedure by offering several information of the reference product since the beginning of the project, but also motivates the development of this topic, because it is the most frequent type of project carried out. The proposed function modeling of the entire product presents a practical and intuitive manner of composing the functional domain and the physical domain, in addition to mapping the correlations between each other. The result of this modeling is a full functional description of the product, which minimizes the omission risk and supports the development of derivative projects, either for the addition of new function to the reference product, or for the improvement of a product performance requirement.

Keywords: Function Modeling, Derivative Project, Product Development.

Lista de Ilustrações

2.1	Mapa mental da revisão bibliográfica.	23
2.2	Classificações de funções de acordo com diferentes autores.	25
2.3	Função global. Adaptado de Pahl <i>et al.</i> (2005).	26
2.4	Desdobramento funcional da função total. Adaptado de Pahl <i>et al.</i> (2005). . . .	26
2.5	Modelo de Kano. Adaptado de Sauerwein <i>et al.</i> (1996).	35
2.6	Estágios do ciclo de vida. Adaptado de Curran (2006).	36
2.7	Curva de comprometimento do custo do produto (ROZENFELD <i>et al.</i> , 2006). . .	37
2.8	Custos em diferentes estágios do processo de desenvolvimento. Adaptado de Baxter (2011).	37
2.9	Abordagem por componente e por função. Adaptado de Werdich (2011).	39
2.10	Visão esquemática do espaço de solução. Adaptado de Daniilidis <i>et al.</i> (2011). .	41
2.11	Dispersão das invenções nos níveis inventivos. Baseado em Altshuller (2007). .	42
2.12	Estrutura funcional hierárquica de uma válvula de redução de pressão. Adaptado de Daniilidis <i>et al.</i> (2011).	42
2.13	Estrutura FBS. Adaptado de Gero (1990).	45
2.14	Esquema dos modelos DSSBF com função no topo e a forma(desenho) abaixo. Adaptado de Yaner e Goel (2006).	47
2.15	Modelo de produto baseado em FBS. Adaptado de Helms e Shea (2012).	48
2.16	FAD representado sobre um layout do corpo de uma bomba. Adaptado de Aurisicchio <i>et al.</i> (2013).	49
2.17	Exemplo de resultado da análise de valor: matriz função-custo de um "guardrail". Adaptado de SAVE (1998).	51
2.18	Modelo FAST básico. Adaptado de Wixson (1999).	52
2.19	Os cinco passos para a construção de uma FMEA. Adaptado de Verband der Automobilindustrie (2006).	53
2.20	Sequência de um processo de FMEA. Adaptado de Instituto da Qualidade Automotiva (2003).	54
2.21	Exemplo de uma Matriz Função Componente (FCM). Adaptado de Werdich (2011).	55
2.22	Formulário da DRBFM. Adaptado de Toyota (2005).	56
2.23	As quatro fases do QFD. Adaptado de Yang e El-Haik (2008).	58
2.24	Quatro domínios do mundo do desenvolvimento do produto. Adaptado de Suh (2001).	59
2.25	Decomposição em zig-zag dos FRs e DPs. Adaptado de Suh (2001).	60
2.26	Exemplo de DSM. Adaptado de Hölttä-Otto e Weck (2007).	61

2.27	Classificações de tipos de projetos de acordo com diversos autores.	64
2.28	Mapeamento dos cinco tipos de projetos de desenvolvimento. Adaptado de Wheelwright e Clark (1992).	65
2.29	Modelo diamante NCTP. Adaptado de Shenhar <i>et al.</i> (2005).	67
2.30	Tipos de novos produtos. Adaptado de Cooper (2011).	70
3.1	Modelo de metodologia de projetos. Adaptado de Delgado Neto (2009)	74
3.2	Exemplo de diagrama de blocos.	76
3.3	Estrutura física do produto.	76
3.4	Fluxo de processo do Componente C.	77
3.5	Exemplo de desenho com parâmetros identificados.	77
3.6	Estrutura física do produto incluindo os parâmetros de projeto.	78
3.7	Processos considerados para a modelagem funcional.	79
3.8	Processo de sub-montagem.	79
3.9	Estrutura funcional do produto.	80
3.10	Matriz Processo Função Componente.	81
3.11	Sequência de processos considerados.	82
3.12	Processos descritos como uma sequência de funções básicas.	82
3.13	Função básica, função primária e função secundária.	83
3.14	Processo de uso.	83
3.15	Funções básicas.	83
3.16	Análise funcional baseada no ciclo de vida.	84
3.17	Classificação das funções.	84
3.18	Produto: roda dentada.	85
3.19	Processo de uso e função principal da roda dentada.	85
3.20	Processo de instalação da roda dentada.	86
3.21	Subfunções de fixar roda dentada.	86
3.22	Ferramenta para instalação da roda dentada.	86
3.23	Matriz Processo Função Desempenho.	87
4.1	Ilustração do rolamento de rolos.	90
4.2	Ilustração em corte da aplicação do rolamento de rolos.	90
4.3	Diagrama de blocos do rolamento de rolos.	91
4.4	Matriz para identificação das interfaces.	92
4.5	Estrutura física do conjunto rolamento de rolos.	92
4.6	Estrutura física do anel externo.	93
4.7	Estrutura física do anel elástico.	93
4.8	Estrutura física da gaiola.	93
4.9	Estrutura física do rolo.	94
4.10	Estrutura física dos componentes externos.	94
4.11	Estrutura física do rolamento de rolos.	95

4.12	Processos considerados do produto base.	96
4.13	Modelagem funcional do processo de uso.	98
4.14	PFCM do processo de uso.	99
4.15	Modelagem funcional do processo de instalação.	101
4.16	PFCM do processo de instalação.	102
4.17	Modelagem funcional do processo de montagem.	104
4.18	PFCM do processo de montagem.	105
4.19	Modelagem funcional do processo de retífica.	107
4.20	PFCM do processo de retífica.	108
4.21	PFPM do requisito de vida.	109
4.22	PFPM do requisito de torque e ruído.	110
4.23	PFPM do requisito de tempo de retífica.	111
5.1	Resumo da PFCM.	113
5.2	Adição da nova função no projeto base.	116
5.3	Integração dos novos componentes na análise estrutural do produto base.	116
5.4	Correlação entre a nova função e os parâmetros dos novos componentes.	117
5.5	Função adicional decorrente da integração da nova função demandada.	118
5.6	Influência das novas funções nos parâmetros existentes no projeto base.	118
5.7	Mapeamento das alterações não intencionais do projeto base.	119
5.8	Matriz Processo Função Desempenho	120
5.9	Identificação dos parâmetros físicos relevantes para a característica de desempenho.	120
5.10	Identificação das alterações não intencionais devido à melhoria de desempenho demandada.	121
A.1	Desenho de conjunto do rolamento.	134
A.2	Desenho final do anel externo.	135
A.3	Desenho de estágio do anel externo.	136
A.4	Desenho do anel elástico.	137
A.5	Desenho da gaiola.	138
A.6	Desenho do rolo.	139
B.1	PFCM completa do rolamento de rolos.	141
C.1	PFPM completa do rolamento de rolos.	143

Lista de Tabelas

2.1	Conjunto de fluxos da base funcional. Adaptado de Hirtz <i>et al.</i> (2002).	30
2.2	Conjunto de funções da base funcional. Adaptado de Hirtz <i>et al.</i> (2002).	31
2.3	Ponto focal da função. Adaptado de Toyota (2005).	57
2.4	Fatores de módulo relacionados às diferentes funções da empresa. Adaptado de Eggen (2003).	63
4.1	Componentes do rolamento de rolos	91

Lista de Abreviaturas e Siglas

Siglas

CAD Computer Aided Design

DoE Design of Experiments

DRBFM Design Review Based on Failure Mode

DSM Design Structure Matrix

DSSBF Drawing Shape Structure Behavior Function

FAD Function Analysis Diagram

FAST Function Analysis System Technique

FBS Function-Behavior-Strucuture ou Function-Behavior-State

FCM Function Component Matrix

FMEA Failure Mode and Effect Analysis

LCA Life Cycle Assessment

MBR Model-Based Reasoning

MFD Modular Function Deployment

NCTP Novelty, Complexity, Technology and Pace

NIST National Institute of Standards and Technology

NPR Número de Prioridade de Risco

PFCM Process Function Component Matrix

PFPM Process Function Performance Matrix

PLC Product Life Cycle

QFD Quality Function Deployment

SAVE Society of American Value Engineers

SBF Structure-Behavior-Function

TRIZ Teoriya Resheniya Izobreatatelskikh Zadatch ou Teoria Resolução Inventiva de Problemas

UCP Uncertainty, Complexity and Pace

SUMÁRIO

1	Introdução	19
1.1	Contextualização	19
1.1.1	Motivação	20
1.1.2	Hipótese	20
1.1.2.1	Sub-hipótese	20
1.2	Objetivos	20
1.2.1	Objetivos específicos	21
1.3	Delimitação	21
1.4	Organização	21
2	Revisão Bibliográfica	23
2.1	Função	23
2.1.1	Definição de função	23
2.1.2	Classificação das funções	25
2.1.2.1	Classificação de acordo com o propósito	25
2.1.2.2	Classificação de acordo com a hierarquia	25
2.1.2.3	Classificação de acordo com a necessidade	27
2.1.2.4	Outras classificações	27
2.1.3	Representação da função	28
2.2	Cliente	33
2.2.1	Modelo de Kano	34
2.3	Ciclo de Vida do Produto	35
2.4	Abordagem funcional	38
2.4.1	Aspectos gerais da modelagem funcional	40
2.4.2	Ferramentas de modelagem funcional	44
2.5	Ferramentas de desenvolvimento de produto	50
2.5.1	Análise do valor	50
2.5.2	Diagrama FAST	51
2.5.3	FMEA	52
2.5.4	DRBFM	55
2.5.5	QFD	57
2.5.6	Projeto axiomático	59
2.5.7	Projeto modular	60
2.5.7.1	DSM	61

2.5.7.2 MFD	62
2.6 Tipos de projeto	64
2.6.1 Tipos de projeto segundo Pahl e Beitz	64
2.6.2 Tipos de projeto segundo Wheelwright e Clark	65
2.6.3 Tipos de projeto segundo Shenhar e Dvir	66
2.6.4 Tipos de projeto segundo Evbuomwan <i>et al.</i>	68
2.6.5 Tipos de projeto segundo Cooper	69
3 Metodologia de pesquisa e proposta do procedimento	71
3.1 Metodologia de pesquisa	71
3.2 Premissas da proposta de modelagem funcional integral do produto	72
3.3 Proposta de modelagem funcional integral do produto	74
3.3.1 Composição do domínio físico da modelagem	75
3.3.2 Composição do domínio funcional da modelagem	78
3.3.3 Proposta de classificação de funções	82
3.3.4 Correlação entre funções e requisitos de desempenho	86
3.3.5 Organização da equipe e reuniões	87
4 Estudo de caso	90
4.1 Análise estrutural do produto base	91
4.2 Análise funcional do produto base	96
4.2.1 Uso	97
4.2.2 Instalação	100
4.2.3 Montagem	103
4.2.4 Retífica do anel externo	106
4.2.5 Matriz Processo Função Desempenho	109
5 Discussões dos Resultados	112
5.1 Discussão sobre os resultados do estudo de caso	112
5.2 Discussão sobre os resultados da modelagem funcional integral do produto . . .	113
5.3 Discussão sobre a aplicação da modelagem funcional proposta em projetos de- rivativos	115
5.3.1 Adição de função	115
5.3.2 Melhoria de desempenho	119
6 Conclusões	122
6.1 Trabalhos futuros	122
Referências	124
APÊNDICES	133

A – Desenhos técnicos do estudo de caso	133
B – Matriz Processo Função Componente do estudo de caso	140
C – Matriz Processo Função Desempenho do estudo de caso	142
ANEXOS	144
A – Definições de fluxo	144
B – Definições de função	154

1 Introdução

1.1 Contextualização

A capacidade de desenvolver produtos de uma empresa é determinante para sobrevivência e sucesso no mercado. Neste âmbito a metodologia e as ferramentas de desenvolvimento de produto têm um papel fundamental. A frequência de lançamento de novos produtos e a exigência dos clientes aumentam cada vez mais e, para acompanhar esta demanda, as empresas buscam maior eficiência no processo de desenvolvimento de produto, o que significa obter um produto mais robusto, em um tempo menor de entrega para o mercado e com um melhor aproveitamento dos recursos investidos.

É conhecido que a maior parte dos custos do projeto já são comprometidos nas fases iniciais do projeto e que omissões fazem com que falhas do projeto sejam detectadas tardiamente. As alterações implementadas em fases avançadas do projeto têm custo elevado e podem até inviabilizar o projeto. Portanto para se evitar omissões se faz necessária uma abordagem integral do produto.

Como Lawrence Miles bem definiu em seu livro "Técnicas de análise e engenharia de valor", o cerne do desenvolvimento de produto é: o cliente quer uma função. Portanto quando se trata da linguagem de funções, lida-se diretamente com a raiz da questão.

O conceito de função em metodologias de desenvolvimento de produto tem origem justamente com a análise de valor, onde se associam custos às funções do produto. Desde então, conceitos relativos à função foram e vêm sendo aplicados em diversas ferramentas de desenvolvimento de produto, como em análises funcionais para geração de conceitos de produto, ferramentas de análise de risco e ferramentas para a otimização do produto, para citar algumas das aplicações.

A modelagem funcional correlaciona as necessidades dos clientes, as quais são definidas com um alto nível de abstração, a parâmetros de projeto, que são definidos de maneira totalmente concreta. Neste contexto, a tese busca uma proposta de modelagem funcional integral do produto.

A proposta é baseada em projetos derivativos, os quais se caracterizam por herdar o princípio funcional de um projeto corrente adotado como projeto base para seu desenvolvimento. Este tipo de projeto é um dos tipos mais frequentes de projetos desenvolvidos, pois há muitos desenvolvimentos incrementais de produtos e as empresas aproveitam o seu conhecimento e suas instalações para lançar novos produtos, minimizando assim a necessidade de grandes investimentos e o tempo de lançamento de um novo produto.

O projeto derivativo dispõe de muita informação desde o seu início advinda do produto base adotado, que aliada com a potencialidade da modelagem funcional, pode trazer a eficiência que as empresas buscam para se manter competitivas.

A proposta da tese foi elaborada a partir da observação e integração de diversos conceitos estabelecidos na área de estudo de metodologia de desenvolvimento de produto, pas-

sando pelo conceito de função, cliente, ciclo de vida do produto, além das próprias ferramentas com abordagens funcionais do produto.

O resultado é um procedimento que facilita e viabiliza a modelagem funcional integral de produtos derivativos, reduz os riscos do projeto, suporta o desenvolvimento robusto e potencialmente reduz o tempo de desenvolvimento do produto. O resultado ainda auxilia na documentação e consolidação do conhecimento sobre o produto e potencializa o desenvolvimento de inovações.

Esta tese traz uma contribuição à área de pesquisa por desenvolver incrementalmente uma ferramenta de desenvolvimento de produto. Esta contribuição poderá ser depois adotada e aplicada a diversas áreas. A tese expõe uma proposta com argumentos e indícios científicos da sua eficácia e se propõe a disponibilizar este conhecimento para que seja aplicado nas mais diversas áreas, por exemplo em projetos inclusivos e na indústria têxtil, como o Laboratório de Sistemas Integrados da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP tem trabalhado.

1.1.1 Motivação

A motivação da tese é propiciar uma abordagem que minimize o risco de omissões no desenvolvimento de projetos derivativos. As omissões podem estar relacionadas a falhas, que, se descobertas tardiamente, podem até inviabilizar o projeto devido aos altos custos de alterações. Adicionalmente, a contribuição aos projetos derivativos é importante devido à alta frequência em que este tipo de projeto é desenvolvido nas empresas, tendo assim um grande potencial de aplicação. Por não se encontrar na literatura um procedimento que supra especificamente estes aspectos, constituiu-se a hipótese desta tese.

1.1.2 Hipótese

Pode-se estabelecer um procedimento para modelagem funcional do produto, com abordagem de forma integral, aplicável a projetos derivativos.

1.1.2.1 Sub-hipótese

Pode-se mapear os clientes de um projeto derivativo a partir da análise do ciclo de vida do produto base adotado para este projeto.

1.2 Objetivos

Desenvolver um procedimento para modelagem funcional do produto para projetos derivativos, que aborde o produto de forma integral, minimizando as omissões na identificação das funções do produto. Este procedimento deve auxiliar na orientação dos esforços de desenvolvimento e propiciar a busca de soluções mais objetivamente, além de reduzir os riscos do projeto e entregar um produto mais robusto.

1.2.1 Objetivos específicos

Para se atingir o objetivo geral desta tese são necessários cumprir com alguns objetivos específicos que estruturarão a mesma. Pode-se identificar os seguintes objetivos específicos:

- Convencionar uma definição de função;
- Definir um formato de representação da função;
- Identificar um procedimento para abordar o produto integralmente;
- Estabelecer um procedimento para a modelagem funcional.

1.3 Delimitação

A proposta desta tese foi concebida com foco em produtos mecânicos, sejam componentes ou sistemas, desde que o funcionamento essencial do produto esteja relacionado com soluções mecânicas e fenômenos físicos. O procedimento proposto não deve ser interpretado como uma exclusividade de produtos mecânico, no entanto tal delimitação se faz necessária para direcionar os estudos e servir como uma primeira área onde validá-lo. A extensão do procedimento a outros tipos de produto ou serviços é recomendada como trabalho futuro.

1.4 Organização

Esta seção explica a organização da tese, a qual está dividida em capítulos que apresentam a sistemática adotada.

O capítulo 1 contextualiza a tese. A motivação da tese é apresentada reforçando a justificativa de seu desenvolvimento. Os objetivos e hipóteses da tese são formalizados, assim com a delimitação do escopo da tese.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica dos conceitos e trabalhos científicos relacionados com o tema da tese. Primeiramente discorre-se sobre funções: definição, classificação e representação. Em seguida revisa-se os conceitos de cliente e de ciclo de vida do produto. Então o tema modelagem funcional é introduzido e descrito, seguido pela revisão das principais ferramentas de desenvolvimento de produto que se utilizam do conceito de função. Por fim algumas classificações de tipos de projetos são apresentadas.

O capítulo 3 mostra como a proposta da tese foi elaborada. Neste capítulo as informações apresentadas na revisão bibliográfica são discutidas e articuladas para compor a proposta de modelagem funcional integral do produto aplicável a projetos derivativos.

O capítulo 4 desenvolve um estudo de caso para validar a proposta de modelagem funcional e ilustrar o potencial da sua aplicação. O objeto de estudo é um rolamento de corpos rolantes, que é empregado em diversas aplicações na indústria.

O capítulo 5 discute os resultados que podem ser analisados do estudo de caso e a aplicação da modelagem funcional proposta em projetos derivativos.

O capítulo 6 sumariza as conclusões tiradas da análise dos resultados, evidencia as contribuições da tese para a área de conhecimento e apresenta sugestões de trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica dos tópicos relacionados ao escopo da tese, conforme apresentados no mapa mental da Figura 2.1. Iniciando pelo tópico função, discorre-se sobre definição, classificação e representação. Em seguida revisa-se a definição de cliente e as abordagens do ciclo de vida do produto. Apresenta-se o conceito da abordagem funcional e, mais detalhadamente, sobre modelagem funcional. As principais ferramentas de desenvolvimento de produto que se utilizam diretamente o conceito de função são descritas. E completando a revisão bibliográfica, são apresentadas classificações de tipos de projetos.

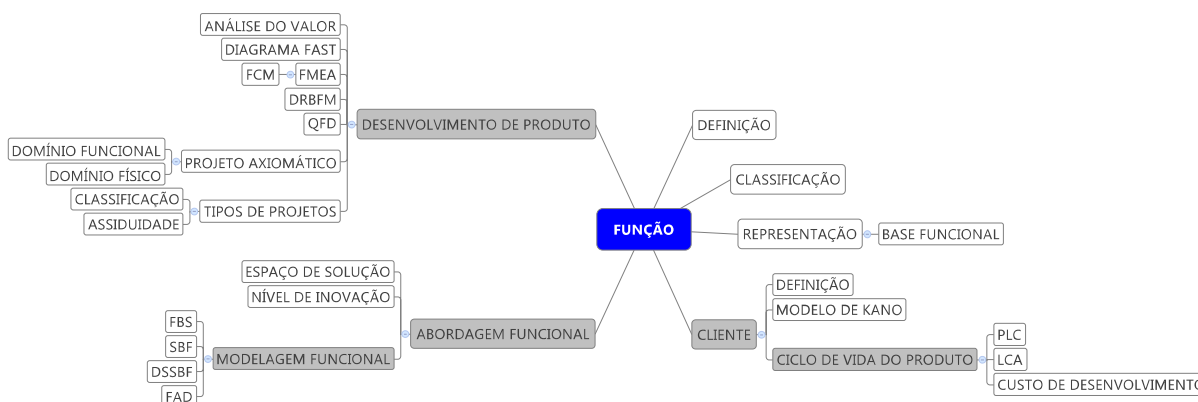


Figura 2.1: Mapa mental da revisão bibliográfica.

2.1 Função

2.1.1 Definição de função

Função é um conceito chave no desenvolvimento de projetos, pois idealmente o desenvolver do projeto produz um projeto de um objeto que satisfaça as funções demandadas (SHIMOMURA *et al.*, 1995).

Apesar de anos de pesquisa, existem várias questões com o termo função, como a falta de uma definição e um significado comum, o que cria confusões na comunicação e na documentação e obstrui o ensino e formalização (CHAKRABARTI *et al.*, 2013) (VERMAAS, 2013). A seguir apresenta-se a definição de função segundo alguns autores:

Miles (1972) define função simplesmente como "*to do something*", ou seja, fazer algo.

Hubka e Eder (1988) definem função como capacidades exigidas ou desejadas de um sistema que permita que o sistema desempenhe os seus objetivos pretendidos.

Rodenacker (1991) define função como uma transformação de entradas em saídas.

Pahl *et al.* (2005) definem função como a relação entrada/saída pretendida de um sistema cujo propósito é desempenhar uma tarefa. A tarefa é a conversão entrada/saída e função é a abstração da tarefa.

De maneira geral, nota-se que as definições na literatura seguem alguns padrões. Chakrabarti *et al.* (2013) fazem uma revisão ampla das definições existentes de função, a partir da onde foram identificadas algumas abordagens:

1. Abordagem por nível de abstração

Alguns autores definem função de uma maneira mais abstrata, como função é fazer algo ou o propósito de um artefato. Outros autores definem de maneira mais concreta, como função sendo uma transformação de entradas em saídas.

2. Abordagem requisito-solução

Alguns autores descrevem funções como sendo requisitos a serem cumpridos, outros como soluções para cumprir estes requisitos.

3. Abordagem sistema-ambiente

Alguns autores descrevem as funções como pertencentes ao sistema, outros como os efeitos do sistema no ambiente.

4. Abordagem projetista-usuário

Alguns autores tratam funções como intenções do projetista e outros como intenções do usuário.

Independentemente da abordagem e da perspectiva, função sempre está relacionada com intenções e mudanças (CHAKRABARTI *et al.*, 2013). A abordagem e perspectiva utilizadas não alteram o produto analisado, porém pode favorecer a análise dependendo do objetivo almejado.

A ambiguidade do conceito de função é difícil de se resolver. É importante manter em mente que funções não existem na realidade e são construções mentais que sempre exigem interpretação (HOWARD E ANDREASEN, 2013).

Vermaas (2013) discute a coexistência de vários significados de função na engenharia e avalia o impacto metodológico que pode ir contra a máxima da ciência e tecnologia, de que a ambiguidade é vista como negativa. As diversas definições de função ainda podem ser claras e úteis se os diferentes significados são distintos e bem definidos, mas deve ser declarado qual significado de função é usado no trabalho em questão.

Projetos são sempre definidos dentro de certos limites. Um dos limites mais importantes, é por exemplo o custo. Outros limites comuns podem ser o tamanho aceitável ou o peso do produto. Alguns dos limites são requisitos de desempenho, enquanto que outros podem ser requisitos legais ou de segurança. Este conjunto de requisitos inclui a especificação de desempenho do produto. A relação dos objetivos do projeto ou funções são consideradas algumas vezes como sendo especificações de desempenho, mas isto não está realmente correto. Objetivos e funções são declarações do que o projeto deve fazer, mas eles não são normalmente colocados em termos de limites precisos, o que é feito pela especificação de desempenho (CROSS, 2008).

2.1.2 Classificação das funções

Conforme os métodos de desenvolvimento são estudados, a utilidade das metodologias baseadas em funções se torna mais clara. Contudo, para que estas metodologias sejam plenamente utilizadas, precisa haver uma padronização das funções (KIRSCHMAN *et al.*, 1996). Uma das maneiras de se propiciar a comunicação, a documentação, o ensino e a formalização é havendo uma classificação. As funções podem ser classificadas a partir de várias perspectivas, conforme apresentado a seguir (Figura 2.2).

Propósito	Hierarquia	Outras classificações
Uso Estima Akiyama, 1991 Baxter, 2011 Csillag, 1991	Básica ou Primária Secundária Csillag, 1995 Global ou Total Primária Secundária Pahl <i>et al.</i>, 2005	Básica Adicional De Unidade Preservação de danos Auto-proteção Toyota, 2005
Necessidade Necessária Desnecessária Akiyama, 1991	Global Parcial Elementar Back <i>et al.</i>, 20008	Extrínseca Intrínseca Kaufman e Woodhead, 2006

Figura 2.2: Classificações de funções de acordo com diferentes autores.

2.1.2.1 Classificação de acordo com o propósito

As funções de uso possibilitam o funcionamento do produto, enquanto as de estima são aquelas características que tornam o produto atrativo e excitam o consumidor, aumentando o desejo de possuí-lo. As funções de estima estão geralmente ligadas aos efeitos sociais, culturais e comerciais do produto (AKIYAMA, 1991).

As funções de uso são mensuráveis, enquanto as de estima são de natureza subjetiva, não mensuráveis, podendo ser avaliadas por comparações (BAXTER, 2011) (CSILLAG, 1995).

2.1.2.2 Classificação de acordo com a hierarquia

Para Csillag (1995), funções são classificadas em básicas ou primárias e secundárias. A função básica ou primária é aquela sem a qual o produto ou serviço perderá seu valor e, em alguns casos, a identidade. As funções secundárias ajudam o produto a ser vendido. Existem outras funções secundárias que ajudam ou possibilitam o desempenho das demais, quer secundária ou primária.

Pahl *et al.* (2005) definem a função global (Figura 2.3) da seguinte maneira: "se o núcleo da tarefa global estiver formulado, então a função global pode ser indicada, a qual aponta,

mediante utilização de um diagrama de blocos, a inter-relação entre variáveis de entrada e de saída com referência à conversão de energia, material e/ou sinal, de forma neutra com relação à solução".



Figura 2.3: Função global. Adaptado de Pahl *et al.* (2005).

Em alguns pontos Pahl *et al.* (2005) também se referem à função global como função total (Figura 2.4), porém esta é uma questão de tradução, onde se encontra na versão em inglês "*overall function*" e na versão alemã "*Gesamtfunktion*".

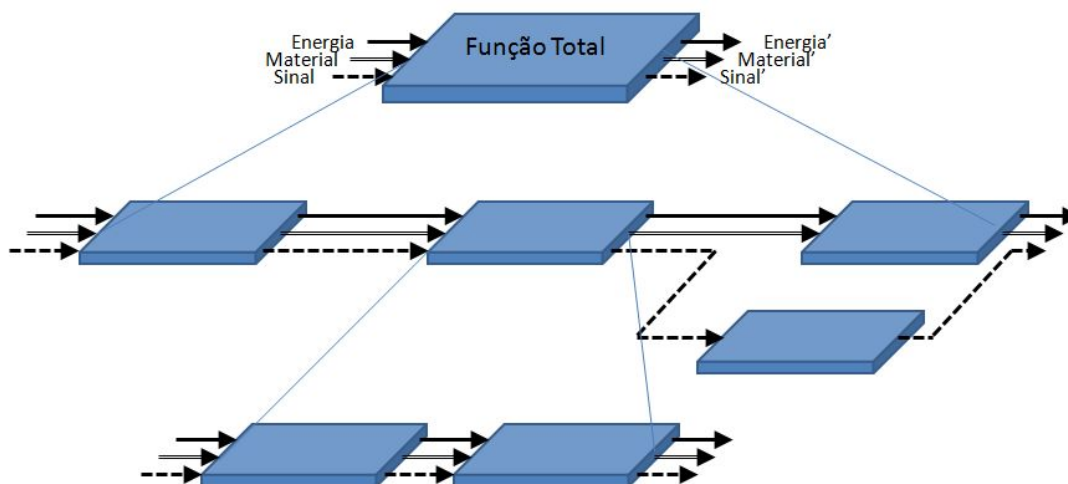


Figura 2.4: Desdobramento funcional da função total. Adaptado de Pahl *et al.* (2005).

Pahl *et al.* (2005) diferenciam funções principais de funções secundárias, onde as funções principais são subfunções que servem diretamente à função global e as funções secundárias, no sentido de funções auxiliares, somente contribuem indiretamente para a função global.

Rozenfeld *et al.* (2006) apresentam uma abordagem onde nas estruturas de funções, tem-se uma descrição que relaciona o sistema técnico e a física do problema por meio de fluxos básicos de energia, materiais e sinais. De início, define-se a função total, a qual é em geral representada graficamente por uma transformação que ocorre em uma caixa-preta com entradas e saídas definidas.

Back *et al.* (2008) adota os termos função global, função parcial e função elementar, listando do maior para o menor nível de complexidade, porém sem definições mais formais.

Ulrich e Eppinger (2008) mencionam somente uma "*overall function*" e "*sub-functions*", que pode-se traduzir como função geral e subfunções respectivamente, sem detalhar as definições específicas de cada uma.

Segundo Baxter (2011), as funções de um produto podem ser classificadas quanto à hierarquia em principal, básicas e secundárias. Para o autor, a função principal explica a própria existência do produto sob o ponto de vista do consumidor. A função básica é aquela que faz funcionar o produto. Sem ela, o produto ou serviço perderá o seu valor e, em alguns casos, até a identidade. As funções secundárias são aquelas que suportam, ajudam, possibilitam ou melhoram a função básica.

2.1.2.3 Classificação de acordo com a necessidade

Funções necessárias são aquelas demandadas pelo cliente ou relacionadas com estas demandas. Funções desnecessárias não são nem demandadas pelo cliente e nem estão relacionadas às demandas do cliente e que podem ser eliminadas por mudanças no projeto atual. Elas também podem ser funções que as melhorias do projeto atual as tornaram desnecessárias (AKIYAMA, 1991).

2.1.2.4 Outras classificações

Há outras classificações na literatura, como a utilizada na ferramenta DRBFM (*Design Review Based on Failure Mode*), onde a tabela focal de funções utiliza como referência cinco grupos de funções (TOYOTA, 2005):

- Função básica: função que representa o trabalho essencial necessário para cumprir o propósito de um produto;
- Funções adicionais: funções adicionadas ao produto para aumentar o seu apelo, ou como demandado em diversas condições tais como leis e regulamentações;
- Função da unidade: função pertencente a instalação de um produto para integrar componentes, portabilidade ou armazenamento;
- Função de prevenção de danos: função para prevenir que um produto cause problemas (vibração, ruído, odor etc) para o usuário;
- Função de auto-proteção: função para proteger as pessoas de se machucarem durante o uso, manufatura ou montagem.

Outras classificação possível segundo Kaufman e Woodhead (2006) é:

- Funções extrínsecas: apesar de estarem fora do sistema estudado, são necessárias para o propósito a ser alcançado. Por exemplo, se tratando de fabricantes de televisões, as funções extrínsecas seriam relacionadas a como os usuários controlam as operações do funcionamento interno da televisão, tais como níveis de volume e mudanças de canal;

- Funções intrínsecas: são aquelas dentro do linhas do escopo. Estas são as funções dentro do sistema que estão sendo estudadas que devem ser executadas através de soluções para desempenhar as funções extrínsecas. Quando o usuário da televisão pressiona um botão do controle remoto, as funções intrínsecas fazem o trabalho necessário para alcançar a satisfação do usuário.

2.1.3 Representação da função

Desde o princípio das análises funcionais com Miles uma função já era representada pelo clássico par "verbo + substantivo" (MILES, 1972), desde então esta fórmula vem sendo reproduzida na maioria das outras ferramentas que se utilizam de funções. Uma representação formal da função é necessária para suportar a modelagem funcional e uma terminologia padronizada leva a resultados repetíveis de tais representações. Esta representação formal é referida como "*functional basis*", apresentada por Stone e Wood (2000), que será traduzido como base funcional.

Esta base funcional foi aprimorada e apresentada por Hirtz *et al.* (2002) onde se elabora um trabalho de reconciliação e integração das pesquisas independentes de Little e Wood (1997), Szykman *et al.* (1999a) e Stone e Wood (2000), para convergir para uma base funcional que cubra as atividades de desenvolvimento de produto em diferentes escalas de complexidades do produto.

A necessidade de representações formalizadas nos desenvolvimentos baseados em funções é frequentemente negligenciada na literatura, porém ela é importante por uma série de motivos (HIRTZ *et al.*, 2002).

O primeiro motivo é a necessidade de se reduzir a ambiguidade no nível da modelagem. Ambiguidades podem ocorrer quando vários termos são utilizados para dizer a mesma coisa, ou quando o mesmo termo é utilizado para diferentes significados. A compilação de um conjunto de termos em uma base concisa não elimina este problema, porém reduz significativamente a sua ocorrência.

Uma questão relacionada é a da singularidade, não no nível dos termos individuais como os sinônimos, mas no nível conceitual. Quanto maior o número de termos existentes no vocabulário, mais maneiras diferentes existem de modelar ou descrever um dado conceito de projeto. Isto faz com que o processamento da informação que foi representada seja mais difícil, seja por uma pessoa tentando interpretar a informação modelada por outra, ou seja por algoritmos desenvolvidos para automatização de projeto ("*function-based reasoning*"). Este problema é mitigado abordando de maneira minimalista a terminologia e os vocabulários formais.

O terceiro motivo para se desenvolver uma base funcional é que aumenta a uniformidade da informação dentre os modelos funcionais. Esta uniformidade facilitará a troca de informação da função entre os pesquisadores e desenvolvedores.

A base funcional pode formar descrições funcionais que seguem também ao formato padrão verbo-substantivo, onde o termo da função ocupa a posição do verbo e o termo do fluxo

ocupa a posição do substantivo.

O conjunto de fluxos foi adotado de Pahl e Beitz (1977), que apresentam os fluxos de material, energia e sinal, baseados nos conceitos de Weizsäcker (1971 citado por PAHL *et al.*, 2011). Estes fluxos compõem o nível mais alto de abstração.

A base funcional possui três níveis de abstração tanto para a função quanto para o fluxo, que em ordem decrescente são: classe ou primário, secundário e terciário. Quanto maior o número do nível, maior o nível de especificidade. O nível terciário oferece uma função e definição mais específica do que o nível de classe ou secundário, levando a tecnologias ou princípios físicos específicos.

A Tabela 2.1 apresenta as três classes de fluxos (material, energia e sinal) e os seus respectivos termos de níveis secundário e terciário. As definições dos fluxos são dadas no Anexo A. A Tabela 2.2 apresenta as classes de funções e os seus respectivos termos de níveis secundário e terciário. Assim como uma lista de correspondentes para cada caso para auxiliar na identificação da função adequada. As definições e exemplos para cada uma das funções são apresentadas no Anexo B.

Os trabalhos conciliados por Hirtz *et al.* (2002) descrevem completamente o universo eletro-mecânico, como se pode notar pelos termos apresentados nas Tabelas 2.1 e 2.2.

Um termo de função pode ser selecionado de qualquer um dos níveis, dependendo da especificidade desejada. Termos de fluxo também nos três níveis. Um fluxo primário é formado simplesmente pelo termo de classe ou primário, tal como *material*. Um fluxo secundário é descrito pelo termo primário mais o termo secundário. Por exemplo, *energia humana* é um fluxo secundário. Um fluxo terciário é descrito por um termo primário mais um termo terciário. Um exemplo é o fluxo *sinal auditivo*.

O grau de especificidade depende do tipo de projeto e dos requisitos de cliente. Usando uma descrição de fluxo mais genérica, obtém-se uma estrutura funcional genérica e uma gama maior de variantes do conceito. Contudo, se os requisitos de cliente exigirem fluxos mais concretos, então um maior nível de especificidade é recomendável.

Tabela 2.1: Conjunto de fluxos da base funcional. Adaptado de Hirtz *et al.* (2002).

Classe (Primário)	Secundário	Terciário
Material	Homem	
	Gás	
	Líquido	
	Sólido	Objeto
		Particulado
		Compósito
	Plasma	
	Mistura	Gás-gás
		Líquido-líquido
		Sólido-sólido
Sinal		Sólido-líquido
		Líquido-gás
		Sólido-gás
		Sólido-líquido-gás
		Coloidal
	Estado	Auditivo
		Olfativo
		Táctil
		Palatal
		Visual
Energia	Controle	Analógico
		Digital
	Humana	
	Acústica	
	Biológica	
	Química	
	Elétrica	
	Eletromagnética	Óptica
		Solar
	Hidráulica	
	Magnética	
	Mecânica	Rotacional
		Translacional
	Pneumática	
	Radioativa/Nuclear	
	Térmica	

Tabela 2.2: Conjunto de funções da base funcional. Adaptado de Hirtz *et al.* (2002).

Classe (Primária)	Secundária	Terciária	Correspondentes
Ramificar	Separar		Isolar, romper, desunir
		Dividir	Destacar, liberar, classificar, partir, desconectar, subtrair
		Extrair	Refinar, filtrar, purificar, coar, limpar
		Remover	Cortar, furar, tornear, polir, arear
Canalizar	Distribuir		Difundir, dissipar, dispersar, divergir, espalhar, disseminar
	Importar		Inserção de forma, permitir, inserir, captar
	Exportar		Dispor, expulsar, emitir, esvaziar, remover, destruir, eliminar
	Transferir		Carregar, transmitir
	Transportar		Avançar, erguer, mover
Conectar	Guiar	Transmitir	Conduzir, levar
			Direcionar, deslocar, conduzir, endireitar, trocar
	Transladar		Mover, realocar
	Rotacionar		Girar, virar
	Permitir GDL		Restringir, desatar, destravar
	Acoplar		Associar, conectar
Controlar magnitude	Unir		Montar, fixar
	Vincular		Atar
	Misturar		Adicionar, combinar, amalgamar, fundir, acondicionar
	Atuar		Habilitar, iniciar, começar, ligar
	Regular		Controlar, equalizar, limitar, manter
	Aumentar		Permitir, abrir
	Reduzir		Fechar, adiar, interromper
	Alterar		Ajustar, modular, transpor, inverter, normalizar, retificar, restabelecer, escalar, variar, modificar
	Incrementar		Amplificar, realçar, ampliar, multiplicar
	Decrementar		Atenuar, amortecer, decrementar
	Dar forma		Compactar, comprimir, esmagar, perfurar, deformar, modelar

Continua na próxima página

Tabela 2.2: continuação

Classe (Primária)	Secundária	Terciária	Correspondentes
Converter	Cessar	Condicionar	Preparar, adaptar, tratar
			Terminar, parar, pausar, interromper, conter
	Converter	Impedir	Inabilitar, desligar
		Inibir	Proteger, isolar, abrigar, resistir
			Condensar, criar, decodificar, diferenciar, digitalizar, codificar, evaporar, gerar, integrar, liquefazer, processar, solidificar, transformar
Provisão	Armazenar		Acumular
		Conter	Captar, enclausurar
Sinal		Coletar	Absorver, consumir, preencher, reservar
	Fornecer		Prover, reabastecer, recuperar
	Sentir		Perceber, determinar
		Detectar	Discernir, perceber, reconhecer
		Medir	Identificar, localizar
		Indicar	Anunciar, mostrar, denotar, registrar, anotar
		Rastrear	Marcar, cronometrar
		Exibir	Emitir, expor, selecionar
Suportar	Processar		Compara, calcular, checar
	Estabilizar		Firmar
	Prender		Restringir, segurar, colocar, fixar
	Posicionar		Alinhar, localizar, orientar

2.2 Cliente

Em desenvolvimento de produto encontra-se sempre o termo cliente, o qual neste contexto é um sinônimo de usuário. Segundo o dicionário Michaelis (2015), usuário é aquele que, por direito de uso, frui as utilidades das coisas.

Tendo este conceito em mente, imediatamente se associa o usuário final do produto ao cliente do produto. Esta associação é correta, porém não significa que o usuário final seja o cliente único e exclusivo do produto do ponto de vista de desenvolvimento de produto.

A definição de cliente para uma FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), assim como para um DRBFM, não é apenas o usuário final, mas também são clientes os engenheiros e equipes responsáveis pelo projeto de montagens de níveis superiores ou do produto final e engenheiros responsáveis pelo processo/manufatura nas atividades como manufatura, montagem e assistência técnica. O cliente pode também ser uma operação subsequente do processo de manufatura, uma operação de assistência técnica ou regulamentações governamentais (INSTITUTO DA QUALIDADE AUTOMOTIVA, 2003) (TOYOTA, 2005) (STAMATIS, 2003).

A norma DIN EN 1325-1 define o usuário como qualquer pessoa ou organização para a qual o produto é desenvolvido e a qual se beneficia de pelo menos uma de suas funções a qualquer momento durante seu ciclo de vida. E ainda destaca que um usuário pode ser tanto um cliente externo quanto interno (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 1996).

Os requisitos têm diversas origens, desde no desejo do próprio usuário final, até em leis, regulamentações e normas. Todos os requisitos devem ser atendidos pelo produto, cujo propósito de existência é servir ao usuário final.

Dado que o produto está em uso pelo cliente final, isto implica que todos os processos predecessores ao uso devem ter ocorrido. E uma vez que o produto exista, os processos pós-uso, como manutenção e reaproveitamento, também terão que ocorrer.

Por exemplo, para que o usuário final possa utilizar o produto, primeiramente este produto precisa ser montado. A execução desta tarefa é executada pelo montador, o qual por sua vez tem algumas necessidades que precisam ser atendidas para que ele execute esta tarefa. Traduzindo nos termos adotados neste trabalho, consegue-se relacionar o montador a um cliente e suas tarefas a funções.

Desta mesma maneira pode-se interpretar que cada um dos envolvidos em todos os processos do ciclo de vida do produto são clientes deste produto e que suas ações ou execuções de tarefas relacionadas ao produto são funções demandadas. O cumprimento destas funções e a sua relação com o a satisfação do cliente é discutida no modelo de Kano (Seção 2.2.1).

2.2.1 Modelo de Kano

É fácil para os times de projeto entenderem que um desempenho melhor do produto pode resultar numa satisfação maior do cliente. No entanto, a relação entre a satisfação do cliente e o desempenho do produto é mais complicada que isto. Para algumas características do produto, a satisfação do cliente pode ser aumentada simplesmente com uma pequena melhoria no desempenho, enquanto que para outras características, a satisfação do cliente somente pode ser melhorada um pouco quando o desempenho do produto tem um melhoramento significativo (SHEN *et al.*, 2000).

Kano desenvolveu em 1984 um diagrama muito útil para caracterizar as necessidades do cliente. O modelo de Kano pode auxiliar a ganhar um profundo conhecimento da satisfação do cliente. As características do produto são divididas em três categorias distintas, cada uma delas afeta a satisfação do cliente de uma maneira diferente (SHEN *et al.*, 2000).

- Requisitos básicos ou atributos obrigatórios: os clientes tomam como certo os seus cumprimentos. Estes requisitos não são declarados pelo cliente. Contudo, se o produto não os cumprir, o cliente pode se tornar muito insatisfeito. Por outro lado, o cumprimento destes requisitos não aumentam a satisfação do cliente (Figura 2.5). Elas servem como os requisitos mínimos (STAMATIS, 2003) (SHEN *et al.*, 2000) (SAUERWEIN *et al.*, 1996).
- Requisitos de desempenho ou atributos unidimensionais: estes são os requisitos que os clientes conseguem articular e estão claros em suas mentes quando estão fazendo escolhas e avaliando opções. São os requisitos de Kano mais visíveis e provavelmente os mais fáceis de se identificar, porque os clientes falam livremente sobre estes tipos de requisitos. Os requisitos de desempenho são tipicamente levantados através de métodos clássicos de pesquisa como entrevistas, questionários e grupos alvo. Como ilustrado na Figura 2.5, quanto melhor eles são executados, mais satisfação eles trazem. E inversamente, quanto pior são executados, mais insatisfação suscitam nos clientes (STAMATIS, 2003) (SHEN *et al.*, 2000) (SAUERWEIN *et al.*, 1996).
- Requisitos de empolgação ou atributos atraentes: a ausência de atributos atraentes não causa insatisfação, pois eles não são nem esperados e muito menos expressados pelos clientes. O cumprimento destes requisitos leva a uma satisfação mais do que proporcional (STAMATIS, 2003) (SHEN *et al.*, 2000) (SAUERWEIN *et al.*, 1996).

Deve-se observar que o mesmo requisito pode mudar de categoria ao longo do tempo dependendo do produto e/ou das expectativas, assim como do valor para o cliente. Especificamente, requisito de empolgação pode se tornar requisito de desempenho e então se tornar requisito básico (STAMATIS, 2003) (SHEN *et al.*, 2000).

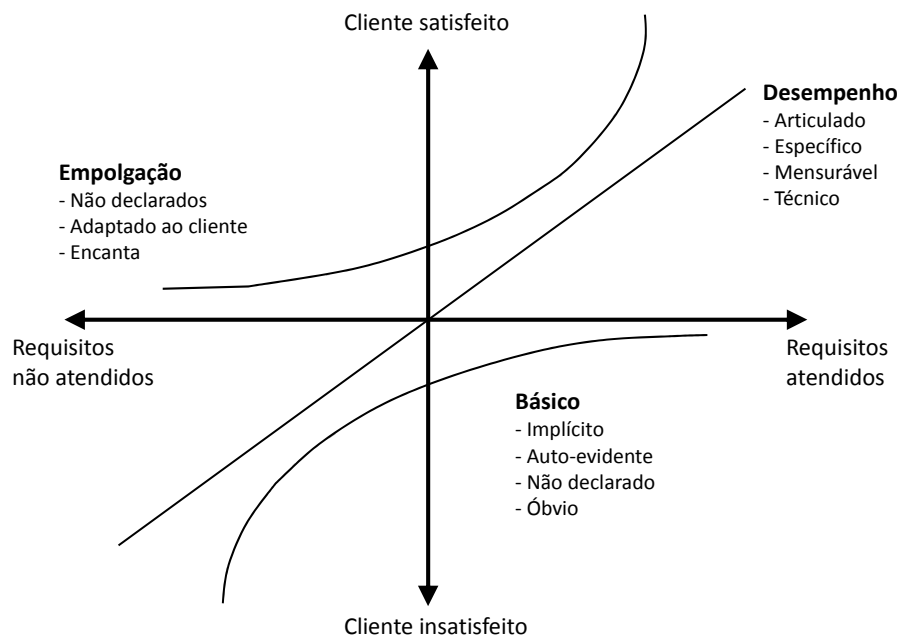


Figura 2.5: Modelo de Kano. Adaptado de Sauerwein *et al.* (1996).

2.3 Ciclo de Vida do Produto

Estudos relacionados ao ciclo de vida se apresentam normalmente segundo duas abordagens, uma mercadológica e outra ecológica. A abordagem mercadológica é conhecida como ciclo de vida do produto ou "*Product Life Cycle*" (PLC). Kotler e Armstrong (1999) definem as fases como: desenvolvimento do produto, introdução, crescimento, maturidade e declínio.

A segunda abordagem considera os estágios da vida de um produto para avaliar os impactos ambientais relacionados a cada processo, por exemplo, extração da matéria-prima, manufatura, distribuição, uso, manutenção, descarte, reuso e reciclagem (Figura 2.6). Esta abordagem é conhecida como avaliação do ciclo de vida ou "*Life Cycle Assessment*" (LCA) (BARBIERI, 2006). Na prática esta análise é referida como "do berço ao túmulo" ou "*cradle to grave*".

Nota-se que a abordagem mercadológica auxilia o gerenciamento do projeto de um produto, pois caracteriza um comportamento intrínseco ao mercado, independentemente das características técnicas, as quais podem amplificar ou reduzir a curva característica de vida do produto.

Dado o conceito de cliente explicado na seção anterior, a abordagem ecológica LCA pode auxiliar na identificação de todos os processos relacionados com o produto e consequentemente todos os seus clientes.

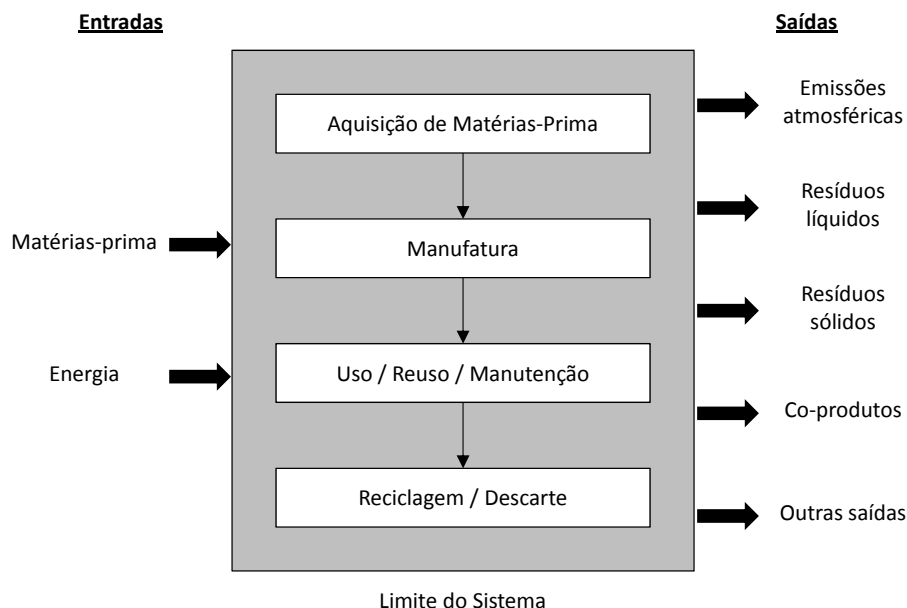


Figura 2.6: Estágios do ciclo de vida. Adaptado de Curran (2006).

As decisões tomadas no início do projeto têm um alto risco por tratar de situações futuras que impactarão no resultado do projeto. Decisões referentes à escolha de alternativas ocorridas no início do ciclo de desenvolvimento são responsáveis por 80% a 90% do custo final do produto. Os custos incorridos na fase de desenvolvimento do produto são relativamente baixos em relação ao custo final. No entanto a fase de desenvolvimento é bastante crítica quanto ao comprometimento do custo final do produto, o que resulta em uma pequena margem de redução de custos na fase de produção do produto, como ilustra a Figura 2.7 (ROZENFELD *et al.*, 2006).

Adicionalmente, a introdução de mudanças em etapas posteriores, como na fase de engenharia de produção, pode implicar em elevadíssimos custos. Qualquer modificação em estágios avançados requer custos muito maiores do que nas fases iniciais (Figura 2.8) (BAXTER, 2011).

Por causa dos significativos custos comprometidos nas fases iniciais de projeto e pelo alto custo das mudanças de projeto nas fases posteriores, deve-se abordar sistematicamente o produto (WERDICH, 2011) e buscar métodos para listar criteriosamente as funções para evitar omissões que podem comprometer o projeto (TOYOTA, 2005) (SUH, 1990).

Por isto é importante tratar o produto integralmente, considerando todos os aspectos a ele relacionados. A proposta da tese é uma abordagem funcional, portanto deve-se garantir que todas as funções sejam consideradas e isto acontece se todos os clientes forem identificados, o que por sua vez é possível se todos os processos do ciclo de vida do produto forem tratados.

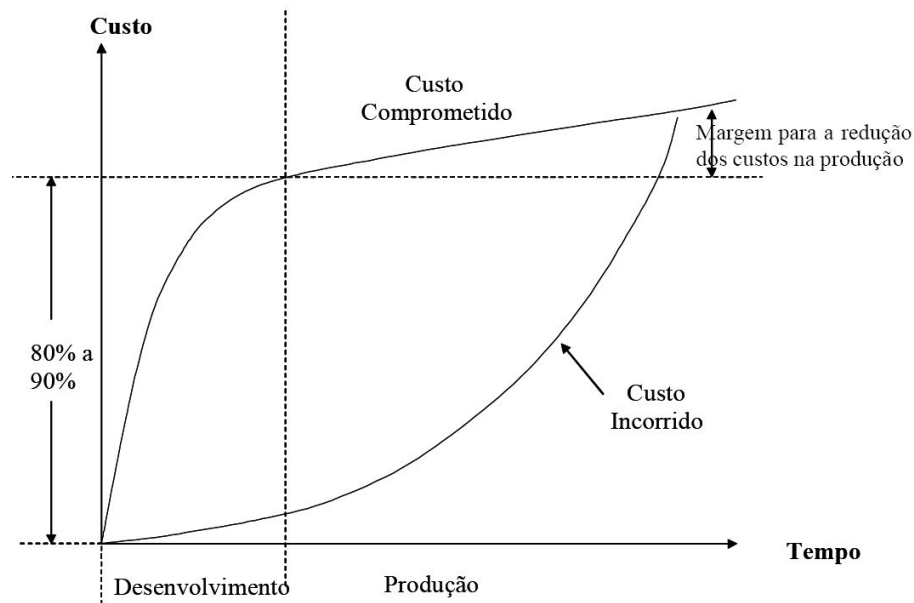


Figura 2.7: Curva de comprometimento do custo do produto (ROZENFELD *et al.*, 2006).

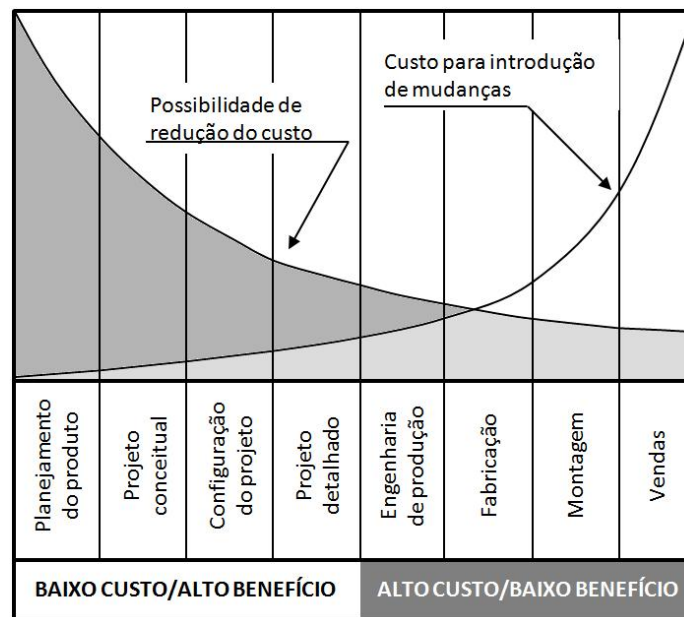


Figura 2.8: Custos em diferentes estágios do processo de desenvolvimento. Adaptado de Baxter (2011).

Clausing (1994) defende que o desenvolvimento holístico é o processo ideal por considerar todos os parâmetros do sistema total. No desenvolvimento de produto tradicional, o conjunto total de parâmetros que precisam ser definidos e quantificados são decompostos de três maneiras: por fase do programa, subsistema e disciplina. Isto forma uma estrutura tridimensional, com cada célula definida por uma única fase, subsistema e disciplina. Em um sistema complexo, esta estrutura pode ter facilmente várias centenas de células, cada uma com seus respectivos conjuntos de parâmetros dedicados. Sub-otimizações são feitas dentro de cada célula com atenção inadequada aos parâmetros que estão fora desta célula. O melhor processo elimina

este tipo de particionamento em células. Todos os parâmetros que são relevantes para a decisão são considerados no processo. Quais parâmetros são considerados relevantes é determinado pelas suas funções em satisfazer as necessidades do cliente.

O ancestral provável mais importante dos métodos de resolução de problema foi René Descartes com seu livro "*Discours de la Méthode*" de 1681 (FRANKE, 2007). Desde Descartes a estratégia geral é:

- Esclarecer o problema;
- Decompor o problema;
- Buscar soluções parciais;
- Analisar e avaliar;
- Concluir.

A metodologia de desenvolvimento de produto clássica segue fortemente esta estratégia. O desenvolvimento de produto moderno se tornou um processo altamente complexo, tendo que atingir um grande número de objetivos e condições diferentes. Como os objetivos, condições e propriedades estruturais dos produtos são altamente inter-relacionados, torna-se impossível encontrar um ponto ótimo para o produto como um todo como uma soma ou produto de pontos ótimos locais (FRANKE, 2007).

Um dos primeiros autores a dar uma abordagem holística do processo de desenvolvimento de produto foi Wögerbauer (1942 citado por FRANKE, 2007). Há pesquisas como de Tomiyama *et al.* (1997), que devido a intensificação da atenção aos problemas ambientais globais, busca integrar o desenvolvimento de produto com o projeto de ciclo de vida do produto, pois muitas decisões tomadas no projeto impactam mais tarde também nos custos ambientais.

2.4 Abordagem funcional

Werdich (2011) explica as abordagens por componente e por função aplicadas ao FMEA. A abordagem por componente é histórica e o "pensamento funcional", como hoje em dia está presente no desenvolvimento de produto mundialmente, não existia. Na abordagem por componente o produto é pensado como uma vista explodida e considera-se cada um dos componentes (Figura 2.9). Então questiona-se o que cada componente faz, quais requisitos ele deve satisfazer, em quais atividades ele atua, o que pode dar errado com este componente e quais seriam as consequências para todo o sistema. O resultado deste procedimento era que geralmente se tratava somente das falhas. Esta abordagem conduz a este ponto e os produtos frequentemente não eram otimizados para as funções. Na abordagem funcional a função está no foco e o sistema é concebido. Erros sistemáticos podem ser resolvidos já na fase de conceito.

WÖGERBAUER, H. *Die Technik des Konstruierens*. Oldenbourg, 1942.

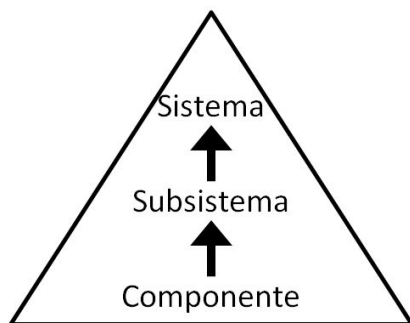
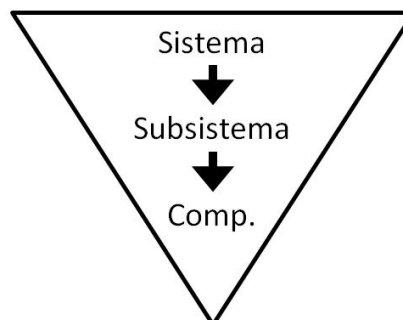
Abordagem por Componente**Abordagem por Função**

Figura 2.9: Abordagem por componente e por função. Adaptado de Werdich (2011).

Na abordagem por função compreende-se o sistema. Consegue-se eliminar sistematicamente falhas desde o início do projeto, desde que seja abordado de maneira rastreável e objetiva. Com isto consegue-se identificar novas ideias e soluções para problemas no tempo certo. É importante observar que uma análise estrutural hierárquica análoga à lista de peças suporta ambas as abordagens e não significa que está se utilizando de uma abordagem por componente. A abordagem por componente é absolutamente diferente de uma análise estrutural (WERDICH, 2011).

Ao resolver problemas durante a reengenharia ou otimização de um produto, a maioria dos engenheiros foca no problema central identificado. Desta maneira soluções possíveis podem ser negligenciadas, as quais apareceriam se as hipóteses fossem derivadas de um nível de abstração funcional mais alto. Para isto, análise funcional e modelo funcional são utilizados para definir o problema, inclusive no contexto do TRIZ (*Teoriya Resheniya Izobreatatelskikh Zadatch* ou Teoria Resolução Inventiva de Problemas) (DANILIDIS *et al.*, 2011).

A análise funcional tem suas origens na metodologia de análise de valor ou engenharia do valor desenvolvida por Lawrence Miles. A análise do valor busca designar frações do custo do produto às funções do mesmo, então os custos das funções orientam os esforços de projeto (MILES, 1972).

A técnica de análise do valor foi desenvolvida após a Segunda Guerra Mundial, nos Estados Unidos, na General Electric, no final da década de 1940. A análise do valor pode ser definida como um processo de revisão sistemática, que é aplicado a projetos de produtos existentes, com o objetivo de atender aos requisitos demandados pelo cliente, de maneira consistente com o desempenho especificado, ao menor custo possível (RICH E HOLWEG, 2000).

Durante a Segunda Guerra Mundial, o governo dos Estados Unidos foi forçado a priorizar o uso estratégico dos metais para garantir que o esforço da guerra estivesse adequadamente suportado. Os fabricantes que não estavam diretamente ligados à guerra se depararam, de repente, com restrições ao uso de materiais críticos. Como eles fabricavam produtos utilizando estes materiais, esta nova restrição significava que não havia escolha a não ser inovar. Então a partir de tentativas e erros desenvolveram-se novos materiais como os plásticos, os quais foram

aplicados e os projetos adaptados de forma que a qualidade do produto não fosse comprometida (KAUFMAN E WOODHEAD, 2006).

Depois da guerra, foi permitido aos fabricantes reverter para os projetos anteriores usando os metais. Contudo muitas empresas não voltaram ao projeto anterior, pois eles na realidade tinham encontrado soluções melhores. Durante este período Larry Miles trabalhando na GE questionou Harry Erlicher, vice-presidente de compras da GE na época, sobre os custos dos produtos. Então eles observaram que não haviam apenas barateado o produto, mas também o melhorado. O estudo do processo de como estas mudanças ocorreram deram origem à análise do valor.

O problema central que eles enfrentaram foi a maneira de procurar soluções alternativas. Isto levou Miles a perceber que se ele não pudesse chegar ao produto, ele tinha que chegar à função. Esta compreensão de que o produto é simplesmente um portador de funções ou um viabilizador de funções está no âmago desta técnica. Miles entendeu que os clientes não compram produtos, mas sim as funções acessadas através deles (KAUFMAN E WOODHEAD, 2006).

Na engenharia de desenvolvimento de produto, todo produto tem algum motivo pretendido por trás da sua existência: a função do produto. A modelagem funcional oferece um método abstrato, porém ainda direto para entender e representar a função geral do produto (HIRTZ *et al.*, 2002).

2.4.1 Aspectos gerais da modelagem funcional

Modelagem funcional é o nome dado para a atividade de desenvolver modelos de dispositivos, produtos, objetos e processos baseado nas suas funcionalidades e nas funcionalidades de seus subcomponentes. Por suportar a decomposição funcional, a modelagem funcional conecta os requisitos de alto nível a detalhes de baixo nível, oferece uma visão holística do sistema e constrói a base para resolver os problemas de representação de produtos complexos e seus processos de desenvolvimento complexos. A modelagem funcional tem um papel importante no ciclo de vida dos produtos: manutenção, diagnose, detecção de falha, reconhecimento de falha e geração de soluções podem ser executados eficazmente dentro do domínio da modelagem funcional (ERDEN *et al.*, 2008).

Daniilidis *et al.* (2011) demonstram que nem todas as funções de um produto apresentam o mesmo grau de independência da solução. Este grau de independência da solução depende do nível hierárquico que se encontra a função. Quanto mais abstratas forem as funções, mais brandas são as hipóteses de problema derivadas e mais brandos são os pontos de entrada incluídos no espaço de soluções (Figura 2.10). Em projetos de reengenharia, os modelos funcionais são bastante detalhados por causa das soluções implementadas conhecidas. Por isto as hipóteses de problemas derivadas são menos abstratas, o que restringe o espaço de soluções e inibe soluções inovativas.

A relação entre o nível de abstração da solução e extrapolação do problema com o nível de inovação pode ser visto também no trabalho de Altshuller (2007), que analisando

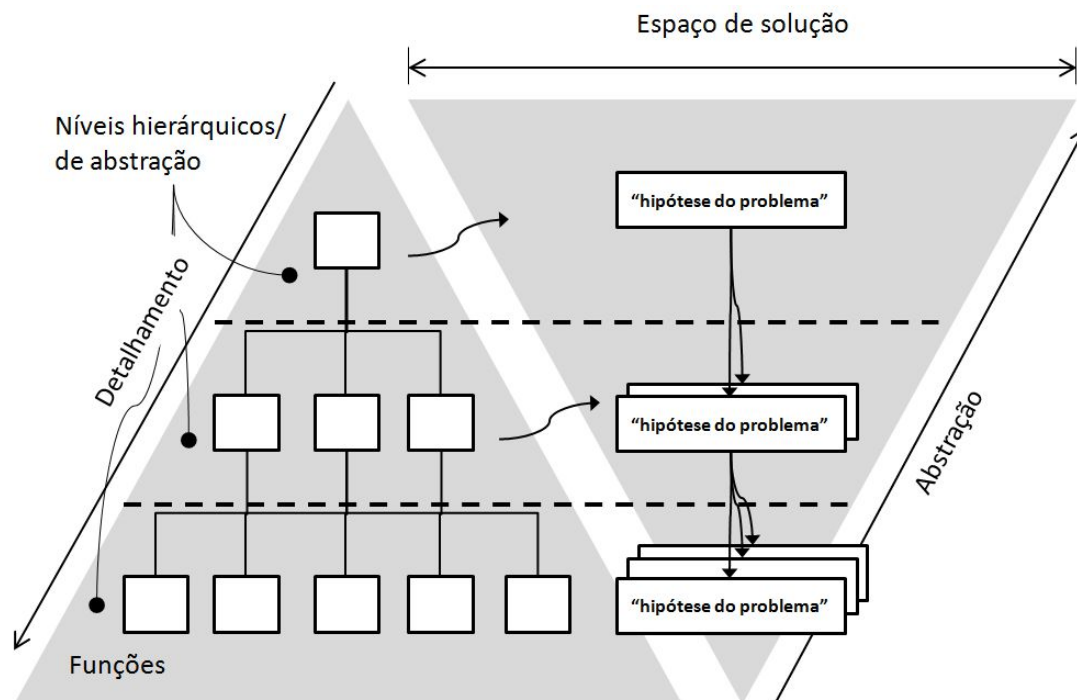


Figura 2.10: Visão esquemática do espaço de solução. Adaptado de Daniilidis *et al.* (2011).

um grande número de patentes identificou que as invenções diferem em seu valor inventivo e propôs cinco níveis de inovação:

Nível 1: O problema e os meios de solução existem dentro da área de uma profissão (um setor específico da indústria). São problemas de rotina resolvidos por métodos bem conhecidos dentro da especialidade;

Nível 2: O problema e os meios de solução existem dentro da área de uma indústria. São pequenas melhorias em um sistema existente utilizando métodos conhecidos dentro da indústria;

Nível 3: O problema e os meios de solução existem dentro de uma área de uma ciência. São melhorias fundamentais em um sistema existente utilizando métodos conhecidos fora da indústria;

Nível 4: O problema e seus meios de solução existem fora do limite da ciência onde o problema se originou. É uma nova geração de um sistema que traz um novo princípio para desempenhar as funções primárias do sistema;

Nível 5: O problema e seus meios de solução existem fora dos limites da ciência contemporânea. Neste caso é necessário primeiramente fazer uma nova descoberta e então, baseado neste novo dado científico, resolver o problema inventivo. É uma descoberta científica rara ou uma invenção pioneira de um sistema essencialmente novo.

Altshuller (2007) analisou 14 classes de invenções de 1965 a 1969 revelando a dispersão entre os níveis inventivos conforme a Figura 2.11.

Conforme as funções dão mais informação a respeito da solução, elas ficam em níveis mais baixos no modelo funcional. Daniilidis *et al.* (2011) ainda distinguem dois tipos

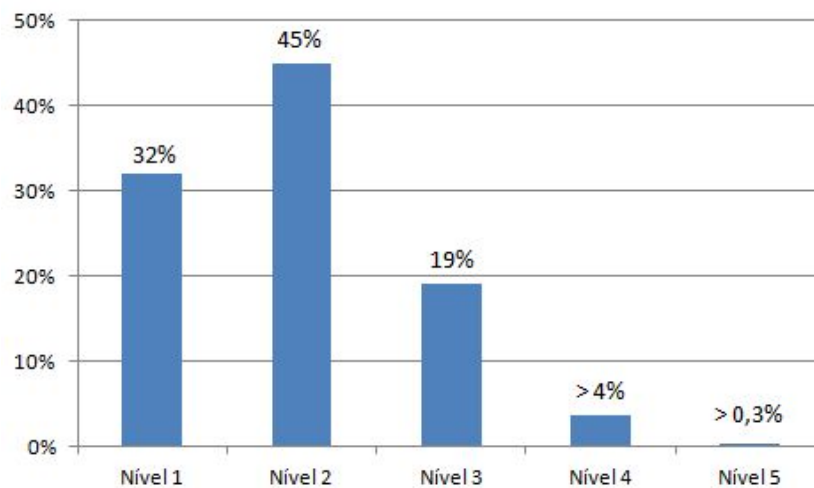


Figura 2.11: Dispersão das invenções nos níveis inventivos. Baseado em Altshuller (2007).

de informação, informação sobre a solução técnica e informação sobre a tecnologia aplicada. Uma solução técnica pode ser implementada utilizando diferentes tipos de tecnologia de acordo com o conhecimento disponível. Portanto funções contendo informação de tecnologia são mais elementares e estão posicionadas mais baixo na hierarquia funcional (Figura 2.12).

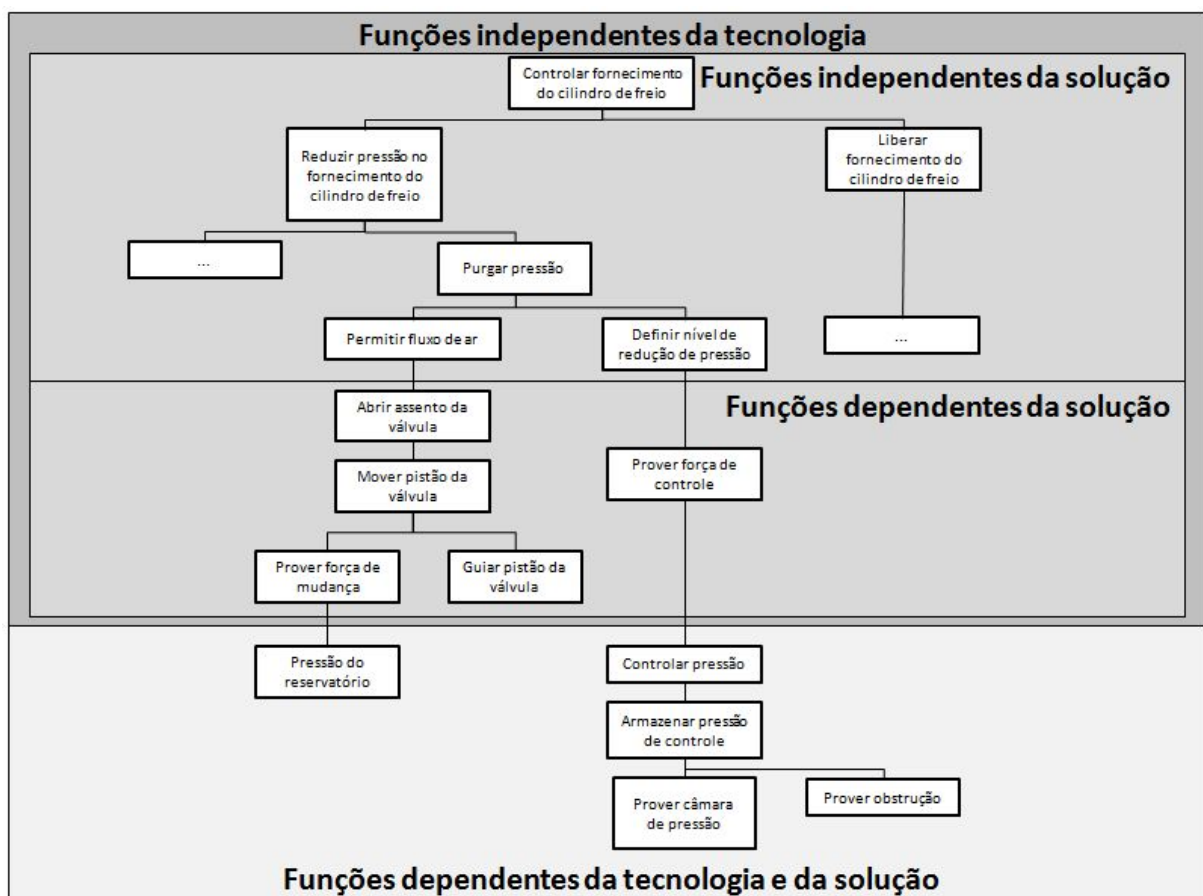


Figura 2.12: Estrutura funcional hierárquica de uma válvula de redução de pressão. Adaptado de Daniilidis *et al.* (2011).

Função é considerada como uma categoria subjetiva que relaciona as intenções/-propósitos humanos residentes no domínio subjetivo aos comportamentos e estruturas no domínio objetivo (UMEDA *et al.*, 1995) (UMEDA *et al.*, 1996) (CHANDRASEKARAN E JOSEPHSON, 2000) (ERDEN *et al.*, 2008).

O domínio subjetivo corresponde às concepções mentais e ao planejamento mental dos humanos, também chamado de simulação mental. Estas são executadas em um nível abstrato, sem considerar as interações físicas exatas. A fase de projeto conceitual no processo de desenvolvimento acontece neste domínio, por exemplo. Por outro lado, o domínio objetivo corresponde às relações físicas e aos processos aplicados ao objeto (ERDEN *et al.*, 2008).

Umeda e Tomiyama (1997) e Far e Elamy (2005) consideram as funções como meios de mudar da tecnologia do raciocínio baseado no modelo (*Model-Based Reasoning* ou MBR) para a tecnologia do raciocínio funcional (*functional reasoning*). Enquanto que a tecnologia MBR trata de "que o objeto faz", o raciocínio funcional trata de "para que é o objeto". Este entendimento é muito próximo do entendimento da separação dos domínios objetivo e subjetivo. O MBR acontece no domínio objetivo e o raciocínio funcional no domínio subjetivo.

Far e Elamy (2005) mencionam quatro tarefas para as quais o raciocínio funcional pode ser aplicado. Identificação: determina as funções associadas com uma dada estrutura. Explicação: responde porque um componente é necessário para realizar um comportamento pretendido. Seleção: usada para determinar e combinar componentes para desempenhar o comportamento necessário para realizar as funções pretendidas. Verificação: usada para testar a funcionalidade de um estrutura dada sob certas condições do meio.

Esta tecnologia é importante, pois o CAD (*Computer Aided Design*) do futuro deve auxiliar o processo inteiro de desenvolvimento, incluindo o projeto funcional, não mais somente o projeto detalhado baseado em modelagem geométrica (TOMIYAMA *et al.*, 1993) (UMEDA E TOMIYAMA, 1997). Por exemplo FBS Modeler e KIEF (*knowledge intensive engineering framework*) de Tomiyama *et al.* (1993) e Yoshioka *et al.* (2004); KRITIK e IDeAL de Goel e Bhatta (2004); IDEA-INSPIRE de Chakrabarti *et al.* (2005); FEST-ER (*function embodiment structure-extend recursively*) e Schemebuilder de Bracewell e Sharpe (1996).

As empresas pressionadas a reduzir os tempos de desenvolvimento começaram a procurar novas formas de explorar os conhecimentos de engenharia acumulados. Os bancos de dados de projetos tradicionais, os quais meramente disponibilizam modelos CAD, desenhos e alguma documentação de versões, são inadequados para este propósito. Pesquisas focadas em repositórios de projetos (*design repositories*) buscam atender a estas demandas da indústria (SZYKMAN *et al.*, 2000).

Um repositório de projeto é um sistema inteligente de modelagem de objeto baseado em conhecimento usado para facilitar a representação, capturar, compartilhar e reutilizar o conhecimento de projeto corporativo. Repositórios de projeto tentam capturar uma representação mais completa do projeto que pode incluir caracterização da função, comportamento, regras de projeto e modelos de simulação por exemplo (SZYKMAN *et al.*, 2000). Este projeto conduzido

pela NIST (*National Institute of Standards and Technology*) foca em algumas áreas, dentre elas a identificação da taxonomia das funções e seus fluxos associados (SZYKMAN *et al.*, 1999b).

2.4.2 Ferramentas de modelagem funcional

Em 1965 Charles Bytheway compreendeu que as funções têm uma dependência lógica e fez uma contribuição significativa ao trabalho de Miles (1972) ao desenvolver o conceito de modelos funcionais. Ele desenvolveu a lógica do *como-porque*, a qual batizou de *Function Analysis System Technique* ou mais conhecida como FAST (SAEGER, 2009).

Yoshikawa (1989 citado por EVBUOMWAN *et al.*, 1996) em seu artigo sobre filosofia de projeto discute aspectos de projetistas que pertencem a escolas de pensamento semântico, sintático e de experiências passadas.

A escola semântica é atribuída a Rodenacker (1991) publicado pela primeira vez em 1970 e difundida por Pahl e Beitz (1977). O dogma central desta escola é que qualquer máquina, como objeto de projeto, é algo que transforma três formas de entradas (matéria, energia e informação) em três saídas respectivas a cada entrada, mas tendo estados diferentes das entradas. As diferenças entre as entradas e as saídas são chamadas de funcionalidade.

Os requisitos iniciais são geralmente dados em termos de funcionalidade, os quais devem ser analisados em uma estrutura lógica, a qual define as conexões entre as sub-funcionalidades. Ao decompor a funcionalidade inicial em sub-funcionalidades mais detalhadas, estas sub-funcionalidades resultantes são substituídas por fenômenos físicos específicos que realizam as respectivas transformações.

Gero (1990) propôs o esquema de modelagem chamado FBS (*Function-Behavior-Structure*). Gero identificou dois tipos de comportamentos derivados da função e da estrutura: o pretendido e o real. No entanto o comportamento real não é traduzido em função. Gero e Kannengiesser (2004) analisaram o desenvolvimento de produto como consistido de oito passos elementares, os quais foram definidos em termos de conceitos chaves de função, comportamento e estrutura.

O desenvolvimento do produto é uma atividade na qual um conjunto de funções F é transformado em descrições de projeto D de um objeto que pode desempenhar estas funções. Estas funções se originam dos clientes e as descrições de projeto contêm a informação suficiente para se produzir o objeto. As funções não são transformadas diretamente em descrições de projeto, mas através de uma série de passos elementares, nos quais o comportamento B do objeto e sua estrutura S também são considerados (Figura 2.13).

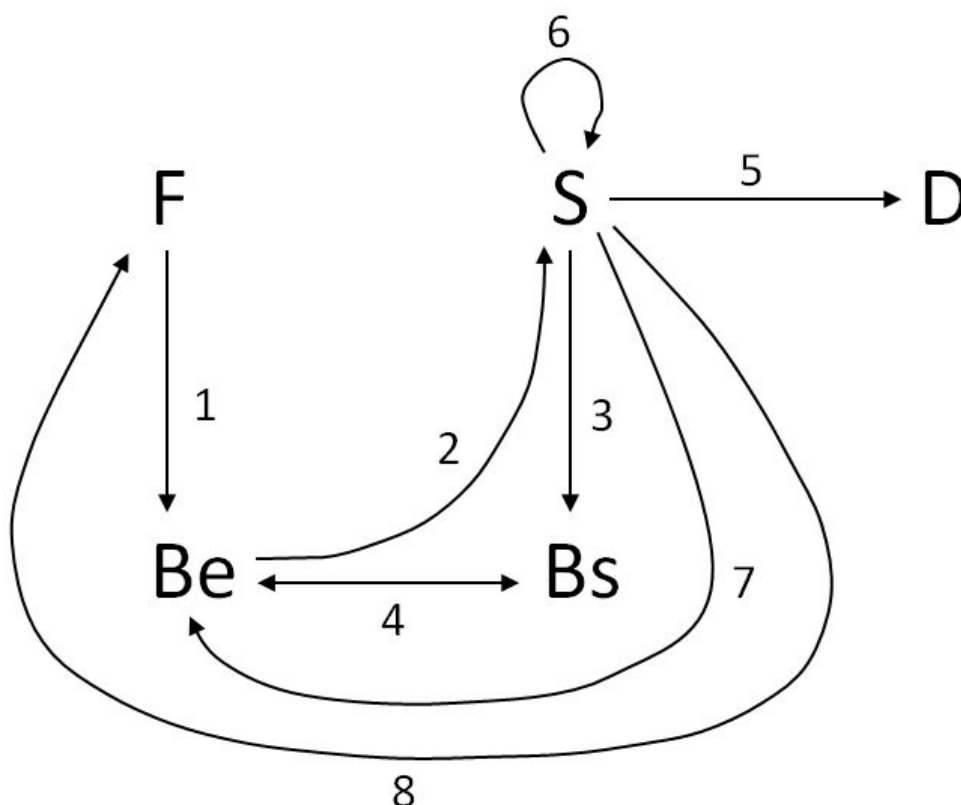


Figura 2.13: Estrutura FBS. Adaptado de Gero (1990).

- Formulação (processo 1) transforma o problema do projeto, expresso em função F em um comportamento B_e que espera-se que desempenhe esta função;
- Síntese (processo 2) transforma o comportamento esperado B_e em uma estrutura solução S que pretende exibir este comportamento desejado;
- Análise (processo 3) deriva o comportamento real B_s da estrutura sintetizada S ;
- Avaliação (processo 4) compara o comportamento derivado da estrutura B_s com o comportamento esperado B_e para preparar a decisão de se a solução de projeto é aceitável;
- Documentação (processo 5) produz a descrição do projeto D para produzir o produto com estrutura S ;
- Reformulação tipo 1 (processo 6) trata de mudanças em termos das variáveis da estrutura S ou dos limites dos seus valores;
- Reformulação tipo 2 (processo 7) trata de mudanças em termos das variáveis do comportamento B ou dos limites dos seus valores;
- Reformulação tipo 3 (processo 8) trata de mudanças em termos das variáveis da função F ou dos limites dos seus valores.

Umeda *et al.* (1995) propuseram a modelagem semelhante também chamada FBS, porém neste caso o S se refere a *State* formando *Function-Behavior-State*, onde a função é definida como a descrição do comportamento abstraído pelos humanos através do reconhecimento do comportamento para utilizá-lo, relacionando os domínios subjetivo e objetivo. Os autores argumentam que é difícil representar a função independentemente do comportamento do qual é abstraído e representa a função como uma combinação de "fazer algo" e um conjunto de comportamentos que exibem isto. Por exemplo, o comportamento de "oscilação da corda" exibe a função "produzir som".

Os autores consideram a decomposição hierárquica das funções como uma das tarefas básicas do projeto. Eles proporcionam um método sistemático para decomposição e incorporação do projeto funcional, mas argumentam que não há um método objetivo nem algorítmico para a decomposição funcional. A decomposição funcional é seguida pelo processo de incorporação, o qual fundamenta as funções indecomponíveis com as características físicas. A associação das características físicas com componentes do objeto e a integração dos componentes resultam no projeto do objeto (UMEDA *et al.*, 1990) (UMEDA *et al.*, 1995) (UMEDA *et al.*, 1996).

Umeda *et al.* (1996) dividem o processo de decomposição em "decomposição de tarefas" e "decomposição causal". A decomposição de tarefas resulta em subfunções que não estão causalmente relacionadas. A decomposição de tarefas está relacionada explicitamente com o conhecimento funcional. A decomposição causal resulta em subfunções cujos comportamentos associados estão relacionados causalmente. Por isto, a decomposição causal demanda conhecimento do comportamento físico.

Yaner e Goel (2006) representam no modelo funções e comportamentos em múltiplos níveis de agregação e abstração de maneira hierárquica. As decomposições de funções e comportamentos são feitas simultaneamente. Com a representação dos autores, o modelo tem o esquema de $F \rightarrow B \rightarrow F \rightarrow B \rightarrow \dots \rightarrow F(S)$. As funções de maior nível são associadas a alguns comportamentos que as realizam. Então estes comportamentos são associados a algumas subfunções de nível mais baixo, as quais são novamente associadas a comportamentos de nível mais baixo que as realizam. Esta decomposição interdependente segue até que as funções possam ser associadas a componentes concretos da estrutura (Figura 2.14).

Goel *et al.* (2009) apresentam uma visão similar através da representação SBF (*Structure-Behavior-Function*). A estrutura SBF considera o comportamento como um conceito intermediário entre a estrutura e os requisitos funcionais definidos subjetivamente. Os comportamentos no modelo SBF são conceitos que são usados para explicar a realização das funções com os elementos estruturais concretos do objeto. Yaner e Goel (2006) descrevem um método para construir o modelo SBF de um sistema físico a partir dos seus desenhos. Este método é chamado de DSSBF (*Drawing Shape Structure Behavior Function*).

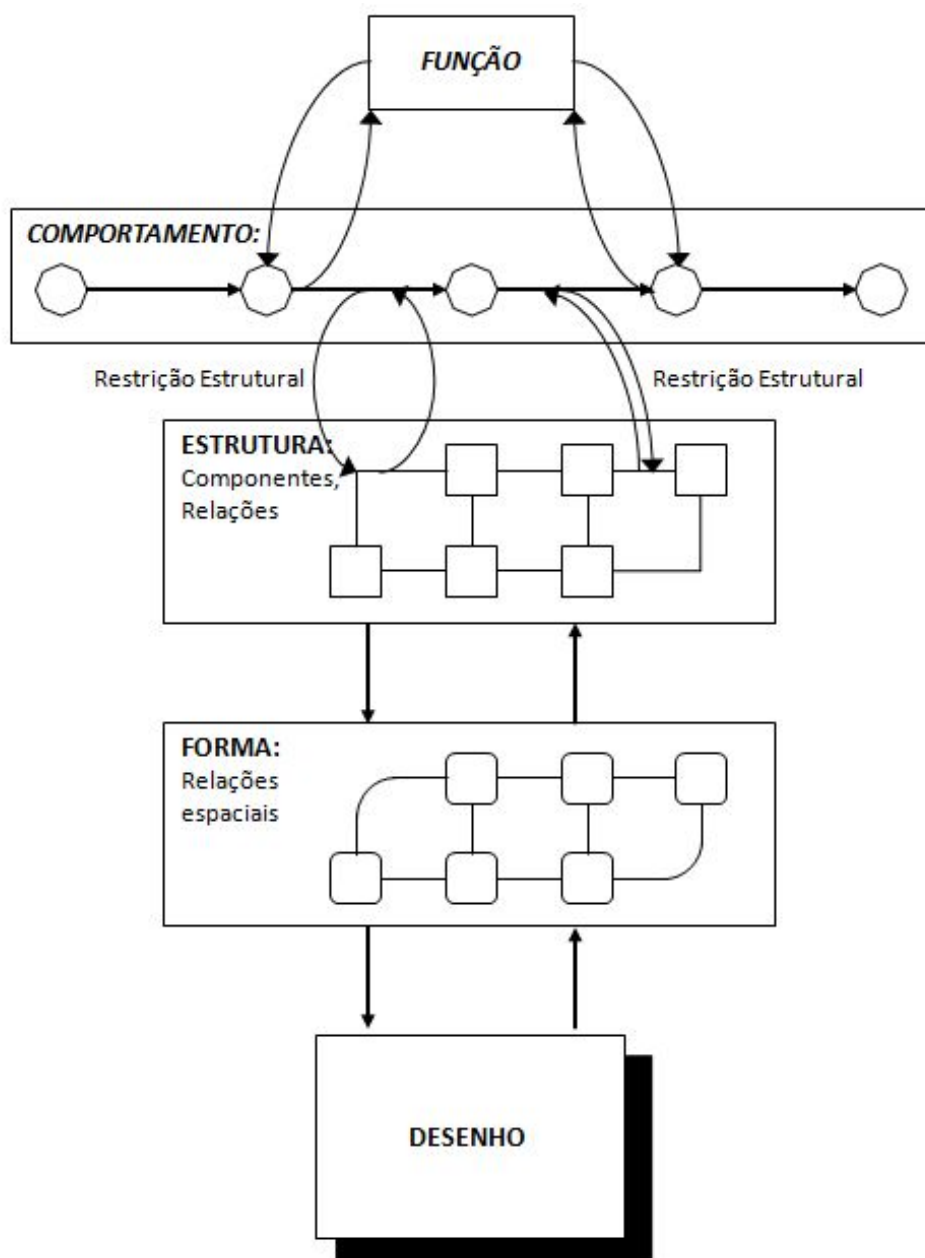


Figura 2.14: Esquema dos modelos DSSBF com função no topo e a forma(desenho) abaixo. Adaptado de Yaner e Goel (2006).

Helms e Shea (2012) resumem a representação do projeto como sendo inspirada pela literatura de projeto clássica envolvendo três níveis de abstração e que no processo de desenvolvimento ocorrem a decomposição de funções de alto nível em subfunções, alocação dos fenômenos físicos nas subfunções e corporificação dos fenômenos físicos nos componentes (Figura 2.15)

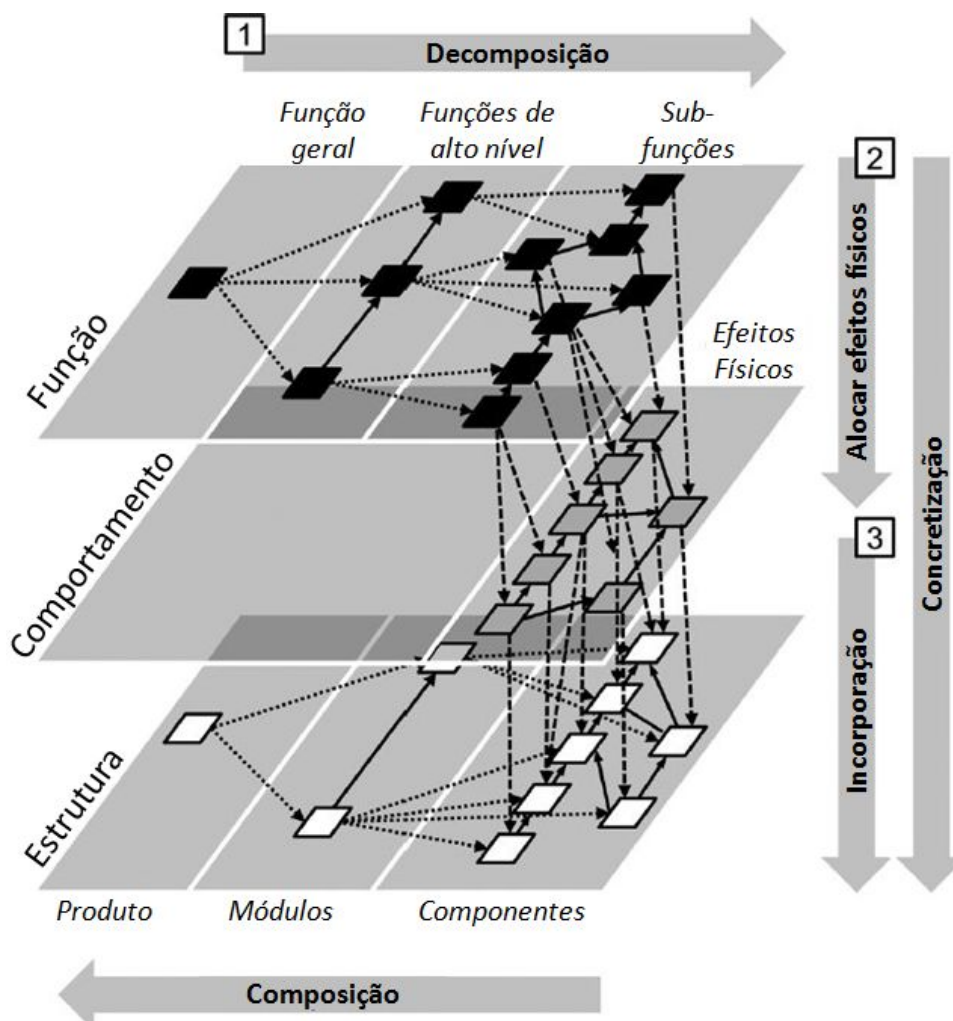


Figura 2.15: Modelo de produto baseado em FBS. Adaptado de Helms e Shea (2012).

O suporte oferecido aos engenheiros pelas ferramentas de modelagem existentes como árvore de funções e a estrutura de funções é limitado por não serem intuitivas e por não dimensionarem bem os problemas de engenharia do mundo real (AURISICCHIO *et al.*, 2013). Pesquisas sobre análise funcional têm contribuído para o desenvolvimento de várias formas de representar funções, no entanto é frequentemente reportado que se faz pouco uso de tais ferramentas na indústria (LOPEZ-MESA E BYLUND, 2011) (ARAUJO *et al.*, 1996) (WHYBREW *et al.*, 2001 citado por AURISICCHIO *et al.*, 2013).

WHYBREW, K.; SHAW, A.I.; AITCHISON, D.R. e RAINE, J.K. Use of design tools and methodologies for rapid product development in the New Zealand manufacturing industry. **In Proceedings of the 13th International Conference on Engineering Design, Design Applications**, pp. 27-34, 2001.

O método FAD (*Function Analysis Diagram*) tem uma notação simples, permite a modelagem das funções do produto juntamente com a estrutura, permite a geração de descrições ricas e acuradas da funcionalidade do produto e é útil para trabalhar com projetos adaptativos ou de variações. O FAD é uma representação do produto dependente da forma, que difere um pouco das principais linhas de pesquisa por buscarem uma representação do produto independente da forma para auxiliar um projeto original (AURISICCHIO *et al.*, 2013).

O FAD consiste em desenhar uma malha com blocos usados para representar a estrutura do produto, usuários ou outros recursos, e relações na forma de setas com um rótulo usadas para representar ações (Figura 2.16). O FAD representa simultaneamente as funções e os elementos físicos do produto (AURISICCHIO *et al.*, 2013).

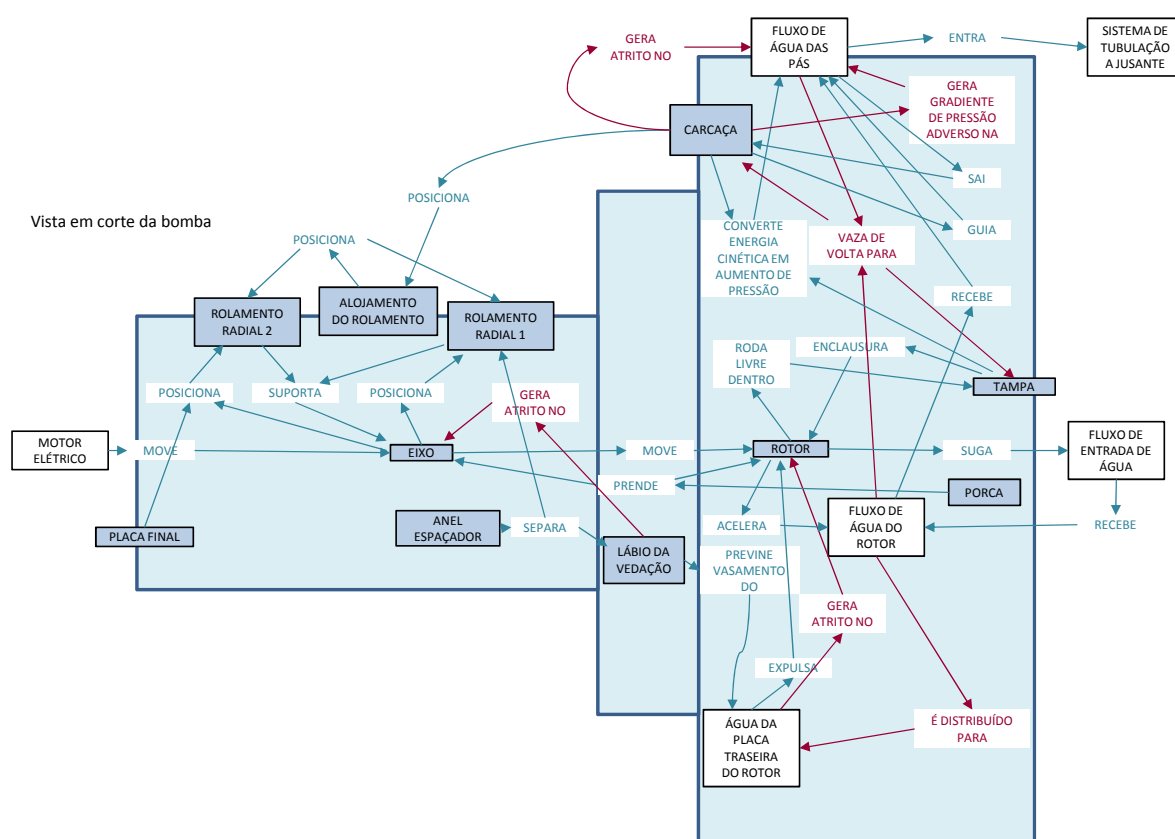


Figura 2.16: FAD representado sobre um layout do corpo de uma bomba. Adaptado de Aurisicchio *et al.* (2013).

2.5 Ferramentas de desenvolvimento de produto

Nesta seção é feita uma revisão das ferramentas de desenvolvimento de produto mais difundidas que aplicam diretamente o conceito de função. A apresentação de cada ferramenta contém o propósito da ferramenta, um breve histórico, um resumo do procedimento de aplicação detalhando a etapa onde o conceito de função é empregado.

2.5.1 Análise do valor

A análise de valor foi criada no início da década de 40 por Lawrence Miles enquanto ele trabalhava na General Electric, a qual estava enfrentando escassez de materiais estratégicos que eram necessários para produzir produtos para a Segunda Guerra Mundial. Miles percebeu que os produtos são comprados por o que eles podem fazer, seja através do trabalho que eles executam ou o prazer que as qualidades estéticas proporcionam.

Usando isto como base ele questionou se o projeto poderia ser melhorado ou se um material diferente poderia cumprir a função. Conforme a análise do valor ganhou popularidade, um grupo de praticantes formaram uma sociedade de estudos para trocar informações e avançar nas capacidades inovativas, incorporando em 1959 a SAVE (*Society of American Value Engineers*) (SAVE, 2007).

A análise do valor é um processo sistemático usado por um time multidisciplinar para melhorar o valor de um projeto através da análise de suas funções. O valor é definido para produtos como o equivalente em dinheiro do desempenho apropriado desses produtos também chamado de justo necessário (CSILLAG, 1995).

O valor é comumente representado pela relação função recursos, onde a função é medida em requisitos de desempenho do cliente e recursos são medidos em materiais, trabalho, preço, tempo necessários para executar tal função. A análise do valor foca em melhorar o valor identificando maneiras alternativas de cumprir a função que atende às expectativas de desempenho do cliente (Figura 2.17) (SAVE, 2007).

A análise funcional é o fundamento da análise do valor. Durante a fase da análise funcional deve-se identificar, clarificar e nomear as funções (MILES, 1972). A análise funcional pode ser aprimorada com o uso da ferramenta de mapeamento gráfico conhecida como FAST (*Function Analysis System Technique*).

Função → Componente ↓	Suportar Peso	Absorver Energia	Transferir Energia	Posicionar Montagem	Receber Energia	Manter Alinhamentc	Manter Força	Resistir Força	Guiar Movimento	Identificar Beirada	Resistir Corrosão	Refletir Luz	Custo Total
Poste	\$1,00	\$2,50	\$2,50	\$4,00									\$10,00
Bloco			\$0,50		\$0,50								\$1,00
Parafuso						\$0,90				\$0,10			\$1,00
Arruela							\$0,45			\$0,05			\$0,50
Porca								\$0,45		\$0,05			\$0,50
Guardrail		\$20,00							\$150,00	\$5,00	\$5,00		\$180,00
Refletor												\$1,00	\$1,00
Custo da Função	\$1,00	\$22,50	\$3,00	\$4,00	\$0,50	\$0,90	\$0,45	\$0,45	\$150,00	\$5,20	\$5,00	\$1,00	\$194,00

Figura 2.17: Exemplo de resultado da análise de valor: matriz função-custo de um "guardrail". Adaptado de SAVE (1998).

2.5.2 Diagrama FAST

Desenvolvido por Charles Bytheway em 1964 e apresentado como um artigo para a SAVE (*Society of American Value Engineers*) em 1965, o diagrama FAST (*Function Analysis System Technique*) contribuiu significativamente para a fase mais importante da técnica de análise do valor. O FAST decompõe uma função básica e a organiza em um diagrama lógico (WIXSON, 1999).

Em 1975 houve um seminário de cinco dias com a participação de sete especialistas em engenharia do valor para se discutir modelagem funcional. Isto resultou em dois tipos de diagramas FAST. Um desenvolvido por Ruggles chamado de *Technical Oriented FAST* e outro chamado de *Task Oriented FAST* desenvolvido por Snodgrass (SAEGER, 2009)

Não há um diagrama FAST "correto", mas há um diagrama FAST "válido". O seu grau de validade é diretamente dependente do talento dos membros participantes do time (recomenda-se sempre um time multidisciplinar) e do escopo da análise. O FAST é um diagrama que relaciona as funções seguindo a lógica do "COMO-POR QUE"(Figura 2.18). As funções são desdobradas perguntando COMO é executada esta função, desta forma caminha-se da esquerda para a direita no diagrama. E ao contrário, pergunta-se POR QUE se executa esta função, caminhando da direita para a esquerda no diagrama. A distribuição vertical é utilizada para exprimir a relação de tempo, relacionada à pergunta QUANDO. Nota-se também que é importante delimitar o escopo da análise, definido pelas linhas tracejadas verticais na Figura 2.18 (KAUFMAN E WOODHEAD, 2006).

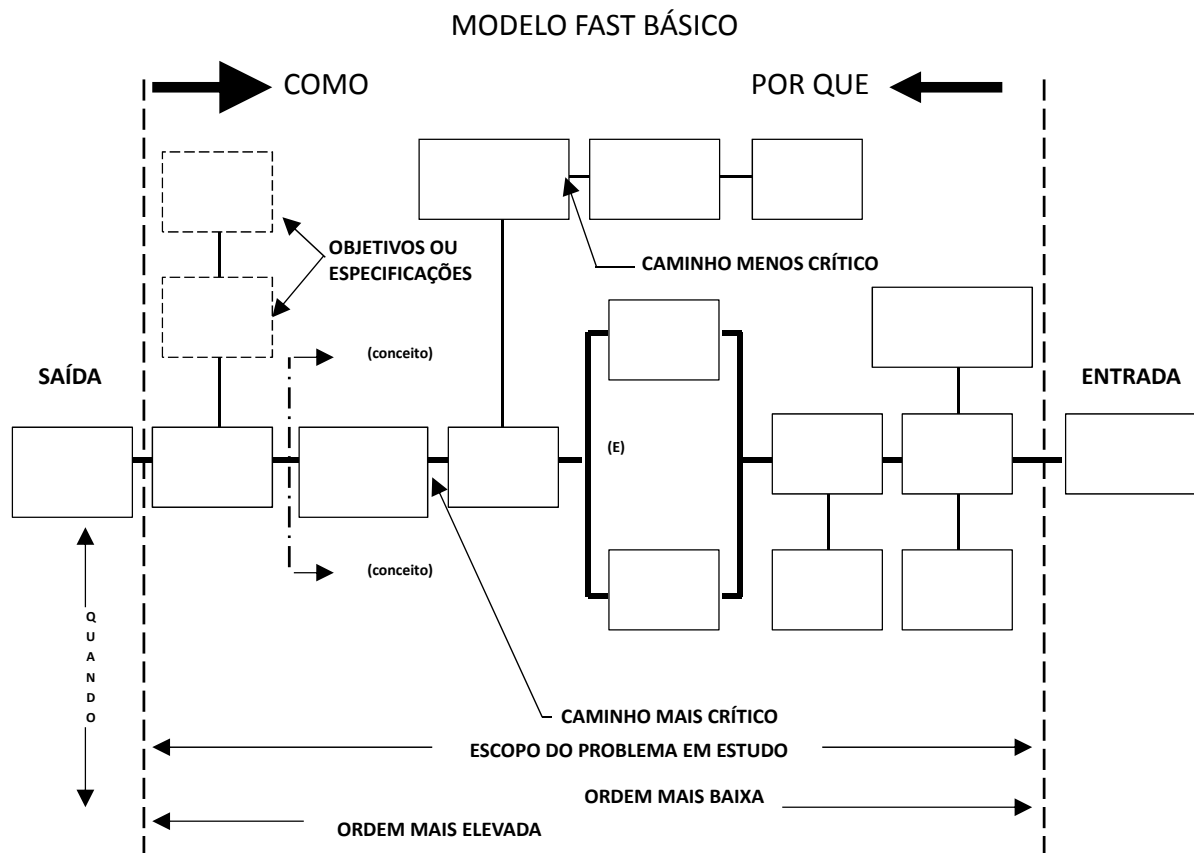


Figura 2.18: Modelo FAST básico. Adaptado de Wixson (1999) .

2.5.3 FMEA

A FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis* ou Análise de Modos e Efeitos de Falha) é um método sistemático de identificar e prevenir problemas do produto e do processo antes que estes ocorram. A FMEA tem como objetivo prevenir defeitos, aumentar a segurança e a satisfação do cliente. A FMEA reduz significativamente os custos por identificar cedo no processo de desenvolvimento melhorias no produto e processo, quando as mudanças ainda são relativamente fáceis e baratas de serem feitas (MCDERMOTT *et al.*, 2009).

A FMEA auxilia a implementar o produto de maneira planejável, rastreável e orientada aos objetivos. O procedimento estruturado auxilia a solução de problemas e promover com isto um modo de pensar preventivo de garantia de qualidade e de análise de risco (WERDICH, 2011).

A FMEA foi desenvolvida em 1949 pelos militares americanos como uma instrução militar MIL-P-1629 (Procedimentos para realizar uma análise crítica de modos de falhas e efeitos). Em 1963 a NASA aplica a FMEA no projeto Apollo. Em 1965 a indústria aeroespacial

adota este método e em 1975 é aplicada na área nuclear. Em 1977 é aplicada pela primeira vez na indústria automotiva pela Ford e em 1980 é regulamentada na Alemanha pela DIN 25448 e mais tarde estabelecida na área através da QS9000 (WERDICH, 2011) (MCDERMOTT *et al.*, 2009).

Segundo Werdich (2011), o procedimento geral para a criação de uma FMEA consiste em:

- Levantar dados (lista de peças, caderno de especificação, instruções, resultado de análise de concorrentes, lições aprendidas, QFD...);
- Definição da abrangência da FMEA e da profundidade a ser tratada;
- Análise funcional e relações entre as funções;
- Análise estrutural;
- Análise de falhas;
- Plano de ação;
- Otimização.

Pode-se ter uma melhor visualização dos cinco passos e do processo do FMEA nas Figuras 2.19 e 2.20 respectivamente.

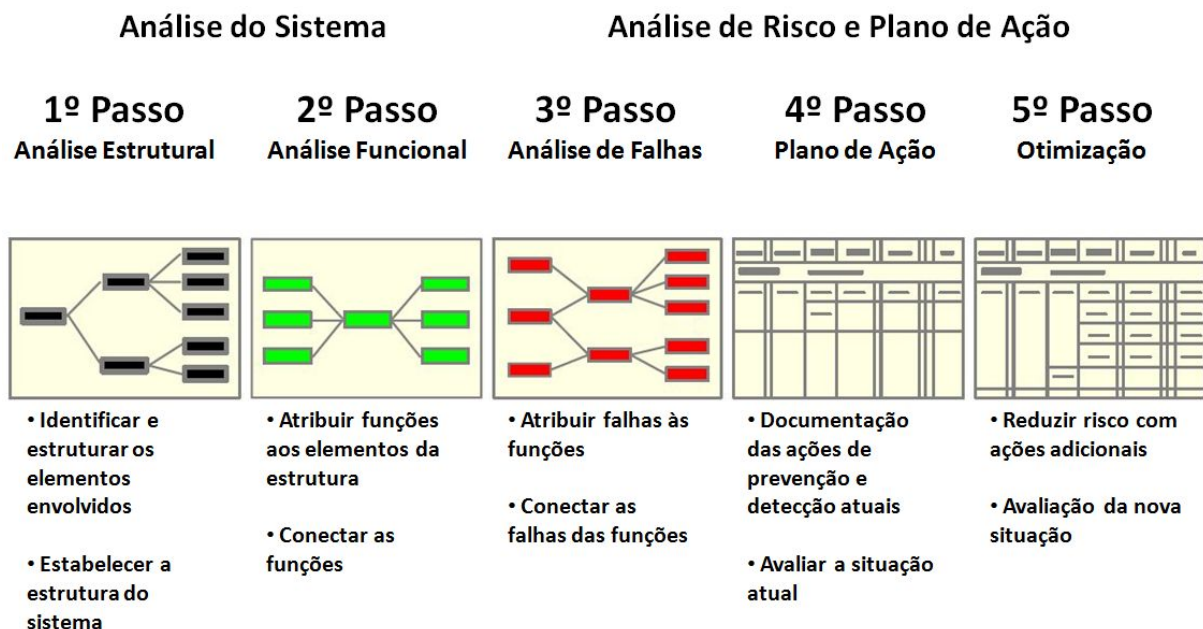


Figura 2.19: Os cinco passos para a construção de uma FMEA. Adaptado de Verband der Automobilindustrie (2006).

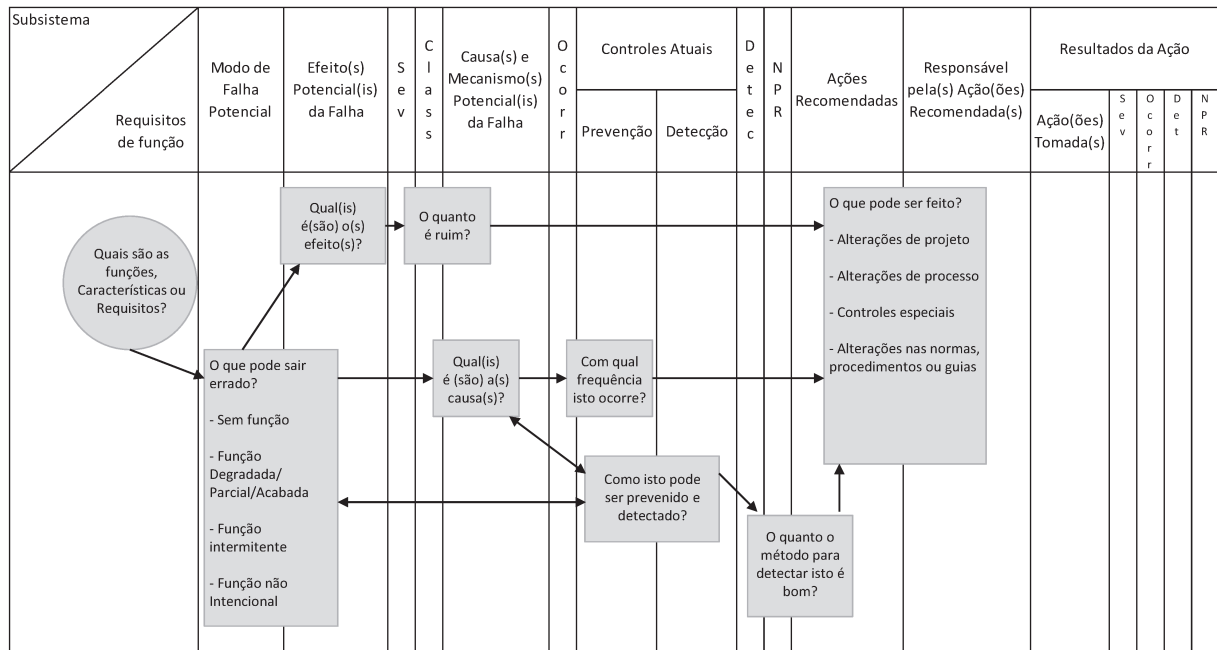


Figura 2.20: Sequência de um processo de FMEA. Adaptado de Instituto da Qualidade Automotiva (2003).

Na definição da abrangência da FMEA pode ser útil traduzir a estrutura física em um diagrama de blocos. O diagrama de blocos é uma tradução pictórica da estrutura relacionada com a FMEA de interesse. São representados os elementos pertencentes à estrutura, a limitação do sistema analisado e as interações entre os elementos (YANG E EL-HAIK, 2008).

Outra ferramenta que auxilia na elaboração da FMEA é a Matriz Função Componente (FCM ou *Function Component Matrix*). Para criar a FCM são necessárias todas as subfunções do produto, assim como todos os componentes que são usados para cumprí-las. O objetivo da FCM é representar os componentes que resolvem as funções dadas, onde a entrada (i,j) da matriz representa se a função i é atendida pelo componente j (Figura 2.21) (WERDICH, 2011) (KAMYAB E LEWIS, 2008).

Stamatis (2003) descreve a análise funcional da FMEA da seguinte maneira: escreve-se a pretensão, o propósito ou o objetivo do produto. A função do produto deve ser derivada das necessidades, desejos e expectativas do cliente. Tipicamente estas incluem requisitos de segurança, regulamentações governamentais e outras restrições identificadas como internas ou externas à organização. Para que a descrição da função do produto seja efetiva, deve-se identificar em detalhe com uma expressão que seja concisa, exata e fácil de entender.

Segundo Stamatis (2003) para se aplicar esta metodologia, alguns pré-requisitos devem ser entendidos e seguidos, dentre os pré-requisitos está que a função deve ser conhecida. É imperativo que a função, propósito e objetivo do produto sejam conhecidos. Caso contrário

Função Principal	Subfunção	Função elementar ou Característica	Montagem 2						
			Componente 1	Componente 2.1	Componente 2.2	Componente 2.3	Componente 2.4	Componente 3	Componente 4
Função principal 1	Subfunção 1.1	Função elementar 1.1.1		1	2	1			1
		Função elementar 1.1.2		1		2		1	1
		Função elementar 1.1.3		1	1	1		1	1
		Função elementar 1.1.4	1						
	Subfunção 1.2	Função elementar 1.2.1	1					1	
		Função elementar 1.2.2	1					1	
		Função elementar 1.2.3	1					1	
	Subfunção 1.3	Função elementar 1.3.1	2		2			2	1
		Função elementar 1.3.2	2		2			2	1
Função principal 2	Subfunção 2.1		1	1	1	1		1	1
		Função elementar 2.2.1	1	1	1	1		2	1

1 não crítico
2 crítico

Figura 2.21: Exemplo de uma Matriz Função Componente (FCM). Adaptado de Werdich (2011).

o resultado é uma perda de tempo e o esforço é focado em redefinir o problema baseado em situações.

A equipe para a elaboração da FMEA é muito importante. Sempre se recomenda formar um time multidisciplinar para que todos os aspectos e possíveis impactos do produto sejam identificados (WERDICH, 2011).

As ações a serem tomadas como resultado da FMEA são definidas a partir do NPR. O NPR (Número de Prioridade de Risco) é o produto dos índices de severidade, ocorrência e detecção. Onde a severidade é classificação associada ao efeito mais grave para um dado modo de falha. A ocorrência é a probabilidade de um mecanismo/causa específico ocorrer durante a vida do projeto. E a detecção é a classificação associada com o melhor controle de detecção listado no controle de projeto (INSTITUTO DA QUALIDADE AUTOMOTIVA, 2003).

2.5.4 DRBFM

A DRBFB (*Design Review Based on Failure Mode* ou Revisão de Projeto Baseada no Modo de Falha) foi descrito em 1997 como um avanço no desenvolvimento do FMEA pela Toyota. A metodologia é baseada em um FMEA existente. Quando há uma alteração ou extensão da aplicação, o método da DRBFM pode ser aplicado baseado no FMEA. O motivo é que alterações são frequentemente introduzidas sem uma investigação estruturada das suas influências. A DRBFM é um método, que acompanha o processo de desenvolvimento de produto com eficiência e criatividade. Neste método não há mais pontuações, a necessidade de melhorias são definidas pelo time de desenvolvimento. O esforço para a aplicação do FMEA pode ser reduzido pela documentação enxuta da DRBFM e o time de desenvolvimento pode se concentrar

somente nas mudanças do produto. O time analisa criticamente as mudanças e extrai delas as dificuldades e riscos (WERDICH, 2011).

Segunda Toyota (2005) as etapas de uma DRBFM consistem em:

- Descrever as alterações intencionais e incidentais detalhadamente;
- Listar todas as funções pertencentes ao objeto;
- Pontos de interesse devido às alterações, que consiste em descrever como as funções são afetadas negativamente pelas alterações do ponto de vista do cliente;
- Quando e como os pontos de interesse aparecem. Descrever o que o cliente sente em cada modo de falha;
- Medidas ou ações tomadas no projeto para prevenir que ocorram os problemas nos pontos de interesse identificados;
- Revisão de projeto. Revisar todos os pontos levantados e discutir se as medidas tomadas são suficientes para resolver os potenciais modos de falha levantados. Caso negativo, ações adicionais são recomendadas e implementadas.

A Figura 2.22 ilustra um formulário de referência para ser preenchido na elaboração da DRBFM.

Nome do componente/ Pontos alterados	Função	Pontos de preocupação devido a mudança		Como e quando os pontos de preocupação aparecem		Efeito no cliente		Medidas de projeto tomadas para prevenir preocupação	Ações recomendadas						Resultados das ações
		Modo de falha potencial devido a mudança	Algum outro ponto de preocupação?	Causa raiz / causa dominante	Alguma outra consideração para causa?		Importância		Itens para serem refletidos no projeto	Resp. data	Itens para serem refletidos nos testes	Resp. data	Itens para serem refletidos no processo de produção	Resp. data	

Figura 2.22: Formulário da DRBFM. Adaptado de Toyota (2005).

Para a etapa de listagem das funções, orienta-se manter em mente o sistema completo e as interações entre os componentes. Recomenda-se utilizar a tabela de ponto focal da função, onde constam cinco grupos de funções: básicas, adicionais, unidade, prevenção de danos e autoproteção (Tabela 2.3). Uma observação é feita: caso não se liste criteriosamente as funções, pode-se criar omissões, as quais levam a uma identificação inadequada dos modos de falha (TOYOTA, 2005).

Tabela 2.3: Ponto focal da função. Adaptado de Toyota (2005).

Foco da função	Descrição
Função básica	Função representando o trabalho essencial necessário para cumprir o propósito do produto
Funções adicionais	Funções adicionadas ao produto para melhorar seu apelo ou demandado por várias condições como leis e regulamentações
Função de unidade	Função pertencente a instalação do produto às interfaces, portabilidade e armazenamento
Função de prevenção de danos	Função para prevenir que o produto cause problemas (vibração, ruído, cheiro etc) ao usuário
Função de autoproteção	Função para proteger que pessoas sejam machucadas durante o uso, manufatura ou montagem

Toyota (2005) sugere o preenchimento do formulário pelo responsável do projeto sozinho baseado em reflexões e conversas com colegas experientes. Este preenchimento é feito até a coluna "Medidas de projeto tomadas para prevenir preocupações". Então deve-se organizar reuniões de revisão de projeto (*Design Review*) para discutir ponto a ponto o que foi identificado. Nesta reunião devem participar especialistas de todas as áreas e recomenda-se manter o número de participantes em torno de dez. Estas revisões de projeto são importantes para identificar possíveis omissões e, como resultado destas discussões, podem surgir ações recomendadas que são preenchidas nas colunas seguintes.

2.5.5 QFD

O QFD (*Quality Function Deployment* ou Desdobramento da Função Qualidade) como uma abordagem para projetar é um conceito introduzido por Yoji Akao no Japão em 1966. O potencial da abordagem se tornou claro quando Nishimura e Takayaki introduziram cartas de qualidade em 1972 (AKAO, 1990).

Os regulamentos rígidos do governo para os navios militares, juntamente com os grandes gastos de capital por navio, forçaram a administração da indústria pesada Mitsubishi nos Estaleiros Kobe a se comprometer com a garantia de qualidade nas etapas iniciais do projeto. Os engenheiros de Kobe esboçaram uma matriz que relaciona todos os regulamentos do governo, os requisitos críticos de projeto e os requisitos dos clientes, com as características téc-

nicas controladas pela empresa, para definir como a empresa os atingiriam. Além disto, a matriz também descrevia a importância relativa de cada entrada, tornando possível aos itens importantes serem identificados e priorizados para receber uma fatia maior dos recursos disponíveis da empresa (AKAO, 1990) (YANG E EL-HAIK, 2008).

O QFD é obtido por equipes multidisciplinares, utilizando uma série de tabelas para desdobrar os atributos críticos do cliente, ao longo das fases de desenvolvimento do projeto. Na metodologia QFD, os clientes definem o produto utilizando suas próprias expressões, que raramente portam qualquer terminologia técnica significativa. A voz do cliente pode ser transformada em uma lista de necessidades que mais tarde será usada como entrada em um diagrama de relacionamento, o qual é chamado de casa da qualidade. Geralmente o QFD se desdobra em quatro fases (Figura 2.23) (YANG E EL-HAIK, 2008) (CLAUSING, 1994).

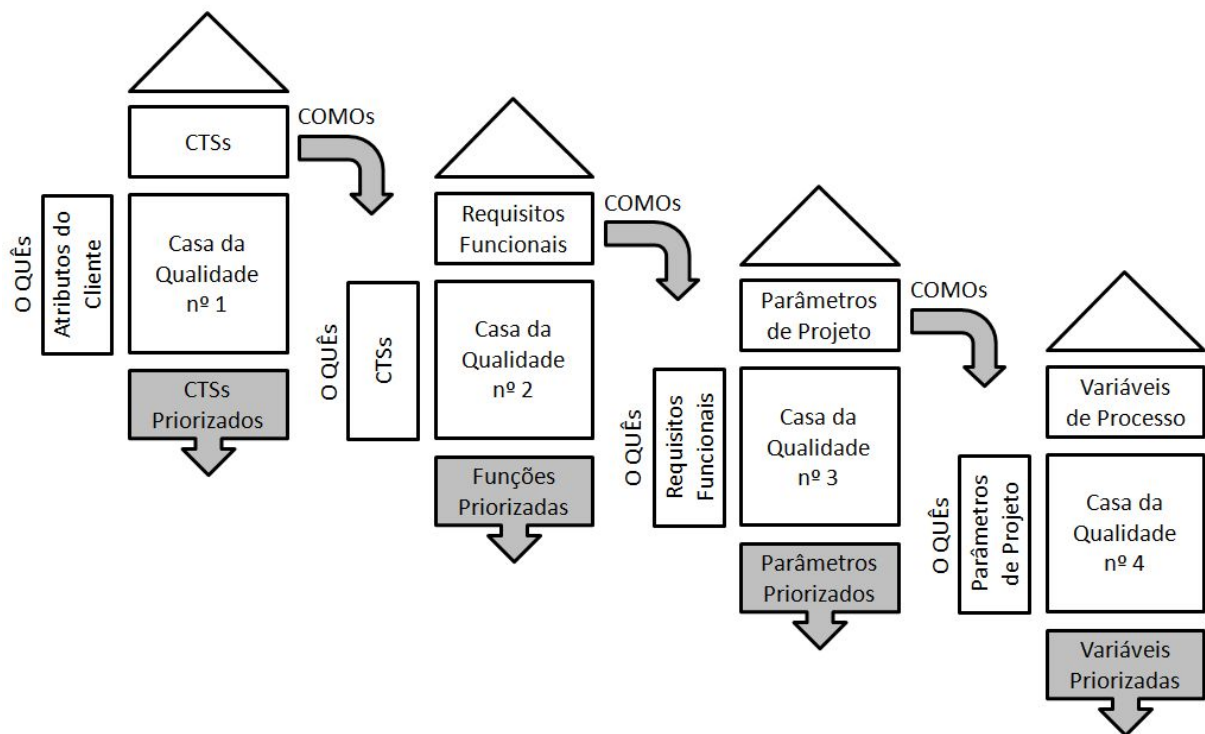


Figura 2.23: As quatro fases do QFD. Adaptado de Yang e El-Haik (2008).

As quatro fases são:

- Fase 1: Planejamento dos atributos críticos para a satisfação;
- Fase 2: Requisitos funcionais;
- Fase 3: Planejamento dos parâmetros de projeto;
- Fase 4: Planejamento das variáveis de processo.

2.5.6 Projeto axiomático

O projeto axiomático foi introduzido e descrito por Suh (1990) e foi um marco no sentido de que o bom desenvolvimento de produto pode ser ensinado como uma ciência.

O mundo do desenvolvimento de produto consiste de quatro domínios: o domínio do cliente, o domínio funcional, o domínio físico e o domínio do processo (Figura 2.24). O domínio do cliente é caracterizado pelas necessidades ou atributos (CA) que os clientes buscam em um produto. No domínio funcional, as necessidades dos clientes são expressas em termos de requisitos funcionais (FR). Para satisfazer as FRs especificadas, são concebidos parâmetros de projetos (DP) no domínio físico. Finalmente para se produzir o produto especificado em termos de DPs, o processo é desenvolvido caracterizado por variáveis de processo (PV) no domínio do processo (SUH, 2001).

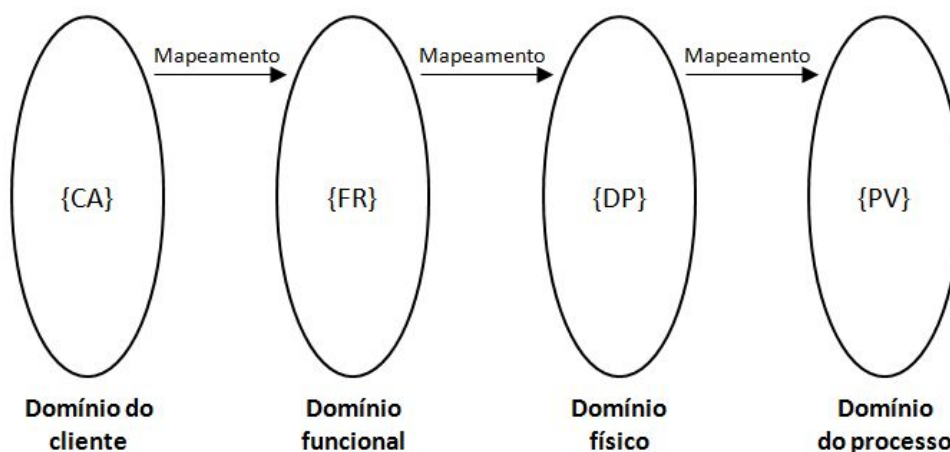


Figura 2.24: Quatro domínios do mundo do desenvolvimento do produto. Adaptado de Suh (2001).

O objetivo de um desenvolvimento de produto sempre está definido no domínio funcional, enquanto que a solução física é sempre gerada no domínio físico. O procedimento de desenvolvimento do produto envolve interligar estes dois domínios em todos os níveis hierárquicos. Estes dois domínios são inerentemente independentes um do outro (SUH, 1990).

Para se decompor os FRs e os DPs, deve-se zigzaguar entre os domínios (Figura 2.25). A partir do FR do domínio funcional vai-se para o domínio físico para se conceitualizar um projeto e determinar seu DP correspondente. Então se retorna ao domínio funcional para criar FR1 e FR2 no próximo nível que conjuntamente satisfazem o nível mais alto FR. Novamente se retorna ao domínio físico para encontrar DP1 e DP2, conceitualizando o projeto neste nível. Este processo de decomposição é seguido até que o FR possa ser satisfeito sem mais decomposições, quando todos os ramos atingirem o estado final (SUH, 2001).

A determinação dos FRs a partir das necessidades do produto final é uma das etapas mais críticas no processo de desenvolvimento de produto. Esta etapa requer um bom conhecimento do problema, pois se este for mal elaborado pode conduzir a soluções inaceitáveis ou

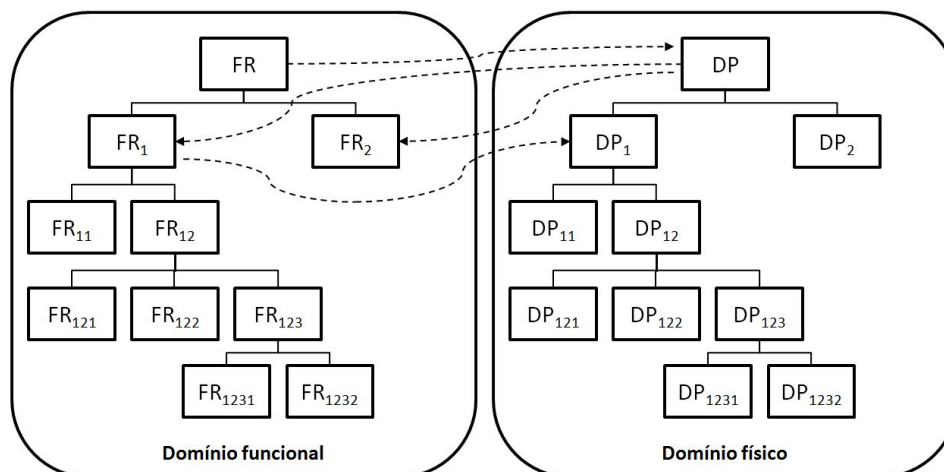


Figura 2.25: Decomposição em zig-zag dos FRs e DPs. Adaptado de Suh (2001) .

desnecessariamente complexas (SUH, 1990).

Suh (1990) cita duas abordagens distintas para se determinar os FRs dependendo se está se tentando criar uma inovação ou se está se tentando melhorar um projeto existente. Para o primeiro caso, recomenda-se que os FRs sejam definidos no espaço funcional, ou seja, num ambiente neutro a solução. Para o segundo caso, recomenda-se definir os FRs a partir dos requisitos dos clientes com a Casa da Qualidade (QFD 2.5.5).

Segundo Suh (1990), há dois axiomas que regem um bom projeto: o primeiro axioma trata da relação entre funções e variáveis físicas e o segundo axioma trata da complexidade do projeto.

O Axioma da Independência (Axioma 1) estabelece que durante o processo de desenvolvimento, conforme se vai dos FRs no domínio funcional para os DPs no domínio físico, o mapeamento deve ser tal que, uma perturbação em um DP particular deve afetar somente seu FR referente.

O Axioma da Informação (Axioma 2) estabelece que, dentre todos os projetos que satisfazem o Axioma da Independência, aquele com o menor conteúdo de informação é o melhor projeto.

2.5.7 Projeto modular

A modularidade é a arquitetura considerada com a mais eficiente para possibilitar mudanças fáceis, de baixo custo e rápidas no produto demandados pelo mercado (PANDREMENOS E CHRYSSOLOURIS, 2009), onde a arquitetura do produto é o esquema como a função do produto é alocada nos componentes físicos (ULRICH, 1995).

Ulrich (1995) distinguiu duas principais arquiteturas em projeto de produtos: a integral e a modular. Na arquitetura integral, os componentes de um produto são projetados para desempenhar mais de uma função e as interfaces entre eles estão acopladas. Por outro lado, na arquitetura modular, uma relação um-a-um existe entre funções e partes, e interfaces desacopla-

das são especificadas.

Contudo um projeto totalmente modular nem sempre é possível, portanto Hölttä-Otto e Weck (2007) sugerem que a modularidade não é simplesmente uma característica binária, mas que os produtos possuem vários níveis de modularidade.

Há alguns métodos e ferramentas que foram desenvolvidos para o projeto modular, como DSM (*Design Structure Matrix*) e MFD (*Modular Function Deployment*).

2.5.7.1 DSM

DSM (*Design Structure Matrix*) é usado para uma melhor representação da estrutura de elementos do sistema. Através da facilidade desta visualização, a equipe de desenvolvimento tem a habilidade de melhor controlar a modularidade do produto com relação a complexidade da interface. Estas matrizes são em geral binárias, quadradas e contém os elementos do sistema, que dão nome às linhas e colunas da matriz. Quando existe um vínculo entre elemento da linha i com o elemento da coluna j , o valor do elemento da matriz ij é 1 ou simplesmente X , caso contrário é 0 ou deixado em branco (Figura 2.26). Os elementos da diagonal da matriz são normalmente adotados como 0, já que não interferem nesta matriz (ULRICH E EPPINGER, 2008) (BRYANT *et al.*, 2005).

	Carcaça inferior fone	Carcaça superior fone	Falante	Microfone	Conector fone	Suporte metálico	Cabo telefônico	Conector unidade principal	Carcaça inferior principal	Carcaça superior principal	Botões	Teclado	Placa principal	Conector telefônico
Carcaça inferior fone	M1	X	X	X	X	X								
Carcaça superior fone	X	M1												
Falante	X		M1		X	X								
Microfone	X			M1	X									
Conector fone	X		X	X	M1		X							
Suporte metálico	X		X			M1								
Cabo telefônico					X		M2	X						
Conector unidade principal							X	M3	X				X	
Carcaça inferior principal								X	M3	X			X	X
Carcaça superior principal									X	M3	X	X		
Botões										X	M3	X		
Teclado										X	X	M3	X	
Placa principal								X	X			X	M3	X
Conector telefônico									X				X	M3

Figura 2.26: Exemplo de DSM. Adaptado de Hölttä-Otto e Weck (2007).

2.5.7.2 MFD

O método MFD (*Modular Function Deployment*) para estruturar o produto usa o conceito de fatores de módulo. A modularidade baseada no uso de fatores de módulo permite a composição de unidades de manufatura independentes para cada módulo (ERIXON, 1996). O MFD consiste de 5 passos (ERIXON, 1996) (PANDREMENOS E CHRYSSOLOURIS, 2009):

1. Esclarecer as especificações do produto

Definir requisitos do cliente. Neste passo inicial, as características do produto são definidas baseadas na análise dos competidores e nos requisitos do cliente.

2. Analisar funções e selecionar soluções técnicas

Especifica-se os requisitos funcionais para atender as demandas identificadas.

3. Identificar possíveis módulos

Gerar conceitos. Este é o passo básico do MFD, onde ocorrem os módulos do produto depois da análise das soluções técnicas. A análise é executada tendo como critério os 12 fatores de módulo (Tabela 2.4).

4. Avaliar conceitos

Neste passo são determinadas as interfaces entre os módulos. Adicionalmente, uma avaliação econômica dos conceitos modulares é feita.

5. Aperfeiçoar cada módulo

O passo final do método inclui a definição das especificações dos módulos (informação técnica, custo alvo etc). Baseado nestas especificações, executa-se o projeto detalhado e a otimização de cada módulo.

Tabela 2.4: Fatores de módulo relacionados às diferentes funções da empresa. Adaptado de Eggen (2003).

Função	Fator de módulo	Descrição
Desenvolvimento de produto e projeto	<i>Carryover</i>	Uma parte ou um subsistema do produto que provavelmente não será exposto a nenhuma alteração de projeto durante a vida da plataforma do produto. Permite grandes investimentos na tecnologia de produção.
	Evolução tecnológica	Partes que provavelmente serão submetidas a alterações como resultado de uma mudança da demanda do cliente ou mudança de tecnologia. Será importante acomodar as interfaces de maneira que a nova tecnologia possa ser introduzida e substituir o módulo em questão.
	Mudanças de produto planejadas	Partes do produto que a empresa pretende desenvolver e mudar.
Variação	Especificação diferente	Tratar a variação de produto e a customização eficientemente. A equipe de projeto deve se empenhar para alocar todas as variações na menor quantidade de partes do produto possível.
	Estilo	Módulos de estilo tipicamente contém partes visíveis do produto que podem ser alteradas para criar diferentes variações do produto.
Produção	Unidade comum	Partes ou subsistemas que podem ser usadas para toda a gama de produtos.
	Processo organização e/ou	Partes que exigem o mesmo processo de produção são agrupadas.
Qualidade	Teste separado	A possibilidade de se testar separadamente cada módulo antes de entregar à montagem final pode contribuir para melhorias significativas de qualidade devido ao reduzido tempo de resposta.
Compras	Disponibilidade de fornecedor	Comprar módulos padronizados de fornecedores externos.
Pós-vendas	Serviço e manutenção	Partes expostas à serviços e manutenção podem ser agrupadas para formar um módulo de serviço para ser possível substituição e reparo rápidos.
	Atualização	Dar aos clientes a possibilidade de trocar o produto no futuro.
	Reciclagem	O número de materiais em cada módulo deve ser limitado. Materiais facilmente recicláveis podem ser mantidos em módulos de reciclagem separados.

2.6 Tipos de projeto

As ferramentas e métodos de desenvolvimento de produto são frequentemente descritas como se o desenvolvimento de produto fosse um processo único a partir de uma folha em branco para um novo produto distinto (*one-of-the-kind*). Contudo estes projetos a partir de uma folha em branco não são tão comuns quanto um desenvolvimento de produto derivativo. Um projeto típico se assemelha mais a um projeto derivativo, isto é, um projeto de modificação de um produto mais antigo (HÖLTTÄ-OTTO, 2005) (WHITNEY, 1990).

As múltiplas linhas de celular da Nokia ou os veículos da Volkswagen, incluindo as marcas Skoda e Audi, são bons exemplos. Estes produtos são raramente iniciados com uma folha em branco, mas são baseados em algo que já existe, algo baseado na competência principal (*core competence*) da empresa (HÖLTTÄ-OTTO, 2005). Por exemplo, na General Electric 85% dos projetos de desenvolvimento são modificações de projetos (WHITNEY, 1990).

A seguir é apresentado como alguns autores classificam e caracterizam os diversos tipos de projeto existentes (Figura 2.27).

Wheelwright e Clark 1992	Evbuomwan et al. 1996	Shenhar e Dvir 2004	Cooper 2011
Derivativo	Rotina	Derivativo	Produtos novos para o mundo
Ruptura	Reprojeto - Adaptativo - de Variantes	Plataforma	Novas linhas de produto
Plataforma		Ruptura	Adições a linhas de produto existentes
Pesquisa e desenvolvimento	Projetos não-de-rotina	Pahl et al. 2005	Melhorias e revisões de produtos existentes
Alianças e parcerias		Originais	Reposicionamentos
		Adaptativos	Reduções de custos

Figura 2.27: Classificações de tipos de projetos de acordo com diversos autores.

2.6.1 Tipos de projeto segundo Pahl e Beitz

Ao elaborar estruturas de funções, é preciso diferenciar entre projetos originais e projetos adaptativos. No caso de projetos originais, o ponto de partida para a estrutura da função é a lista de requisitos e a formulação abstrata do problema. Além das necessidades e vontades, ainda podem ser identificadas inter-relações funcionais ou dessas relações resultam ao menos as subfunções de entrada e de saída da estrutura da função (PAHL *et al.*, 2005).

Nas seqüências de desenvolvimentos, sob forma de projetos adaptativos, uma primeira tentativa para estabelecer a estrutura da função decorre da análise dos elementos da construção da solução conhecida. Ela serve de base para variantes da estrutura da função que podem conduzir a outras soluções possíveis. Além do mais, pode ser usada para fins de otimização ou desenvolvimento de sistemas modulares (PAHL *et al.*, 2005).

2.6.2 Tipos de projeto segundo Wheelwright e Clark

Wheelwright e Clark (1992) definiram cinco tipos de projetos de desenvolvimento de produto baseando-se em duas dimensões, o nível de mudança no produto e o nível de mudança no processo de manufatura. Os três primeiros são projetos de desenvolvimento comerciais: derivativo, ruptura e plataforma. As outras duas categorias são: pesquisa e desenvolvimento, a qual é precursora de um desenvolvimento comercial, e alianças e parcerias, as quais podem ser tanto comerciais ou pesquisas básicas (2.28).

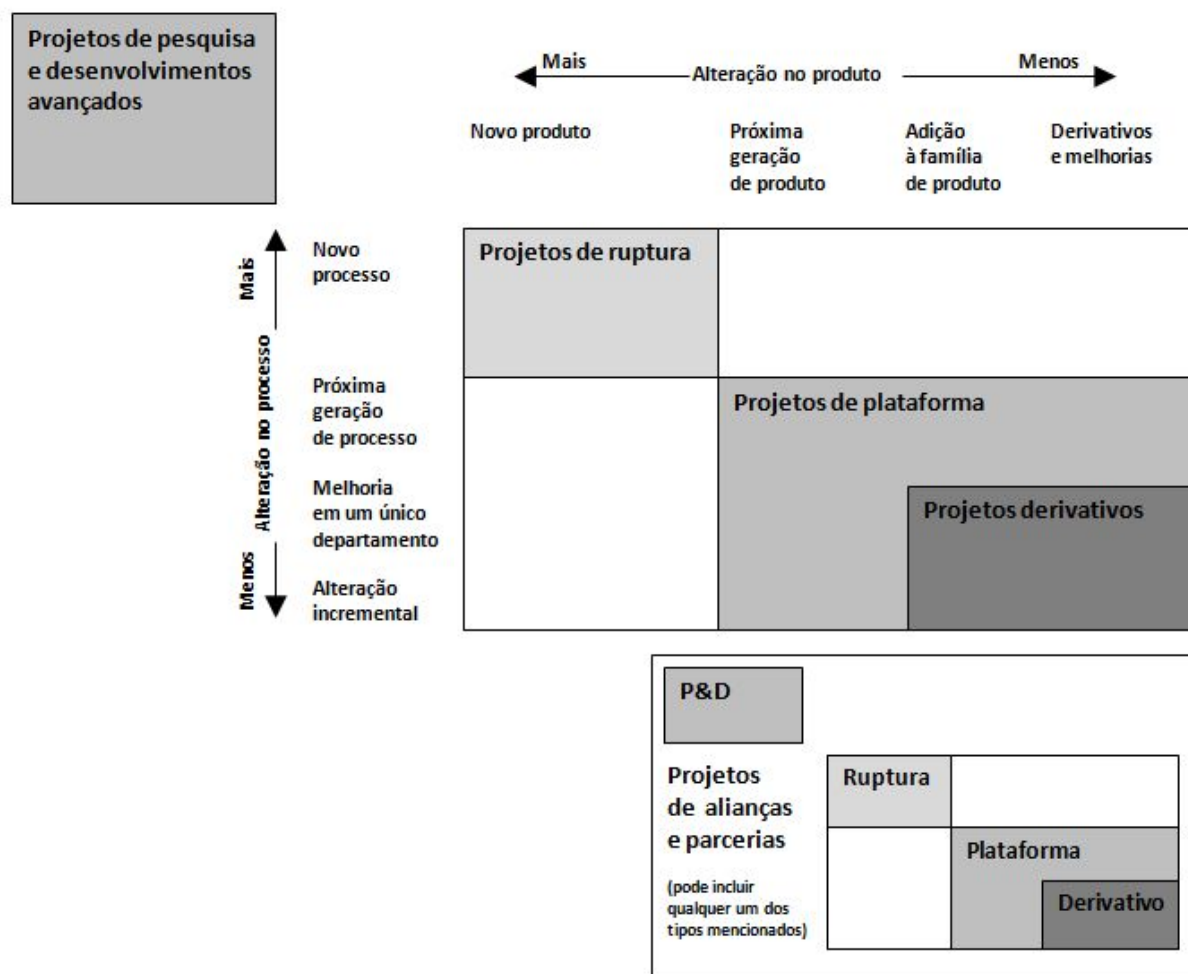


Figura 2.28: Mapeamento dos cinco tipos de projetos de desenvolvimento. Adaptado de Wheelwright e Clark (1992).

1. Projetos derivativos abrangem desde versões de custo reduzido de produtos existentes até inclusões ou aperfeiçoamentos de processos de produção existentes. O trabalho de desenvolvimento nos projetos derivativos tipicamente se enquadra em três categorias:
 - Mudanças incrementais do produto: como novo empacotamento ou nova característica com pequena ou nenhuma mudança no processo de manufatura;
 - Mudanças incrementais do processo: como um processo de manufatura de custo menor, maior confiabilidade ou uma pequena mudança nos materiais usados, com pouca ou nenhuma mudança no produto ;
 - Mudanças incrementais em ambas dimensões.
2. Projetos de ruptura estão no outro extremo do espectro de desenvolvimento, pois envolve mudanças significativas nos produtos e processos existentes. Projetos de ruptura bem sucedidos estabelecem categorias de produtos e processos que diferem fundamentalmente das gerações anteriores.
3. Projetos de plataforma estão no meio do espectro de desenvolvimentos e portanto são mais difíceis de definir. Eles requerem mais mudanças no produto e/ou no processo que os projetos derivativos, porém eles não introduzem novas tecnologias ou materiais não testados como os projetos de ruptura.

Produtos de plataforma bem planejados e bem executados trazem tipicamente melhorias fundamentais no custo, qualidade e desempenho em relação às gerações anteriores.
4. Pesquisa e desenvolvimento é a geração de conhecimentos de novos materiais e tecnologias que eventualmente se transformam em um desenvolvimento comercial.
5. Alianças e parcerias, as quais também se situam fora dos limites do mapa de desenvolvimento, podem ser criadas para buscar qualquer tipo de projeto: pesquisa e desenvolvimento, ruptura, plataforma ou derivativo.

2.6.3 Tipos de projeto segundo Shenhar e Dvir

Shenhar e Dvir (1996) desenvolveram uma teoria tipológica de gerenciamento de projeto e uma estrutura de três dimensões para análise de projetos chamada modelo UCP, do inglês "*Uncertainty, Complexity and Pace*", que significam incerteza, complexidade e ritmo.

A incerteza é avaliada no início do projeto. A complexidade considera o tamanho, número de elementos, variedade e interconectividade. E o ritmo se refere ao tempo disponível.

Shenhar e Dvir (2004) propuseram um modelo mais refinado consistido por quatro dimensões: inovação, complexidade, tecnologia e ritmo. Denominado de modelo diamante NCTP, referente a "*Novelty, Complexity, Technology and Pace*" (Figura 2.29).

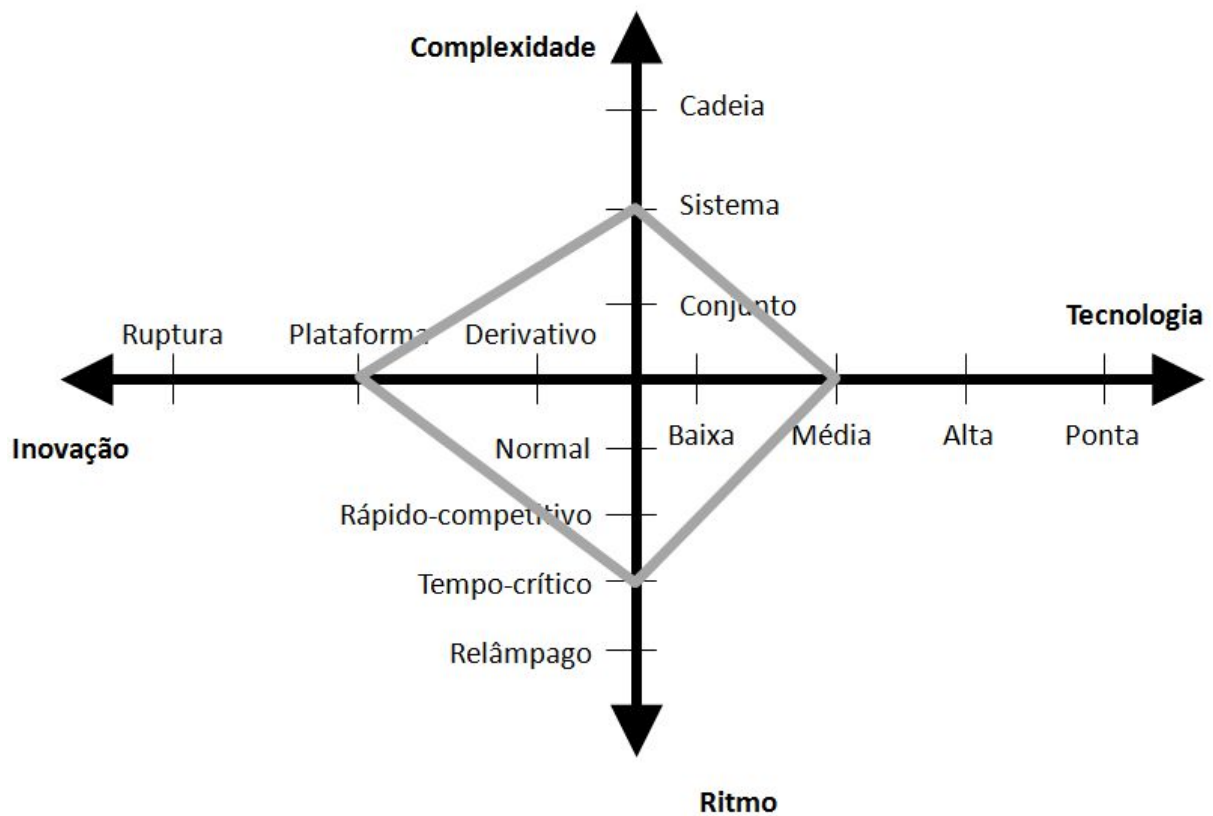


Figura 2.29: Modelo diamante NCTP. Adaptado de Shenhar *et al.* (2005).

Inovação: o quanto novo é o produto para o mercado.

- Derivativo: melhoria de um produto existente;
- Plataforma: uma nova geração de uma linha de produto existente;
- Ruptura: um produto novo para o mundo.

Complexidade: o quanto complexo é o produto.

- Conjunto: subsistema executando uma única função;
- Sistema: conjunto de subsistemas com múltiplas funções;
- Cadeia: coleção bastante dispersa de sistemas com um objetivo comum.

Tecnologia: extensão da tecnologia nova para a empresa, que é usada no projeto.

- Baixa tecnologia: nenhuma tecnologia nova é usada;
- Média tecnologia: alguma tecnologia nova;
- Alta tecnologia: maioria ou todas tecnologias novas, porém existentes;
- Tecnologia de ponta: tecnologias necessárias não existentes no início do projeto.

Ritmo: urgência do projeto e tempo disponível.

- Normal: atrasos não são críticos;
- Rápido-competitivo: o tempo para o mercado é importante para o negócio;
- Tempo-crítico: conclusão no tempo é crucial para a oportunidade de sucesso;
- Relâmpago: projeto de crise, solução imediata é necessária.

2.6.4 Tipos de projeto segundo Evbuomwan *et al.*

Segundo Evbuomwan *et al.* (1996), os problemas dos projetos enfrentados pelos engenheiros e projetistas podem ser classificados sob os seguintes tipos:

1. Projetos de rotina: estes são considerados derivados de protótipos comuns com o mesmo conjunto de variáveis ou características e a estrutura não muda. Aqui um plano de projeto existe, com decomposição em sub-problemas, alternativas e soluções prototipadas conhecidas antecipadamente.
2. Reprojetos (*redesigns*): Isto envolve modificar um projeto existente para satisfazer aos novos requisitos ou melhorar seu desempenho submetido aos requisitos atuais. O resultado final do reprojeto pode também apresentar alguma forma de conteúdo criativo, inovador ou de projeto de rotina. Reprojetos são discutidos como projetos adaptativos e projetos de variantes.
 - a. Projetos adaptativos, configurativos ou transitórios. Estas formas de projeto envolvem adaptar um sistema conhecido (o princípio de solução permanece o mesmo) para uma tarefa alterada. Eles também envolvem melhorias do projeto básico por uma série de refinamentos de detalhes.
 - b. Projetos de variantes, de extensão ou paramétrico. Este segue um procedimento extrapolativo ou intepolativo. A técnica de projeto usa um projeto testado/provado como uma base para gerar mais projetos geometricamente similares com capacidades diferentes.
3. Projetos não-de-rotina, projetos originais ou novos. Estas formas de projeto também são conhecidos como projetos originais e são classificados em projetos inovadores e criativos.
 - a. Projetos inovadores. Aqui variáveis ou características novas são introduzidas, as quais ainda carregam alguma similaridade com as variáveis ou características existentes, e a decomposição do problema é conhecida, mas os sub-problemas e várias alternativas às suas soluções devem ser sintetizadas. Em outras situações, uma recombinação alternativa de sub-problemas pode gerar novos projetos. Também é considerado que resolver o mesmo problema de maneiras diferentes, ou diferentes problemas da mesma maneira (por analogia), cairia nesta classe.

b. Projetos criativos. Neste caso novas variáveis ou características são introduzidas, as quais não carregam similaridade com as variáveis ou características do protótipo anterior e o projeto resultante tem pouca similaridade com os projetos existentes. Para projetos criativos nenhum plano de projeto é conhecido, a priori, para o problema em consideração.

2.6.5 Tipos de projeto segundo Cooper

Outra maneira útil de se identificar diferentes tipos de novos produtos é de acordo com a sua novidade para a empresa e para o mercado, onde novo para a empresa significa que ela nunca produziu ou comercializou este tipo de produto antes, mas outras empresas podem já o ter feito; e novo para o mercado, o produto é o primeiro do seu tipo no mercado. Cooper (2011) identificou seis diferentes tipos ou categorias de produto, assim como o percentual de suas ocorrências.

1. Produtos novos para o mundo: estes novos produtos são os primeiros dos seus tipos e criam um mercado totalmente novo. Este tipo representa somente 10% de todos os novos produtos e tende a diminuir.
2. Novas linhas de produto: estes produtos, apesar de não serem novos para o mercado, são realmente novos para a empresa em específico. Eles permitem que a empresa entre em uma categoria de produto estabelecida ou em um mercado pela primeira vez. Cerca de 20% de todos os novos produtos são deste tipo.
3. Adições a linhas de produtos existentes: estes são novos itens para a empresa, porém eles se enquadram dentro de uma linha de produtos existente que a empresa produz. Eles também podem representar um produto relativamente novo para o mercado. Este tipo de novo produto contempla uma das maiores parcelas de todos os lançamentos de novos produtos com cerca de 26%.
4. Melhorias e revisões de produtos existentes: estes produtos "não-tão-novos" são essencialmente substituições de produtos existentes em uma linha de produto da empresa. Eles oferecem um desempenho melhor ou um valor aparente maior em relação ao produto anterior. Este produtos novos e melhorados também correspondem a até 26% dos lançamentos de novos produtos.
5. Reposicionamentos: estes são basicamente novas aplicações de produtos existentes e frequentemente envolvem um redirecionamento de produtos antigos para um novo segmento de mercado ou para uma aplicação diferente. Reposicionamentos correspondem a cerca de 7% de todos os novos produtos.
6. Reduções de custos: estes são os menos "novos" de todos os tipos de novos produtos. Eles são novos produtos desenvolvidos para substituir produtos existentes da empresa, mas

eles apresentam benefícios e desempenhos equivalentes a custos inferiores. Do ponto de vista de marketing, eles não são novos produtos, mas do ponto de vista de desenvolvimento e produção, eles podem representar mudanças significativas. Ele representam 11% de todos os lançamentos de novos produtos.

A Figura 2.30 apresenta os tipos de novos produtos segundo Cooper (2011), organizando-os segundo dois eixos: novidade para a empresa e novidade para o mercado.

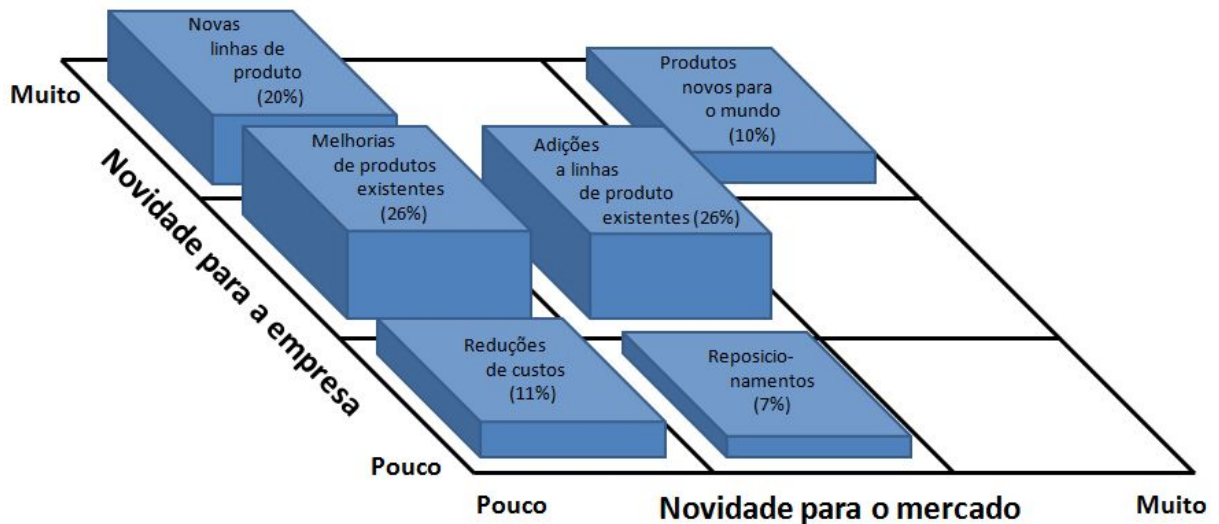


Figura 2.30: Tipos de novos produtos. Adaptado de Cooper (2011).

3 Metodologia de pesquisa e proposta do procedimento

Este capítulo discorre sobre dois assuntos: o primeiro se refere aos métodos de pesquisa utilizados no desenvolvimento da tese (Seção 3.1); e o segundo se refere à proposição do procedimento elaborado nesta tese. Isto é feito a partir de premissas discutidas nas Seção 3.2 e em seguida o procedimento proposto é descrito e discutido detalhadamente na Seção 3.3.

3.1 Metodologia de pesquisa

Pode-se identificar duas etapas distintas na elaboração desta tese. A primeira se refere à proposta do procedimento de modelagem funcional integral do produto, apresentada neste Capítulo 3. E a segunda contempla a validação deste procedimento, apresentada no Capítulo 4.

Segundo Gil (2002), pode-se classificar o delineamento desta tese na etapa da proposta do procedimento como pesquisa bibliográfica, onde se recorreu basicamente a livros e publicações periódicas científicas. Com relação ao objetivo, pode-se classificar esta primeira etapa como uma pesquisa exploratória, onde se buscou deixar o conhecimento explícito com o intuito de construir a hipótese e aprimorar os conhecimentos da área pesquisada.

A pesquisa bibliográfica abordou os assuntos que delimitam o escopo da tese: função, cliente, ciclo de vida do produto, modelagem funcional, ferramentas de desenvolvimento de produto relacionadas ao conceito de função e tipos de projeto.

Esta revisão expõe o estado da arte do tema e evidencia os pontos que justificam a tese, além de expor o material base para compor o procedimento proposto combinando conceitos apresentados em cada um dos diversos tópicos.

Algumas questões auxiliaram na orientação da pesquisa bibliográfica, como:

- Qual a definição de função?
- Como se classificam as funções?
- Qual o princípio da modelagem funcional?
- Quais ferramentas de desenvolvimento de produto utilizam o conceito de função?
- Como se caracteriza um projeto derivativo?
- Como abordar o produto integralmente do ponto de vista funcional?

A definição da metodologia utilizada na segunda etapa não é tão trivial. O objetivo desta etapa é demonstrar a validade da proposta elaborada a partir da discussão dos conhecimentos apresentados na revisão bibliográfica. A questão é: qual a metodologia adequada para se validar um procedimento de desenvolvimento de produto?

Nota-se na literatura uma deficiência na definição de uma metodologia para este fim. O desenvolvimento de produto é um tema muito amplo, pois pode abordar os mais diversos tipos

de produtos (mecânicos, eletrônicos, software, entre outros) ou serviços e pode envolver as mais diversas tecnologias e indústrias. Adicionalmente as métricas de sucesso do desenvolvimento de um produto em si já podem ser um tema a parte.

De maneira geral as ferramentas de desenvolvimento de produto são validadas com o tempo de uso, consolidando-se conforme são aplicadas. São criadas para suprir uma necessidade identificada, formula-se uma abordagem com uma construção lógica e aplica-se ao caso. Conforme a ferramenta é bem sucedida, o seu uso é expandido e experimentado em áreas correlativas. Ao colecionar um conjunto de casos de sucesso, uma ferramenta consagra-se na área de desenvolvimento de produtos. Observa-se este fenômeno na história do FMEA (MCDERMOTT *et al.*, 2009) e da análise do valor (CSILLAG, 1995) por exemplo.

Portanto para se demonstrar a validade do procedimento proposto nesta tese, criou-se um estudo de caso, apresentado no Capítulo 4. Estudos de caso podem ser estudos qualitativos ou quantitativos (STAKE, 1994), porém é uma metodologia com tendências à abordagem qualitativa, na qual se chega a dados expressos na forma de discussões e/ou diagramas. E, como uma estratégia de pesquisa qualitativa, está sujeita a interpretações (SCHELL, 1992).

O estudo de caso elaborado aborda um tipo de projeto específico e delimitado. Nele foi aplicado o procedimento proposto pela tese e então são discutidos os resultados alcançados com este procedimento. Com isto quer se comprovar que o procedimento proposto é válido, especificamente nas condições demonstradas. Mesmo o resultado não podendo ser generalizado para todos os tipos de produtos e projetos, pode-se discutir e indicar a potencial expansão do seu uso para situações correlatas e similares.

O procedimento proposto nesta tese será consolidado conforme colecionar aplicações de sucesso, o que se dá com o tempo, da mesma maneira que foi descrito para as atuais ferramentas de desenvolvimento de produto já estabelecidas.

3.2 Premissas da proposta de modelagem funcional integral do produto

A modelagem funcional correlaciona os domínios envolvidos no desenvolvimento do produto: o domínio subjetivo e o domínio objetivo de Umeda *et al.* (1995), Umeda *et al.* (1996), Chandrasekaran e Josephson (2000) e Erden *et al.* (2008), apresentados na Seção 2.4.1; equivalentes ao domínio funcional e domínio físico de Suh (2001) apresentados na Seção 2.5.6.

A abordagem funcional se estabeleceu por possibilitar eliminar sistematicamente falhas desde o início do projeto ((WERDICH, 2011) apresentado na Seção 2.4.1) e por lidar diretamente com o que o cliente deseja ((MILES, 1972) apresentado na Seção 1.1).

O trabalho sistemático desde o início do projeto é importante, pois já no início do projeto é comprometida a maior parte dos custos do projeto (Rozenfeld *et al.* (2006) apresentado na Seção 2.3) e quanto mais tarde são descobertas as falhas, maiores são os custos de alteração (Baxter (2011) apresentado na Seção 2.3), podendo até inviabilizar o projeto. Por isto a proposta desta tese busca uma maneira de abordar o produto integralmente, minimizando omissões no projeto.

Diversas classificações de tipos de projetos estão apresentadas na Seção 2.6. Pahl *et al.* (2005) mencionam os projetos adaptativos como projetos que partem de uma solução conhecida. Wheelwright e Clark (1992) descrevem os projetos derivativos de como mudanças incrementais de produtos existentes. Shenhar e Dvir (2004) apresentam o projeto derivativo como a melhoria de um produto existente. Evbuomwan *et al.* (1996) apresentam os projetos de rotina e os reprojetos (adaptativos e de variantes) como projetos baseados em produtos e soluções existentes. Cooper (2011) apresenta os tipos de projetos: melhorias e revisões de projetos existentes; reposicionamentos; e reduções de custos. Este projetos são basicamente adaptações e alterações de produtos existentes.

Os projetos que tomam como base um produto existente, independentemente do nome dado a este projeto, são a maioria dos projetos desenvolvidos (Hölttä-Otto (2005), Whitney (1990) e Cooper (2011) apresentados na Seção 2.6).

Esta tese adota o nome projeto derivativo, para se referir a projetos que tomam um produto base como referência para o desenvolvimento do novo projeto, por expressar claramente no nome a ideia de que o novo projeto deriva de um produto existente.

A modelagem funcional decompõe as funções desde um nível alto de abstração totalmente independente da solução até os níveis mais baixos de abstração dependentes da solução (Daniilidis *et al.* (2011) apresentado em 2.4.1).

Gero (1990), Umeda *et al.* (1995), Goel e Bhatta (2004) e Yaner e Goel (2006) acrescentam o conceito de comportamento (*Behavior*) ao conceito de função na modelagem funcional, apresentados na Seção 2.4.2. Por exemplo, o comportamento de "oscilar corda"exibe a função "produzir som". Yaner e Goel (2006) apresentam um modelo onde as funções se alternam sucessivamente com os comportamentos. Umeda *et al.* (1995) argumentam que é difícil representar a função independentemente do comportamento do qual é abstraído.

Como este trabalho adota uma definição de função com um alto nível de abstração: fazer algo (apresentado na Seção 2.1.1), não haverá uma distinção formal entre função e comportamento nas sucessivas alternâncias entre as mesmas. O desdobramento funcional se dá seguindo a lógica do "COMO-POR QUE"do diagrama FAST (Wixson (1999) apresentada na Seção 2.5.2).

As funções são representadas pelo par "verbo + substantivo"que representam respectivamente a função e o fluxo, apresentados na Seção 2.1.3. Nesta tese, o par "verbo + substantivo"será inicialmente descrito duplamente: uma vez com os termos estabelecidos na base funcional (Seção 2.1.3) e outra com os termos livres.

Este convenção é adotada neste momento, pois levanta-se a hipótese de que estes termos estabelecidos na base funcional dificultem a comunicação na discussão das funções de baixos nível de abstração e dependentes da solução, necessitando de termos bastante específicos.

A proposta desta tese busca orientações práticas e intuitivas para a modelagem funcional, pois este é um dos pontos negativos que limitam a adoção destas ferramentas na indústria (Lopez-Mesa e Bylund (2011), Araujo *et al.* (1996), Whybrew *et al.* (2001) e Aurisicchio *et al.* (2013) apresentados na Seção 2.4.2).

O desenvolvimento da modelagem funcional integral dos produtos base de uma empresa deve idealmente ocorrer previamente ao processo de desenvolvimento de produto, assim quando um projeto derivativo for desenvolvido, a modelagem funcional do produto base poderá ser utilizada na etapa de Projeto Detalhado, apresentada na Figura 3.1. Esta utilização é explorada na Seção 5.3.

Caso, durante a etapa de Projeto Preliminar, seja identificado que não há disponível a modelagem funcional do produto base em questão, deve-se iniciar imediatamente a modelagem funcional, para que esta esteja disponível para o Projeto Detalhado e então seguir normalmente o fluxo descrito anteriormente.



Figura 3.1: Modelo de metodologia de projetos. Adaptado de Delgado Neto (2009)

3.3 Proposta de modelagem funcional integral do produto

O desenvolvimento do produto se dá pelo mapeamento entre os domínios funcional e físico, como definido por Suh (1990) (Seção 2.5.6), portanto é essencial que a composição destes domínios não contenha omissões. A modelagem funcional se refere a composição e correlação destes domínios.

Partindo deste ponto e com o objetivo de tratar o produto integralmente, o projeto derivativo proporciona condições ideais para esta abordagem. O projeto derivativo é desenvolvido a partir de um produto base que sofre alterações incrementais para atender aos novos requisitos de projeto. Portanto o produto base é na realidade o objeto de estudo da modelagem funcional integral do produto. O procedimento proposto é composto por duas etapas, as quais são apresentadas na sequência: composição do domínio físico (Seção 3.3.1) e a composição do domínio funcional correlacionando-o com a estrutura (Seção 3.3.2).

O produto base tem uma estrutura física estabelecida claramente até o nível dos parâmetros físicos e por isto é a orientação para a composição integral do domínio físico.

A composição integral do domínio funcional significa que todas as funções do produto devem ser contempladas. As funções têm sua origem nos clientes, conforme discutido na Seções 2.1 e 2.2. Por sua vez, os clientes estão associados aos processos do ciclo de vida do produto (como no *Life Cycle Assessment* apresentado na Seção 2.3).

Como o produto base possui um fluxo de processos estabelecido, analisando o ciclo de vida do produto base é possível identificar todos os seus clientes e portanto todas as funções do produto base. A partir da proposta de composição do domínio funcional, surge uma proposta de classificação de funções apresentada na Seção 3.3.3.

Assim como na FMEA (Seção 2.5.3) e na DRBFM (Seção 2.5.4), a organização da equipe e das reuniões para o desenvolvimento do projeto são importantes. A organização da equipe e das reuniões para a proposta da tese é apresentada e discutida na Seção 3.3.5.

Nesta tese, a proposta foi elaborada pensando em produtos mecânicos, ou seja, onde os fenômenos atuantes no desempenhos das funções são basicamente fenômenos físicos. Outros tipos de produtos, como produtos eletrônicos ou softwares, assim como serviços, ou produtos baseados em outros fenômenos podem se beneficiar do procedimento proposto, porém a comprovação da validade deste benefício não está contemplado no escopo desta tese.

3.3.1 Composição do domínio físico da modelagem

A composição do domínio físico é feita a partir da análise estrutural do produto base. O domínio físico é o conjunto dos parâmetros de projeto concebidos para satisfazer aos requisitos funcionais, como definido no projeto axiomático (Seção 2.5.6). Os documentos necessários para iniciar a análise estrutural do produto base são:

- Lista de componentes
- Desenho de conjunto
- Desenhos de sub-conjuntos
- Desenhos de componentes
- Desenhos de estágio dos componentes

Para se delimitar claramente o problema, recomenda-se a criação de um diagrama de blocos como na FMEA (Seção 2.5.3), onde são dispostos os componentes do produto, identificados na lista de componentes, assim como componentes das interfaces relevantes do produto.

Neste diagrama devem ser delimitados os sub-conjuntos formados e o conjunto equivalente ao produto analisado. Nele também são identificadas as interfaces internas (relações entre componentes do produto) e as interfaces externas (relações entre componentes do produto

e componentes externos ao produto). Um exemplo de um diagrama de blocos é apresentado na Figura 3.2.

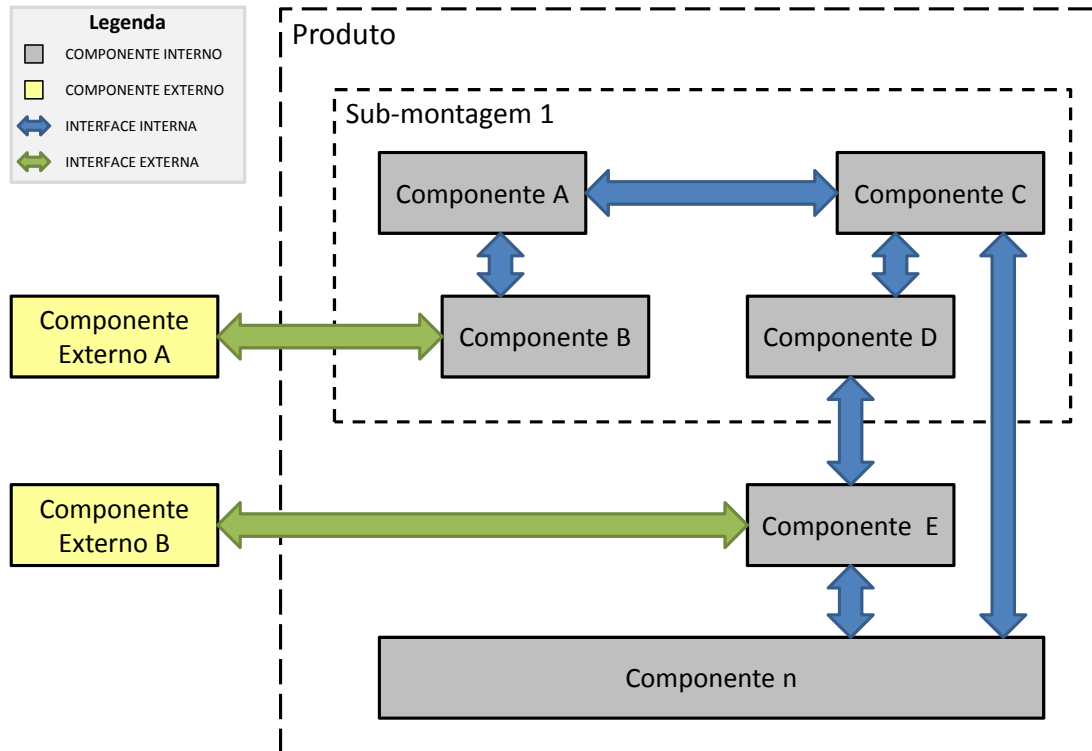


Figura 3.2: Exemplo de diagrama de blocos.

Este diagrama de blocos consegue de uma maneira simples e visual delimitar o objeto de estudo. A partir disto, deve-se organizar estas informações atentando para utilizar sempre a mesma denominação em todos os documentos. Por exemplo, o mesmo nome do componente no seu desenho deve ser usado no diagrama de blocos e nos documentos seguintes, assim facilita-se o entendimento e propicia a rastreabilidade da informação.

Baseando-se na lista de componentes e no diagrama de blocos, pode-se montar uma estrutura partindo do conjunto, sub-montagens decompondo até os componentes. Esta representação deve também identificar os estágios dos componentes considerados e não somente o seu estado final. Esta estrutura é representada na Figura 3.3.

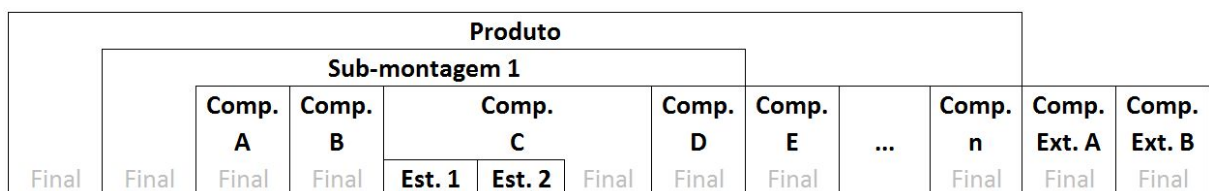


Figura 3.3: Estrutura física do produto.

Para facilitar a visualização, incluiu-se a palavra "final" para identificar o estado final de cada componente, mas esta notação é desnecessária. Nota-se na Figura 3.3 que o Componente C tem os estágios 1 e 2 considerados além do seu estado final, seguindo o fluxo de processo apresentado na Figura 3.4.



Figura 3.4: Fluxo de processo do Componente C.

O próximo passo é identificar em cada um dos desenhos (conjunto, sub-montagens, componentes e estágios) os parâmetros de projeto especificados, considerando desde as cotas até as especificações em notas e legendas. A Figura 3.5 apresenta um exemplo de desenho de um componente, onde foram identificados quatro parâmetros de projeto, sinalizados com números circunscritos.

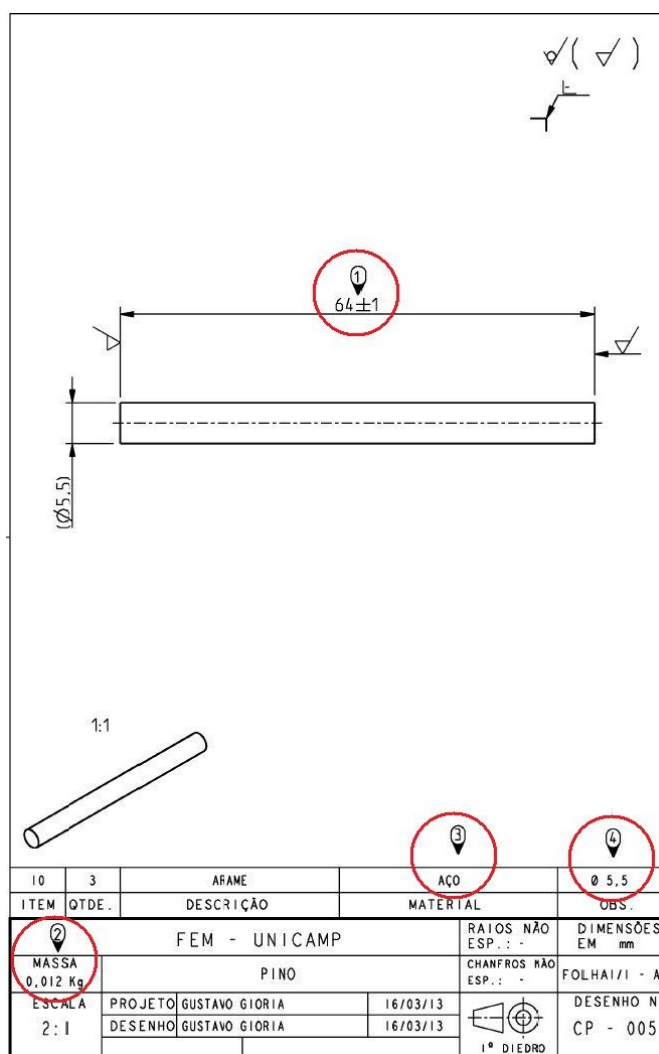


Figura 3.5: Exemplo de desenho com parâmetros identificados.

A Figura 3.6 ilustra a inclusão dos parâmetros de projeto identificados em cada componente na estrutura física do produto. Na figura pode-se ver os parâmetros preenchidos na linha abaixo dos seus respectivos componentes, completando assim a estrutura física do produto do produto até os parâmetros físicos do produto.

Produto																																
Sub-montagem 1																																
Comp. A			Comp. B			Comp. C						Comp. D			Comp. E			...			Comp. n			Comp. Ext. A			Comp. Ext. B					
Final			Final			Final						Final			Final						Final			Final			Final					
1 ... n			1 ... n			Est. 1		Est. 2		Final		1 ... n			1 ... n			1 ... n						1 ... n			1 ... n			1 ... n		

Figura 3.6: Estrutura física do produto incluindo os parâmetros de projeto.

Os parâmetros físicos a serem considerados não estão necessariamente todos concentrados nos desenhos de componentes. É possível que nos desenhos de conjunto ou de sub-montagem haja algum parâmetro definido e este também deve ser considerado na estrutura física do produto, como pode ser observado na Figura 3.6. Com isto se tem a análise da estrutura física do produto base. Esta estrutura forma o cabeçalho das colunas da matriz função componente apresentada na Seção 2.5.3.

3.3.2 Composição do domínio funcional da modelagem

Esta seção descreve a composição do domínio funcional do produto base e a correlação do domínio funcional com o domínio físico para compor a matriz função componente apresentada na Seção 2.5.3. O domínio funcional deve desdobrar as funções do mais alto nível de abstração até o nível mais baixo de abstração onde as funções podem ser correlacionadas com os parâmetros físicos do produto base.

Com o objetivo de eliminar as omissões, a abordagem integral do produto base, do ponto de vista funcional, fundamenta-se no mapeamento dos clientes através da identificação de todos os processos do ciclo de vida do produto base. Portanto o primeiro passo é identificar os processos relevantes do produto base que serão considerado na modelagem funcional.

Por exemplo, baseando-se nas Figuras 3.2 e 3.4, pode-se tratar dos processos de manufatura do componente C, sub-montagem, montagem, uso e manutenção. Portanto teriam sido identificados cinco processos relevantes. Estes processo são listados um abaixo do outro linearmente da maneira mais lógica possível, como mostra a Figura 3.7.

Cada um dos processos pode ser descrito através de uma sequência de atividades, a execução de cada uma das atividades é uma função relacionada ao processo. A Figura 3.8 descreve a sequência de atividades do processo de sub-montagem: monta-se o componente A com o B, em seguida monta-se o componente C e por último monta-se o componente D completando a sub-montagem. Para se auxiliar na elaboração da descrição das atividades do processo, recomenda-se a observação e a consulta aos clientes.

Processo

Manufatura Comp. C
Sub-montagem
Montagem
Uso
Manutenção

Figura 3.7: Processos considerados para a modelagem funcional.

Processo**Função**

Sub-montagem	Montar Comp. A +B
	Montar Comp. C
	Montar Comp. D

Figura 3.8: Processo de sub-montagem.

O desdobramento é feito sucessivamente até que a função possa ser associada diretamente aos parâmetros do domínio físico. Este desdobramento é feito para todos os processos e então se obtém uma estrutura funcional como ilustrada na Figura 3.9.

Processo	Função		
Processo 1	Função 1.1	...	Sub-função 1.1.n.1
			...
			Sub-função 1.1.n.n
	...	...	
Processo 2	Função 1.n		
	Função 2.1		
	...	...	...
Processo 3	Função 2.n		
	Função 3.1		
	...	...	...
...	Função 3.n		
	...		...
Processo n	...	...	
	Função n.1		
	...		...
	Função n.n		Sub-função n.n.n.n

Figura 3.9: Estrutura funcional do produto.

Esta estrutura é lida seguindo a lógica do "COMO-POR QUE". Caminhando da esquerda para direita segue-se a lógica de COMO a função é executada e da direita para a esquerda de POR QUE a função é executada.

As funções e sub-funções devem ser descritas por um verbo e um substantivo seguindo a base funcional (Seção 2.1.3). Sugere-se que na descrição das funções, além da nomenclatura padronizada, esta função também seja descrita com a linguagem usada no dia-a-dia da equipe de projeto. A nomenclatura padronizada garantirá e permitirá a troca e a formação de um banco de dados de projeto, porém a linguagem livre da equipe de projeto permite um dinamismo nas discussões e facilita o entendimento da análise funcional no contexto. Os participantes da análise funcional não precisam dominar o vocabulário padronizado e as discussões ocorrem naturalmente nos temas cotidianos. O responsável pelo projeto deve "traduzir" as funções levantadas e documentá-las com o vocabulário padronizado.

Esta estrutura funcional forma o cabeçalho das linhas de uma matriz, que juntamente com a estrutura de linhas elaborada na composição do domínio físico, compõem uma nova matriz denominada Matriz Processo Função Componente (PFCM ou *Process Function Component Matrix*) (Figura 3.10), a qual correlaciona desde os processos até as funções de nível mais baixo de abstração com os parâmetros físicos do projeto base.

			Produto																																							
			Sub-montagem 1																																							
			Comp. A						Comp. B						Comp. C						Comp. D				Comp. E				...		Comp. n				Comp. Ext. A				Comp. Ext. B			
			Final		Final		Final		Final		Est. 1		Est. 2		Final		Final		Final		Final		Final				Final		Final		Final		Final									
Processo	Função		1	...	n	1	...	n	1	...	n	1	...	n	1	...	n	1	...	n	1	...	n	1	...	n	1	...	n	1	...	n	1	...	n							
Processo 1	Função 1.1	Sub-função 1.1.n.1																																								
	...	...																																								
	...	Sub-função 1.1.n.n																																								
	...	...																																								
Processo 2	Função 1.n	...																																								
	Função 2.1	...																																								
	...	...																																								
Processo 3	Função 2.n	...																																								
	Função 3.1	...																																								
	...	...																																								
...	Função 3.n	...																																								
	...	...																																								
	...	...																																								
Processo n	Função n.1	...																																								
	...	...																																								
	Função n.n	Sub-função n.n.n.n																																								

Figura 3.10: Matriz Processo Função Componente.

Com o intuito de auxiliar no desdobramento dos processos em funções, a seguir são apresentadas algumas orientações específicas para alguns processos.

Uso: Este é o principal processo. Deve-se descrever todos os usos previstos para o produto que estão no escopo do projeto do mesmo.

Manufatura: Pode ser descrito tanto o processo de fabricação de cada componente ou somente dos componentes mais relevantes. No entanto uma vez que se descreve o processo de fabricação de um componente, deve-se considerá-lo integralmente, desde o recebimento da matéria-prima até a disponibilização do componente para a montagem, para evitar omissões.

Para cada etapa do processo deve-se ser capaz de identificar todos os parâmetros físicos do componente que estão sendo trabalhados. Os seguintes documentos são úteis neste desdobramento: fluxo de processo, desenhos de estágio do componente, instruções de trabalho para cada posto e plano de controle de qualidade. A observação dos processos e a contribuição dos operadores dos processos também são importantes para a análise funcional.

Montagem: Analisar todas as etapas da montagem do produto. Utilizar o fluxo do processo, as instruções de trabalhos, as instruções de controle de qualidade como suporte para a elaboração deste desdobramento, além da observação da linha de montagem e informações do operador da montagem.

Manutenção: O processo de manutenção deve prever os problemas mais frequentes do produto, como itens de desgaste por exemplo. Esta análise pode ser baseada nas instruções do manual de manutenção ou nos treinamentos técnicos dos responsáveis pela manutenção. A análise funcional descreve passo-a-passo o que é feito no produto para se restaurar a funcionalidade perdida.

Ajuste: Similar à manutenção, o processo de ajuste pode ser descrito a partir do manual de instruções do produto, onde o usuário pretende atuar no produto com o intuito de

ajustar o desempenho de uma função executada.

A partir da proposta de modelagem funcional integral do produto apresentada, identificou-se a possibilidade de se classificar hierarquicamente as funções de uma nova maneira considerando o ciclo de vida do produto, a qual é descrita a seguir na Seção 3.3.3.

3.3.3 Proposta de classificação de funções

Considerando uma sequência de processos da modelagem funcional integral do produto, para exemplificação, aqui serão abordados três processos genericamente definidos como A, B e C, ilustrados na Figura 3.11.

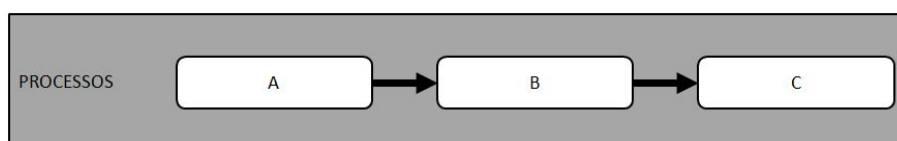


Figura 3.11: Sequência de processos considerados.

Cada processo pode ser descrito por uma sequência de tarefas ou genericamente, fazer algo. Portanto segundo a definição adotada nesta tese, uma sequência de funções. Estas funções estão no nível mais alto de abstração e portanto são denominadas funções básicas (Figura 3.12).

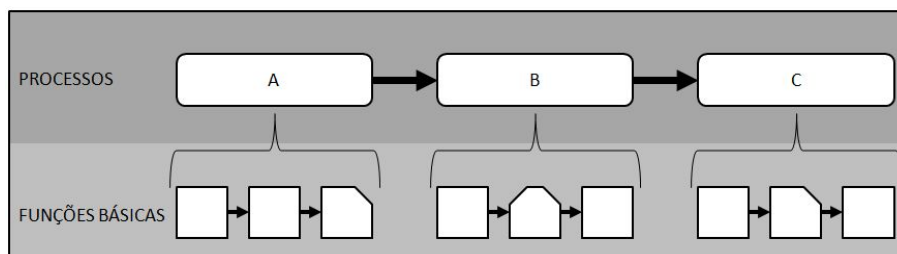


Figura 3.12: Processos descritos como uma sequência de funções básicas.

Estas funções são assim denominadas por estarem relacionadas às necessidades básicas de cada cliente, o responsável pelo processo. Ou seja, as necessidades dos clientes são identificadas. Elas servem de base para se iniciar o desdobramento ou decomposição funcional e não há função de nível de abstração maior que as funções básicas.

Na Figura 3.12 são usadas três funções básicas para se descrever o processo, porém esta quantidade utilizada é meramente ilustrativa. A quantidade de funções para se descrever um processo é aberta, ela depende do produto, do processo e das condições consideradas na análise.

As funções básicas podem ainda inicialmente ser classificadas em dois grupos, da seguinte maneira: cada processo descrito por uma sequência de funções básicas possui, dentre estas funções, uma que mais caracteriza o processo, o qual está descrevendo. Esta função é classificada como a função primária deste processo. As outras funções básicas relacionadas a

este processo são classificadas como funções secundárias. Na Figura 3.13 são identificados os ícones relacionados à função primária e à função secundária.

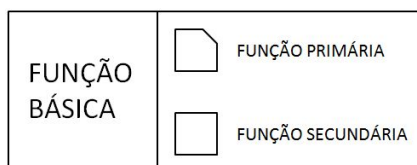


Figura 3.13: Função básica, função primária e função secundária.

Identificadas as funções básicas primárias e secundárias, consegue-se compreender um pouco mais a Figura 3.12 apresentada anteriormente. Nota-se que a função primária não tem uma posição fixa no sequenciamento das funções básicas. A função primária é definida pelo conteúdo da informação e não pela posição no sequenciamento. Como se pode notar no exemplo, no Processo A a função primária é a terceira das três funções básicas, no Processo C é a segunda.

Dentre todos os processos passíveis de serem analisados, o processo de uso é naturalmente o processo mais importante do produto, pois é o que dá significado a sua existência. Portanto a função primária relacionada a este processo é ainda classificada como função principal. Ou seja, a função principal do produto é a função básica primária relacionada ao processo de uso (Figuras 3.14 e 3.15).

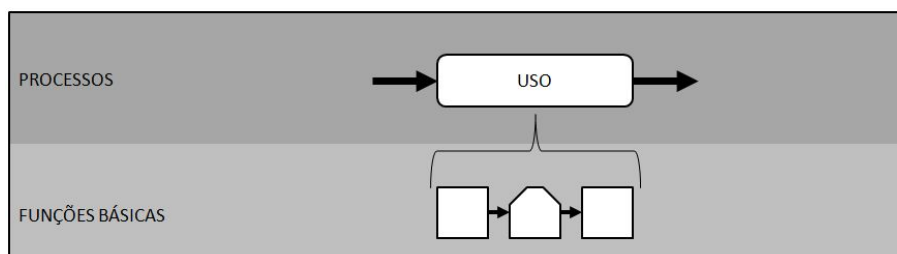


Figura 3.14: Processo de uso.

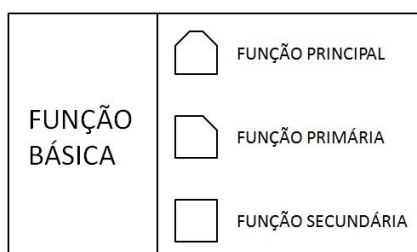


Figura 3.15: Funções básicas.

Uma vez identificadas as funções básicas, todas as funções desdobradas a partir destas são classificadas como subfunções. Portanto as subfunções são funções de qualquer nível de complexidade inferior às funções básicas. As subfunções são identificadas através de subseqüentes decomposições até o nível de detalhamento desejado na análise funcional (Figuras 3.16 e 3.17).

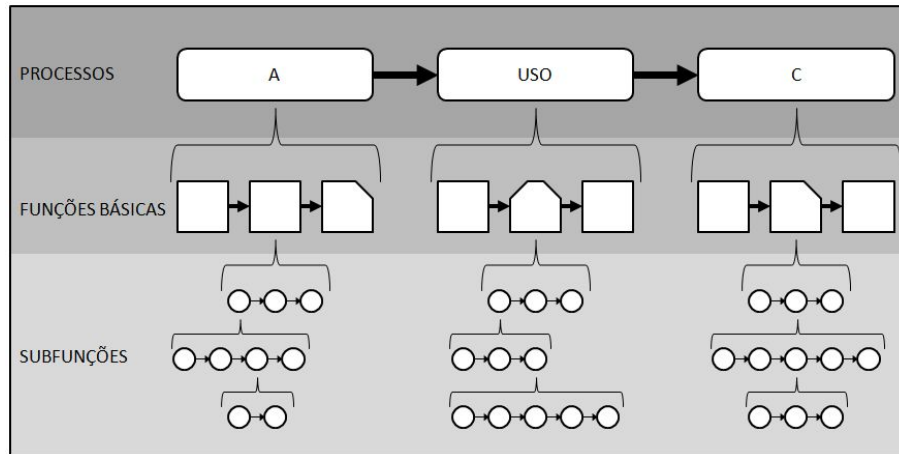


Figura 3.16: Análise funcional baseada no ciclo de vida.

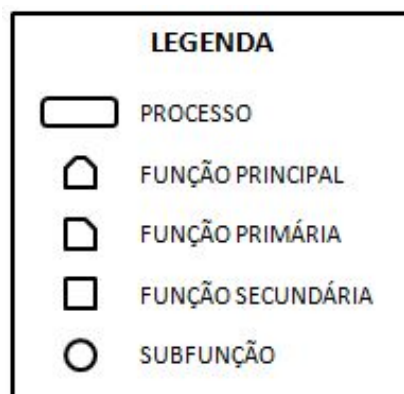


Figura 3.17: Classificação das funções.

As quantidades de subfunções utilizadas nas figuras também são meramente ilustrativas e mostram que tanto a função principal, quanto a primária e secundária podem ser desdobradas em subfunções.

Exemplo de classificação hierárquica de funções baseada no ciclo de vida do produto

Para se ilustrar a proposta de classificação hierárquica de funções proposta, a seguir é apresentado um fragmento de uma modelagem funcional seguindo esta proposta.

O produto a ser analisado consiste em uma roda dentada (Figura 3.18). Sem se preocupar com o formalismo da maneira de expressar uma função, será adotado simplesmente um verbo e um substantivo para tal expressão.



Figura 3.18: Produto: roda dentada.

Ao se analisar uma roda dentada quanto ao seu processo de uso, pode-se dizer que sua função principal é transmitir torque (Figura 3.19). Seja para transmitir o torque de um eixo para a corrente ou ao contrário.

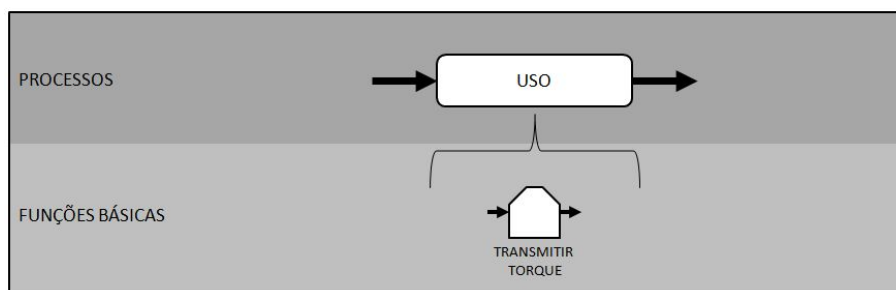


Figura 3.19: Processo de uso e função principal da roda dentada.

Quando se faz a análise funcional baseada no ciclo de vida do produto, conforme proposto por esta tese, haverá um processo de instalação do produto. Este processo pode ser descrito pela seguinte sequência de funções: posicionar roda dentada e fixar roda dentada. Estas são funções básicas do processo de instalação e ainda pode-se dizer que posicionar roda dentada é a função primária deste processo (Figura 3.20).

Isto quer dizer, que primeiramente deve-se colocar a roda dentada na sua posição de montagem no eixo e depois se deve fixar a roda dentada nesta posição, por exemplo com uma porca na ponta do eixo. Ao desdobrar a função fixar roda dentada em subfunções obtém-se: posicionar porca, segurar roda dentada, apertar porca (Figura 3.21). Note que a subfunção segurar a roda dentada para fixar a roda dentada através de uma porca é essencial. Sem ela, o torque aplicado à porca faz com que o eixo gire e a porca não seja fixada com o torque adequado, consequentemente comprometendo o processo de uso do produto.

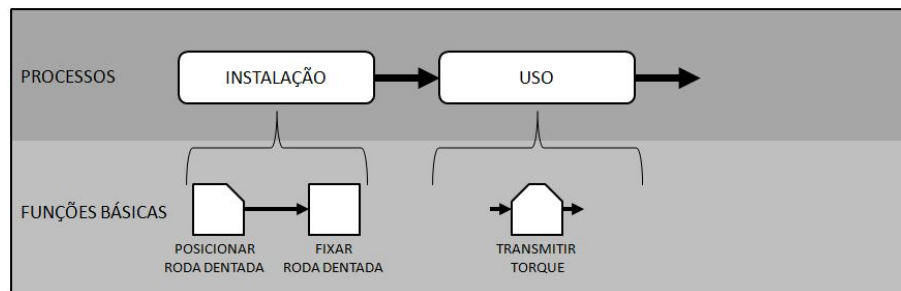


Figura 3.20: Processo de instalação da roda dentada.

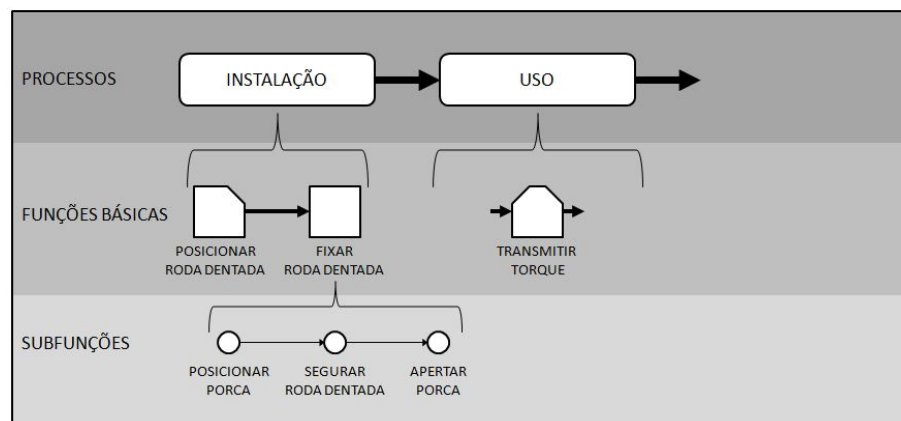


Figura 3.21: Subfunções de fixar roda dentada.

É interessante notar que a subfunção segurar roda dentada reflete diretamente no projeto do produto, mesmo não sendo um desdobramento de funções ligado ao processo de uso. Devido ao processo de instalação, se fazem necessários os furos no corpo da roda dentada para a utilização de uma ferramenta na instalação da mesma (Figura 3.22).



Figura 3.22: Ferramenta para instalação da roda dentada.

3.3.4 Correlação entre funções e requisitos de desempenho

Conforme descrito na Seção 2.1.1, o desempenho do produto é especificado por limites precisos das funções que o produto executa. Para isto propõe-se uma representação matricial que facilita a identificação da relação entre os requisitos de desempenho e as funções do produto, denominada PFPM (Matriz Processo Função Desempenho ou *Process Function Performance Matrix*).

A matriz é composta nas linhas pelo modelo funcional do produto e cada coluna é um requisito de desempenho identificado, como ilustrado na Figura 3.23.

			Desempenho			
Processo	Função		Requisito 1	Requisito 2	...	Requisito n
Processo 1	Função 1.1	Sub-função 1.1.n.1	X			
		...		X		
		Sub-função 1.1.n.n				
	...					
	Função 1.n					
Processo 2	Função 2.1					
	...	...				
	Função 2.n					
Processo 3	Função 3.1			X		
	...	...				
	Função 3.n					
...	...	...				
Processo n	Função n.1					
	...	...				
	Função n.n	Sub-função n.n.n.n				X

Figura 3.23: Matriz Processo Função Desempenho.

Observa-se na Figura 3.23, que o Requisito 1 está relacionado com a Sub-função 1.1.n.1; o Requisito 2 está relacionado com a Função 1.1 e a Função 3.1; e o Requisito n está relacionado com a Sub-função n.n.n.n. Ou seja, o requisito pode estar relacionado a uma ou mais funções e também pode estar ligado a funções de qualquer nível.

A partir da correlação identificada na PFPM entre os requisitos de desempenho e as funções do produto, pode-se em seguida identificar na PFCM os parâmetros do produto relacionadas às funções associadas ao requisito de desempenho.

3.3.5 Organização da equipe e reuniões

A organização da equipe e das reuniões é importante para se garantir uma aplicação eficaz do procedimento proposto, assim como na FMEA (WERDICH, 2011) e na DRBFM (TOYOTA, 2005). Sugere-se que o responsável técnico pelo produto lidere e conduza esta organização.

A equipe envolvida no procedimento deve ser multidisciplinar, pois todos os aspectos do produto serão tratados. No entanto, isto não significa que todos devem participar de todas as reuniões. Reuniões com grupos muito extensos impossibilitam que cada um traga sua contri-

buição em um tempo hábil e geralmente ocorrem discussões paralelas que não são aproveitadas efetivamente nos resultados, fazendo com que mais reuniões sejam necessárias. Com o passar das reuniões os convidados se desmotivam, o que contribui para que o índice de abstenção aumente. Um número grande de reuniões conflita com as prioridades dos participantes em relação às suas outras responsabilidades, o que contribui também para a abstenção nas reuniões.

Os participantes de cada reunião são definidos pelo líder do projeto conforme o conteúdo e o objetivo da mesma. A sugestão é trabalhar com dois tipos distintos de reuniões, uma para coleta de dados e outra para revisão da compilação dos dados. Pode-se estabelecer uma equipe central comum a todas as reuniões, que seriam os responsáveis pelo desenvolvimento do produto (engenheiro de produto e projetista por exemplo).

A reunião para coleta de dados deve ser focada no conteúdo a ser discutido e não na documentação. O líder, o qual tem uma visão global do produto, identifica os pontos a serem discutidos, então agrupa estes pontos e agenda uma reunião com a equipe central e mais os especialistas no assunto a se coletar informações.

Nesta reunião, os convidados não precisam dominar o procedimento da modelagem funcional quanto à sua formalidade, o líder ou neste caso moderador, deve conduzir a reunião para levantar os pontos que tem interesse e ter sensibilidade para identificar novos pontos durante a discussão. O importante é que não se deve usar a reunião para preencher documentos, pois isto atrapalha o ritmo das discussões e o tempo de reunião é mal aproveitado.

Após a reunião de coleta de dados, o líder deve organizar as informações levantadas no padrão da modelagem funcional e eventualmente identificar novos pontos a serem discutidos. O líder deve obrigatoriamente ter conhecimento pleno do procedimento e suas formalizações.

No planejamento das reuniões é possível prever alguns pontos de entregas parciais, onde, por exemplo, a modelagem funcional de um processo está completa. Neste momento deve-se fazer uma revisão parcial da modelagem funcional.

A reunião de revisão deve integrar especialistas de todas as áreas e o líder deve apresentar os documentos elaborados e auxiliares (desenhos, diagrama de blocos etc). Desta maneira todos têm uma visão geral do andamento da modelagem funcional e propicia discussões multidisciplinares. Esta maneira é sugerida na DRBFM e funciona como um *Design Review*.

O material organizado propicia o entendimento da equipe e as críticas construtivas da informação compilada. Nesta reunião é importante que se tenha também participantes com conhecimento específico do procedimento da modelagem funcional, pois a formalização da informação também é relevante neste momento.

Esta reunião é importante para evitar erros de entendimento da equipe central e para garantir que o compilado represente a opinião da equipe toda, isto traz também o comprometimento da equipe com o projeto. Mais uma vez, não se deve se preocupar em atualizar e corrigir o documento simultaneamente com as discussões; basta tomar nota dos pontos. A correção ou atualização do documento é feita após a reunião e reapresentada na próxima oportunidade.

A organização tradicional onde toda a equipe multidisciplinar participa de todas as reuniões e onde as reuniões são baseadas e focadas na documentação também funciona, porém apresenta algumas desvantagens citadas anteriormente.

O tempo de elaboração ou carga de trabalho para o procedimento de modelagem funcional proposto por esta tese não difere muito da elaboração de uma FMEA para o mesmo produto. Portanto um tempo hábil e já praticado dentro do desenvolvimento de produto.

4 Estudo de caso

Este capítulo apresenta um estudo de caso com o objetivo de se comprovar a viabilidade e de se demonstrar o potencial da proposta de modelagem funcional integral do produto aplicável a projetos derivativos. A proposta foi desenvolvida com foco em sistema mecânicos, ou seja, o princípio de funcionamento do produto é baseado em fenômenos físicos. O produto escolhido é um rolamento de rolos cilíndricos, apresentado na Figura 4.1.

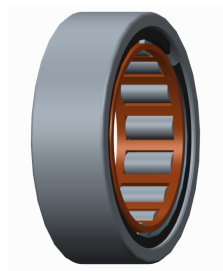


Figura 4.1: Ilustração do rolamento de rolos.

Este tipo de rolamento é empregado em várias aplicações, como caixas de transmissão automotivas, pontas de eixo de veículos e máquinas industriais. Porém sua construção deve ser adequada para as cargas, rotações e demais condições de aplicação de cada caso, gerando variações derivadas de um modelo de referência. Genericamente pode-se considerar a aplicação do rolamento como uma montagem em uma carcaça e um eixo, conforme ilustrado na Figura 4.2.

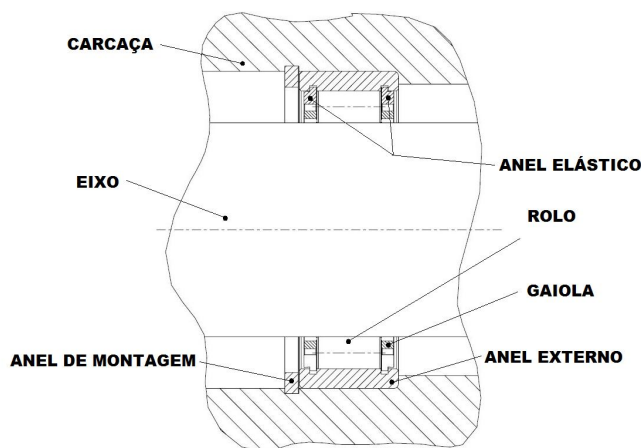


Figura 4.2: Ilustração em corte da aplicação do rolamento de rolos.

Definindo o rolamento apresentado como produto base, este capítulo desenvolve a modelagem funcional integral do produto apresentada em duas partes. A primeira compõe o domínio físico através da análise estrutural do produto base (Seção 4.1). A segunda parte compõe o domínio funcional e correlaciona-o com o domínio físico na análise funcional do produto base (Seção 4.2).

4.1 Análise estrutural do produto base

Esta seção apresenta a composição do domínio físico do produto base. O rolamento de rolos adotado como produto base é composto pelos componentes listados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Componentes do rolamento de rolos

Componente
Anel externo
Anel elástico
Gaiola
Rolo

O desenho de conjunto do rolamento de rolos da Figura 4.1 está apresentado no Apêndice A na Figura A.1. Juntamente com as informações da aplicação do rolamento apresentada na Figura 4.2, elabora-se o diagrama de blocos da Figura 4.3.

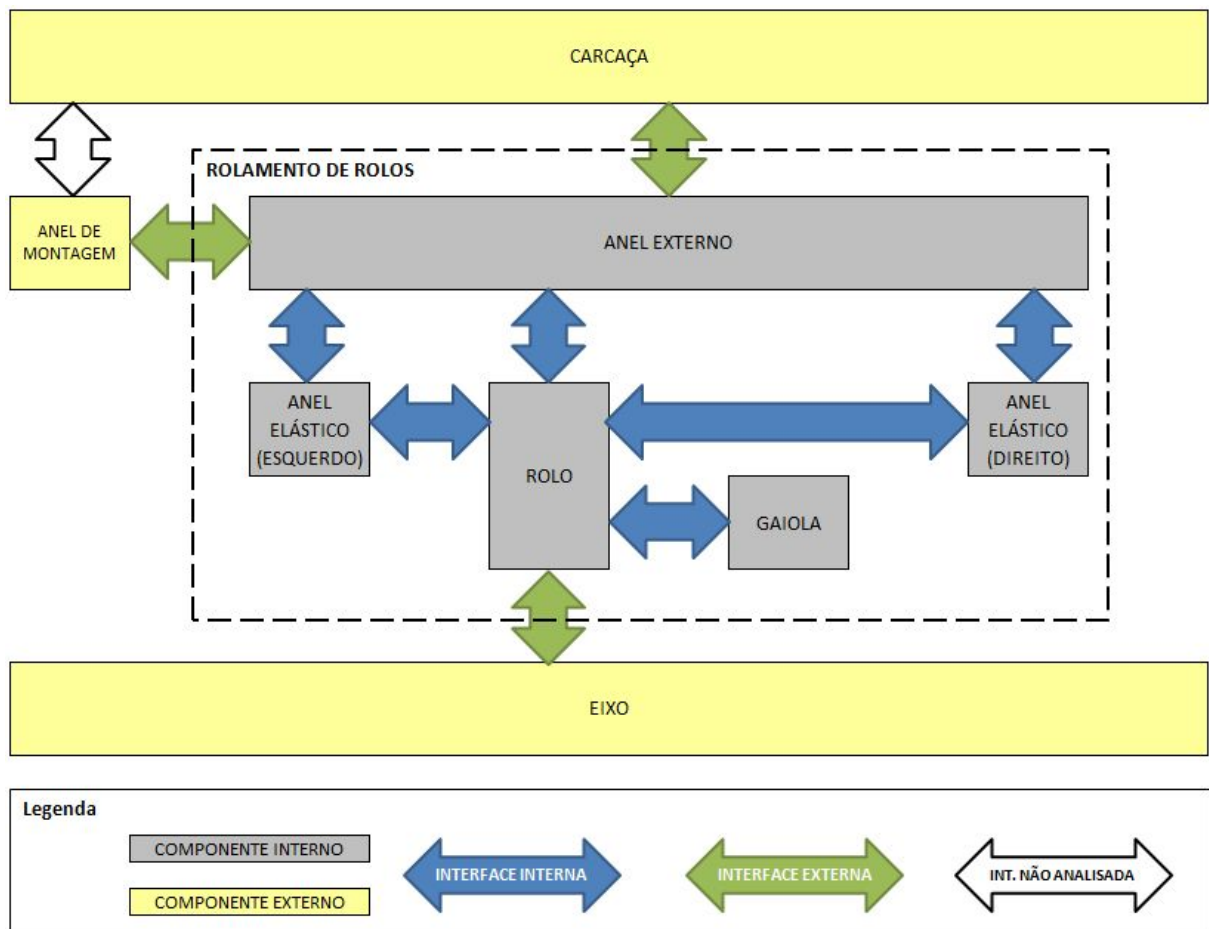


Figura 4.3: Diagrama de blocos do rolamento de rolos.

O diagrama de blocos facilita a visualização e a delimitação do escopo da análise estrutural. Nota-se a identificação de três componentes que fazem interface com o produto: a carcaça, o eixo e o anel de montagem.

A carcaça faz interface com o anel externo, o eixo com o rolo e o anel de montagem com o anel externo. Há uma interface entre a carcaça e o anel de montagem, porém não será analisada neste caso. Mesmo sendo uma interface entre dois componentes externos é possível considerá-la na modelagem funcional.

Para auxiliar na identificação das interfaces consideradas no diagrama de blocos, pode-se construir uma matriz para se decidir quais interfaces entre quais componentes serão consideradas, conforme Figura 4.4.

	ANEL EXTERNO	ANEL ELÁSTICO(ESQUERDO)	ANEL ELÁSTICO (DIREITO)	GAIOLA	ROLO	CARCAÇA	EIXO	ANEL DE MONTAGEM
ANEL EXTERNO		1	1		1	1		1
ANEL ELÁSTICO(ESQUERDO)	1				1			
ANEL ELÁSTICO (DIREITO)	1				1			
GAIOLA					1			
ROLO	1	1	1	1			1	
CARCAÇA	1							1
EIXO					1			
ANEL DE MONTAGEM	1					1		

Figura 4.4: Matriz para identificação das interfaces.

Baseando-se no desenho de conjunto apresentado na Figura A.1 do Apêndice A, onde cada parâmetro é identificado por um número, cria-se a estrutura física do conjunto rolamento de rolos apresentado na Figura 4.5.

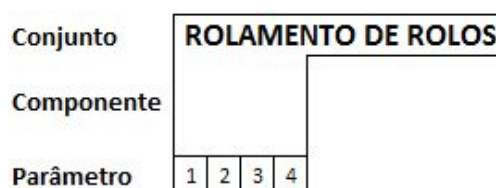


Figura 4.5: Estrutura física do conjunto rolamento de rolos.

Os desenhos final e de estágio do anel externo são apresentados respectivamente nas Figuras A.2 e A.3. Como os valores das cotas são omitidos por questões de sigilo industrial, os desenhos de estágio e final do anel externo parecem idênticos. No entanto as modificações do estágio para o final serão descritas a seguir.

A geometria do desenho de estágio do anel externo é obtida a partir do torneamento de um tubo seguido do tratamento térmico. Deste estágio para o desenho final há a retífica de face, que modifica os parâmetros 1, 5, 8 e 10 do anel externo; a retífica externa, que modifica os parâmetros 2 e 8 do anel externo; e a retífica interna, que modifica os parâmetros 4, 9 e 10 do anel externo. Os demais parâmetros do desenho final permanecem iguais aos do desenho de estágio do anel externo.

A Figura 4.6 apresenta a estrutura física do anel externo.

Conjunto	ROLAMENTO DE ROLOS																							
Componente	ANEL EXTERNO																							
	ESTÁGIO																							
Parâmetro	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Figura 4.6: Estrutura física do anel externo.

A Figura 4.7 apresenta a estrutura física do anel elástico baseada no desenho na Figura A.4 do Apêndice A, onde os parâmetros com componentes foram identificados através de números.

Conjunto	ROLAMENTO DE ROLOS												
Componente	ANEL ELÁSTICO (ESQUERDO E DIREITO)												
Parâmetro	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

Figura 4.7: Estrutura física do anel elástico.

A Figura 4.8 apresenta a estrutura física da gaiola baseada no desenho da Figura A.5 do Apêndice A, onde os parâmetros com componentes foram identificados através de números.

Conjunto	ROLAMENTO DE ROLOS							
Componente	GAIOLA							
Parâmetro	1	2	3	4	5	6	7	8

Figura 4.8: Estrutura física da gaiola.

A Figura 4.9 apresenta a estrutura física do rolo baseada no desenho da Figura A.6 do Apêndice A, onde os parâmetros com componentes foram identificados através de números.

Conjunto	ROLAMENTO DE ROLOS						
Componente	ROLO						
Parâmetro	1	2	3	4	5	6	7

Figura 4.9: Estrutura física do rolo.

A Figura 4.10 apresenta a estrutura física dos componentes externos baseada na Figura 4.2.

Conjunto			
Componente	CARÇAÇA	EIXO	ANEL DE MONTAGEM
Parâmetro			

Figura 4.10: Estrutura física dos componentes externos.

Em princípio podem ser considerados também os parâmetros dos componentes externos, por exemplo o diâmetro do alojamento na carcaça e o material da carcaça, diâmetro e material do eixo e as dimensões do anel de montagem, no entanto aqui os componentes externos não serão detalhados neste nível.

Com todas estas informações compõe-se o domínio físico do produto base e pode-se criar a estrutura física do produto apresentada na Figura 4.11, a qual forma o cabeçalho das colunas da PFCM.

Nota-se que algumas cotas do desenho de conjunto são as mesmas do desenho final do anel externo. As cotas 1, 2 e 4 do desenho de conjunto equivalem respectivamente às cotas 1, 2 e 8 do desenho final do anel externo. Estas cotas, mesmo que duplicadas devem constar na estrutura física do produto, o importante é sempre que este parâmetro for mais tarde associado a uma função, deve-se assinalar o parâmetro em todos os lugares onde ele aparece.

4.2 Análise funcional do produto base

Esta seção apresenta a composição o domínio funcional a partir da análise funcional do produto base e correlaciona-o como domínio físico através da PFCM.

Ao analisar o ciclo de vida do rolamento de rolos identifica-se os processos mais relevantes, os quais devem ser considerados na modelagem funcional. Estes processos são a retífica do anel externo, a montagem do conjunto (rolamento de rolos), a instalação do rolamento na aplicação e o funcionamento do rolamento na aplicação (uso). Estes processos são listados na Figura 4.12 e são o ponto de partida para o desdobramento funcional.

Processo

RETÍFICA DO ANEL EXTERNO
MONTAGEM
INSTALAÇÃO
USO

Figura 4.12: Processos considerados do produto base.

Estes processos foram considerados relevantes neste momento, porém é possível que este produto base seja usado outras vezes no futuro e novos processos se tornem relevantes. Então estes processos podem ser incorporados à análise.

A seguir cada um dos processos são modelados funcionalmente até o nível mais baixo de abstração onde a sub-função pode ser associada a parâmetros do produto. Cada função está descrita primeiramente com um vocabulário livre que se aproxima dos termos usados usualmente para este produto e também logo abaixo com o vocabulário da base funcional apresentada na Seção 2.1.3. A PFCM completa é apresentada no Apêndice B para documentação do estudo de caso.

4.2.1 Uso

O processo de uso é modelado e apresentado na Figura 4.13. Para facilitar a interpretação, discorre-se de maneira sucinta o raciocínio seguido para compor a modelagem deste processo.

O processo de uso corresponde a função principal de permitir o movimento relativo de rotação entre o eixo e a carcaça. Isto é alcançado permitindo o rolagem dos corpos rolantes e suportando a carga radial da aplicação.

Para que a rolagem dos corpos rolantes aconteça é necessário prover os corpos rolantes e uma pista para suportá-los. Além disto, os rolos devem ser guiados para seguir a orientação da rotação e o anel externo deve estar fixo. Os rolos são distanciados um dos outros e pré-carregados para que a rolagem possa então ocorrer.

O rolos são guiados lateralmente pelos anéis elásticos que se alojam no anel externo. O anel externo é fixado através da interferência com o alojamento da carcaça. Esta interferência, combinada com a montagem do eixo, define a pré-carga nos rolos. Os rolos são distribuídos pela gaiola que os aloja.

Cada uma das sub-funções do nível mais baixo de abstração pode ser associada aos parâmetros da estrutura física do produto. Esta associação é apresentada na PFCM do processo de uso (Figura 4.14). O cabeçalho das linhas são compostos pelas funções apresentadas na Figura 4.13 e o cabeçalho das colunas pela estrutura apresentada na Figura 4.11.

Os parâmetros da estrutura física que não apresentam correlação com nenhuma das sub-funções do processo de uso são omitidos para que a figura seja legível e melhore a visualização da matriz. Esta omissão não compromete a apresentação do estudo de caso.

Como apresentado na Figura 4.14, suportar corpos rolantes é desempenhado pelas pistas externa (definida pelos parâmetros 4, 5, 6, 7, 11 e 12 do anel externo) e pela pista interna (definida pelo eixo). O corpo rolante é definido pelas seus próprios parâmetros e desta mesma forma pode-se ler a PFCM.

Processo	Função	Sub-função			
USO	Permitir rotação entre eixo e carcaça Permitir GDL objeto	Permitir rolagem corpos rolantes Permitir GDL objeto	Suportar corpos rolantes Suportar objeto		
			Prover corpos rolantes Conter objeto		
			Guiar rolos Guiar objeto	Apoiar rolo na lateral do anel elástico Suportar objeto	
				Apoiar anel elástico no canal do anel Suportar objeto	
			Fixar anel externo Prender objeto	Prensar anel na carcaça Inserir objeto	
			Separar rolos Separar objeto	Distribuir rolos Posicionar objeto	Alojar rolos Conter objeto
			Rolar corpos na pista Permitir GDL objeto	Pré-carregar rolos Atuar energia mecânica	Montar carcaça-rolamento Acoplar objeto
					Montar eixo-rolamento Acoplar objeto
		Suportar carga radial Suportar energia mecânica	Distribuir carga Distribuir energia mecânica	Suportar corpos rolantes Suportar objeto	
				Prover corpos rolantes Conter objeto	
				Distribuir rolos Posicionar objeto	Alojar rolos Conter objeto
			Absorver carga Condicionar energia mecânica	Deformar anel Dar forma objeto	
				Deformar rolo Dar forma objeto	
				Deformar eixo Dar forma objeto	

Figura 4.13: Modelagem funcional do processo de uso.

Figura 4.14: PFCM do processo de uso.

[illegible]

4.2.2 Instalação

O processo de instalação é modelado e apresentado na Figura 4.15. Para facilitar a interpretação, discorre-se de maneira sucinta o raciocínio seguido para compor a modelagem deste processo.

As funções básicas são montar o rolamento na carcaça e montar o eixo no rolamento. Para se montar o rolamento na carcaça, utiliza-se uma prensa. Portanto as funções a serem desempenhadas são posicionar o rolamento na prensa, alinhá-lo com a carcaça e prensar o rolamento no alojamento da carcaça. Depois disto o rolamento é travado na carcaça através do anel de montagem. A montagem do eixo é feita simplesmente com o seu posicionamento de inserção.

Cada uma das sub-funções do nível mais baixo de abstração pode ser associada aos parâmetros da estrutura física do produto. Esta associação é apresentada na PFCM do processo de instalação (Figura 4.16). O cabeçalho das linhas são compostos pelas funções apresentadas na Figura 4.15 e o cabeçalho das colunas pela estrutura apresentada na Figura 4.11.

Os parâmetros da estrutura física que não apresentam correlação com nenhuma das sub-funções do processo de uso são omitidos para que a figura seja legível e melhore a visualização da matriz. Esta omissão não compromete a apresentação do estudo de caso.

É interessante notar na Figura 4.16 a importância dos chanfros do anel externo (parâmetro 8 do anel externo), além do próprio diâmetro externo (parâmetro 2 do anel externo) para o alinhamento do rolamento com o alojamento da carcaça.

Nota-se também que a estrutura do anel externo (parâmetros 1, 2, 4, 11 e 12 do anel externo) é usada para transmitir a força de prensagem do rolamento. Outro aspecto é a influência do canto do rolo (parâmetros 4 e 5) para a inserção do eixo no rolamento.

Processo	Função	Sub-função		
INSTALAÇÃO	Montar rolamento (na carcaça) Acoplar objeto	Posicionar rolamento Posicionar objeto	Posicionar rolamento (na prensa) Posicionar objeto	Apoiar face Suportar objeto
				Guiar diâmetro interno Guiar objeto
		Prensar rolamento Inserir objeto	Alinhar rolamento (com alojamento) Guiar objeto	
			Aplicar força no anel Atuar energia mecânica	
			Transmitir força pelo anel Transmitir energia mecânica	
			Deformar carcaça Dar forma objeto	
			Remover força Cessar energia mecânica	
		Fixar rolamento Vincular objeto	Inserir anel de montagem Inserir objeto	
	Montar eixo Acoplar objeto	Posicionar eixo Posicionar objeto		
		Inserir eixo Inserir objeto	Aplicar força no eixo Atuar energia mecânica	
			Deslocar rolos Transladar objeto	
			Deslocar eixo Transladar objeto	

Figura 4.15: Modelagem funcional do processo de instalação.

Figura 4.16: PFCM do processo de instalação.

					ROLAMENTO DE ROLOS																			CARCAÇA	EIXO	ANEL DE MONTAGEM
					ANEL EXTERNO							ROLO														
Processo	Função	Sub-função			1	2	3	4	1	2	4	8	11	12	2	4	5	6	7							
INSTALAÇÃO	Montar rolamento (na carcaça) Acoplar objeto	Posicionar rolamento Posicionar objeto	Posicionar rolamento (na prensa) Suportar objeto		x	x			x	x	x															
			Guiar diâmetro interno Guiar objeto			x	x			x	x			x												
		Alinhar rolamento (com alojamento) Guiar objeto			x		x		x		x											x				
			Prensar rolamento Inserir objeto	Aplicar força no anel Atuar energia mecânica		x	x			x	x	x														
		Transmitir força pelo anel Transmitir energia mecânica			x	x			x	x	x		x	x												
		Deformar carcaça Dar forma objeto																					x			
		Remover força Cessar energia mecânica																								
		Fixar rolamento Vincular objeto	Inserir anel de montagem Inserir objeto																			x		x		
	Montar eixo Acoplar objeto	Posicionar eixo Posicionar objeto																					x			
		Inserir eixo Inserir objeto	Aplicar força no eixo Atuar energia mecânica																				x			
			Deslocar rolos Transladar objeto									x		x	x	x	x	x	x	x	x					
			Deslocar eixo Transladar objeto																					x		

4.2.3 Montagem

O processo de montagem do rolamento é modelado e apresentado na Figura 4.17. Para facilitar a interpretação, discorre-se de maneira sucinta o raciocínio seguido para compor a modelagem deste processo.

A função primária é montar rolamento. A montagem é feita na seguinte sequência: monta-se um anel elástico no anel externo; preenche-se a gaiola com os rolos; monta-se a gaiola com os rolos no anel externo; monta-se o segundo anel elástico no anel externo.

A gaiola com os rolos não é considerada uma sub-montagem, pois esta gaiola não tem retenção, ou seja, os rolos e a gaiola não constituem uma unidade montada por si só.

Cada uma das sub-funções do nível mais baixo de abstração pode ser associada aos parâmetros da estrutura física do produto. Esta associação é apresentada na PFCM do processo de montagem (Figura 4.18). O cabeçalho das linhas são compostos pelas funções apresentadas na Figura 4.15 e o cabeçalho das colunas pela estrutura apresentada na Figura 4.11.

Os parâmetros da estrutura física que não apresentam correlação com nenhuma das sub-funções do processo de uso são omitidos para que a figura seja legível e melhore a visualização da matriz. Esta omissão não compromete a apresentação do estudo de caso.

É interessante notar na Figura 4.18 por exemplo a importância do raio do anel elástico (parâmetro 9) para guiar o anel elástico ao prensá-lo para montar no anel externo. Assim como a importância da geometria do canal do anel externo (parâmetros 3, 4, 7 e 9) para alojar o anel elástico.

Nota-se também a relação dos parâmetros do rolo (1 a 5) e da janela da gaiola (5 a 7) para alojar os rolos na janela da gaiola.

Processo	Função	Sub-função		
MONTAGEM	Montar rolamento Unir objeto	Montar anel elástico (no anel externo) Acoplar objeto	Posicionar anel externo Posicionar objeto	Apoiar face Suportar objeto
				Guiar diâmetro externo Guiar objeto
			Posicionar anel elástico (na prensa) Posicionar objeto	Apoiar na face Suportar objeto
				Guiar diâmetro Guiar objeto
			Prensar anel elástico Inserir objeto	Aplicar força na face Atuar energia mecânica
				Guiar anel elástico Guiar objeto
				Deformar anel Dar forma objeto
				Alojar no canal do anel Conter objeto
				Remover força Cessar energia mecânica
		Preencher gaiola (com rolos) Importar objeto	Posicionar gaiola Posicionar objeto	Apoiar na face Suportar objeto
			Posicionar rolos Posicionar objeto	Apoiar na face Suportar objeto
			Alojar rolos na gaiola Conter objeto	Aplicar força no rolo Atuar energia mecânica
				Alojar na janela da gaiola Conter objeto
		Montar gaiola (com rolos no anel externo) Posicionar objeto	Posicionar anel (montado com anel elástico) Posicionar objeto	Apoiar na face Suportar objeto
				Guiar no diâmetro externo Guiar objeto
			Inserir gaiola com rolos Posicionar objeto	Soltar gaiola com rolos Exportar objeto
				Guiar gaiola com rolos Guiar objeto
				Apoiar rolos no anel elástico Suportar objeto
				Apoiar gaiola nos rolos Suportar objeto
		Montar anel elástico (no anel externo) Acoplar objeto	Posicionar anel elástico (na prensa) Posicionar objeto	Apoiar na face Suportar objeto
				Guiar diâmetro Guiar objeto
			Prensar anel elástico Inserir objeto	Aplicar força na face Atuar energia mecânica
				Guiar anel elástico Guiar objeto
				Deformar anel Dar forma objeto
				Alojar anel no canal Conter objeto
				Remover força Cessar energia mecânica

Figura 4.17: Modelagem funcional do processo de montagem.

Figura 4.18: PFCM do processo de montagem.

Processo					Função					Sub-função					ROLAMENTO DE ROLOS																																		
															ANEL EXTERNO										ANEL ELÁSTICO (ESQUERDO E DIREITO)													GAIOLA							ROLO				
															1	2	1	2	3	4	7	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	1	2	3	5	6	7	1	2	3	4	5	
MONTAGEM	Montar rolamento Unir objeto	Montar anel elástico (no anel externo) Acoplar objeto	Posicional anel externo Posicionar objeto	Apoiar face Suportar objeto	x	x	x	x		x																																							
			Guiar diâmetro externo Guiar objeto		x		x																																										
			Posicionar anel elástico (na prensa) Posicionar objeto	Apoiar na face Suportar objeto											x	x			x																														
			Guiar diâmetro Guiar objeto											x																																			
			Prensar anel elástico Inserir objeto	Aplicar força na face Atuar energia mecânica											x	x			x																														
				Guiar anel elástico Guiar objeto															x	x			x																										
				Deformar anel Dar forma objeto							x			x	x	x	x	x	x	x					x	x	x	x																					
				Alojar no canal do anel Conter objeto							x	x	x	x					x			x	x	x																									
				Remover força Cessar energia mecânica																																													
				Preencher gaiola (com rolos) Importar objeto	Posicionar gaiola Posicionar objeto	Apoiar na face Suportar objeto																								x	x	x																	
					Posicionar rolos Posicionar objeto	Apoiar na face Suportar objeto																																x											
		Alojar rolos na gaiola Conter objeto	Aplicar força no rolo Atuar energia mecânica																																	x													
			Alojar na janela da gaiola Conter objeto																																	x													
		Montar gaiola (com rolos no anel externo) Posicionar objeto	Posicionar anel (montado com anel elástico) Posicionar objeto	Apoiar na face Suportar objeto	x	x	x	x		x																																							
				Guiar no diâmetro externo Guiar objeto		x		x																																									
				Soltar gaiola com rolos Exportar objeto																																													
			Inserir gaiola com rolos Posicionar objeto	Guiar gaiola com rolos Guiar objeto																																													
				Apoiar rolos no anel elástico Suportar objeto							x	x																									x												
				Apoiar gaiola nos rolos Suportar objeto																																													
		Montar anel elástico (no anel externo) Acoplar objeto	Posicionar anel elástico (na prensa) Posicionar objeto	Apoiar na face Suportar objeto																																													
				Guiar diâmetro Guiar objeto																																													
				Aplicar força na face Atuar energia mecânica																																													
			Prensar anel elástico Inserir objeto	Guiar anel elástico Guiar objeto																																													
				Deformar anel Dar forma objeto							x			x	x	x	x	x	x	x					x	x	x	x																					
Alojar anel no canal Conter objeto									x	x	x	x					x			x	x	x																											
Remover força Cessar energia mecânica																																																	

4.2.4 Retífica do anel externo

O processo de retífica do anel externo é modelado e apresentado na Figura 4.19. Para facilitar a interpretação, discorre-se de maneira sucinta o raciocínio seguido para compor a modelagem deste processo.

A função primária do processo é retificar a pista. Para isto se tem duas funções secundárias: retificar a face e retificar o diâmetro externo. A qualidade da pista é influenciada pela qualidade do diâmetro externo, pois este é usado como referência para a pista. Por sua vez, o diâmetro externo é trabalhado com referência na face do anel, por isto a importância das funções secundárias para a função primária deste processo. Na retífica de face, o rolamento é apoiado na própria face e um anel empurra o outro pelo seu diâmetro externo até os rebolos. Na retífica do diâmetro externo, um anel é posicionado atrás do outro apoiando face com face. Então o anel é levado a rotacionar pelo rebole de arraste e o rebole de corte avança para remover o material. Na retífica de pista, o anel é apoiado na face e fixado pelo diâmetro externo, então o rebole de corte retifica a pista.

Cada uma das sub-funções do nível mais baixo de abstração pode ser associada aos parâmetros da estrutura física do produto. Esta associação é apresentada na PFCM do processo de retífica (Figura 4.20). O cabeçalho das linhas são compostos pelas funções apresentadas na Figura 4.19 e o cabeçalho das colunas pela estrutura apresentada na Figura 4.11.

Os parâmetros da estrutura física que não apresentam correlação com nenhuma das sub-funções do processo de uso são omitidos para que a figura seja legível e melhore a visualização da matriz. Esta omissão não compromete a apresentação do estudo de caso.

A remoção do material na retífica da face do anel externo modifica principalmente o parâmetro 1 e consequentemente o parâmetro 5. O material que é removido se refere ao material entre os diâmetros 2 e 4. É interessante notar que ao remover material na retífica de face, há um efeito no parâmetros 8 e 10 do anel externo. Os parâmetros 11 e 12 também são relevantes na função remover material, pois definem a dureza e a especificação do material respectivamente.

A remoção do material na retífica do diâmetro externo do anel externo modifica principalmente o parâmetro 2. O material que é removido se refere ao material da altura 1. É interessante notar que ao remover material na retífica do diâmetro externo, há um efeito no parâmetro 8. Os parâmetros 11 e 12 também são relevantes na função remover material, pois definem a dureza e a especificação do material respectivamente.

A remoção do material na retífica de pista do anel externo modifica principalmente o parâmetro 4. O material que é removido se refere a extensão de material da altura 1 menos os canais definidos pela largura 7. É interessante notar que ao remover material na retífica de pista, há um efeito no parâmetro 9 e 10. Os parâmetros 11 e 12 também são relevantes na função remover material, pois definem a dureza e a especificação do material respectivamente.

Processo	Função	Sub-função	
RETÍFICA DO ANEL EXTERNO	Retificar face Remover material	Posicionar anel externo Posicionar objeto	Apoiar face na esteira Suportar objeto
		Conduzir anel externo Transladar objeto	Arrastar anel Transladar objeto
			Empurrar anel Transladar objeto
		Avançar rebolo de corte Transladar objeto	
		Remover material Remover material	
	Refitigar diâmetro externo Remover material	Posicionar anel externo Posicionar objeto	Apoiar diâmetro externo Suportar objeto
			Apoiar face com face do anel Suportar objeto
		Conduzir anel externo Transladar objeto	Arrastar anel Transladar objeto
			Empurrar anel Transladar objeto
		Apoiar anel externo Suportar objeto	
		Rotacionar anel externo (com rebolo de arraste) Rotacionar objeto	
		Avançar rebolo de corte Transladar objeto	
		Remover material Remover material	
	Retificar pista Remover material	Posicionar anel externo Posicionar objeto	Apoiar face Suportar objeto
		Fixar pelo externo Prender objeto	
		Girar peça Rotacionar objeto	
		Avançar rebolo de corte Transladar objeto	
		Remover material Remover material	

Figura 4.19: Modelagem funcional do processo de retífica.

Figura 4.20: PFCM do processo de retífica.

				ROLAMENTO DE ROLOS																							
				ANEL EXTERNO																							
				ESTÁGIO																							
Processo	Função	Sub-função		1	2	4	1	2	4	5	7	8	9	10	11	12	1	2	4	5	7	8	9	10	11	12	
RETÍFICA DO ANEL EXTERNO	Retificar face Remover material	Posicionar anel externo Posicional objeto	Apoiar face na esteira Suportar objeto				x	x	x																		
		Conduzir anel externo Transladar objeto	Arrastar anel Transladar objeto				x	x	x																		
			Empurrar anel Transladar objeto				x					x															
		Avançar rebolo de corte Transladar objeto																									
		Remover material Remover material			x	x	x	x	x	x	x		x		x	x	x	x	x	x	x	x		x		x	x
	Refitcar diâmetro externo Remover material	Posicionar anel externo Posicionar objeto	Apoiar diâmetro externo Suportar objeto				x	x																			
			Apoiar face com face do anel Suportar objeto				x	x	x																		
		Conduzir anel externo Transladar objeto	Arrastar anel Transladar objeto				x																				
			Empurrar anel Transladar objeto				x	x	x																		
		Apoiar anel externo Suportar objeto					x	x																			
		Rotacionar anel externo (com rebolo de arraste) Rotacionar objeto					x	x																			
		Avançar rebolo de corte Transladar objeto																									
		Remover material Remover material			x	x	x	x	x				x			x	x	x	x				x			x	x
	Retificar pista Remover material	Posicionar anel externo Posicionar objeto	Apoiar face Suportar objeto				x	x	x																		
		Fixar pelo externo Prender objeto					x	x																			
		Girar peça Rotacionar objeto					x	x																			
		Avançar rebolo de corte Transladar objeto																									
		Remover material Remover material			x			x		x		x		x	x	x	x	x		x		x		x	x	x	x

4.2.5 Matriz Processo Função Desempenho

Nesta Seção cria-se a Matriz Processo Função Desempenho (PFPM) do rolamento de rolos. Os requisitos de desempenho usuais do rolamento de rolo são: vida do rolamento, torque e ruído. Neste estudo de caso será considerado também um requisito de desempenho relativo a um cliente intermediário do rolamento de rolo: tempo de retífica do anel externo. Este requisito é muito importante para o departamento de manufatura e tem um grande impacto no custo e na qualidade do produto. A PFPM completa é apresentada no Apêndice C para documentação do estudo de caso.

O requisito de vida é normalmente expresso em horas, ou seja, o rolamento deve ter uma vida mínima de tantas horas. Este requisito está relacionado com as funções suportar corpos rolantes, prover corpos rolantes, distribuir corpos rolantes e as deformar o anel, rolos e eixo do processo de uso, conforme ilustra a Figura 4.21. Os demais processos e funções foram omitidos para permitir a visualização na figura dos aspectos relevantes.

Processo	Função	Sub-função	Desempenho			Vida
USO	Permitir rotação entre eixo e carcaça Permitir GDL objeto	Permitir rolagem corpos rolantes Permitir GDL objeto	Suportar corpos rolantes Suportar objeto			x
			Prover corpos rolantes Conter objeto			x
			Guiar rolos Guiar objeto	Apoiar rolo na lateral do anel elástico Suportar objeto		
				Apoiar anel elástico no canal do anel Suportar objeto		
			Fixar anel externo Prender objeto	Prensar anel na carcaça Inserir objeto		
			Separar rolos Separar objeto	Distribuir rolos Posicionar objeto	Alojar rolos Conter objeto	x
			Rolar corpos na pista Permitir GDL objeto	Pré-carregar rolos Atuar energia mecânica	Montar carcaça-rolamento Acoplar objeto	x
					Montar eixo-rolamento Acoplar objeto	x
		Suportar carga radial Suportar energia mecânica	Distribuir carga Distribuir energia mecânica	Suportar corpos rolantes Suportar objeto		x
				Prover corpos rolantes Conter objeto		x
				Distribuir rolos Posicionar objeto	Alojar rolos Conter objeto	x
			Absorver carga Condicionar energia mecânica	Deformar anel Dar forma objeto		x
				Deformar rolo Dar forma objeto		x
				Deformar eixo Dar forma objeto		x
						x

Figura 4.21: PFPM do requisito de vida.

O requisito de vida depende de todos os parâmetros associados às funções mencionadas e também a parâmetros externos ao projeto construtivo do produto, como por exemplo a carga aplicada, rotação do eixo, condição de lubrificação e temperatura de aplicação. Estes parâmetros não são cotas dos desenhos técnicos, mas condições de aplicação. A relação entre os parâmetros de projeto, dos parâmetros externos e da vida é a equação da vida do rolamento estabelecida na literatura. A teoria de rolamentos pode ser encontrada em Harris e Kotzalas (2006).

O requisito de torque é naturalmente expresso em unidades de torque e o requisito de ruído sonoro em uma escala de decibéis. Estes requisitos são importantes, pois evidenciam a eficiência energética e a qualidade do produto. Como ambos os requisitos estão relacionadas às mesmas funções, os requisitos de torque e ruído são apresentados na Figura 4.22.

					Desempenho		
Processo	Função	Sub-função			Torque	Ruído	
USO	Permitir rotação entre eixo e carcaça Permitir GDL objeto	Permitir rolagem corpos rolantes Permitir GDL objeto	Suportar corpos rolantes Suportar objeto		x	x	
			Prover corpos rolantes Conter objeto		x	x	
			Guiar rolos Guiar objeto	Apoiar rolo na lateral do anel elástico Suportar objeto	x	x	
				Apoiar anel elástico no canal do anel Suportar objeto			
			Fixar anel externo Prender objeto	Prensar anel na carcaça Inserir objeto			
			Separar rolos Separar objeto	Distribuir rolos Posicionar objeto	Alojar rolos Conter objeto	x	
			Rolar corpos na pista Permitir GDL objeto	Pré-carregar rolos Atuar energia mecânica	Montar carcaça-rolamento Acoplar objeto	x	
					Montar eixo-rolamento Acoplar objeto		
		Suportar carga radial Suportar energia mecânica	Distribuir carga Distribuir energia mecânica	Suportar corpos rolantes Suportar objeto		x	x
				Prover corpos rolantes Conter objeto		x	x
				Distribuir rolos Posicionar objeto	Alojar rolos Conter objeto	x	x
			Absorver carga Condicionar energia mecânica	Deformar anel Dar forma objeto		x	x
				Deformar rolo Dar forma objeto		x	x
				Deformar eixo Dar forma objeto		x	x

Figura 4.22: PFPM do requisito de torque e ruído.

Estes requisitos estão relacionados às funções suportar corpos rolantes, prover corpos rolantes e deformar anel, rolo e eixo, que geram o torque e também ruído de rolagem; à função apoiar rolo na lateral do anel elástico, que gera um atrito na lateral dos rolos; e à função alojar rolos, que gera o atrito entre a gaiola e os rolos. Todas estas funções pertencem ao processo de uso. Os demais processos e funções foram omitidos para permitir a visualização na figura dos aspectos relevantes.

Os requisitos de torque e ruído dependem de todos os parâmetros associados às funções mencionadas e também a parâmetros externos ao projeto construtivo do produto, como por exemplo a carga aplicada, rotação do eixo, condição de lubrificação e temperatura de aplicação. Estes parâmetros não são cotas dos desenhos técnicos, mas condições de aplicação.

O requisito de tempo de retífica do anel externo é um requisito do cliente interno responsável pelo processo de manufatura. Este requisito impacta diretamente na ocupação de máquina e no custo do produto e não deve comprometer a qualidade do produto. Este requisito está relacionado às funções remover material das funções retificar face, retificar diâmetro externo e retificar pista, como apresentado na Figura 4.23. Todas estas funções pertencem ao processo de retífica do anel externo. Os demais processos e funções foram omitidos para permitir a visualização na figura dos aspectos relevantes.

				Desempenho
Processo	Função	Sub-função		Tempo de retífica
RETÍFICA DO ANEL EXTERNO	Retificar face Remover material	Posicionar anel externo Posicionar objeto	Apoiar face na esteira Suportar objeto	
		Conduzir anel externo Transladar objeto	Arrastar anel Transladar objeto	
		Avançar rebolo de corte Transladar objeto	Empurrar anel Transladar objeto	
		Remover material Remover material		x
	Refitigar diâmetro externo Remover material	Posicionar anel externo Posicionar objeto	Apoiar diâmetro externo Suportar objeto	
			Apoiar face com face do anel Suportar objeto	
		Conduzir anel externo Transladar objeto	Arrastar anel Transladar objeto	
		Empurrar anel Transladar objeto		
		Apoiar anel externo Suportar objeto		
		Rotacionar anel externo (com rebolo de arraste) Rotacionar objeto		
		Avançar rebolo de corte Transladar objeto		
		Remover material Remover material		x
	Retificar pista Remover material	Posicionar anel externo Posicionar objeto	Apoiar face Suportar objeto	
		Fixar pelo externo Prender objeto		
		Girar peça Rotacionar objeto		
		Avançar rebolo de corte Transladar objeto		
		Remover material Remover material		x

Figura 4.23: PFPM do requisito de tempo de retífica.

O requisito de tempo de retífica depende de todos os parâmetros associados às funções mencionadas e também a parâmetros externos ao projeto construtivo do produto, como por exemplo rotação do rebolo, velocidade de avanço, características do rebolo etc. Estes parâmetros não são cotas dos desenhos técnicos, mas condições e ajustes de usinagem.

5 Discussões dos Resultados

Este capítulo discorre sobre os resultados da tese e está organizado em três partes. A primeira parte discute sobre o conteúdo do estudo de caso desenvolvido no Capítulo 4. A segunda parte discute como a modelagem funcional integral do produto proposta se relaciona com diversos aspectos do universo de desenvolvimento de produtos mencionados na revisão bibliográfica (Capítulo 2). E a terceira parte discute como a modelagem funcional integral do produto contribui para o desenvolvimento de projetos derivativos.

5.1 Discussão sobre os resultados do estudo de caso

O estudo de caso apresenta a modelagem funcional integral de um rolamento de rolos, o qual é um produto corrente e serve de base para diversos projetos derivativos. Os processos considerados relevantes para a modelagem são o uso do rolamento, a instalação do rolamento na aplicação, a montagem do rolamento e a retífica do anel externo, isto quer dizer que todos os envolvidos nestes processos, são clientes do produto considerados na modelagem funcional.

Na análise estrutural do produto base foram identificados 59 parâmetros de projeto, sendo 56 parâmetros do produto além dos 3 componentes externos (Figura 4.5). A estrutura funcional do produto tem 112 funções identificadas e há 847 correlações estabelecidas entre as estruturas física e funcional. Na análise funcional do processo de uso, identifica-se através da PFCM (Figura 4.14) que 35 dos 56 parâmetros do produto estão relacionados a este processo, além de 2 dos 3 componentes externos.

Estes dados da PFCM são apresentados de forma resumida e esquemática na Figura 5.1, onde os números representam a quantidade de elementos identificados e, entre parênteses, a quantidade de elementos relacionados a função de uso. A modelagem funcional integral identificou a existência de alguma correlação de 57 características, sendo 54 parâmetros de projeto e 3 componentes externos, a algum processo (Figura B.1).

Isto se deve ao fato de terem sido identificadas 112 funções e sub-funções, ao invés de apenas as 26 funções pertencentes à análise funcional do processo de uso (Figura 4.13). Este é um bom indicativo que o procedimento de modelagem proposto consegue abordar de uma maneira mais ampla o produto visando minimizar omissões na análise do produto, que podem permitir falhas que descobertas tardiamente comprometem a viabilidade do projeto.

Os dois parâmetros de projeto, que não foram associados a nenhuma função do produto e, conseqüentemente, a nenhum processo e cliente considerados, são:

- O parâmetro 8 do anel elástico, que se refere aos raios dos cantos do diâmetro externo;
- O parâmetro 4 da gaiola, que se refere a largura dos chanfros na lateral da gaiola.

Portanto, segundo esta análise, não é necessário especificar estes parâmetros nos seus respectivos componentes. Desta forma diminui-se os requisitos dos componentes, simplificando-os, o que pode até resultar em uma redução de custo no produto base.

		ESTRUTURA FÍSICA									
		56 + 3 (35 + 2)									
ESTRUTURA FUNCIONAL		CORRELAÇÕES									
112		847									
(26)		(203)									

Figura 5.1: Resumo da PFCM.

Nota-se que há várias funções que não estão diretamente ligadas ao usuário final, porém a abordagem integral permite identificar a importância destas funções, as quais poderiam erroneamente ser classificadas como funções desnecessárias.

Por exemplo, a função retificar face não está relacionada diretamente ao usuário final, no entanto esta função gera uma face de referência, que é usada na retífica do diâmetro externo, a qual, por sua vez, serve de referência para a retífica de pista. Os parâmetros gerados na retífica de pista estão diretamente relacionados com as funções de permitir rolagem dos corpos rolantes e suportar carga radial, funções demandadas pelo usuário final.

Portanto as funções não relacionadas diretamente ao usuário final, não são necessariamente funções desnecessárias do produto. Como no exemplo citado, estas funções podem ser foco de melhorias no produto. Por exemplo, se for desenvolvido um processo que produza as características de pista necessárias sem a ter que retificar de face e o diâmetro externo, consegue-se melhorar o desempenho de tempo de retífica.

5.2 Discussão sobre os resultados da modelagem funcional integral do produto

O procedimento de modelagem funcional integral do produto proposto tem como característica positiva se apresentar de maneira intuitiva, pois se baseia no mapeamento dos processos do ciclo de vida do produto. Isto é viabilizado ao adotar um produto base para executar a modelagem funcional e não um produto inexistente sendo criado do zero.

A construção da modelagem funcional se dá correlacionando o domínio funcional ao domínio físico do produto, similarmente ao procedimento do projeto axiomático. O desdo-

bramento das funções em subníveis respeita a lógica do COMO-POR QUE, introduzida pela ferramenta FAST.

As funções são expressas por um par "verbo + substantivo", consagrado desde o início da análise do valor. E dentro desta forma de expressar as funções está embutido o conceito dos fluxos de energia, material e sinal, através da nomenclatura padronizada da base funcional.

No entanto nota-se que os termos padronizados da base funcional dificultam o entendimento nos níveis menos abstratos das funções. Por isto recomenda-se para esta modelagem funcional integral utilizar o vocabulário definido na base funcional e paralelamente um vocabulário livre específico para o caso em análise. O uso da base funcional permitirá a troca de informações entre projetos e estabelece uma base para as ferramentas que estão sendo desenvolvidas baseadas na abordagem funcional. Enquanto que o vocabulário livre permite uma fácil comunicação dentro do grupo de projeto e consegue expressar as especificidades do produto no níveis mais baixos de abstração.

Nos níveis mais altos de abstração, a base funcional é bastante útil para a geração de ideias e busca de soluções inovadoras. Nota-se claramente que nestes níveis o espaço para soluções é mais amplo e possibilita inovações de níveis mais altos. Por exemplo, ao discutir a função "Permitir GDL objeto", referindo-se a "Permitir rotação entre eixo e carcaça", pode-se pensar em várias soluções, desde um rolamento de corpos rolantes a um mancal magnético ou um mancal hidrodinâmico. Porém uma vez que o conceito da solução é definido, o espaço para inovações se limita bastante a ajustes de parâmetros de projeto, o que resulta geralmente em soluções não patenteáveis, por isto a porcentagem de inovações segundo Altshuller (2007) do nível 1 na Figura 2.11 acaba sendo menor do que de nível 2, mesmo sabendo-se que soluções deste nível são mais frequentes.

Analisando a modelagem funcional é possível notar que as necessidades expressas do cliente podem estar associadas tanto a um nível elevado quanto baixo de abstração. Por exemplo, caso o responsável pela montagem do rolamento na carcaça do processo de instalação (Figura 4.15) tiver uma restrição de força na prensa que ele tem disponível, isto pode se tornar um requisito de desempenho, que caso não atendido demande investimentos para a implementação do projeto. Estas necessidades então podem estar associadas a diversos níveis e surgem de cada cliente. Portanto a responsabilidade da equipe de projeto é integrar todas estas funções, além de, como especialistas no produto, garantir que as funções de ordem superior e inferior a estas demandadas sejam satisfeitas.

A modelagem funcional integral do produto serve também para a documentação e gerenciamento do conhecimento sobre o produto, pois cada correlação identificada na PFCM é de grande valor para o conhecimento técnico da empresa e pode orientar pesquisas e estudos de aperfeiçoamento do produto.

5.3 Discussão sobre a aplicação da modelagem funcional proposta em projetos derivativos

A modelagem funcional integral do produto é viabilizada para um produto base, pois este produto tem seus processos estabelecidos. Um projeto derivativo, tipo de projeto mais frequentemente desenvolvido, toma um produto base como referência para seu desenvolvimento, portanto a modelagem funcional do produto base é essencial para este caso.

O projeto derivativo pode ter basicamente dois objetivos: a adição de função ou a melhoria de desempenho (Seção 2.6). O desenvolvimento para cada um destes objetivos é apresentado nas Seções 5.3.1 e 5.3.2 respectivamente.

A demanda destes objetivos pode ser uma solicitação explícita do cliente ou pode ser uma demanda latente (reprimida). Na primeira situação, esta demanda se relaciona com os requisitos de desempenho de Kano; já a segunda situação está relacionada com o requisito de empolgação de Kano (Seção 2.2.1).

A modelagem funcional proposta auxilia em ambas as situações, seja por explicitar as funções relacionadas com a necessidade declarada pelo cliente, seja para orientar a pesquisa da voz do cliente relacionando com as funções do produto base, ou orientar métodos criativos de busca de soluções alternativas para as soluções desempenhadas pelo produto, ou ainda novas funções a partir da mesma estrutura física do produto base. A modelagem funcional integral do produto pode ainda auxiliar na modularização do produto através do agrupamento das funções atreladas aos componentes físicos.

A modelagem funcional integral do produto também auxilia a identificação das alterações intencionais e incidentais no produto base, corroborando com o método DRBFM (Seção 2.5.4), assim como serve de base para a criação de um FMEA para o produto base (Seção 2.5.3), pois apresenta todas as funções do produto e as suas correlações com a estrutura física, podendo assim facilmente averiguar onde as alterações do projeto derivativo incidem. Isto minimiza os riscos do projeto e propicia o desenvolvimento de um produto robusto para os seus clientes.

5.3.1 Adição de função

Neste projeto são demandados novos requisitos, ou seja, novas funções. Para o desenvolvimento deste projeto deve-se identificar em qual processo e em que nível do desdobramento funcional esta nova função se encaixa, inserindo-a assim na análise funcional herdada do projeto base (Figura 5.2).

Baseado na análise funcional deste novo requisito, deve-se gerar e desenvolver soluções para este problema utilizando métodos já conhecidos. Após desenvolver a solução no domínio físico, isto que dizer, depois de elaborar os seus componentes e agregá-los ao projeto base, consegue-se integrar estes novos elementos à análise estrutural do produto base (Figura 5.3), inclusive deve-se atualizar o diagrama de blocos.

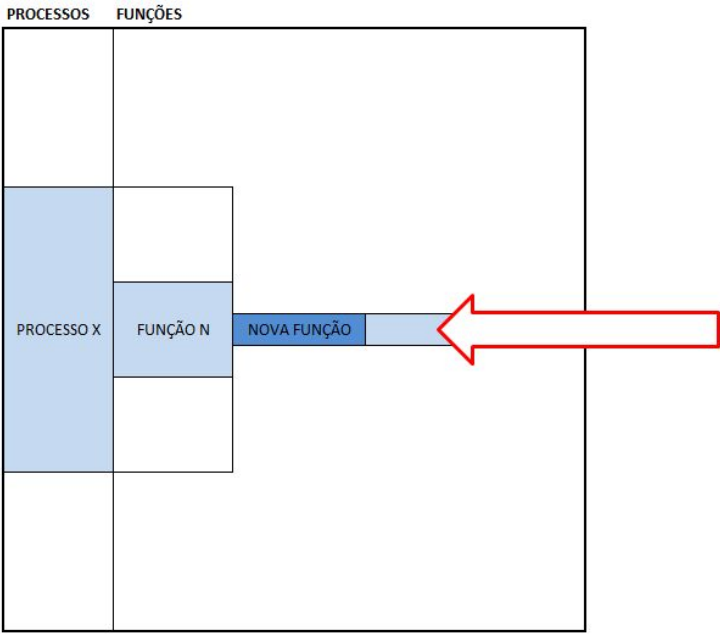


Figura 5.2: Adição da nova função no projeto base.

PRODUTO											
				NOVO COMPONENTE A				NOVO COMPONENTE B			
				PARÂMETRO A1	PARÂMETRO A2	PARÂMETRO A3	PARÂMETRO A4	PARÂMETRO B1	PARÂMETRO B2	PARÂMETRO B3	

Figura 5.3: Integração dos novos componentes na análise estrutural do produto base.

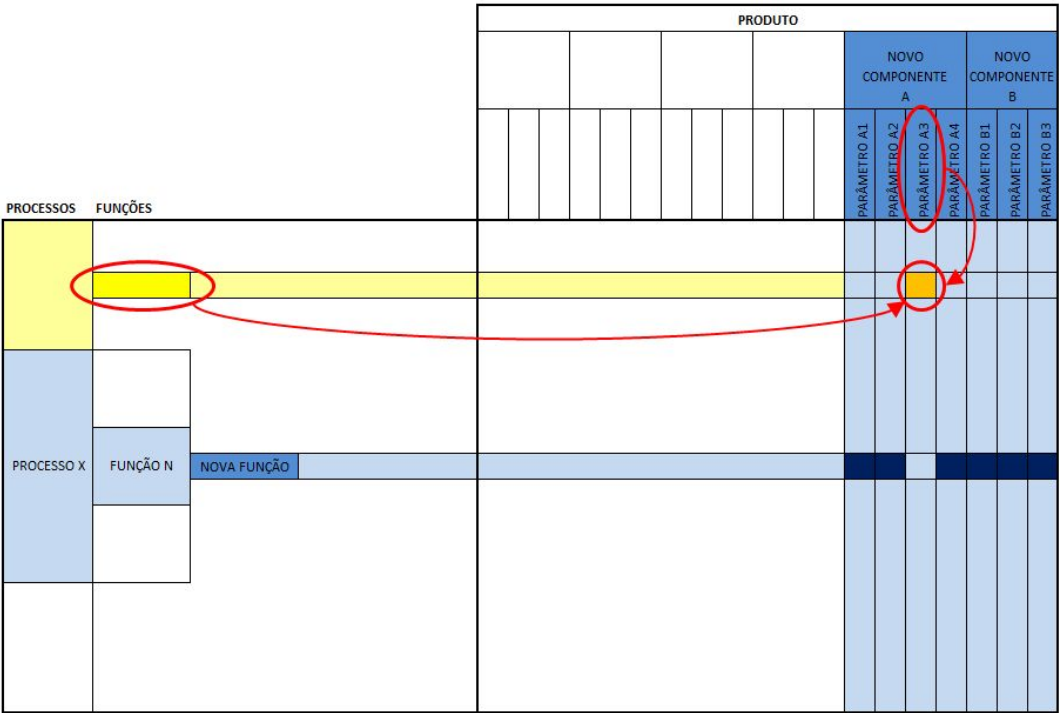


Figura 5.5: Função adicional decorrente da integração da nova função demandada.

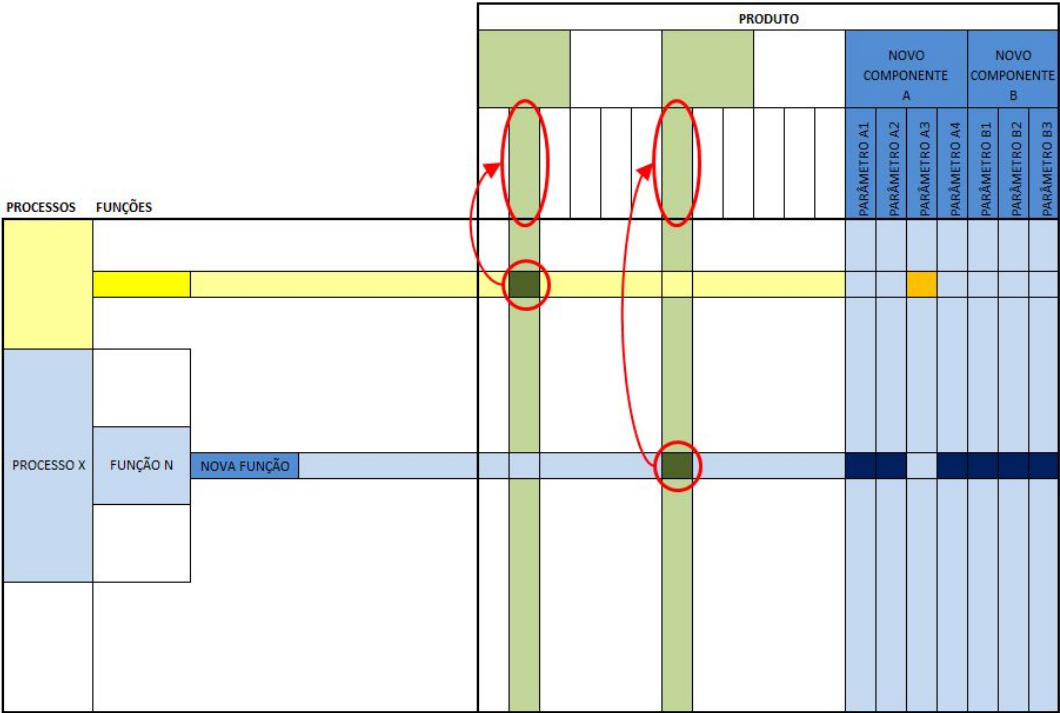


Figura 5.6: Influência das novas funções nos parâmetros existentes no projeto base.

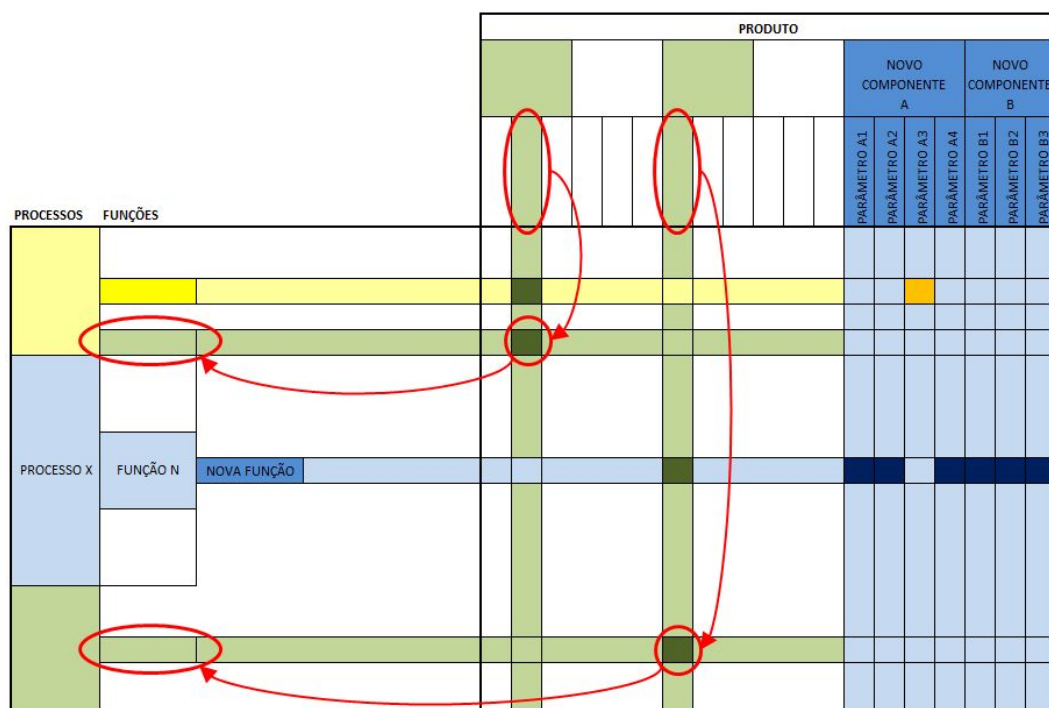


Figura 5.7: Mapeamento das alterações não intencionais do projeto base.

5.3.2 Melhoria de desempenho

Neste projeto demanda-se a melhoria do desempenho de requisitos existentes. A PFCM apresenta relações qualitativas entre o domínio funcional e o domínio físico do produto, porém quando se trata de desempenho, torna-se necessária uma avaliação quantitativa.

As características de desempenho podem estar relacionadas a uma ou mais funções, mas em geral cada uma delas está ligada a um único processo. Por exemplo, o tempo de execução de uma tarefa, a precisão da execução de uma tarefa e o número total de execução de uma tarefa (vida do produto) são características de desempenho do produto ligadas ao processo de uso. Já o tempo de ajuste e o tempo de manutenção são características de desempenho do produto ligadas aos processos de instalação e manutenção respectivamente. Para tratar estas informações, cria-se a PFPM, onde cada característica de desempenho pode ser correlacionada com as suas funções (Figura 5.8).

Note que a característica de desempenho pode ser unicamente definida por uma função independentemente do nível da função, como o caso das características de desempenho 1 e 3, que são definidas respectivamente pelas funções 2.2 e 2.2.2. Além disso, as características de desempenho podem ser definidas por mais de uma função, inclusive simultaneamente por funções de níveis diferentes, como o caso da característica de desempenho 2, que é definida pelas funções 1.2, 2.1.2.1, 2.1.2.2 e 2.3.2.

				DESEMPENHO		
				CARACTERÍSTICA 1	CARACTERÍSTICA 2	CARACTERÍSTICA 3
PROCESSOS	FUNÇÕES					
1	1.1	1.1.1				
		1.1.2				
	1.2					
	1.3					
2	2.1	2.1.1				
		2.1.2	2.1.2.1			
			2.1.2.2			
	2.2	2.2.1				
		2.2.2				
		2.2.3				
	2.3	2.3.1				
		2.3.2	2.3.2.1			
			2.3.2.2			
3	3.1	3.1.1				
		3.1.2				
	3.2					
	3.3	3.3.1				
		3.3.2				

Figura 5.8: Matriz Processo Função Desempenho

Portanto quando se desenvolve um projeto para a melhoria de desempenho de um produto, deve-se identificar na PFPM, as funções relacionadas e esta característica de desempenho (Figura 5.8) para então identificar na PFCM quais parâmetros físicos do produto influenciam esta característica de desempenho (Figura 5.9).

				PRODUTO					
				COMPONENTE	COMPONENTE	COMPONENTE	COMPONENTE	COMPONENTE	COMPONENTE
PROCESSOS	FUNÇÕES								
1	1.1	1.1.1							
		1.1.2							
	1.2								
	1.3								
2	2.1	2.1.1							
		2.1.2	2.1.2.1						
			2.1.2.2						
	2.2	2.2.1							
		2.2.2							
		2.2.3							
	2.3	2.3.1							
		2.3.2	2.3.2.1						
			2.3.2.2						
3	3.1	3.1.1							
		3.1.2							
	3.2								
	3.3	3.3.1							
		3.3.2							

Figura 5.9: Identificação dos parâmetros físicos relevantes para a característica de desempenho.

Estas relações podem ser identificadas, confirmadas e/ou quantificadas através de estudos com DoE (*Design of Experiments*). É importante observar que estes parâmetros físicos que serão ajustados, podem estar relacionados a outras funções e isto é identificado na matriz conforme a Figura 5.10.

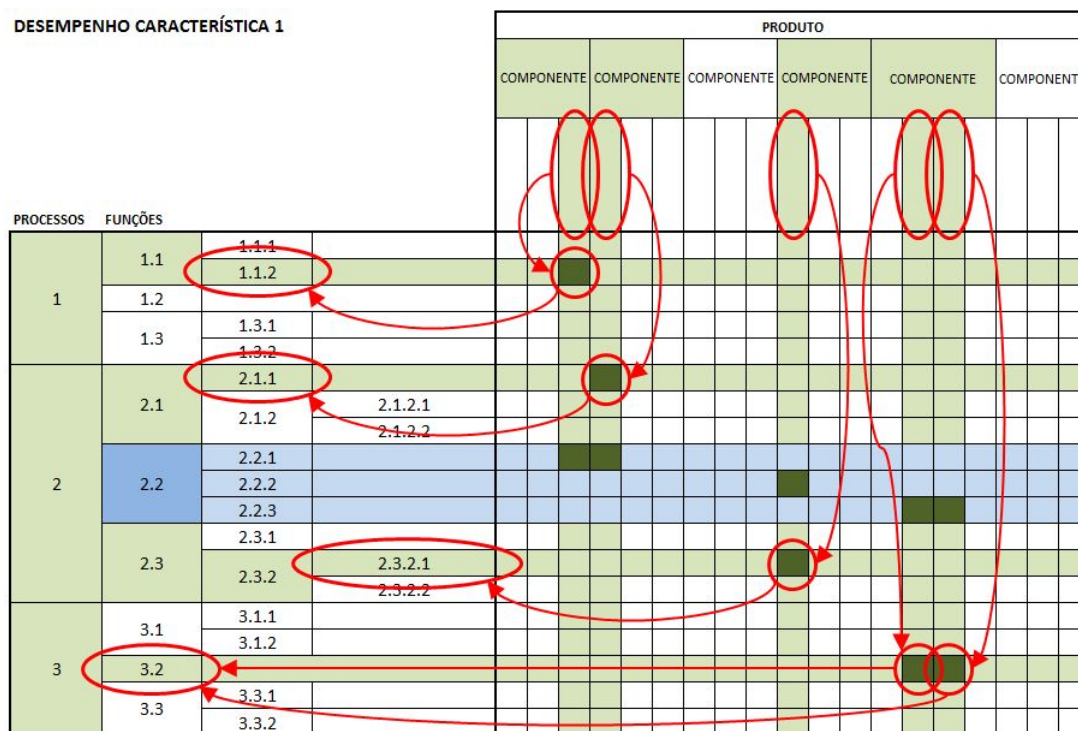


Figura 5.10: Identificação das alterações não intencionais devido à melhoria de desempenho demandada.

Conhecendo todas estas relações, pode-se ajustar os parâmetros para atender aos novos requisitos de desempenho ciente das alterações não intencionais buscando um compromisso que atenda plenamente todos os clientes.

Há casos onde o simples ajuste de parâmetros do produto não é capaz de atender aos novos requisitos de desempenho do cliente, neste caso o projeto requer uma abordagem como a adição de função. Por exemplo, o cliente exige um produto com um menor índice de ruído durante o uso. Analisadas todas as funções dentro do processo de uso que podem dissipar energia em energia acústica, identificados os parâmetros físicos que influenciam nestas funções e feitas as melhorias, não foi atingido o requisito. Neste caso deve-se incluir uma função de absorção do som no processo de uso, o que desencadeará o desenvolvimento de um isolador acústico por exemplo.

6 Conclusões

Esta tese explora a relevância dos projetos derivativos juntamente com o potencial da abordagem funcional no desenvolvimento de produto. Apresenta uma ampla revisão bibliográfica sobre funções, compreendendo definição, classificação, representação formal e aplicação em ferramentas de desenvolvimento de produto.

A tese contribui para a área de desenvolvimento de produto ao desenvolver incrementalmente o conhecimento sobre modelagem funcional a partir de conceitos estabelecidos e com potencial de aplicação em diversas áreas de produto.

Este trabalho propõe uma maneira de abordar o produto integralmente se baseando nos conceitos de cliente e ciclo de vida do produto, que é possível através do produto base do projeto derivativo. Esta abordagem integral é importante devido à crescente complexidade dos projetos e por prevenir omissões no desenvolvimento do produto, cujos impactos podem inviabilizar um projeto.

A essência do procedimento proposto está em mapear eficientemente o domínio funcional do produto em sua plenitude, visto que o produto é a materialização das necessidades de todos os clientes envolvidos no seu ciclo de vida desencadeadas pela demanda do usuário final, que é o principal cliente do produto.

A correlação entre os domínios funcional e físico é documentada em uma matriz inspirada na Matriz Função Componente (FCM), que, por considerar os processos como origem das funções, foi batizada de Matriz Processo Função Componente (PFCM). Por sua vez, propõe-se a documentação da correlação entre as funções do produto e seus requisitos de desempenho através da Matriz Processo Função Desempenho (PFPM).

A tese propicia ainda duas contribuições, a primeira ao propor uma classificação hierárquica de funções baseada no ciclo de vida do produto e a segunda ao disponibilizar um vocabulário em língua portuguesa relacionado à base funcional.

É importante ressaltar que a proposta da tese foi validada dentro do escopo do estudo de caso, que é basicamente produtos mecânicos. Áreas correlatas podem se beneficiar desta tese, porém sua validade foge do escopo deste trabalho.

6.1 Trabalhos futuros

Devido ao grande volume de informações e ao nível de complexidade que a relação entre o domínio funcional e o domínio físico pode ter ao abordar produtos complexos, há a necessidade de se desenvolver um software para gerenciamento destas informações e para auxiliar a equipe de desenvolvimento a aplicar este procedimento. Um software auxiliaria também na divulgação e implementação deste procedimento.

Apesar do procedimento ter sido estabelecido, o seu estudo de caso se restringiu a um produto simples. Portanto há um potencial a ser explorado das implicações e potencialidades deste procedimento para o desenvolvimento de sistemas e subsistemas. Este desenvolvimento

será facilitado tendo o software proposto já desenvolvido, justamente por volume de dados a ser tratado.

Outras áreas além do desenvolvimento de produtos mecânicos podem se beneficiar do procedimento proposto, assim sendo sugere-se o estudo da adequação do procedimento para desenvolvimento de produtos mecatrônicos e desenvolvimento de softwares por exemplo.

Vislumbra-se também a contribuição da modelagem funcional integral do produto para os bancos de dados integrados com os sistemas CAD. Onde o objetivo é automatizar o desenvolvimento na busca de soluções a partir de uma descrição do problema baseada nas funcionalidades e que ofereça como resposta modelos geométricos para o problema proposto.

A modelagem funcional integral do produto pode ser uma ferramenta interessante para ser incorporada ao movimento da Indústria 4.0. Os sistemas ciber-físicos previstos na quarta revolução industrial serão capazes de disponibilizar dados do produto, processo e aplicação em tempo real e de maneira integrada. A modelagem funcional integral do produto pode ser um meio de avaliar e correlacionar os dados disponibilizados com as funções do produto, auxiliando na especificação do produto e mesmo no ajuste do processo de manufatura do produto.

Referências

AKAO, Y. **Quality Function Deployment: integrating customer requirements into product design**. Productivity Press, 1990.

AKIYAMA, K. **Function analysis**. Productivity Press, 1991.

ALTSHULLER, G. **The innovation algorithm**. Technical Innovation Center, 2 ed., 2007.

ARAÚJO, C.S.; BENEDETTO-NETO, H.; CAMPELLO, A.C.; SEGRE, F.M. e WRIGHT, I.C. The utilization of product development methods: a survey of uk industry. **Journal of Engineering Design**, v. 7, n. 3, 265–277, 1996.

AURISICCHIO, M.; BRACEWELL, R. e ARMSTRONG, G. The function analysis diagram: intended benefits and co-existence with other functional models. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing**, v. 27, n. 3, 249–257, 2013.

BACK, N.; OGLIARI, A.; DIAS, A. e SILVA, J.C. **Projeto integrado de produtos**. Manole, 2008.

BARBIERI, J.C. **Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos**. Saraiva, 1 ed., 2006.

BAXTER, M. **Projeto de produto**. Blucher, 3 ed., 2011.

BRACEWELL, R.H. e SHARPE, J.E.E. Functional descriptions used in computer support for qualitative scheme generation - schemebuilder. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing**, v. 10, 333–345, 1996.

BRYANT, C.R.; STONE, R.B.; MCADAMS, D.A.; KURTOGLU, T. e CAMPBELL, M.I. Concept generation from the functional basis of design. In **International Conference on Engineering Design**. 2005.

CHAKRABARTI, A.; SARKAR, P.; LEELAVATHAMMA, B. e NATARAJU, B.S. A func-

tional representation for aiding biomimetic and artificial inspiration of new ideas. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing**, v. 19, 113–132, 2005.

CHAKRABARTI, A.; SRINIVASAN, V.; RANJAN, B. e LINDEMANN, U. A case for multiple views of function in design based on a common definition. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing**, v. 27, 271–279, 2013.

CHANDRASEKARAN, B. e JOSEPHSON, J.R. Function in device representation. **Engineering with Computers**, v. 16, 162–177, 2000.

CLAUSING, D. **Total Quality Development**. ASME Press, 1994.

COOPER, R.G. **Winning at new products**. Basic Books, 4 ed., 2011.

CROSS, N. **Engineering Design Methods: Strategies for Product Design**. Wiley, 4 ed., 2008.

CSILLAG, J.M. **Análise do valor**. Atlas, 4 ed., 1995.

CURRAN, M.A. Life cycle assessment: Principles and practice. Relatório técnico, Scientific Applications International Corporation, 2006.

DANIILIDIS, C.; EBEN, K. e LINDEMANN, U. A functional analysis approach for product reengineering. **Procedia Engineering**, v. 9, 270–280, 2011.

DELGADO NETO, Geraldo Gonçalves. **Desenvolvimento e aplicação de um programa computacional, para abordagem sistemática de desenvolvimento de produtos e serviços**. 2009. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG DIN EN 1325-1: **Vocabulary for value management, value analysis and function analysis**. November 1996.

EGGEN, O. Modular product development. **Article as a part of product design course at the Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Noruega**, 2003.

ERDEN, M.S.; KOMOTO, H.; BEEK, T.J.V.; D'AMELIO, V.; ECHAVARRIA, E. e TO-

MIYAMA, T. A review of function modeling: approaches and applications. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing**, v. 22, 147–169, 2008.

ERIXON, G. Modular function development (mfd), support for good product structure creation. **Proceedings of the 2nd WDK Workshop on Product Structuring, Delft University of Technology, the Netherlands**, 1996.

EVBUOMWAN, N.F.O.; SIVALOGANATHAN, S. e JEBB, A. A survey of design philosophies, models, methods and systems. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 210, 301–320, 1996.

FAR, B.H. e ELAMY, A.H. Functional reasoning theories: problems and perspectives. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing**, v. 19, 75–88, 2005.

FRANKE, H.J. Holistic methods in product development. **Proceedings of the 17th CIRP design conference**, pp. 185–195, 2007.

GERO, J.S. Design prototypes: a knowledge representation schema for design. **AI Magazine**, v. 11, n. 4, 26–36, 1990.

GERO, J.S. e KANNENGIESSER, U. The situated function-behavior-structure framework. **Design Studies**, v. 25, n. 4, 373–391, 2004.

GIL, A.C. **Como elaborar projeto de pesquisa**. Atlas, 4 ed., 2002.

GOEL, A.; RUGABER, S. e VATTAM, S. Structure, behavior and function of complex systems: the sbf modeling language. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing**, v. 23, n. 1, 23–35, 2009.

GOEL, A.K. e BHATTA, S.R. Use of design patterns in analogy-based design. **Advanced Engineering Informatics**, v. 18, 85–94, 2004.

HARRIS, T.A. e KOTZALAS, M.N. **Essential concepts of bearing technology**. CRC Press, 5 ed., 2006.

HELMS, B. e SHEA, K. Computational synthesis of product architecture based on object-oriented graph grammars. **Journal of Mechanical Design**, v. 134, n. 2, 2012.

HIRTZ, J.; STONE, R.B.; MCADAMS, D.A.; SZYKMAN, S. e WOOD, K.L. A functional basis for engineering design: Reconciling and evolving previous efforts. **Research in Engineering Design**, v. 13, 65–82, 2002.

HÖLTTÄ-OTTO, Katja. **Modular product plataform design**. 2005. Tese (Doutorado). Helsinki University of Technologie.

HÖLTTÄ-OTTO, K. e WECK, O.D. Degree of modularity in engineering systems and products with technical and business constrains. **Concurrent Engineering**, v. 15, 113–126, 2007.

HOWARD, T.J. e ANDREASEN, M.M. Mind-sets of functional reasoning in engineering design. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing**, v. 27, 233–240, 2013.

HUBKA, V. e EDER, W. **Theory of technical systems: A total concept theory for engineering design**. Springer, 1988.

INSTITUTO DA QUALIDADE AUTOMOTIVA. **Análise de modo e efeitos de falha potencial: FMEA**. Instituto da Qualidade Automotiva, 3 ed., 2003.

KAMYAB, A. e LEWIS, K.E. Customizing products using functional component matrices. **Proceedings of the ASME 2008 International Design Engineering Technical Conference & Computers and Information in Engineering Conference**, 2008.

KAUFMAN, J.J. e WOODHEAD, R. **Stimulating innovation in products and services with function analysis and mapping**. John Wiley & Sons, 2006.

KIRSCHMAN, C.; FADEL, G. e JARA-ALMONTE, C. Classifying function for mechanical design. **Proceedings of the 1996 ASME Design Engineering Technical Conference and Computers in Engineering Conference**, 1996.

KOTLER, P. e ARMSTONG, G. **Princípios de marketing**. LTC, 7 ed., 1999.

LITTLE, A.D. e WOOD, K.L. Functional analysis: a fundamental empirical study for reverse engineering, benchmarking and redesign. **Proceedings of the ASME Design Theory and Methodology Conference**, 1997.

LOPEZ-MESA, B. e BYLUND, N. A study of the use of concept selection methods from inside a company. **Research in Engineering Design**, v. 22, n. 1, 7–27, 2011.

MCDERMOTT, R.E.; MIKULAK, R.J. e BEAUREGARD, M.R. **The basics of FMEA**. CRC, 2009.

MICHAELIS. Dicionário michaelis. Disponível em : <<http://michaelis.uol.com.br/>>, 2015. Acesso em: 19 ago. 2015.

MILES, L. **Techniques of value analysis and engineering**. McGraw-Hill, 1972.

PAHL, G. e BEITZ, W. **Konstruktions**. Springer, 1 ed., 1977.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J. e GROTE, K.H. **Projeto na engenharia**. Edgar, 2005.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J. e GROTE, K.H. **Projeto na engenharia**. Edgard Blücher, 2011.

PANDREMENOS, J. e CHRYSSOLOURIS, G. Modular product design. **Proceedings of the 19th CIRP Design Conference - Competitive Design**, 2009.

RICH, N. e HOLWEG, M. **Value analysis, value engineering**. Lean Enterprise Research Centre, 2000.

RODENACKER, W. **Methodisches konstruieren**. Springer, 4 ed., 1991.

ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F.A.; AMARAL, D.C.; DE TOLEDO, J.C.; DA SILVA, S.L.; ALLIPRANDINI, D.H. e SCALICE, R.K. **Gestão de desenvolvimento de produtos**. Saraiva, 2006.

SAEGER, I. Function modeling issues. 2009.

SAUERWEIN, E.; BAILOM, F.; MATZLER, K. e HINTERHUBER, H.H. The kano model: How to delight your customers. **IX International Working Seminar on Production Economics**, pp. 313–327, 1996.

SAVE. **Function: definition and analysis**. The Value Society, 1998.

SAVE. **Value methodology standard and body of knowledge**. The Value Society, 2007.

SCHELL, Charler. **The value of the case study as a research strategy**. 1992. Dissertação (Mestrado). Manchester Business School.

SHEN, X.X.; TAN, K.C. e XIE, M. An integrated approach to innovative product development using kano's model and qfd. **European Journal of Innovation Management**, v. 3, 91–99, 2000.

SHENHAR, A. e DVIR, D. Toward a typological theory of project management. **Research Policy**, v. 25, 1996.

SHENHAR, A. e DVIR, D. How project differ and what to do about it. In **The Wiley guide to managing projects**, pp. 1265–1286. Wiley & Sons, 2004.

SHENHAR, A.; DVIR, D.; MILOSEVIC, D.; MULENBURG, J.; PATANAKUL, P.; REILLY, R.; RYAN, M.; SAGE, A.; SAUSER, B.; SRIVANNABOON, S.; STEFANOVIC, J. e THAMHAIN, H. Toward a nasa specific project management framework. **Engineering Management Journal**, v. 17, n. 4, 8–16, 2005.

SHIMOMURA, Y.; TAKEDA, H.; YOSHIOKA, M.; UMEDA, Y. e TOMIYAMA, T. Representation of design object based on the functional evolution process model. **Proceedings of Design Theory and Methodology**, 1995.

STAKE, R.E. Case studies. In **Handbook of Qualitative Research**, capítulo 14, pp. 236–247. SAGE, 1994.

STAMATIS, D.H. **FMEA from theory to execution**. ASQ Quality, 2 ed., 2003.

STONE, R.B. e WOOD, K.L. Development of a functional basis for design. **Journal of Mechanical Design**, v. 122, 359–370, 2000.

SUH, N.P. **The principles of design**. Oxford University, 1990.

SUH, N.P. **Axiomatic design**. Oxford university, 2001.

SZYKMAN, S.; RACZ, J.W. e SRIRAM, R.D. The representation of function in computer-based design. **Proceedings of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences**, 1999a.

SZYKMAN, S.; SRIRAM, R.D.; BOCHENEK, C.; RACZ, J.W. e SENFAUTE, J. Design repositories: engineering design's new knowledge base. **IEEE Intelligent Systems**, v. 3, 48–55, 2000.

SZYKMAN, S.; SRIRAM, R.D.; TRIEU, K.; HEINTZ, J.F.; ASSANT, G. e ARCHIAMBAULT, S. The nist design repository project. **Advances in Soft Computing**, pp. 5–19, 1999b.

TOMIYAMA, T.; UMEDA, Y. e WALLACE, D.R. A holistic approach to life cycle design. **Proceedings of the 4th international seminar on life cycle engineering**, pp. 92–103, 1997.

TOMIYAMA, T.; UMEDA, Y. e YOSHIKAWA, H. A cad for functional design. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 42, 143–146, 1993.

TOYOTA. **Begunners' guide to DRBFM**. Toyota Motor Corporation, 2005.

ULRICH, K. The role of product architecture in the manufacturing firm. **Research Policy**, v. 24, 419–440, 1995.

ULRICH, K.T. e EPPINGER, S.D. **Product design and development**. Mc Graw Hill, 2008.

UMEDA, Y.; ISHII, M.; YOSHIDA, M.; SHIMOMURA, Y. e TOMIYAMA, T. Supporting concept design based on the function-behavior-state modeler. **Artificial Intelligence for Engi-**

neering Design, Analysis and Manufacturing, v. 10, 275–288, 1996.

UMEDA, Y.; TAKEDA, H. e TOMIYAMA, T. Function, behaviour, and structure. **Applications of Artificial Intelligence in Engineering V**, 1990.

UMEDA, Y. e TOMIYAMA, T. Functional reasoning in design. **IEEE expert**, v. 12, n. 2, 42–48, 1997.

UMEDA, Y.; TOMIYAMA, T. e YOSHIKAWA, H. Fbs modeling: modeling scheme of function for concept design. **Proceedings of the 9th International Workshop on Qualitative Reasoning**, pp. 271–278, 1995.

VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE. **Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie: Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz**. VDA, 2006.

VERMAAS, P. The coexistence of engineering meanings of function. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing**, v. 27, 191–202, 2013.

WERDICH, M. **FMEA - Einführung und Moderation**. Vieweg+Teubner, 2011.

WHEELWRIGHT, S.C. e CLARK, K.B. Creating project plans to focus product development. **Harvard Business Review**, v. 70, n. 2, 70–82, 1992.

WHITNEY, D.E. Designing the design process. **Research in engineering design**, v. 2, n. 1, 3–13, 1990.

WHYBREW, K.; SHAW, A.I.; AITCHISON, D.R. e RAINE, J.K. Use of design tools and methodologies for rapid product development in the new zealand manufacturing industry. **In Proceedings of the 13th International Conference on Engineering Design, Design Applications**, pp. 27–34, 2001.

WIXSON, J.R. Function analysis and decomposition using function analysis systems technique. **International Council on Systems engineering Annual Conference**, 1999.

YANER, P.W. e GOEL, A.K. From design to function: from sbf to dssbf. **In Design Computing**

and Cognition'06, pp. 423–441, 2006.

YANG, K. e EL-HAIK, B. **Projeto para seis sigma: um roteiro para o desenvolvimento do produto**. Educator, 2008.

YOSHIOKA, M.; UMEDA, Y.; TAKEDA, H.; SHIMOMURA, Y.; NOMAGUCHI, Y. e TOMIYAMA, T. Physical concept ontology for knowledge intensive engineering framework. **Advanced Engineering Informatics**, v. 18, 95–113, 2004.

APÊNDICE A – Desenhos técnicos do estudo de caso

Neste apêndice são apresentados os desenhos técnicos utilizados no estudo de caso do rolamento de rolos:

- Desenho de conjunto do rolamento (Figura A.1);
- Desenho final do anel externo (Figura A.2);
- Desenho de estágio do anel externo (Figura A.3);
- Desenho do anel elástico (Figura A.4);
- Desenho da gaiola (Figura A.5);
- Desenho do rolo (Figura A.6).

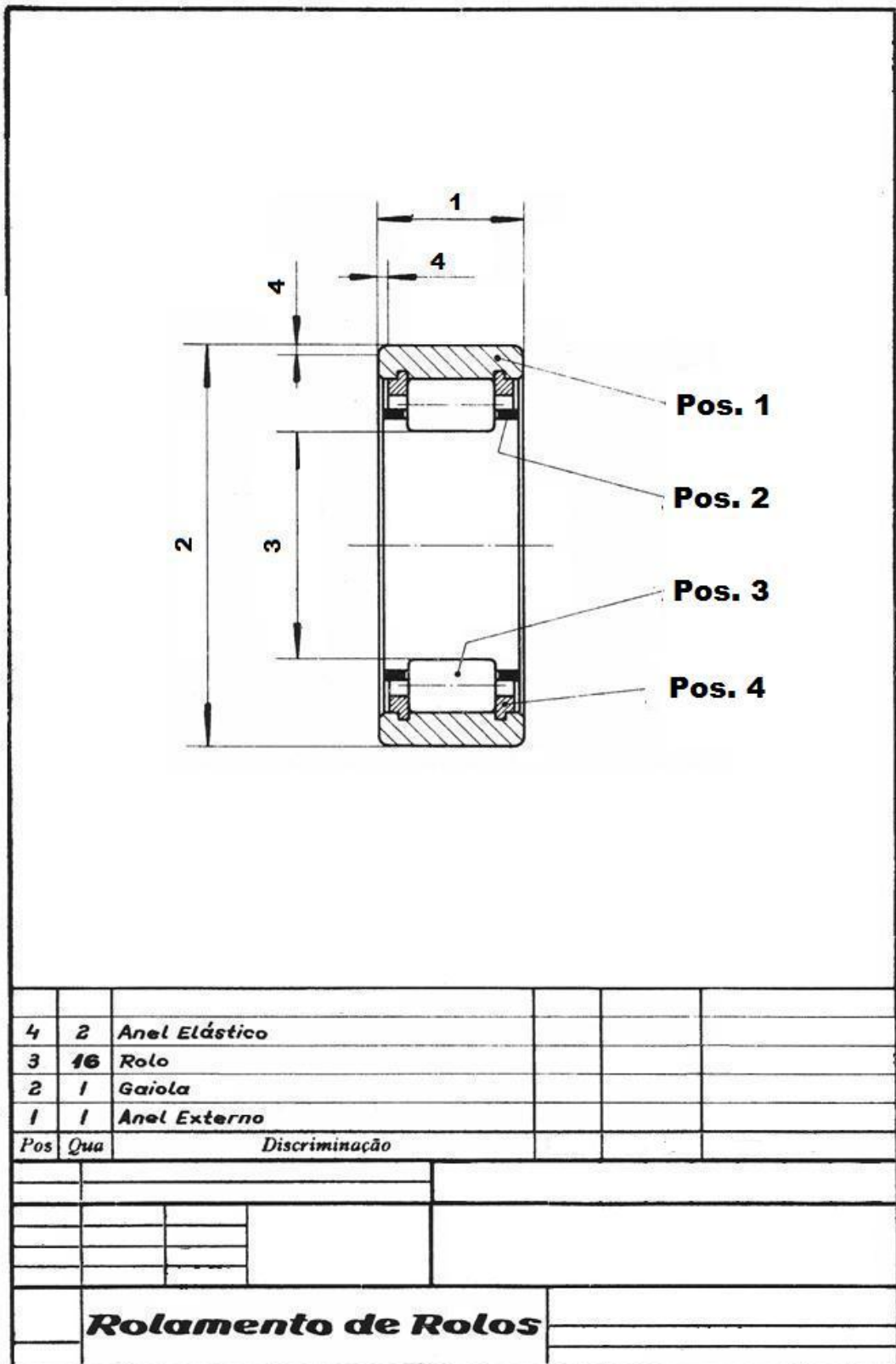


Figura A.1: Desenho de conjunto do rolamento.

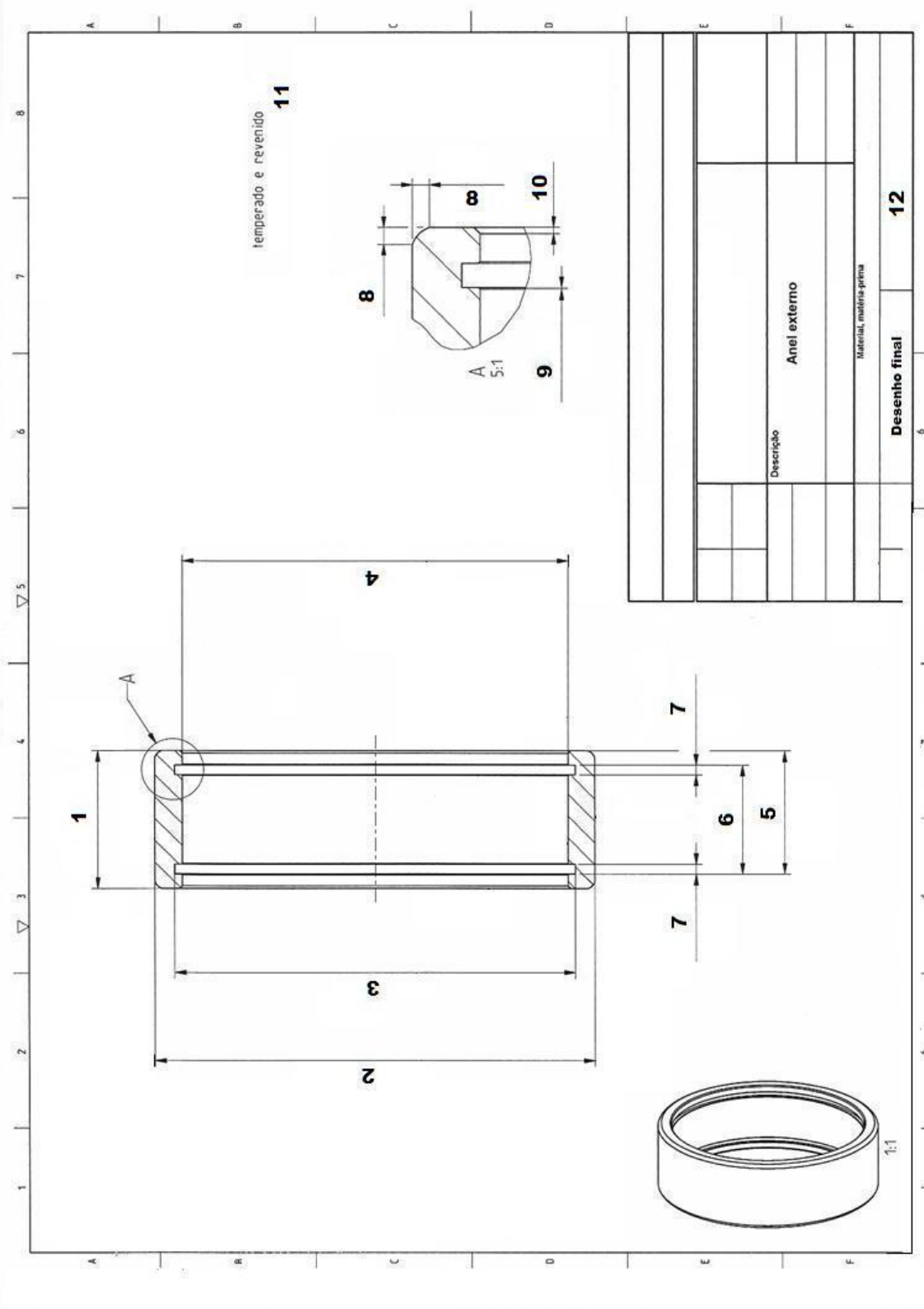


Figura A.2: Desenho final do anel externo.

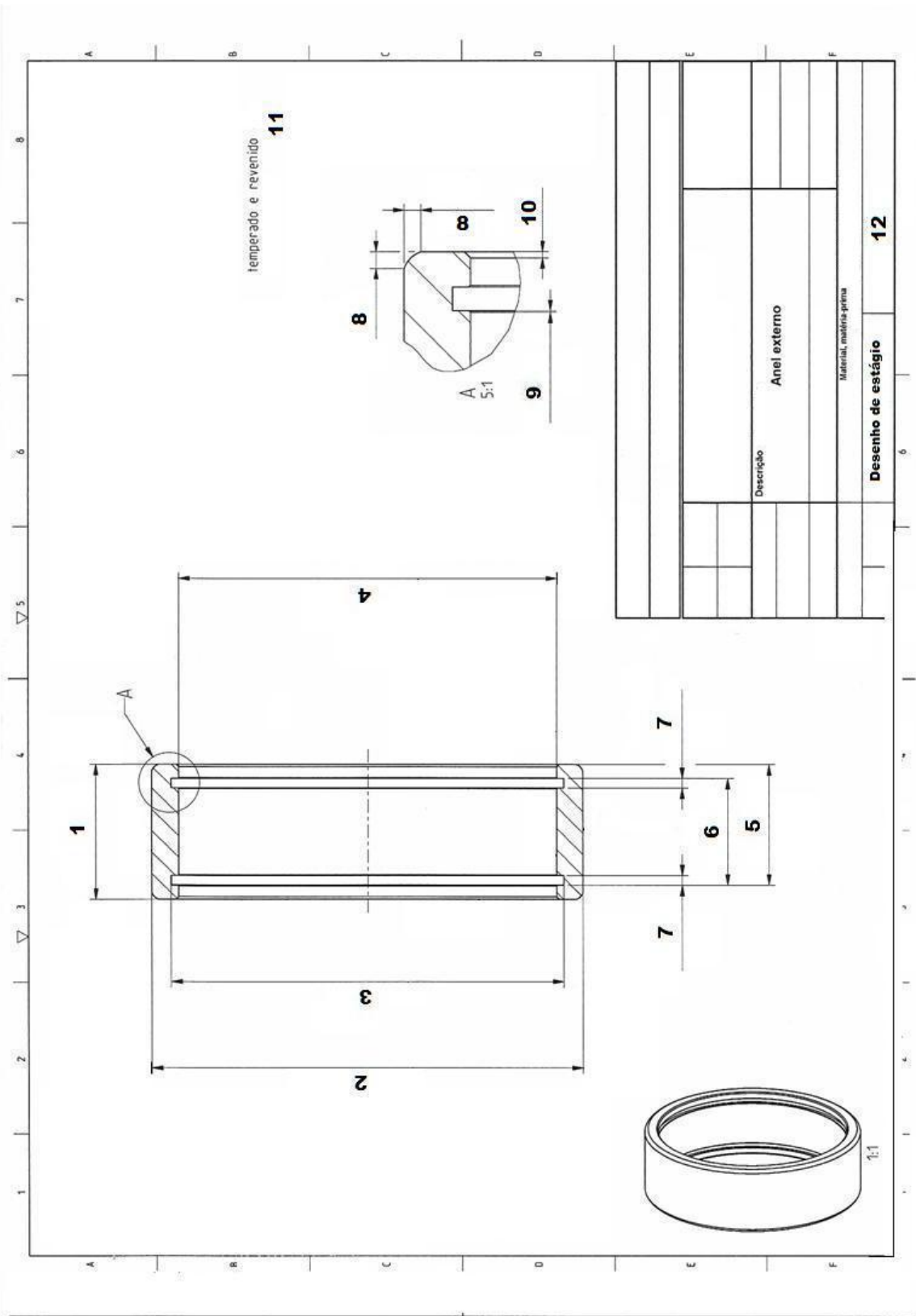


Figura A.3: Desenho de estágio do anel externo.

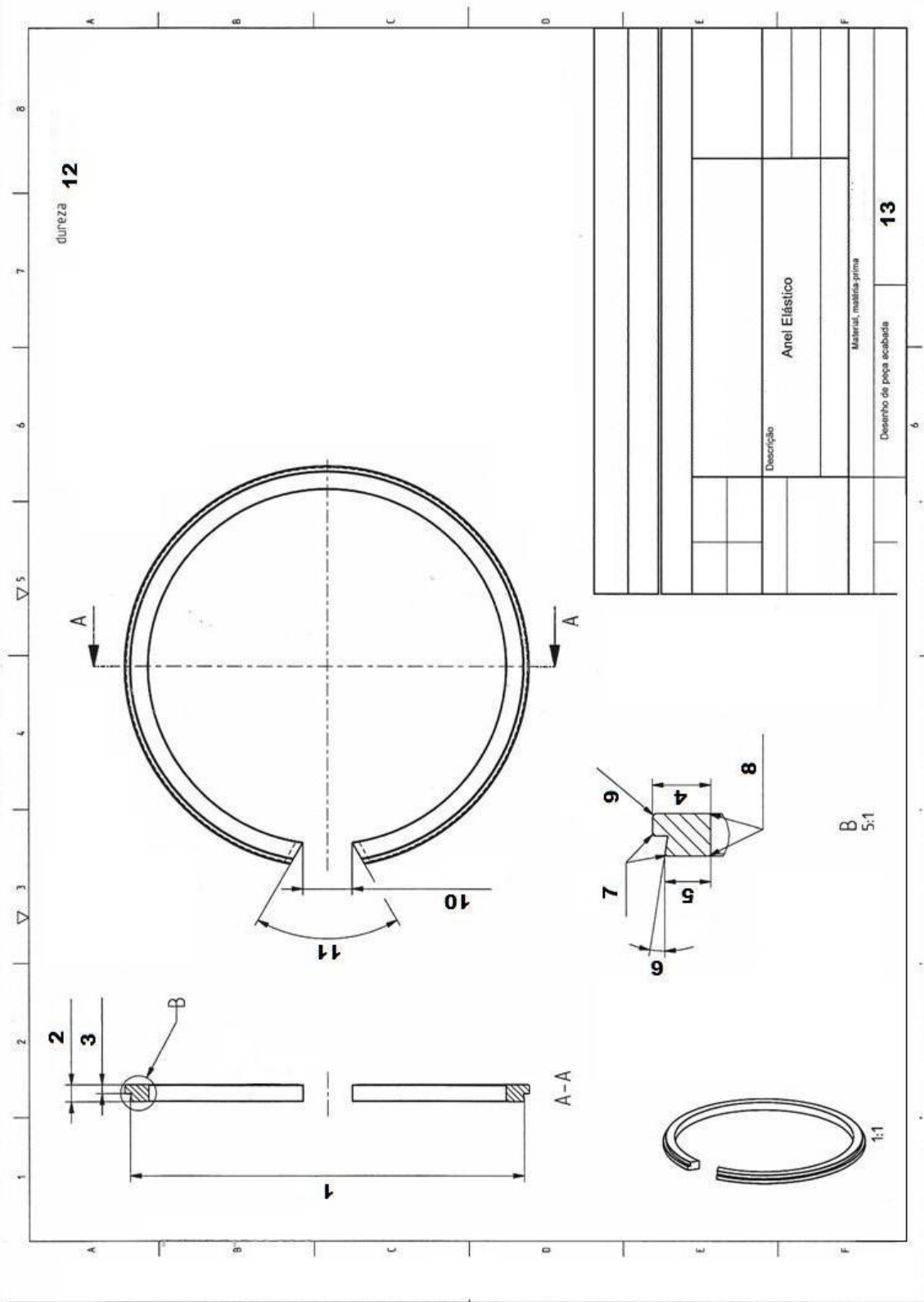


Figura A.4: Desenho do anel elástico.

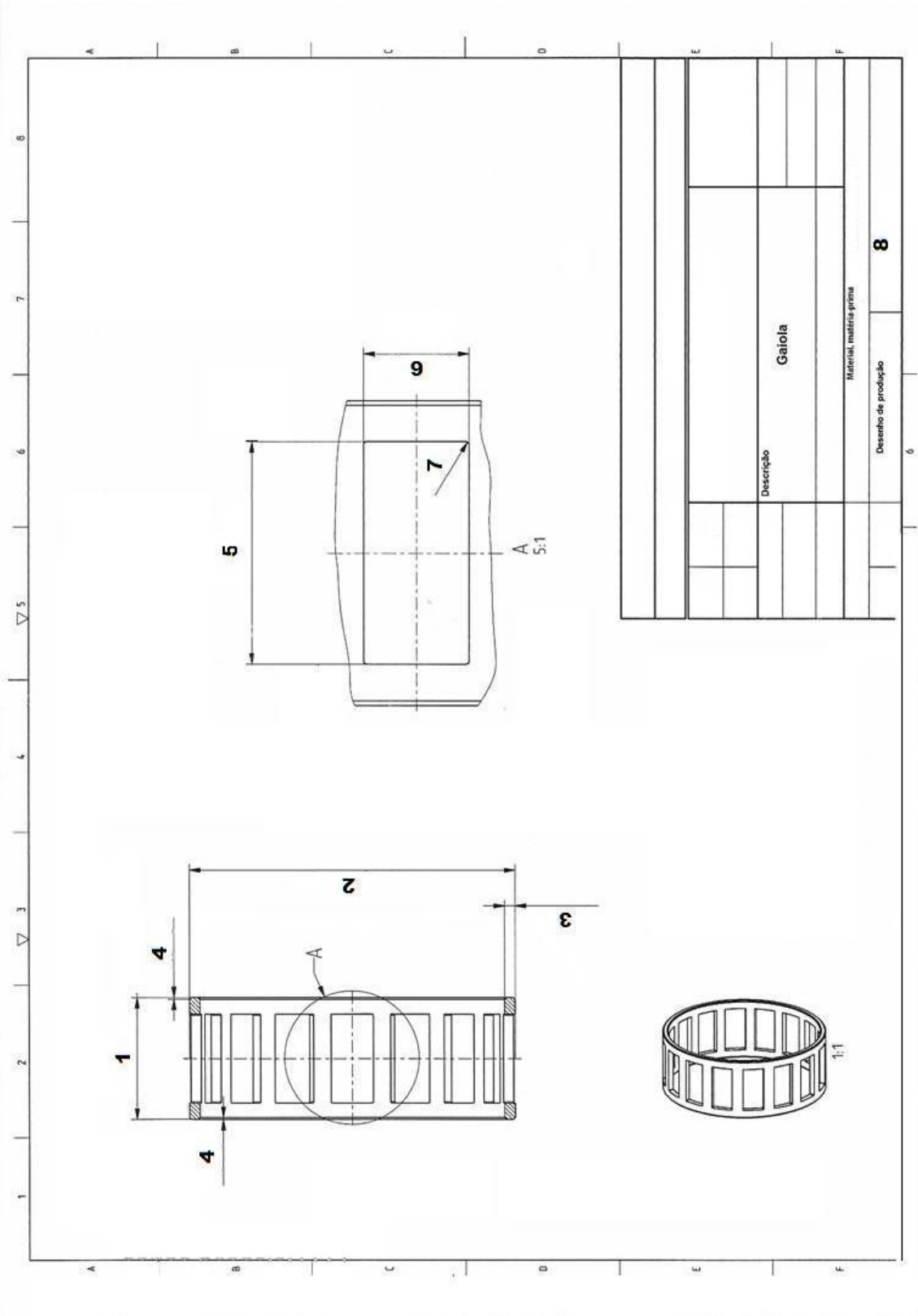


Figura A.5: Desenho da gaiola.

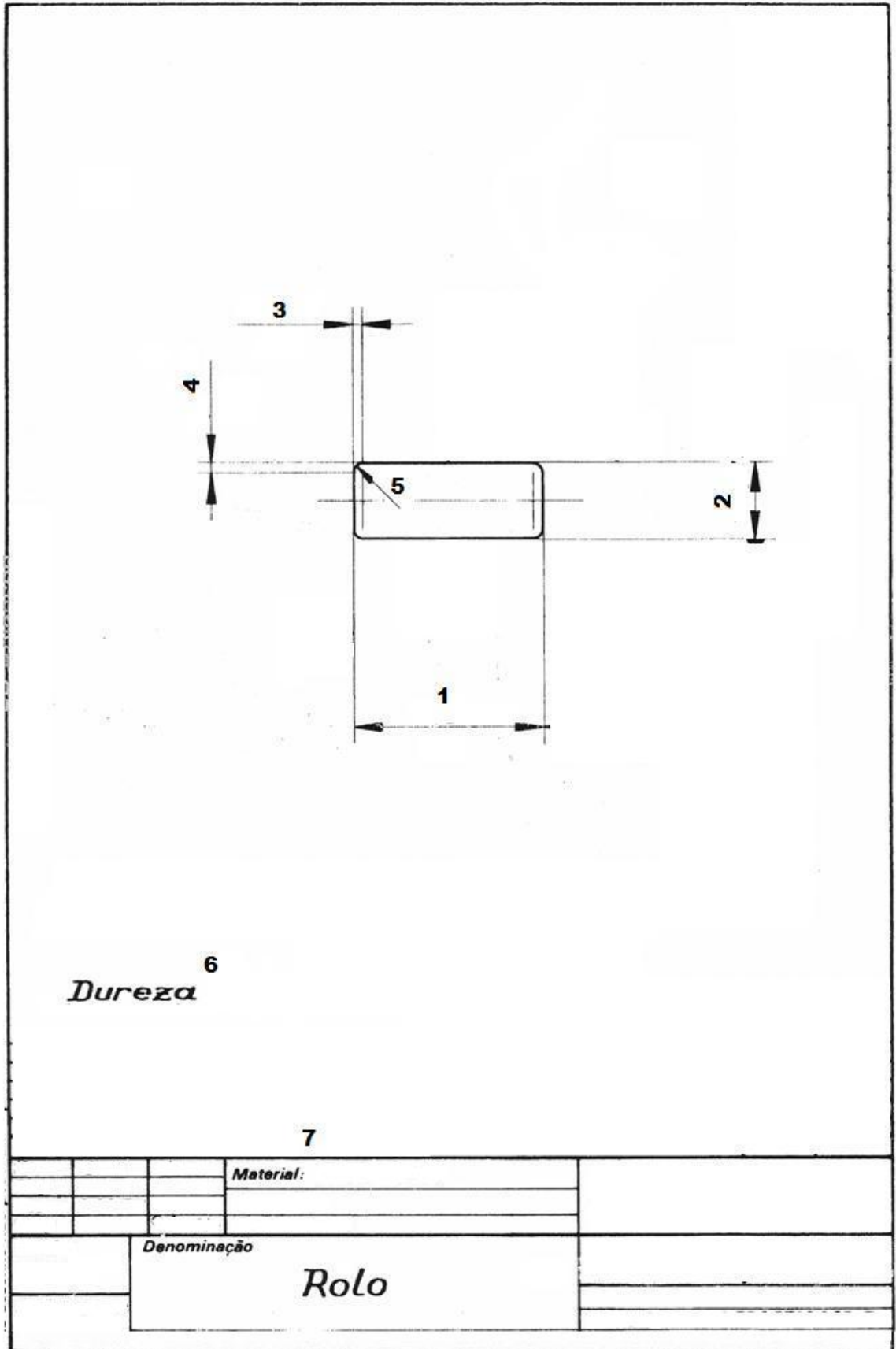


Figura A.6: Desenho do rolo.

APÊNDICE B – Matriz Processo Função Componente do estudo de caso

Neste apêndice é apresentada a PFCM completa do rolamento de rolos (Figura B.1). A matriz completa é composta pelas PFCMs dos processos de uso (Figura 4.14), de instalação (Figura 4.16), de montagem (Figura 4.18) e de retífica do anel externo (Figura 4.20).

[illegible]

Figura B.1: PFCM completa do rolamento de rolos.

APÊNDICE C – Matriz Processo Função Desempenho do estudo de caso

Neste apêndice é apresentada a PFPM completa do rolamento de rolos (Figura C.1). A matriz completa é composta pelas PFPMs dos requisitos de vida (Figura 4.21), de torque e ruído (Figura 4.22) e de tempo de retífica (Figura 4.23).

Desempenho					Velocidade	Torque	Ruído	Temperatura
Processo	Função	Sub-função						
RETIFICA DO ANEL EXTERNO	Retificar face Remover material	Posicionar anel externo Posicionar objeto	Apolar face na esteira Suportar objeto					
		Conduzir anel externo Transladar objeto	Arrastar anel Transladar objeto					
		Avançar rebolo de corte Transladar objeto	Empurrar anel Transladar objeto					
		Remover material Remover material						
	Refletir diâmetro externo Remover material	Posicionar anel externo Posicionar objeto	Apolar diâmetro externo Suportar objeto					
			Apolar face com face do anel Suportar objeto					
		Conduzir anel externo Transladar objeto	Arrastar anel Transladar objeto					
			Empurrar anel Transladar objeto					
		Apolar anel externo Suportar objeto						
		Rotacionar anel externo (com rebolo de arraste) Rotacionar objeto						
	Retificar pista Remover material	Avançar rebolo de corte Transladar objeto						
		Remover material Remover material						
		Posicionar anel externo Posicionar objeto	Apolar face Suportar objeto					
		Fixar pelo externo Prender objeto						
		Girar peça Rotacionar objeto						
		Avançar rebolo de corte Transladar objeto						
MONTAGEM	Montar rolamento (na caixa) Acoplar objeto	Montar anel elástico (no anel externo) Acoplar objeto	Posicionar anel externo Posicionar objeto	Apolar face Suportar objeto				
			Posicionar anel elástico (na prensa) Posicionar objeto	Girar diâmetro externo Girar objeto				
				Apolar na face Suportar objeto				
				Girar diâmetro Girar objeto				
			Prender anel elástico Inserir objeto	Aplicar força na face Atuar energia mecânica				
				Girar anel elástico Girar objeto				
		Preencher gaiola (com rolos) Importar objeto	Posicionar gaiola Posicionar objeto	Deformar anel Dar forma objeto				
				Alinhar no canal do anel Conter objeto				
			Posicionar rolos Posicionar objeto	Remover força Cessar energia mecânica				
			Alinhar rolos na gaiola Conter objeto					
				Apolar na face Suportar objeto				
				Aplicar força no rolo Atuar energia mecânica				
	Montar gaiola (com rolos no anel externo) Posicionar objeto	Posicionar anel (montado com anel elástico) Posicionar objeto	Apolar na face Suportar objeto	Alinhar na janela da gaiola Conter objeto				
			Girar no diâmetro externo Girar objeto					
				Apolar na face Suportar objeto				
		Inserir gaiola com rolos Posicionar objeto	Soltar gaiola com rolos Suportar objeto	Girar diâmetro externo Girar objeto				
			Girar gaiola com rolos Girar objeto					
			Apolar rolos no anel elástico Suportar objeto					
INSTALAÇÃO	Montar rolamento (na caixa) Acoplar objeto	Posicionar rolamento (na prensa) Posicionar objeto	Apolar face Suportar objeto	Apolar face Suportar objeto				
			Girar diâmetro interno Girar objeto					
			Alinhar rolamento (com alojamento) Girar objeto					
			Aplicar força no anel Atuar energia mecânica					
			Transmitir força pelo anel Transmitir energia mecânica					
			Deformar carcaça Dar forma objeto					
	Preencher rolamento Inserir objeto	Remover força Cessar energia mecânica						
			Inserir anel de montagem Inserir objeto					
		Posicionar eixo Posicionar objeto						
USO	Permitir rotação entre eixo e carcaça Permitir GDL objeto	Permitir rolagem corpos rolantes Permitir GDL objeto	Posicionar eixo Posicionar objeto	Apolar face Suportar objeto				
				Girar diâmetro interno Girar objeto				
			Alinhar rolamento (com alojamento) Girar objeto					
			Aplicar força no anel Atuar energia mecânica					
			Transmitir força pelo anel Transmitir energia mecânica					
			Deformar carcaça Dar forma objeto					
	Suportar carga radial Suportar energia mecânica	Prender objeto	Remover força Cessar energia mecânica					
			Inserir anel de montagem Inserir objeto					
		Distribuir carga Distribuir energia mecânica	Apolar face Suportar objeto	Apolar face Suportar objeto				
			Girar diâmetro interno Girar objeto					
			Alinhar rolamento (com alojamento) Girar objeto					
USO	Permitir rotação entre eixo e carcaça Permitir GDL objeto	Permitir rolagem corpos rolantes Permitir GDL objeto	Posicionar eixo Posicionar objeto	Apolar face Suportar objeto				
				Girar diâmetro interno Girar objeto				
			Alinhar rolamento (com alojamento) Girar objeto					
			Aplicar força no anel Atuar energia mecânica					
			Transmitir força pelo anel Transmitir energia mecânica					
			Deformar carcaça Dar forma objeto					
	Suportar carga radial Suportar energia mecânica	Prender objeto	Remover força Cessar energia mecânica					
			Inserir anel de montagem Inserir objeto					
		Distribuir carga Distribuir energia mecânica	Apolar face Suportar objeto	Apolar face Suportar objeto				
			Girar diâmetro interno Girar objeto					
			Alinhar rolamento (com alojamento) Girar objeto					

Figura C.1: PFPM completa do rolamento de rolos.

ANEXO A – Definições de fluxo

Definições de fluxos adaptado de Hirtz *et al.* (2002).

1. Material

(a) Homem

Pessoa ou parte de uma pessoa que atravessa o limite do dispositivo.

Exemplo: A maioria das cafeteiras necessita do fluxo de uma mão humana para atuar (ou iniciar) a eletricidade e então esquentar a água.

(b) Gás

Qualquer conjunto de moléculas caracterizadas por movimentação aleatória e pela ausência de ligação entre as moléculas.

Exemplo: Um ventilador oscilatório move o ar por meio de suas pás giratórias. O ar é transformado em um fluxo de gás.

(c) Líquido

Um líquido escoando, especificamente tendo suas moléculas se movimentando livremente uma em relação à outra, mas, por causa das forças coesivas, não se expande indefinidamente.

Exemplo: O fluxo de água através da cafeteira é um líquido.

(d) Sólido

Qualquer objeto com massa que tem uma forma firme e definida.

Exemplo: O fluxo da lixa em uma lixadeira manual é transformado em um sólido entrando na lixadeira.

i. Objeto

Material que pode ser visto ou tocado que ocupa espaço.

Exemplo: A caixa de papel descartado para reciclagem é representado como o fluxo objeto.

ii. Particulado

Substância contendo minúsculas partículas separadas.

Exemplo: Açúcar granulado e tinta em pó são particulados.

iii. Compósito

Material sólido composto por duas ou mais substâncias que têm características físicas diferentes e na qual cada substância conserva sua identidade enquanto contribui com propriedades desejáveis para a unidade completa. Qualquer classe de materiais de engenharia de alta resistência ou baixo peso consistindo de várias combinações de ligas, plásticos ou cerâmicas.

Exemplo: Materiais tais como madeira, fibra de vidro combinada com metais, cerâmicas, vidros ou polímeros juntos são considerados um compósito. Malha de Kevlar combinada com papel em forma de colmeia por meio de uma resina é considerada um compósito.

(e) Plasma

Um conjunto de partículas carregadas que é eletricamente neutro que apresenta algumas propriedades de um gás, mas diferenciando de um gás por ser um bom condutor de eletricidade e ser afetado por campo magnético.

Exemplo: Corte a plasma focaliza um feixe intenso de ar ionizado, conhecido como plasma, produzido por um arco elétrico, enquanto derrete o material a ser cortado.

(f) Mistura

Uma substância contendo dois ou mais componentes, os quais não têm uma proporção fixa, não perdem suas características individuais e podem ser separados por meios físicos.

Exemplo: Precipitações esperada para esta noite é uma mistura de chuva e neve.

i. Gás-gás

Um conjunto de moléculas contendo dois ou mais componentes, os quais são caracterizados por um movimento aleatório e da falta de ligação entre as moléculas.

Exemplo: A mistura de argônio e dióxido de carbono, um fluxo de gás-gás, é comumente usado na soldagem.

ii. Líquido-líquido

Uma combinação de dois ou mais fluídos prontamente escoando, especificamente tendo suas moléculas movendo livremente uma em relação às outras, mas por causa do efeito das forças coesivas, não se expande indefinidamente.

Exemplo: Óleo de máquina e gasolina é uma mistura líquido-líquido comum usada na manutenção de máquinas de jardinagem.

iii. Sólido-sólido

Uma combinação de dois ou mais componentes cuja massa tem uma forma firme e definida.

Exemplo: Seixo, areia, cascalho e escória podem ser usados para formar concreto, argamassa ou reboco. Depois de curado, o concreto é um sólido-sólido.

iv. Sólido-líquido

Uma combinação de dois ou mais componentes contendo pelo menos um sólido e um líquido.

Exemplo: Chá gelado é uma mistura sólido-líquido de gelo (sólido), água (líquido) e infusão de chá (sólido).

v. Líquido-gás

Uma combinação de dois ou mais componentes contendo pelo menos um líquido e um gás.

Exemplo: Bebidas gaseificadas são misturas líquido-gás de xarope flavorizante (líquido), água purificada (líquido) e dióxido de carbono (gás).

vi. Sólido-gás

Uma combinação de dois ou mais componentes contendo pelo menos um sólido e um gás.

Exemplo: Nevoeiro é uma mistura sólido-gás de partículas congeladas de água (sólido) no ar (gás).

vii. Sólido-líquido-gás

Uma combinação de três ou mais componentes contendo pelo menos um de cada sólido, líquido e gás.

Exemplo: Em um copo de soda e cubos de gelo, o copo contém o fluxo sólido-líquido-gás.

viii. Coloidal

Uma substância sólida, líquida ou gasosa feita de partículas bem pequenas, insolúveis, não-difusíveis que permanecem em suspensão em um meio envolvente sólido, líquido ou gasoso de uma substância diferente.

Exemplo: Aerosol, fumaça e neblina podem todos ser considerados coloides. Neblina é uma combinação de gotículas muito pequenas de água suspensa no ar.

2. Sinal

(a) Estado

Uma condição de algum sistema, como em informação sobre o estado do sistema.

Exemplo: Automóveis frequentemente medem a temperatura da água do motor e enviam um sinal de estado para o motorista através de um sensor de temperatura.

i. Auditivo

Uma condição de algum sistema apresentada por um som.

Exemplo: Pilotos recebem um sinal auditivo quando a aeronave atinge uma altitude perigosamente baixa.

ii. Olfativo

Uma condição de algum sistema relacionada ao senso de cheiro ou particulados.

Exemplo: Detectores de monóxido de carbono recebem um sinal olfativo do ambiente e monitora-o para altos níveis de CO.

iii. Táctil

Uma condição de algum sistema percebida pelo toque ou contato direto.

Exemplo: Um celular entrega um sinal tátil para o seu usuário através de vibração.

iv. Palatal

Uma condição de alguma substância dissolvida percebida pelo sentido palatal.

Exemplo: Em uma panela elétrica, o sinal palatal do chefe é usado para determinar quando desligar a panela.

v. Visual

Uma condição de algum sistema apresentada por alguma imagem.

Exemplo: Uma parafusadeira elétrica apresenta um sinal visual da sua direção através de um mostrador de seta no interruptor.

(b) Controle

Um comando enviado para um instrumento ou aparelho para regular um mecanismo.

Exemplo: Um piloto de avião envia um sinal de controle para os elevadores através do manche. O movimento do manche é transformado em um sinal elétrico, enviado através de um cabo e então transformado novamente em uma deflexão física do defletor.

i. Analógico

Um sinal de controle enviadas por quantidades físicas diretas, contínuas, mensuráveis e variáveis.

Exemplo: O potenciômetro de ajuste de volume do rádio envia um sinal analógico para aumentar ou diminuir o volume do som.

ii. Digital

Um sinal de controle enviado por quantidades separadas, distintas, não correlacionadas ou descontínuas.

Exemplo: Um computador envia sinais digitais (discretos) para o controlador do disco rígido durante as operações de leitura/escrita.

3. Energia

(a) Complementos genéricos

i. Esforço

Qualquer componente de energia usada para cumprir um propósito pretendido.

ii. Fluxo

Qualquer componente de energia causando o objeto pretendido a mover ou seguir livremente.

(b) Humana

Trabalho executado por uma pessoa ou dispositivo.

Exemplo: Um automóvel demanda um fluxo de energia humana para esterçar e acelerar o veículo.

i. Força

Esforço humano que é entrada para o sistema sem consideração com ao movimento requerido.

Exemplo: Força humana é necessária para atuar o gatilho de uma arma de brinquedo.

ii. Velocidade

Atividade que requer movimento de todo ou parte do corpo através de um caminho prescrito.

Exemplo: O *track pad* do notebook recebe o fluxo da velocidade humana para controlar o cursor.

(c) Acústica

Trabalho executado na produção e transmissão de som.

Exemplo: O motor de uma furadeira gera o fluxo de energia acústica em adição ao torque.

i. Pressão

O campo de pressão das ondas sonoras.

Exemplo: Um microfone condensador tem um diafragma, o qual vibra em resposta à pressão acústica. Esta vibração muda a capacitância do diafragma, portanto superpondo uma voltagem alternada na voltagem direta aplicada no circuito.

ii. Velocidade da partícula

A velocidade na qual as ondas do som viajam através de um meio condutor.

Exemplo: Dispositivos sonar dependem do fluxo de velocidade da partícula acústica para a extensão de um objeto.

(d) Biológica

Trabalho produzido por ou conectado com plantas ou animais.

Exemplo: Em granjas, grãos são dados às galinhas, os quais então são convertidos em energia biológica.

i. Pressão

O campo de pressão exercido por um fluido biológico comprimido.

Exemplo: A alta concentração de açúcares e sais dentro de uma célula causa a entrada, por osmose, de água dentro do vacúolo, o qual em contrapartida expande o vacúolo e gera uma pressão biológica hidrostática, chamada turgor, que pressiona a membrana da célula contra a parede da célula. Turgor é a causa da rigidez no tecido de planta viva.

ii. Fluxo volumétrico

A energia cinética das moléculas em um fluxo de fluido biológico.

Exemplo: Atividade metabólica acelerada de tecidos tais como músculos ou o intestino automaticamente induzem a um fluxo volumétrico aumentado de sangue através dos vasos dilatados.

(e) Química

Trabalho resultante de reações das quais substâncias são produzidas ou nas quais são convertidas em outras substâncias.

Exemplo: Uma bateria converte o fluxo de energia química em energia elétrica.

i. Afinidade

A força com a qual átomos são mantidos juntos em ligações químicas. Afinidade é proporcional ao potencial químico das espécies constituintes do composto.

Exemplo: Um motor de combustão interna transforma a afinidade química do combustível em força mecânica.

ii. Taxa de reação

A velocidade na qual os reagentes químicos produzem produtos. Taxa de reação é proporcional à proporção de moles dos espécies constituintes.

Exemplo: Revestimentos especiais em painéis automotivos reduzem a taxa de reação química do metal com o ambiente.

(f) Elétrica

Trabalho resultante do fluxo de elétrons do pólo negativo para o positivo.

Exemplo: Uma lixadeira elétrica importa um fluxo de energia elétrica da conexão da tomada e a transforma em rotação.

i. Tensão

Diferença de potencial entre os pólos positivo e negativo.

Exemplo: Tomadas caseiras geralmente fornecem uma tensão de aproximadamente 110V.

ii. Corrente

O fluxo ou taxa de fluxo de carga elétrica em um condutor ou meio entre dois pontos tendo uma diferença de potencial.

Exemplo: Disjuntor desarma quando a corrente excede o limite especificado.

(g) Eletromagnética

Energia que é propagada através do espaço livre ou através um meio material na forma de ondas eletromagnéticas. Há ambas as propriedades de onda e de partículas.

Exemplo: Painéis solares convertem o fluxo de energia eletromagnética em eletricidade.

i. Complementos genéricos

A. Esforço

Qualquer componente de energia eletromagnética usada para cumprir um propósito pretendido.

B. Fluxo

Qualquer componente de energia eletromagnética causando o objeto pretendido a mover ou seguir livremente.

ii. Ótica

Trabalho associado com a natureza e propriedades da luz e da visão. Também um caso especial de energia solar.

Exemplo: Um para-brisa de carro refina o fluxo de energia ótica que o passageiro recebe.

A. Intensidade

A quantidade de energia ótica por unidade de área.

Exemplo: Janelas pintadas reduzem a intensidade ótica da luz que entra.

B. Velocidade

A velocidade da luz em seu meio condutor.

Exemplo: A NASA desenvolveu e testou um sensor de controle de trajetória (TCS) para a estação espacial para calcular a distância entre o compartimento de carga e um satélite. É baseado na constância do fluxo da velocidade ótica para calcular a distância a partir de medições de voo de um laser refletido.

iii. Solar

Trabalho produzido por ou vindo do sol.

Exemplo: Painéis solares coletam o fluxo de energia solar e transforma-o em eletricidade.

A. Intensidade

A quantidade de energia solar por unidade de área.

Exemplo: Um dia nublado reduz a intensidade solar disponível para os painéis solares para conversão para eletricidade.

B. Velocidade

A velocidade da luz no espaço livre.

Exemplo: Ao contrário da maioria dos fluxos de energia, a velocidade solar é conhecidamente constante.

(h) Hidráulica

Trabalho que resulta do movimento e da força de um líquido, incluindo forças hidrostáticas.

Exemplo: Usinas hidrelétricas geram eletricidade aproveitando a energia hidráulica da água que passa através das turbinas.

i. Pressão

O campo de pressão exercido por um líquido comprimido.

Exemplo: Um macaco hidráulico usa o fluxo de pressão hidráulico para levantar objetos pesados.

ii. Fluxo volumétrico

O movimento das moléculas do fluido.

Exemplo: Um medidor de água mede o fluxo volumétrico de água sem uma queda significativa de pressão na linha.

(i) Magnética

Trabalho resultante de materiais que têm a propriedade de atrair outros materiais similares, quer esta característica esteja ocorrendo naturalmente ou induzida eletricamente.

Exemplo: A energia magnética de uma trava magnética é o fluxo que mantém o preso à estrutura de base de ferro.

i. Força magnética

A força motriz que estabelece o fluxo magnético em um núcleo. A força magnetomotriz é diretamente proporcional à corrente na bobina ao redor do núcleo.

Exemplo: Em uma fechadura magnética de porta, a mudança na força magnetomotriz (trazida por uma mudança na corrente elétrica) permite que libere a fechadura e a porta abra.

ii. Taxa de fluxo magnético

Fluxo é o deslocamento magnético variável em um núcleo induzido pelo fluxo de corrente através da bobina. O fluxo magnético variável é a taxa no tempo de mudança do fluxo. A voltagem através de uma bobina magnética é diretamente proporcional à taxa no tempo de mudança do fluxo magnético.

Exemplo: Um relê magnético é um transdutor que detecta a taxa no tempo de mudança do fluxo magnético quando o braço do relê move.

(j) Mecânica

Energia associada com as partes que se movem de uma máquina ou a energia dos esforços associada com o estado de carregamento de um objeto.

Exemplo: Um elevador converte energia elétrica ou hidráulica em energia mecânica.

i. Complementos genéricos

A. Esforço

Qualquer componente de energia mecânica usado para cumprir um propósito pretendido.

B. Fluxo

Qualquer componente de energia mecânica que provoque um objeto a se mover ou se deslocar livremente.

ii. Energia rotativa

Energia que resulta de uma rotação ou de uma rotação virtual.

Exemplo: Os clientes estão preocupados primariamente com o fluxo de energia rotacional de uma parafusadeira elétrica.

A. Torque

Refere-se ao momento que produz ou tende a produzir uma rotação.

Exemplo: Em um parafusadeira elétrica, eletricidade é convertida em energia rotacional. O fluxo mais específico é torque, baseado na necessidade primária do cliente de inserir parafusos facilmente e não rapidamente.

B. Velocidade angular

Refere-se à orientação ou magnitude da taxa no tempo de mudança da posição angular em torno de um eixo específico.

Exemplo: Uma centrífuga é utilizada para separar líquidos de diferentes densidades de um mistura. O fluxo primário que ele produz é a velocidade angular, já que a taxa de rotação em torno de um eixo é a maior interesse.

iii. Energia translacional

Fluxo de energia gerado ou demandado por uma translação ou translação virtual.

Exemplo: Um brinquedo de uma criança, como um lançador de projétil, transmite a energia translacional para o projétil para impulsioná-lo.

A. Força

A ação que produz ou tenta produzir uma translação.

Exemplo: Em uma máquina de teste de tração, o fluxo primário de interesse é o da força que causa a tensão no corpo de prova.

B. Velocidade linear

Movimento que pode ser descrito por três componentes de direção.

Exemplo: Um carro do elevador utiliza o fluxo de velocidade linear para mover entre os andares.

(k) Pneumática

Trabalho resultante de um fluxo de gás comprimido ou de uma fonte de pressão.

Exemplo: Uma arma de pressão depende do fluxo de energia pneumática (do ar comprimido) para impulsionar o projétil.

i. Pressão

O campo de pressão exercido por um gás comprimido.

Exemplo: Alguns cilindros dependem do fluxo de pressão pneumática para mover um pistão ou suportar uma força.

ii. Fluxo de massa

A energia cinética das moléculas em um fluxo de gás.

Exemplo: O fluxo de massa de ar é o fluxo que transmite a energia térmica de um secador de cabelo para o cabelo molhado.

(l) Radioativa/Nuclear

Trabalho resultante de ou produzido por partículas ou raios, tais como os raios alfa, beta e gama, pela desintegração espontânea do núcleo atômico.

Exemplo: Reatores nuclear produzem um fluxo de energia radioativa a qual transforma a água em vapor e então movimentam turbinas geradoras de eletricidade.

i. Intensidade

A quantidade de partículas radioativas por unidade de área.

Exemplo: Concreto é um material efetivo de proteção a radiação, reduzindo a intensidade radioativa na proporção a sua espessura.

ii. Taxa de decaimento

A taxa de emissão de partículas radioativas de uma substância.

Exemplo: A taxa de decaimento do carbono oferece um método para datar objetos pré-históricos.

(m) Térmica

Uma forma de energia que é transferida entre dois corpos como resultado da diferença de temperatura.

Exemplo: Uma cafeteira converte o fluxo de energia em fluxo de energia térmica, a qual ela transmite para a água.

i. Temperatura

O grau de calor de um corpo.

Exemplo: Uma cafeteira leva a temperatura da água a de ebulição para que levar a água do reservatório para o filtro.

ii. Taxa de calor (Nota: este é um pseudo-fluxo)

A taxa no tempo de mudança da energia de calor de um corpo.

Exemplo: Aletas no bloco do motor aumentam o fluxo taxa de calor do motor por condução (através da aleta), convecção (para o ar) e radiação (para o meio).

ANEXO B – Definições de função

Observe que certas funções estão limitadas a operar em certos tipos de fluxo. Esta restrição é tipicamente dada na definição da função e é aplicável a todas as funções dos sub-níveis da função referida. Definições de função adaptadas de Hirtz *et al.* (2002).

1. Ramificar

Provocar um fluxo (material, energia, sinal) para não mais estar unido ou misturado.

(a) Separar

Isolar um fluxo (material, energia, sinal) em componentes distintos. Os componentes separados são distintos do fluxo antes da separação, assim como um do outro.

Exemplo: Um prisma de vidro separa a luz em diferentes componentes de comprimento de ondas para produzir um arco-íris.

i. Dividir

Separar um fluxo.

Exemplo: Uma máquina de vendas automática divide a forma sólida das moedas nas designações apropriadas.

ii. Extrair

Sacar, ou forçadamente remover, um fluxo.

Exemplo: Um aspirador de pó extrai detritos da mistura importada e exporta ar limpo para o ambiente.

iii. Remover

Tirar parte de um fluxo do seu local prefixado.

Exemplo: Uma lixadeira remove pequenos pedaços da superfície da madeira para suavizar a madeira.

(b) Distribuir

Provocar o rompimento de um fluxo (material, energia, sinal). Cada pedaço individual é similar ao outro e também ao fluxo não distribuído.

Exemplo: Um pulverizador (*spray*) distribui líquido fixador de cabelo sobre a cabeça para manter o cabelo na posição desejada.

2. Canalizar

Provocar um fluxo (material, energia, sinal) a se mover de um local para outro.

(a) Importar

Trazer um fluxo (material, energia, sinal) de fora dos limites do sistema.

Exemplo: Uma abertura física no topo do copo do liquidificador importa um sólido (comida) para o sistema. Também a alça do copo do liquidificador importa a mão humana.

(b) Exportar

Enviar um fluxo (material, energia, sinal) para fora dos limites do sistema.

Exemplo: despejar a comida triturada do copo do liquidificador exporta líquido para fora do sistema. A abertura no topo do liquidificador é uma solução para a sub-função exportar.

(c) Transferir

Deslocar ou levar um fluxo (material, energia, sinal) de um lugar para outro.

i. Transportar

Mover um material de um lugar para outro.

Exemplo: Uma cafeteira transporta líquido (água) do seu reservatório através da sua câmara de aquecimento e então para o filtro.

ii. Transmitir

Mover energia de um lugar para outro.

Exemplo: Em uma lixadeira manual, a carcaça da lixadeira transmite a força humana para o objeto que está sendo lixado.

(d) Guiar

Direcionar o curso de um fluxo (material, energia, sinal) ao longo de um caminho específico.

Exemplo: Um sistema de aquecimento doméstico guia o gás (ar) pela casa para os devidos locais através de um conjunto de dutos.

i. Transladar

Fixar o movimento de um fluxo por um dispositivo em uma direção linear.

Exemplo: em uma linha de montagem, uma esteira translada produtos semi-acabados de uma estação de montagem para outra.

ii. Rotacionar

Fixar o movimento de um fluxo por um dispositivo em torno de um eixo.

Exemplo: Um disco de driver de computador rotaciona os discos magnéticos em torno de um eixo para que o leitor leia os dados.

iii. Permitir grau de liberdade (GDL)

Controlar o movimento de um fluxo por uma força externa ao dispositivo em uma ou mais direções.

Exemplo: Para possibilitar um acesso fácil ao porta-malas e fechamento apropriado, a tampa do porta-malas deve se mover de acordo com um grau de liberdade específico. Um mecanismo de quatro barras permite um GDL rotacional para a tampa do porta-malas.

3. Conectar

Trazer dois ou mais fluxos (material, energia, sinal) juntos.

(a) Acoplar

Unir ou trazer junto fluxos (material, energia, sinal) de maneira que os membros ainda sejam distinguíveis um do outro.

Exemplo: um lápis comum acopla uma borracha e um bastão de escrever. O acoplamento é feito usando uma luva de metal que é prensada na borracha e no bastão.

i. Unir

Acoplar fluxos juntos de uma maneira predeterminada.

Exemplo: Uma chave catraca une o bocal na interface do seu eixo quadrado.

ii. Vincular

Acoplar fluxos juntos por meio de um fluxo intermediário.

Exemplo: Um tensor vincula duas pontas de um cabo de direção.

(b) Misturar

Combinar dois fluxos (material, energia, sinal) em uma massa única, uniforme e homogênea.

Exemplo: Um *shaker* mistura a tinta base com os corantes para formar um líquido homogêneo.

4. Controlar magnitude

Alterar ou governar o tamanho ou amplitude de um fluxo (material, energia, sinal).

(a) Atuar

Iniciar o fluxo de energia, sinal ou material em resposta a um sinal de controle importado.

Exemplo: Um interruptor de um circuito atua o fluxo de energia elétrica e liga uma lâmpada.

(b) Regular

Ajustar o fluxo de energia, sinal ou material em resposta a um sinal de controle, quanto a uma característica do fluxo.

Exemplo: Girar o registro regula a vazão do fluxo de líquido fluindo da torneira.

i. Aumentar

Ampliar um fluxo em resposta a um sinal de controle.

Exemplo: Abrir mais o registro de uma torneira aumenta o fluxo de água.

ii. Reduzir

Diminuir um fluxo em resposta a um sinal de controle.

Exemplo: Fechar a válvula reduz a vazão de propano na churrasqueira a gás.

(c) Alterar

Ajustar o fluxo de energia, sinal ou material de uma maneira predeterminada e fixa.

Exemplo: Em uma furadeira manual, um potenciômetro altera o fluxo de energia elétrica para o motor, mudando assim a rotação que a furadeira gira.

i. Incrementar

Ampliar um fluxo de uma maneira predeterminada e fixa.

Exemplo: uma lente de aumento incrementa o sinal visual (a impressão) de um documento em papel.

ii. Decrementar

Reduzir um fluxo de uma maneira predeterminada e fixa.

Exemplo: A redução de engrenagens de uma parafusadeira elétrica decrementa o fluxo de energia rotacional.

iii. Dar forma

Moldar ou formar um fluxo.

Exemplo: Na indústria automotiva, grandes prensas dão forma a chapas de metal em contornos de forma que se tornam pára-choques, capôs e porta-malas.

iv. Condicionar

Tornar um fluxo apropriado para o uso desejado.

Exemplo: Para prevenir danos a um equipamento elétrico, um protetor de picos de tensão condiciona a energia elétrica eliminando os picos e ruídos (normalmente através de capacitores) do fluxo de energia.

(d) Cessar

Parar ou impedir a transferência de um fluxo (material, energia, sinal).

Exemplo: Um revestimento reflexivo de uma janela cessa a transmissão de radiação UV através da janela.

i. Impedir

Evitar que um fluxo aconteça.

Exemplo: Uma comporta de uma barragem impede que a água esco para o outro lado.

ii. Inibir

Conter significativamente um fluxo, apesar de uma porção do fluxo continuar a ser transferido.

Exemplo: As estruturas de veículos espaciais inibem o fluxo de radiação para proteger a tripulação e a carga.

5. Converter

Mudar de uma forma de fluxo (material, energia, sinal) para outro. Para plenitude, qualquer tipo de conversão de fluxo é válida. na prática, conversões tais como converter eletricidade em torque serão mais comuns do que converter sólido em energia óptica.

Exemplo: Um motor elétrico converte eletricidade em energia rotacional.

6. Provisão

Acumular ou prover um fluxo de material ou energia.

(a) Armazenar

Acumular um fluxo.

Exemplo: Uma bateria elétrica armazena a energia em uma lanterna.

i. Conter

Manter um fluxo dentro de limites.

Exemplo: Um saco de aspirador contém os detritos aspirados de uma casa.

ii. Coletar

Reunir um fluxo em um local.

Exemplo: Painéis solares coletam os raios UV do sol para energizar pequenos mecanismos.

(b) Fornecer

Prover um fluxo a partir de um reservatório.

Exemplo: Em uma lanterna, a bateria fornece energia para a lâmpada.

7. Sinal

Prover informação em um fluxo de material, energia ou sinal como um fluxo de sinal de saída. O fluxo que fornece informação passa inalterado pela função.

(a) Sentir

Perceber ou estar informado de um fluxo.

Exemplo: Um toca-fitas sente se chegou o final da fita.

i. Detectar

Descobrir informação sobre um fluxo.

Exemplo: Um sensor no topo de um cilindro de gás detecta níveis de pressão adequados.

ii. Medir

Determinar a magnitude de um fluxo.

Exemplo: um termostato analógico mede a temperatura através de um termopar.

(b) Indicar

Tornar algo conhecido para o usuário sobre o fluxo.

Exemplo: Uma pequena janela em um recipiente de uma cafeteira indica o nível de água na máquina.

i. Rastrear

Observar e registrar o dado de um fluxo.

Exemplo: Rastreando o desempenho das baterias, pode-se determinar o ponto de baixa eficiência.

ii. Exibir

Revelar algo sobre o fluxo para a mente ou visão.

Exemplo: O mostrador de coordenadas xyz em uma fresadora vertical exibe a posição exata da ferramenta de corte.

(c) Processar

Submeter informação a um tratamento ou método particular tendo um conjunto de operações ou passos.

Exemplo: Um computador processa o sinal de solicitação de acesso antes de permitir o usuário acessar suas instalações.

8. Suportar

Fixar firmemente um material em uma posição definida, ou assegurar uma energia ou sinal em um curso específico.

(a) Estabilizar

Evitar que um fluxo mude de curso ou posição.

Exemplo: Em um aspirador de pó típico, o centro de gravidade é colocado a uma altura baixa para estabilizar o aspirador quando puxado pela mangueira.

(b) Prender

Fixar firmemente um caminho de um fluxo.

exemplo: em uma luva de ciclismo, uma tira de velcro prende a mão humana na posição correta.

(c) Posicionar

Colocar um fluxo (material, energia, sinal) em um lugar ou orientação específico.

Exemplo: A abertura para moedas de uma máquina de refrigerantes posiciona a moeda para iniciar o processo de avaliação e transporte da moeda.