

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**UTILIZAÇÃO DE MODELOS PARA A REPRESENTAÇÃO DE
PRODUTOS NO PROJETO CONCEITUAL**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ENGENHARIA

MARCELO GITIRANA GOMES FERREIRA

FLORIANÓPOLIS, JUNHO DE 1997

UTILIZAÇÃO DE MODELOS PARA A REPRESENTAÇÃO DE
PRODUTOS NO PROJETO CONCEITUAL

MARCELO GITIRANA GOMES FERREIRA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE
CONCENTRAÇÃO PROJETO MECÂNICO, APROVADA EM SUA FORMA
FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA.



Prof. Fernando A. Forcellini, Dr.Eng.
Orientador



Prof. Nelson Back, Ph.D.
Co-orientador

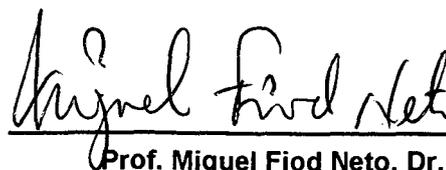


Prof. Abelardo Alves de Queiroz, Ph.D.
Coordenador

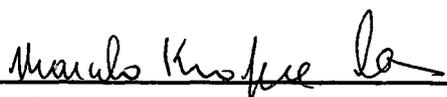
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Acires A. Dias, Dr. Sc.
Presidente



Prof. Miguel Fiod Neto, Dr.



Prof. Marcelo Krajnc Alves, Ph. D.



Prof. André Ogliari, M. Eng.

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família.

Agradecimentos

A Florianópolis pelo carinho com que me acolheu.
Ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC pela
oportunidade concedida.
Ao meu orientador, professor Fernando Forcellini, pela
paciência e pelo entusiasmo transmitido.
Aos professores Nelson Back, André Ogliári e Augusto
Weiss, pelos ensinamentos técnicos e humanos.
À amiga Vera Duarte pelo carinho e incentivo.
A Renata, Ana Vlândia e Rafaela, amáveis companheiras.
A Jorge Eurico Peres e Lucas Weihmann, amigos da
primeira à última hora.
Aos grandes amigos Fred Amorim e Etney Neves pelos
insights a respeito da vida.
Aos companheiros Marcus Couto, Eduardo Barbeitos e
Cesar Vinadé pela convivência agradável e enriquecedora.
Aos colegas do LP pela amizade e companheirismo.
Ao Caio e à Vevê.
A todos, por fim, muito obrigado.

Sumário

Dedicatória	iii
Agradecimentos	iv
Sumário	v
Lista de figuras	viii
Lista de tabelas	xi
Resumo	xii
Abstract	xiii
Capítulo 1	
Introdução	1
Capítulo 2	
O projeto de engenharia	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Definição.....	5
2.3 Classificações.....	7
2.4 Modelos do processo de projeto.....	8
2.5 Considerações finais.....	16
Capítulo 3	
O projeto conceitual	17
3.1 Introdução.....	17
3.2 Definição.....	17
3.3 A concepção.....	19
3.4 Modelo procedural do projeto conceitual.....	21
3.5 O processo de projeto conceitual.....	27
3.6 Considerações finais.....	33

Capítulo 4

Os modelos de produto	34
4.1 Introdução	34
4.2 Definições e generalidades.....	34
4.3 Linguagens	38
4.4 Propósitos	41
4.5 Classificação.....	42
4.5.1 Modelos de estrutura	43
4.5.2 Modelos icônicos.....	44
4.5.3 Modelos analógicos	45
4.5.4 Modelos matemáticos e lógicos	46
4.6 Simulação	49
4.7 Tendências com relação ao modelamento	49
4.7.1 Abrangência	50
4.7.2 Multiplicidade de aspectos.....	51
4.7.3 Informatização.....	52
4.7.4 Integração e simultaneidade.....	54
4.7.5 Suporte às primeiras fases do projeto.....	55
4.8 Considerações finais.....	59

Capítulo 5

Modelos de tarefa	61
5.1 Introdução	61
5.2 Lista de especificações.....	62
5.3 Processo de esclarecimento da tarefa.....	63
5.4 Considerações finais.....	70

Capítulo 6

Modelos Funcionais	73
6.1 Introdução	73
6.2 Função	74
6.2.1 Definição	74
6.2.2 Modelamento.....	78
6.3 Modelos funcionais no projeto conceitual	78

6.3.1 Função total	79
6.3.2 Estrutura de funções	82
6.3.3 Operações básicas	88
6.3.3.1 Operações físicas básicas	88
6.3.3.2 Operações lógicas e matemáticas básicas	92
6.5 Considerações finais.....	94
Capítulo 7	
Modelos de princípio de solução e de concepção	97
7.1 Introdução	97
7.2 Princípio de solução.....	99
7.2.1 Efeitos físicos	100
7.2.2 Portadores de efeito.....	102
7.2.3 Princípio de solução total.....	106
7.4 Modelo de concepção	109
7.5 Considerações finais.....	114
Capítulo 8	
Conclusões e recomendações.....	117
8.1 Introdução	117
8.2 Conclusões	118
8.2 Recomendações	119
Referência bibliográfica	121
Glossário.....	126

Lista de figuras

Figura 1. 1	Requisitos para a competitividade dos produtos.....	1
Figura 2. 1	Projeto <i>versus</i> reprojeto.....	7
Figura 2. 2	Modelo do processo de projeto, segundo French [11].....	9
Figura 2. 3	Modelo do processo de projeto, segundo Pahi e Beitz [26].....	10
Figura 2. 4	Modelo do processo de projeto, segundo Hubka [16].	11
Figura 2. 5	Modelo do processo de projeto, segundo a VDI 2221 [44].....	14
Figura 2. 6	Divergência e convergência no processo de projeto (VDI 2222 [45]).	15
Figura 3. 1	O projeto conceitual no modelo consensual do processo de projeto.	18
Figura 3. 2	Etapas do projeto conceitual, segundo Pahl e Beitz [26].	21
Figura 3. 3	Função total [26].	22
Figura 3. 4	Estabelecimento da estrutura de funções [26].....	23
Figura 3. 5	Combinação de princípios de solução em variantes de solução [26].	25
Figura 3. 6	O processo total de projeto de um produto - modelo consensual.	27
Figura 3. 7	O processo de projeto conceitual.	28
Figura 3. 8	Problema de projeto no diagrama complexidade <i>versus</i> concreticidade. ..	29
Figura 3. 9	Estratégias para o desenvolvimento de princípios de solução [35].....	31
Figura 3. 10	Projeto conceitual no diagrama complexidade <i>versus</i> concreticidade. ..	32
Figura 3. 11	Subprocessos do projeto conceitual.	32
Figura 4. 1	Relação entre objeto e modelo.	36
Figura 4. 2	Linguagens de projeto e respectivos modelos.....	39
Figura 4. 3	Predominância de linguagens no fluxo geral de projeto.....	40
Figura 4. 4	Modelo de cromossomos [24].	50
Figura 4. 5	Metamodelo [48].	52
Figura 4. 6	Combinação de classes [36].	54
Figura 4. 7	Diagrama de grafos conceituais [38].	57
Figura 4. 8	Grafo conceitual para válvula de diafragma [13].	58
Figura 4. 9	Relação entre função e princípio de solução [17].	58

Figura 4. 10	Processo de projeto.....	60
Figura 5. 1	Sistemática para a obtenção de especificações de projeto [10].....	64
Figura 5. 2	Modelo de lista de especificações de projeto [10].....	69
Figura 5. 3	Modelos de produto utilizados no esclarecimento da tarefa.....	69
Figura 6. 1	Par de engrenagem e possíveis funções.....	76
Figura 6. 2	Funções realizadas por distintos sistemas físicos.....	76
Figura 6. 3	Estados, comportamentos e funções de um sistema (adaptado de [40]).	77
Figura 6. 4	Representações gráficas de funções técnicas individuais.	78
Figura 6. 5	Módelos funcionais de um produto.....	79
Figura 6. 6	Representação esquemática da função total.....	80
Figura 6. 7	Função total “ <i>lavar roupas</i> ”.....	80
Figura 6. 8	Símbolos para a elaboração de uma estrutura de funções [26].	83
Figura 6. 9	Desdobramento da função total em funções mais simples [26].....	83
Figura 6. 10	Contorno de uma estrutura de funções.	84
Figura 6. 11	Funções parciais para “ <i>lavar roupas</i> ”.....	84
Figura 6. 12	Estrutura de funções para “ <i>lavar roupas</i> ”.....	85
Figura 6. 13	Estrutura de operações básicas para “ <i>lavar roupas</i> ”.....	87
Figura 6. 14	Operações físicas básicas, segundo Koller [18].....	89
Figura 6. 15	Operações básicas inversas de misturar e separar.	90
Figura 6. 16	Alavanca com relação entre braços variável.....	90
Figura 6. 17	Equivalência entre bases de operações básicas [27].....	91
Figura 6. 18	Operações matemáticas básicas [2].....	92
Figura 6. 19	Funções lógicas básicas [2].....	93
Figura 6. 20	Modelo de operações lógicas para o acionamento de um misturador. ..	93
Figura 6. 21	Seqüência de modelos funcionais do projeto conceitual.....	96
Figura 7. 1	Modelos de produto na síntese de soluções.	98
Figura 7. 2	Efeitos físicos de uso na engenharia.....	101
Figura 7. 3	Efeitos físicos para a separação de partículas sólidas em líquidos.	102
Figura 7. 4	Constituição de um princípio de solução.....	103
Figura 7. 5	Portadores para o efeito físico da alavanca.	103
Figura 7. 6	Modelamento do princípio de solução da roldana.....	104
Figura 7. 7	Princípios de solução para uma morsa. [15].....	105
Figura 7. 8	Princípios de solução para posicionador para soldas. [15].....	106
Figura 7. 9	Princípio de solução para um elevador de automóveis.....	108

Figura 7. 10 Princípio de solução para um resfriador de fluidos.	108
Figura 7. 11 Modelo de concepção para um elevador de automóveis.	112
Figura 7. 12 Modelos de concepção para microtrator articulado [31].	113
Figura 7. 13 Modelos de concepção para uma morsa, segundo Hubka [16].	114

Lista de tabelas

Tabela 3. 1	Métodos para busca de princípios de solução.....	24
Tabela 5. 1	Níveis de propriedades dos produtos [10].	65
Tabela 5. 2	Clientes e usuários do projeto [10].	65
Tabela 6. 1	<i>Funções genericamente válidas</i> de Pahl e Beitz [26].	91

Resumo

Esta dissertação analisa a evolução do produto ao longo do seu processo de projeto conceitual, sob o enfoque da sua representação através de modelos de produtos. O projeto conceitual é analisado como um processo de geração de concepções de produto com base em uma lista de especificações de projeto. Neste processo, o produto é modelado primeiramente em termos das funções que do mesmo são requeridas e posteriormente em termos de sistemas físicos - princípios de solução - capazes de cumprir tais funções. Na busca por princípios de solução, o projetista normalmente decompõe o complexo problema total de projeto - função total - em subproblemas de menor complexidade - subfunções - o que vem a facilitar a busca por princípios de solução. Os princípios de solução individuais são então combinados (recompostos) em um princípio de solução total para o problema e posteriormente desenvolvidos em concepções de produto. Os diversos estágios de desenvolvimento do produto ao longo do projeto conceitual são neste trabalho devidamente definidos e suas representações, por meio de modelos, esclarecidas.

Abstract

The work analyses the product evolution throughout its conceptual design, focusing its representation by product models. The conceptual design is analysed as a process of product concepts generation, based on a design specification. Within the conceptual design, the product is initially modelled in terms of its required functions and later in terms of physical systems - solution principles - capable to carry out such functions. In the search for solution principles, the designer usually decomposes the total design problem (total function) in less complex sub-problems, what simplifies the search for solution principles. The individual solution principles are then recomposed in a total solution principle to the problem and later developed into product concepts. The product stages of development throughout the conceptual design are in this work properly defined and their representation, by product models, clarified.

Capítulo 1

Introdução

A sobrevivência das empresas no atual cenário de competição internacional é função do grau de competitividade de seus produtos. A competitividade, por sua vez, se baseia nos requisitos qualidade, custo e tempo, como ilustrado na figura 1.1. Num mercado global e em constante evolução, o perfil do consumidor atual exige produtos de alta qualidade a um baixo custo. A empresa deve responder a esta demanda com agilidade. Um produto que chega tardiamente ao mercado terá sua fatia do mercado ocupada por um concorrente ou talvez já não satisfaça mais às necessidades, em constante evolução, do consumidor.

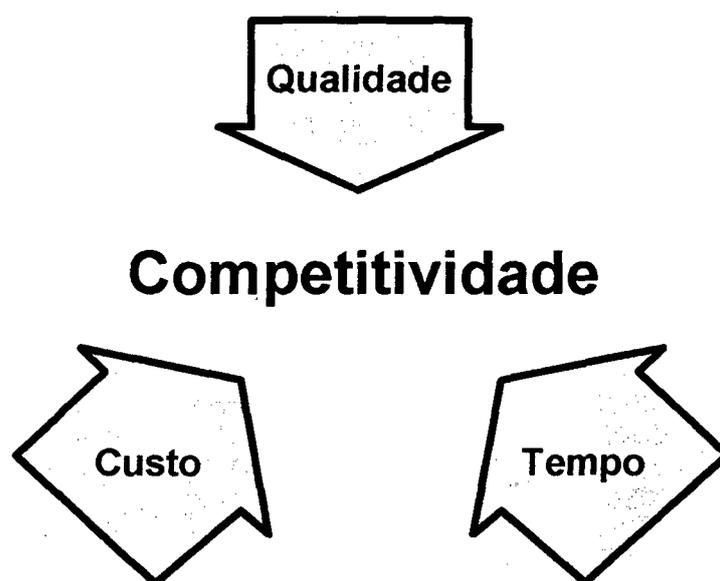


Figura 1. 1 Requisitos para a competitividade dos produtos.

Aliados aos requisitos de qualidade, custo e tempo, mais recentemente vêm-se enfatizando requisitos ergonômicos e de segurança no trabalho. Deve-se respeitar os limites de conforto e segurança do homem ao interagir com um sistema técnico. O conceito do homem que se adaptava à máquina foi substituído pelo da máquina que se adapta ao homem.

Também os requisitos de segurança ambiental vêm recebendo crescente atenção da comunidade internacional. As questões ambientais não são mais apenas preocupação de uns poucos ambientalistas. Países do primeiro-mundo hoje fecham suas portas aos produtos que venham a agredir o meio-ambiente em qualquer fase do seu ciclo de vida, seja na produção, no uso ou no descarte. A ISO 14000 é um marco na busca por processos e produtos ecologicamente corretos, da mesma forma com que no começo desta década a ISO 9000 marcou a busca pela qualidade total.

A seguir, algumas iniciativas adotadas pelas empresas na busca pela competitividade, segundo Duffy, Andreasen *et al* [6].

“ No início dos anos 80, a automação a nível de chão de fábrica era a questão central. ...O foco estava no aumento da eficiência e da flexibilidade da produção através da automação e da integração. Obtendo sucesso parcial a atenção mudou de direção.

Em meados dos anos 80, a indústria ocidental percebeu seus padrões de qualidade frouxos em relação à indústria japonesa. Uma intensa campanha pela qualidade foi deflagrada e posteriormente reforçada pelo lançamento da ISO 9000.

No final dos anos 80, logística era a questão chave. A crescente complexidade no controle e planejamento da produção trouxe a logística a foco. Modernos conceitos de controle e planejamento, tais como MRP II (*Manufacturing Resource Planning II*), JIT (*Just In Time*) e OPT (*Optimal Planning Techniques*) foram introduzidos.

Os anos 90 estão sendo dominados pela atenção no processo de projeto: engenharia simultânea, *Design-For-Almost-Everything*, *knowledge based engineering* são hoje termos em uso corrente. ...”

Na década de 80, segundo Duffy, Andreasen *et al* [6], difundiu-se a constatação generalizada de que 80% do custo de um produto era determinado pelo seu projeto, embora o custo da atividade de projeto em si contribuísse com apenas algo em torno de 10% do custo por produto. De acordo com Ullman [42], aproximadamente 85% dos problemas com novos produtos podem ser atribuídos a um projeto deficiente. Tais dados vêm apenas salientar a importância da atividade de projeto no ciclo de vida e por conseguinte no grau de competitividade de um produto.

Na busca por qualidade e competitividade, nada mais sensato do que se buscar a otimização do projeto do produto, e esta otimização passa pela sua automação e integração com as demais fases do ciclo de vida do produto, com destaque à fabricação. Um requisito fundamental para tal automação e integração é o

conhecimento dos modelos de produto usados ao longo do processo de projeto do produto. Tais modelos devem levar em consideração aspectos do ciclo de vida do produto durante o seu desenvolvimento.

O problema da busca por modelos adequados se agrava na fase conceitual de um projeto, na qual se trabalha em um alto grau de abstração. A maioria dos aplicativos computacionais existentes lida com modelos geométricos que, conforme Wolter e Chandrasekaran [47], abaixo, não se adequam ao projeto conceitual.

“Atualmente, os projetos são freqüentemente desenvolvidos e representados com o auxílio de um sistema CAD (*Computer Aided Design*) utilizando um modelamento sólido. Tais sistemas são responsáveis pela redução do tempo de projeto e pela automação de tarefas repetitivas, e permitindo a cópia ou re-uso de componentes padrão de projeto. Entretanto, modelos sólidos possuem algumas limitações. Primeiro, não servem de suporte ao projeto conceitual ou a re-projetos; e segundo, eles descrevem apenas geometria e não as intenções do projetista.”

Hoje se busca trazer o CAD ao projeto conceitual - conceito de CACD, *Computer Aided Conceptual Design* - de uma forma integrada com as demais etapas do ciclo de vida do produto. Para isto é necessário que se trabalhe com modelos de produto claros, simples e que se prestem a uma adequada implantação computacional.

A presente dissertação objetiva a organização do conhecimento dos modelos de produto utilizados ao longo do projeto conceitual. Tal organização de conhecimento passa pela análise crítica e pelo correlacionamento dos modelos de produto utilizados nesta fase do desenvolvimento do produto.

A dissertação será estruturada da forma que se segue em termos de capítulos. O segundo capítulo, expõe e define o processo de projeto de engenharia como um todo e o terceiro capítulo focaliza a fase de projeto conceitual, área específica de estudo da dissertação. O processo de projeto conceitual é subdividido em dois subprocessos: a análise funcional e a síntese de soluções. O quarto capítulo é destinado a fornecer ao leitor um embasamento teórico a respeito da teoria de modelagem do produto e também uma visão geral das novas tendências para o modelamento de produtos, através da exposição de alguns trabalhos recentemente desenvolvidos na área. Antes de iniciar o estudo dos modelos pertencentes ao projeto

conceitual propriamente dito, no quinto capítulo serão vistos os modelos pertencentes à fase de esclarecimento da tarefa, com especial ênfase ao modelo da lista de especificações de projeto. Os modelos funcionais do produto serão estudados no decorrer do sexto capítulo e os modelos de princípio de solução no decorrer do sétimo. Também no sétimo capítulo serão estudados os modelos de concepção do produto, que vêm a se constituir na principal saída do processo de projeto conceitual.

Capítulo 2

O projeto de engenharia

2.1 Introdução

O projeto conceitual é o domínio de estudo da presente dissertação. Este, por sua vez, se insere no contexto mais amplo do processo total de projeto de engenharia. Utiliza-se aqui o termo “projeto de engenharia”, e não tão somente “projeto”, para diferenciá-lo de outras modalidades de projeto, tal como o de arquitetura, cujas metodologias nem sempre convergem com as do projeto de engenharia. Por “processo total de projeto” entende-se o processo de projeto em todas as suas fases e etapas: da coleta de necessidades junto ao mercado à elaboração de documentos detalhados que possibilitem a realização física do produto.

O presente capítulo objetiva esclarecer a natureza do projeto de engenharia. Na busca por tal esclarecimento, primeiramente será apresentada uma definição do projeto de engenharia e em seguida algumas maneiras de classificar as suas diversas modalidades, de acordo com critérios específicos. As fases do processo de projeto de engenharia, e suas respectivas etapas, serão enquadradas e analisadas dentro do que neste capítulo será definido como modelo consensual do processo de projeto.

O entendimento do processo de projeto como um todo e uma visão estruturada de suas partes são desta forma pré-requisitos para o posterior estudo do projeto conceitual. Não faz sequer qualquer sentido falar de projeto conceitual sem se referir ao modelo de processo de projeto no qual o mesmo se insere.

2.2 Definição

Antes de apresentar uma definição própria de processo de projeto ou simplesmente projeto, veja como outros autores o definem.

De acordo com Pahl e Beitz [26], "Projetar é uma atividade intelectual para satisfazer certas demandas da melhor maneira possível. É uma atividade de engenharia que impinge em praticamente todas as esferas da vida humana, baseia-se em descobertas e leis da ciência e cria condições para a aplicação destas leis para a manufatura de produtos úteis."

Para Back [2], "projeto é a criação de algo novo, de algo que nunca tenha sido montado desta forma e para esta finalidade, mesmo que seja a montagem de peças velhas". Caracteriza ainda o projeto, o de engenharia mais especificamente, como "uma atividade orientada para o atendimento das necessidades humanas, principalmente daquelas que podem ser satisfeitas por fatores tecnológicos de nossa cultura".

Ullman [42] define o processo de projeto como: "um mapa para, a partir de uma necessidade por objeto específico, chegar ao produto final". Alerta ainda para a possibilidade de poder haver diferentes soluções para qualquer problema de projeto. O "mapa" de Ullman [42] parece se referir mais a uma metodologia de projeto que ao projeto propriamente dito.

Destas e de outras definições de projeto estudadas - tal como as coletadas por Evbuomwan *et al* [7] - percebe-se constante recorrência de termos como: idealização, objeto, necessidades e otimização. A partir destes termos, pode-se sucintamente afirmar que, **projetar é idealizar algo real para satisfazer da melhor maneira possível uma necessidade.**

Cabem aqui algumas considerações. O projeto é predominantemente uma atividade intelectual, um processo sobretudo criativo. Idealizar algo com existência real, seja um objeto material, como um bem, seja algo não material, como um serviço. A idealização de algo que não possa vir a existir não será um projeto, mas sim um sonho ou uma utopia [49].

Projeta-se algo para satisfazer uma necessidade, real ou latente. Há alguns anos, inexistia a real necessidade de uma telefonia celular. Vivia-se bem sem esta. Hoje tal tecnologia está presente na vida de profissionais que necessitam de um meio

de comunicação rápido e portátil como uma necessidade real. Revelou-se uma necessidade que era latente.

Projetar também envolve uma atividade de otimização. Busca-se a melhor solução possível sob as restrições de projeto e dentro das limitações de recursos materiais e de conhecimento.

2.3 Classificações

Numa tentativa de sistematizar as diversas modalidades de processo de projeto dentro da engenharia, deve-se primeiramente distinguir o **projeto** propriamente dito do **reprojeto**. No projeto, parte-se de uma necessidade detectada no mercado e busca-se chegar a um produto que atenda tal necessidade, sem partir apenas para a modificação e melhoria de um produto já existente. No reprojeto, um produto já existente satisfaz deficientemente uma necessidade do mercado. Parte-se então para a modificação desse produto a fim de que o mesmo venha melhor atender àquela necessidade. A figura 2.1 ilustra a diferença básica do projeto para o reprojeto.

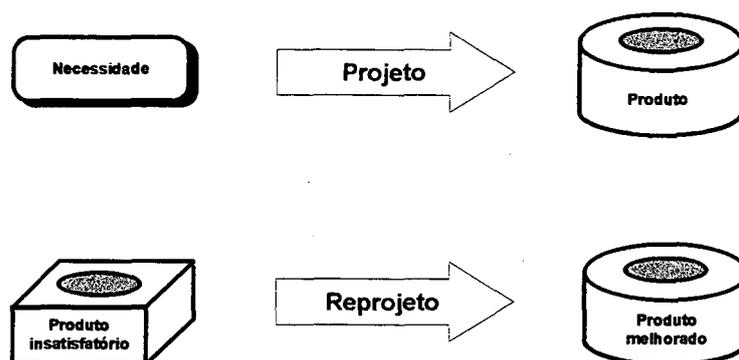


Figura 2. 1 Projeto *versus* reprojeto.

Uma possível maneira de classificar os processos de projeto de um produto é dividi-los, quanto à originalidade da tarefa e do princípio de solução, nas três modalidades listadas abaixo:

- **Projeto original:** envolve a elaboração de um princípio de solução original para um sistema, independentemente da originalidade da tarefa.

- **Projeto adaptativo:** envolve a adaptação de um sistema conhecido para uma nova tarefa. O princípio de solução permanece o mesmo.
- **Projeto variante:** envolve a variação de certos aspectos do sistema escolhido tal como tamanho, formas e configurações, sem no entanto alterar a sua função.

As situações de projeto muitas vezes se apresentam como uma combinação das modalidades de projeto citadas. Segundo Ullman [42], as diversas modalidades em que se pode enquadrar o projeto são tão somente casos particulares, restringidos, do projeto original. Assim uma metodologia clara para projetos originais é suficiente para orientar o projetista na resolução de qualquer projeto de engenharia, obedecendo às restrições de cada caso.

Por fim, Hubka [15] alerta para algumas diferenciações na natureza do projeto com relação à quantidade de itens a serem fabricados. Nos casos extremos haveria:

- o projeto para **produção unitária**, ou em pequeno número - o problema reside principalmente em atingir a função requerida e satisfazer as propriedades desejadas. Ênfase é dada em relação à robustez e à funcionalidade, uma vez que normalmente não é possível se construir e testar um protótipo. Intensivo trabalho deve ser despendido às fases iniciais do processo de projeto conceitual e preliminar.
- o projeto para produção em **grandes lotes** ou para a **produção em massa**, onde uma especial ênfase deve ser dada à formalização dos desenhos e documentos de projeto. É usual fabricar e testar um protótipo a fim de verificar se as funções de projeto foram alcançadas e de trazer ao projeto qualquer deficiência observada, para que seja corrigida. Ferramentas especiais, gabaritos e fixações para manufatura também devem ser preparadas.

2.4 Modelos do processo de projeto

Desde inícios dos anos 60, vêm-se desenvolvendo modelos para o processo de projeto que orientem o projetista em sua atividade. No projeto de engenharia, convergiu-se para a um modelo de processo que compreende quatro fases. Tal

modelo pode ser encontrado, com pequenas variações, em diversos autores como French [11], Pahl e Beitz [26] e Hubka [16], ver figuras 2.2, 2.3 e 2.4. Este modelo está descrito mais formalmente na VDI 2221 [44], conforme figura 2.5.

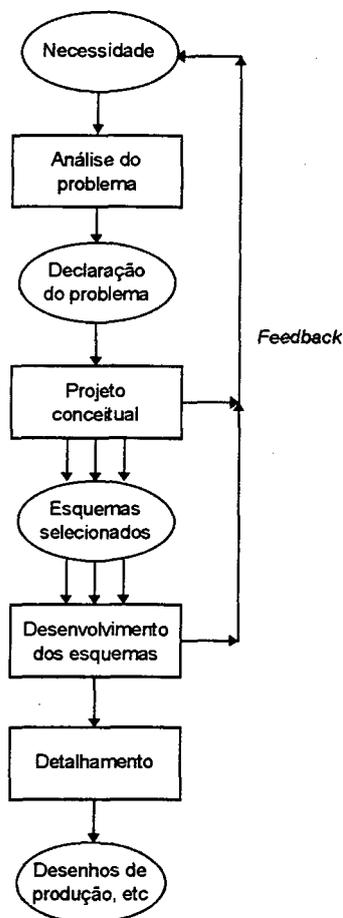


Figura 2. 2 Modelo do processo de projeto, segundo French [11].

No modelo proposto por Pahl e Beitz [26], mostrado na figura 2.3 - um dos mais difundidos - as fases do processo de projeto são denominadas:

- esclarecimento da tarefa;
- projeto conceitual;
- projeto preliminar ou de leiaute (*embodiment design*) e
- projeto detalhado.

Tais fases compreendem atividades que levam respectivamente aos seguintes estágios de desenvolvimento do produto, que, conforme será visto em capítulos posteriores, corresponderão a modelos de produto de mesmo nome:

- especificação de projeto;
- concepção;
- projeto preliminar;
- projeto definitivo e
- documentação do produto.

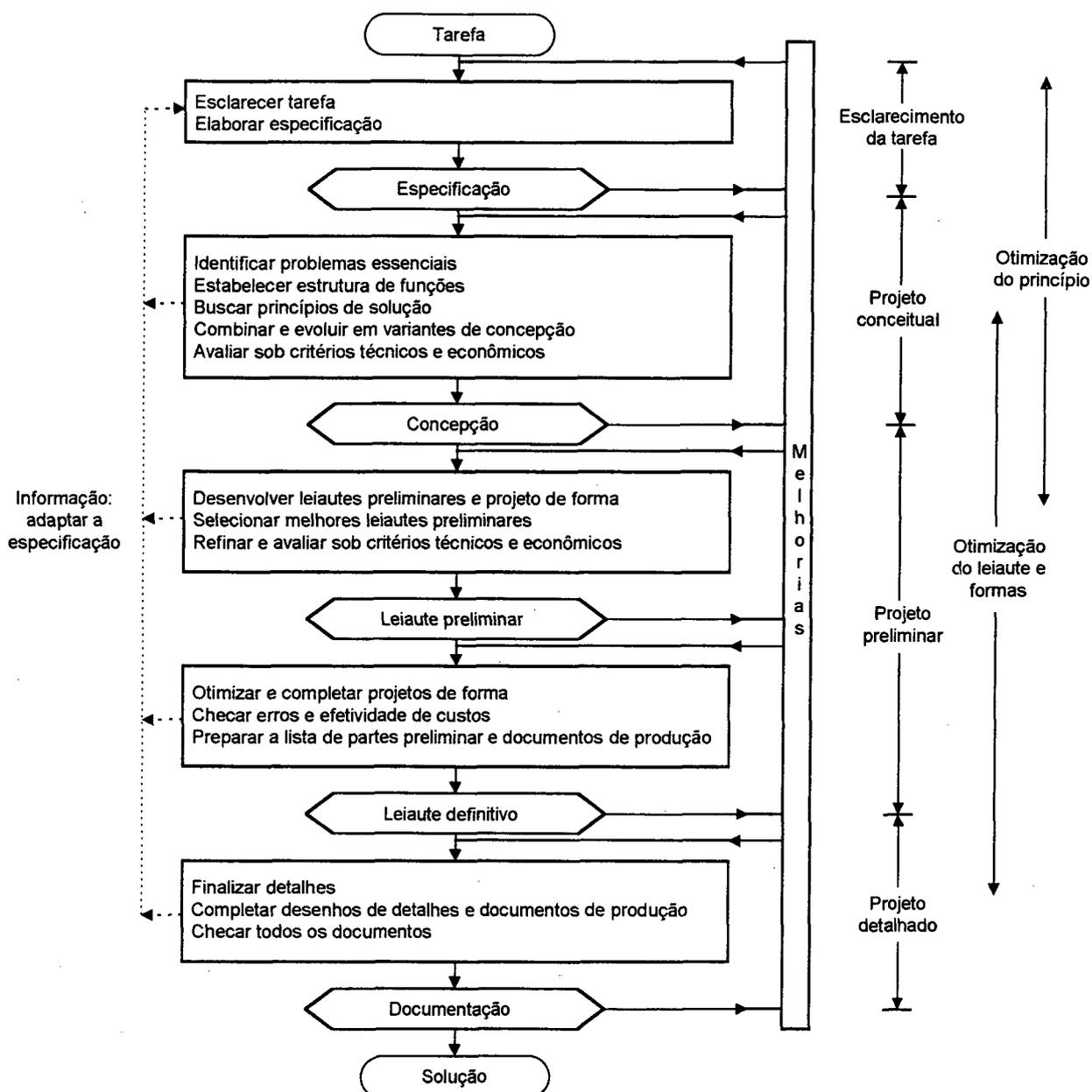


Figura 2. 3 Modelo do processo de projeto, segundo Pahl e Beitz [26].

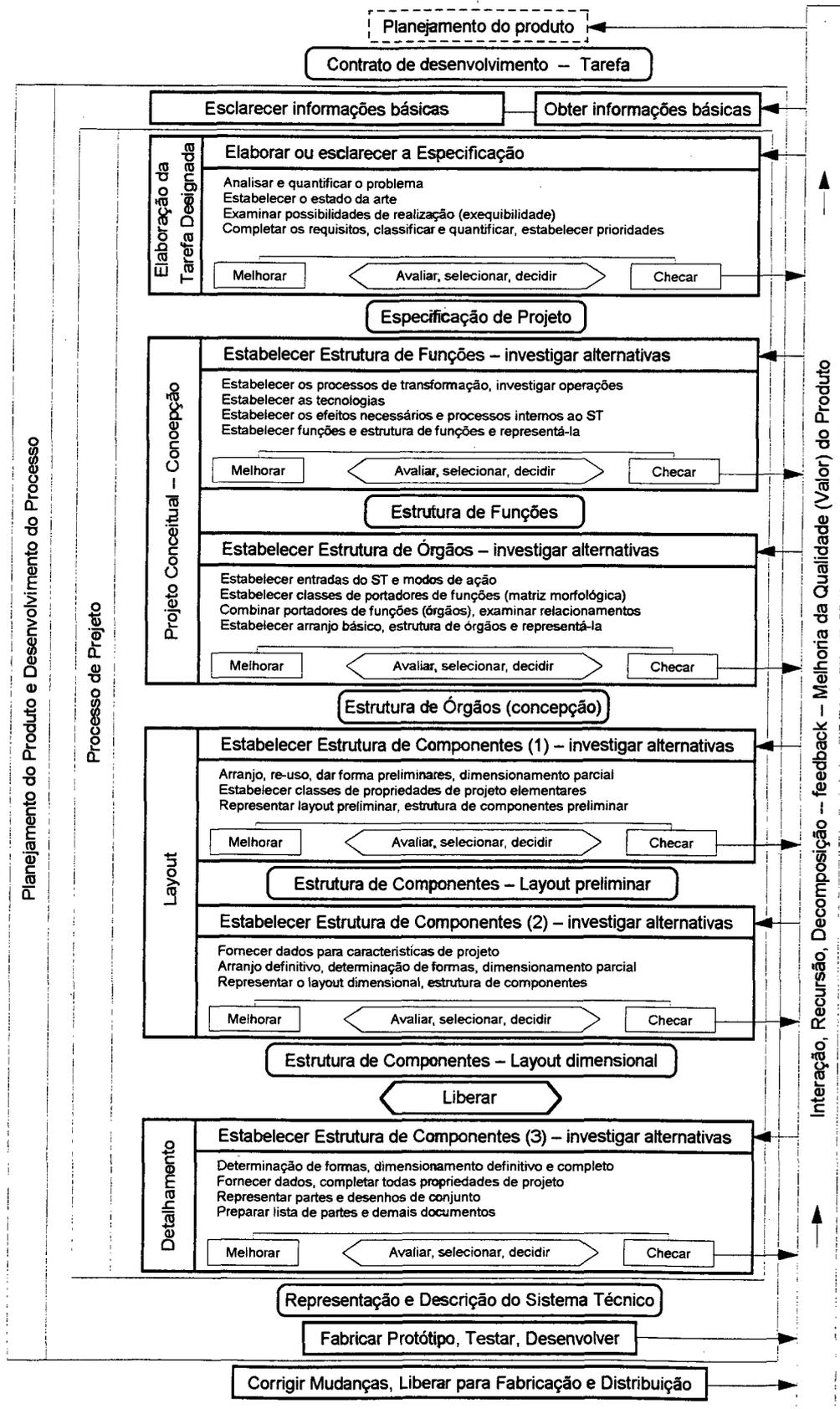


Figura 2. 4 Modelo do processo de projeto, segundo Hubka [16].

De uma maneira geral, as fases do processo de projeto de engenharia envolvem as seguintes atividades:

- **Esclarecimento da tarefa**

Nesta fase, o problema é analisado e informações sobre o mesmo são coletadas. Com base nessas informações, uma especificação de projeto é elaborada. A especificação define as funções e as propriedades requeridas do produto, bem como possíveis restrições em relação ao produto ou mesmo ao processo de projeto, tal como normas e prazos.

- **Projeto conceitual**

A partir da especificação, deve-se gerar e avaliar soluções gerais para o problema de projeto que possibilitem um posterior desenvolvimento no projeto preliminar e no projeto detalhado. Tais soluções são denominadas concepções por Pahl e Beitz [26].

O projeto conceitual é visto como a mais importante fase do processo de projeto, pois decisões ali tomadas terão grande influência nas fases seguintes do processo de projeto. Por ser especificamente o domínio de estudo da presente dissertação, o projeto conceitual será objeto de um estudo mais detalhado no terceiro capítulo desta dissertação.

- **Projeto preliminar**

Nesta fase, a partir da concepção escolhida, elabora-se um projeto ou leiaute definitivo. O leiaute definitivo estabelece o arranjo das montagens, componentes e partes, bem como as suas formas geométricas, dimensões e materiais. No leiaute definitivo, a configuração do produto e as formas das partes devem ser desenvolvidas a um ponto onde o projeto do produto possa ser avaliado em relação aos principais requisitos da especificação.

O projeto preliminar é essencialmente um processo de refinamento da concepção, pulando de um subproblema para outro, antecipando decisões a serem tomadas e corrigindo decisões já tomadas à luz do estado corrente do projeto. Assim, torna-se difícil esboçar um plano geral de ação para esta fase.

Normalmente, ao término desta fase, o projeto é representado por desenhos de leiante em escala, mostrando dimensões importantes, e listas de partes preliminares.

- **Projeto detalhado**

Nesta fase final a forma geométrica, dimensões, tolerâncias, propriedades superficiais e materiais do produto e todas as suas partes individuais são completamente especificadas e expostas em desenhos de montagem, desenhos de detalhes e listas de partes. Também se deve elaborar instruções para produção, montagem, teste, transporte e operação, uso, manutenção entre outros. Todos estes documentos se enquadram, de acordo com a VDI 2221 [44], sob o título de “documentos do produto”.

De uma maneira geral, constata-se uma grande similaridade entre os modelos do processo de projeto apresentados. Não parece haver grandes diferenças nas atividades indicadas nem na seqüência seguida. Pequenas diferenças encontram-se na distribuição das atividades entre as fases. Os modelos apresentados podem assim ser considerados variantes do que se pode chamar de “**modelo consensual**” do processo de projeto, que contempla as quatro fases descritas nos parágrafos anteriores.

Em seguida são apresentados alguns comentários pertinentes em relação aos modelos do processo de projeto discutidos.

- As divisões entre as fases do projeto não devem ser tomadas de uma forma rígida, nem estas fases devem ser seguidas cegamente uma após a outra. As fases e etapas de projeto são cumpridas iterativamente, retornando-se a fases anteriores, atingindo-se uma otimização gradual.
- Em cada fase, alternativas de solução são descartadas. Trabalhar todas as alternativas de solução levaria a uma explosão de possibilidades a serem estudadas. Por outro lado, restringir por demais as alternativas é perigoso pois uma ótima alternativa pode assim ser desprezada. O projetista é assim levado a divergir e convergir em cada fase. Este importante princípio está ilustrado na figura 2.6, obtida da VDI 2221 [44].

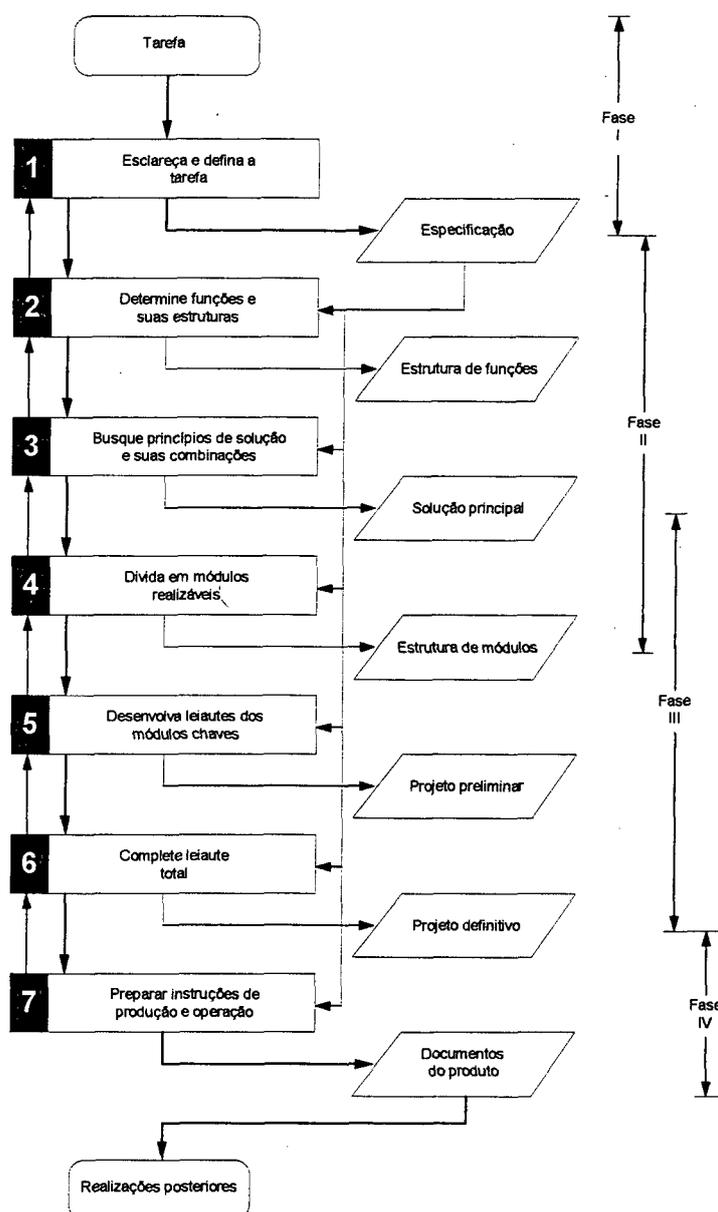


Figura 2. 5 Modelo do processo de projeto, segundo a VDI 2221 [44].

- Os modelos de processo de projeto foram desenvolvidos com a idéia de produtos novos e inovações em mente. Assim, muita atenção é dispensada à fase do projeto conceitual em detrimento do projeto preliminar e do projeto detalhado.

Tais observações, no entanto não desqualificam os modelos de fases, uma vez que seu objetivo não é prever o comportamento do projetista mas aprimorá-lo,

oferecendo procedimentos sistemáticos que fazem o processo de projeto mais transparente e efetivo.

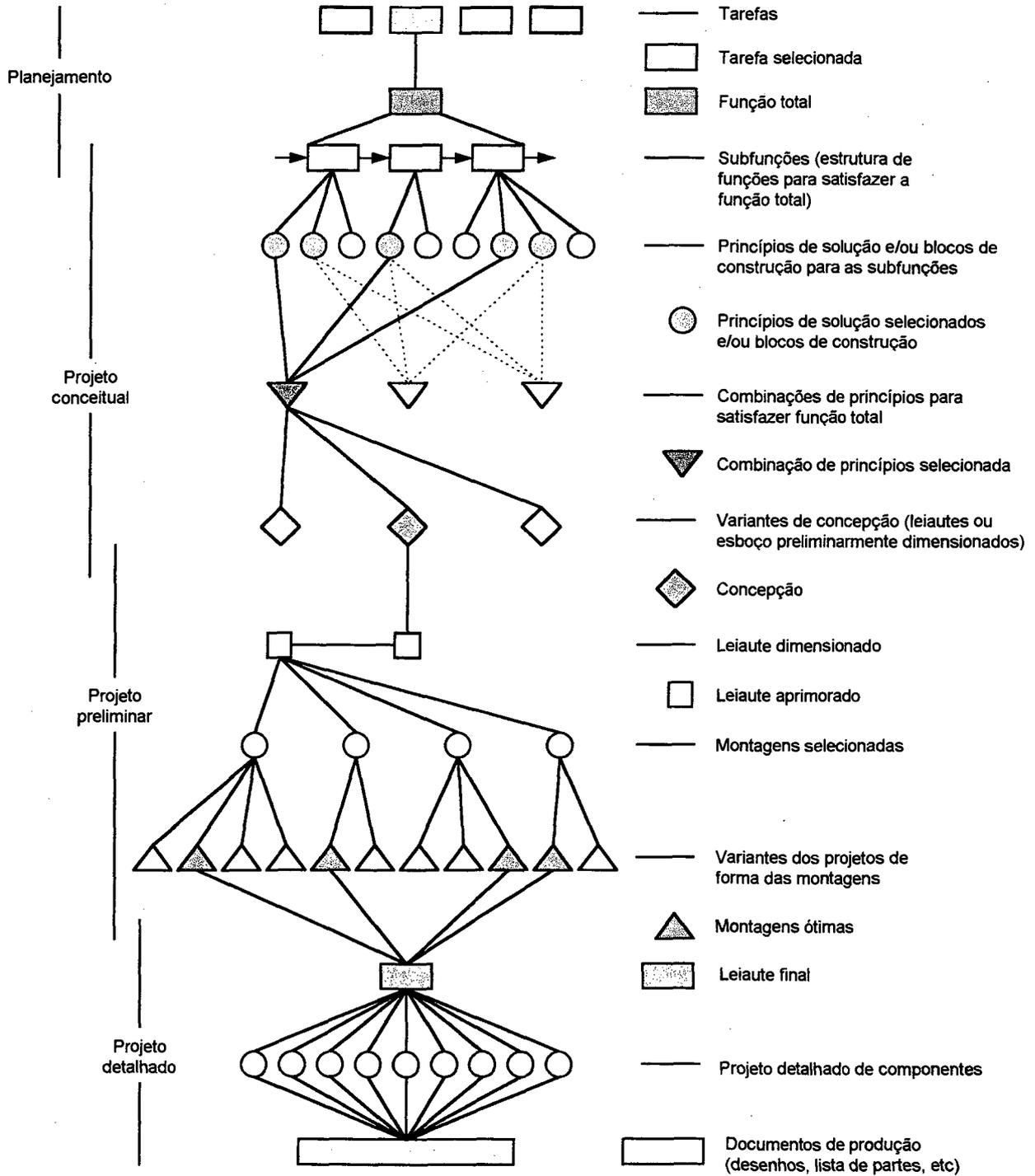


Figura 2. 6 Divergência e convergência no processo de projeto (VDI 2222 [45]).

2.5 Considerações finais

Neste capítulo buscou-se descrever os aspectos básicos do processo de projeto de engenharia, que engloba entre outras fases a de projeto conceitual. O processo de projeto de engenharia foi assim apresentado como uma atividade essencialmente criativa que visa a satisfação de necessidades.

Primeiramente foi apresentada uma definição para o projeto de engenharia que enfatiza a existência de uma necessidade como razão principal de ser do projeto. Após distinguir o projeto propriamente dito do reprojeto, o projeto de engenharia foi dividido em três modalidades, com relação à originalidade da tarefa e ao princípio de solução: projeto original, adaptativo e variante. O estudo de uma metodologia para o projeto original é tido como suficiente para o entendimento das diversas modalidades de projeto, pois essas podem ser vistas como casos particulares, restringidos do projeto original.

Por fim, o processo de projeto foi analisado com o auxílio de modelos de fase ou procedurais, tais como os de French [11], Pahl e Beitz [26] e Hubka [16], ou mais formalmente na VDI 2221 [44]. Como foi visto, tais modelos convergem para um modelo consensual do processo de projeto compreendendo as fases de: esclarecimento da tarefa, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado. O objetivo de tais modelos de processo não é enquadrar o comportamento do projetista numa trilha a ser seguida de uma forma descriteriosa, ou de oferecer uma “receita” para se projetar. Os modelos do processo de projeto devem servir de guia ao projetista, auxiliando-o nos passos a serem dados, nas decisões a serem tomadas e lhe servindo de referência para que o mesmo possa mais bem se orientar ao longo do processo de projeto.

Capítulo 3

O projeto conceitual

3.1 Introdução

O presente capítulo buscará um entendimento da fase de projeto conceitual do produto, domínio de estudo da presente dissertação. Primeiramente será buscada uma definição para o projeto conceitual com base na geração de concepções para o produto a ser projetado. Em assim sendo, será necessário analisar cuidadosamente o que se entende por uma concepção de produto, realçando a sua importância na qualidade, na competitividade e na sobrevivência do produto no mercado.

O estudo do processo de projeto conceitual primeiramente se servirá de um modelo de fases e etapas, ou procedural, do projeto conceitual. O modelo de Pahl e Beitz [26] será utilizado por ser um exemplo clássico e amplamente difundido de tais modelos.

Tendo-se obtido um entendimento das etapas a serem normalmente seguidas no processo de projeto conceitual, tal como oferecido pelo paradigma Pahl e Beitz [26], será possível então abordar o projeto conceitual de uma forma mais global e sistêmica. Tal abordagem, além de consolidar o entendimento do projeto conceitual obtido através de um modelo procedural, por ser mais abstrata e flexível, livra o projetista de roteiros rígidos e excessivamente sistemáticos para a obtenção de concepções para o produto.

3.2 Definição

O projeto conceitual é a fase do processo de projeto que gera, a partir de uma necessidade detectada e esclarecida, uma concepção para um produto que atenda da melhor maneira possível esta necessidade, sujeita às limitações de recursos e às restrições de projeto.

Dentro do modelo consensual do processo de projeto apresentado no item 2.4, o projeto conceitual se situa entre a fase de esclarecimento da tarefa e o projeto preliminar, conforme mostrado na figura 3.1.

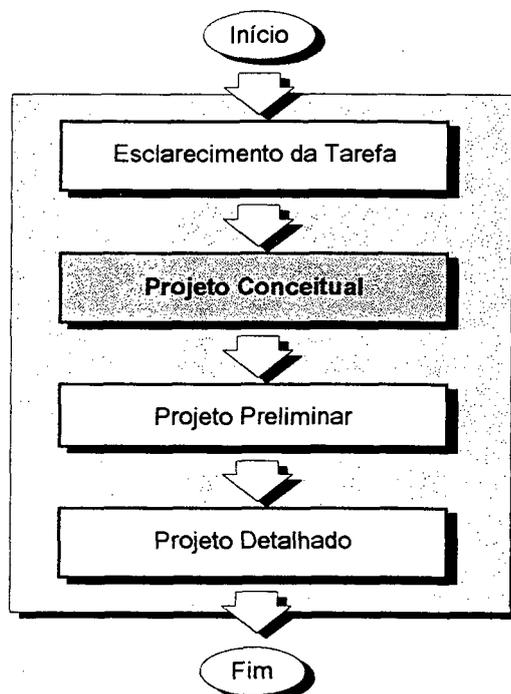


Figura 3. 1 O projeto conceitual no modelo consensual do processo de projeto.

Para French [11], projeto conceitual é a fase do projeto que “toma a declaração do problema e gera soluções gerais na forma de esquemas. É a fase que exige as maiores demandas do projetista e onde há maiores possibilidades para grandes melhorias. É a fase onde ciência de engenharia, conhecimento prático, métodos de produção e aspectos comerciais necessitam ser trazidos à tona, onde as mais importantes decisões são tomadas.”

Numa abordagem mais procedural, Pahl e Beitz [26] definem o projeto conceitual listando as suas etapas e indicando a sua saída: “projeto conceitual é a parte do processo de projeto na qual, pela identificação dos problemas essenciais através da abstração, pelo estabelecimento da estrutura de funções e pela busca de princípios de solução apropriados e suas combinações, o caminho básico da solução é exposto através da elaboração de uma concepção de solução “.

Nas definições apresentadas percebe-se claramente o projeto conceitual como uma atividade voltada para a elaboração de uma **concepção** para um produto

(French [11] se refere a *sketchs*). O item seguinte buscará esclarecer o significado do termo concepção e demonstrar a sua importância. Isto feito na esperança de que uma melhor compreensão a respeito da concepção de um produto venha a facilitar o entendimento do próprio processo de projeto conceitual.

3.3 A concepção

Abaixo, transcreve-se o verbete “concepção” extraído do “Novo dicionário da língua portuguesa” de Aurélio Buarque de Holanda [8].

concepção. [Do Lat. *conceptione*] *S. f.* 1. O ato ou efeito de conceber ou de gerar (útero); geração. 2. O ato de conceber ou criar mentalmente, de formar idéias, especialmente abstrações; *a concepção de um princípio filosófico, de uma teoria matemática.* 3. *P. ext.* Maneira de conceber ou formular uma idéia original, um projeto, um plano, para posterior realização: *A concepção urbanística de Brasília é de Lúcio Costa.* 4. Noção, idéia, conceito, compreensão: *Sua concepção de autoridade está baseada nos moldes tradicionais.* 5. Modo de ver, ponto de vista; opinião, conceito: *Na minha concepção vocês agiram de maneira impensada.*

No âmbito do processo de projeto de produtos, **uma concepção é sobretudo uma idéia do que é ou do que poderá vir a ser o produto.** Tal idéia se investe de um conjunto de meios para realizar as funções pretendidas para o produto, bem como as relações espaciais e estruturais entre tais meios.

A concepção é normalmente expressa, ou modelada, por um desenho de esboço. Nas palavras de Ullman [42], “uma concepção é uma idéia que pode ser representada em um esboço simplificado ou através de notas, em outras palavras, uma **abstração** do que um dia possa vir a ser um produto”.

A fim de demonstrar a importância da concepção do produto na sua qualidade e competitividade, tome por exemplo o mercado de impressoras para microcomputadores pessoais. No final dos anos 80, este mercado era dominado pelas impressoras matriciais. Nestas, um conjunto (matriz) de pinos ou agulhas comprime uma fita com a tinta contra o papel. A baixa qualidade de impressão e o alto ruído

eram compensados pelo baixo custo em relação às tecnologias concorrentes. Enquanto os fabricantes das tradicionais impressoras investiam no seu aprimoramento, a HP pesquisava uma concepção alternativa de impressora. No início desta década a HP lançou sua linha de impressoras a jato de tinta. Qualidade de impressão inferior à de uma laser porém bastante superior à de uma matricial; silenciosa e com faixa de preço comparável à da matricial. Era o fim de uma tecnologia, de uma concepção de impressoras para microcomputadores pessoais. Os concorrentes, fabricantes das impressoras matriciais, ainda esboçaram reações: impressoras com 24 pinos (no lugar dos antigos 9), fitas coloridas, sistemas eficientes de abafamento do ruído. O esforço foi em vão.

A razão desta revolução neste mercado de impressoras está no fato de que a HP não buscou modificações superficiais para os equipamentos existentes. Foi mais fundo, buscou uma nova **concepção** para a mesma função: "*imprimir informações*". O reprojeto da HP não foi feito mais a nível de projeto preliminar ou detalhado, mas sim a nível de concepção ou do projeto conceitual.

Um segundo exemplo de nova concepção superando uma concepção antiga para a realização de uma dada tarefa é encontrado hoje no mercado das máquinas fotográficas. As câmeras digitais surgem como uma nova alternativa aos filmes fotosensíveis. Preço ainda é o fator limitante na expansão do consumo das câmeras digitais. Com a tendência natural de queda no preço de novas tecnologias e as vantagens adicionais que a nova tecnologia traz, é de se esperar para breve o fim das máquinas fotográficas com filmes fotosensíveis.

A seguir, serão apresentadas as principais etapas normalmente seguidas pelo projetista para obtenção de concepções de produto. Tais etapas podem ser estruturadas em um modelo procedural do processo de projeto conceitual. Ao invés de apresentar um modelo procedural próprio do projeto conceitual, o presente estudo se servirá do modelo apresentado por Pahl e Beitz [26] por considerá-lo suficientemente completo e amplamente difundido. Outros modelos procedurais existentes - Hubka [16] por exemplo, ver figura 2.4 - também serviriam igualmente para o propósito de familiarizar o leitor com as etapas do projeto conceitual.

3.4 Modelo procedural do projeto conceitual

Pahl e Beitz [26] estruturam o projeto conceitual em uma seqüência de etapas, ilustradas na figura 3.2, a serem seguidas a fim de que - segundo os autores [26] - se garanta a qualidade da concepção do produto. O processo envolve iterações em qualquer das etapas com a finalidade do seu refino.

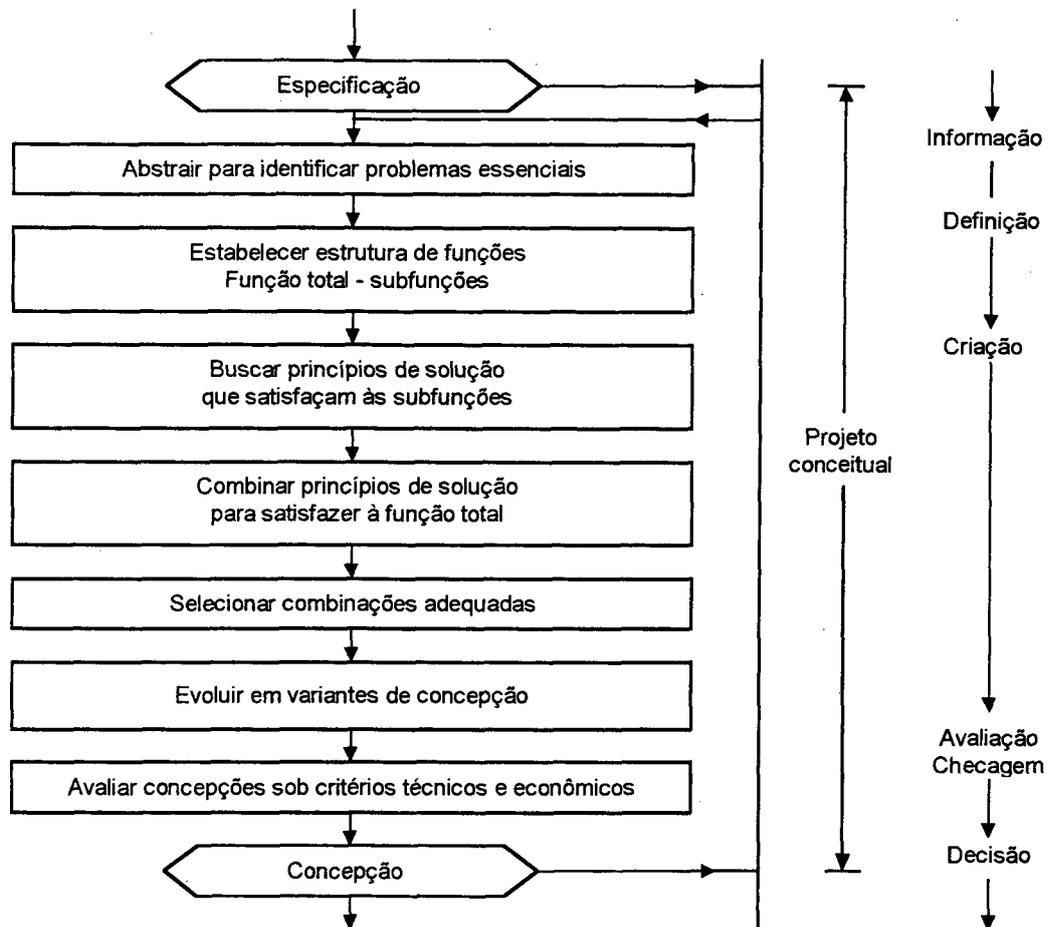


Figura 3. 2 Etapas do projeto conceitual, segundo Pahl e Beitz [26].

A seguir, serão estudadas cada uma das etapas abordadas por Pahl e Beitz [26] em seu modelo procedural ilustrado na figura 3.2.

• **Abstração**

Por abstrair entende-se ignorar o que é particular e enfatizar o que é geral e essencial. No processo de projeto a abstração deve levar à formulação e representação do problema numa forma neutra e não tendenciosa.

A primeira etapa recomendada por Pahl e Beitz [26] para o desenvolvimento do projeto conceitual é a análise da especificação de projeto com respeito às funções requeridas e às restrições de projeto. Esta análise, aliada a uma compassada abstração, revelará os aspectos gerais e características essenciais da tarefa.

Uma vez que os aspectos essenciais do problema tenham sido identificados através da correta formulação do problema, Pahl e Beitz [26] sugerem que se investigue a possibilidade de que extensões ou mesmo mudanças na tarefa inicial possam levar a soluções mais promissoras para o projeto.

Uma característica da abordagem apresentada por Pahl e Beitz [26] é que a formulação do problema é feita a mais ampla possível em etapas sucessivas. Ou seja, a formulação óbvia do problema não é aceita à primeira vista, mas ampliada sistematicamente. O quanto o processo de abstração deve ser levado adiante, dependerá das restrições de projeto.

No processo de abstração, todas as restrições impostas ao projetista devem ser questionadas, podendo algumas ser até mesmo eliminadas. O processo de abstração ajuda a identificar e eliminar as restrições fictícias.

• Estabelecimento da estrutura de funções

A função de um produto, ou seja, a relação entre suas entradas e suas saídas, é determinada pelos requisitos de seu projeto. A análise e abstração dos requisitos de projeto permitem assim que se identifique uma função total que, baseada no fluxo de energia, material e sinal, e com o uso de diagrama de blocos, expresse a relação entre entradas e saídas do sistema, independentemente da solução a ser escolhida, conforme mostrado na figura 3.3.

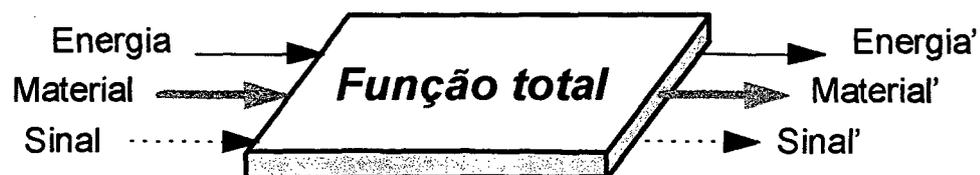


Figura 3. 3 Função total [26].

A função total, ou uma função de maior complexidade, pode ser decomposta em subfunções de menor complexidade. A combinação das subfunções individuais

resulta em uma estrutura de funções que representa a função total, conforme mostra a figura 3.4.

A decomposição de uma função complexa objetiva a determinação de subfunções, facilitando a subsequente busca por soluções, e a combinação destas subfunções em uma estrutura de funções simples e inequívoca.

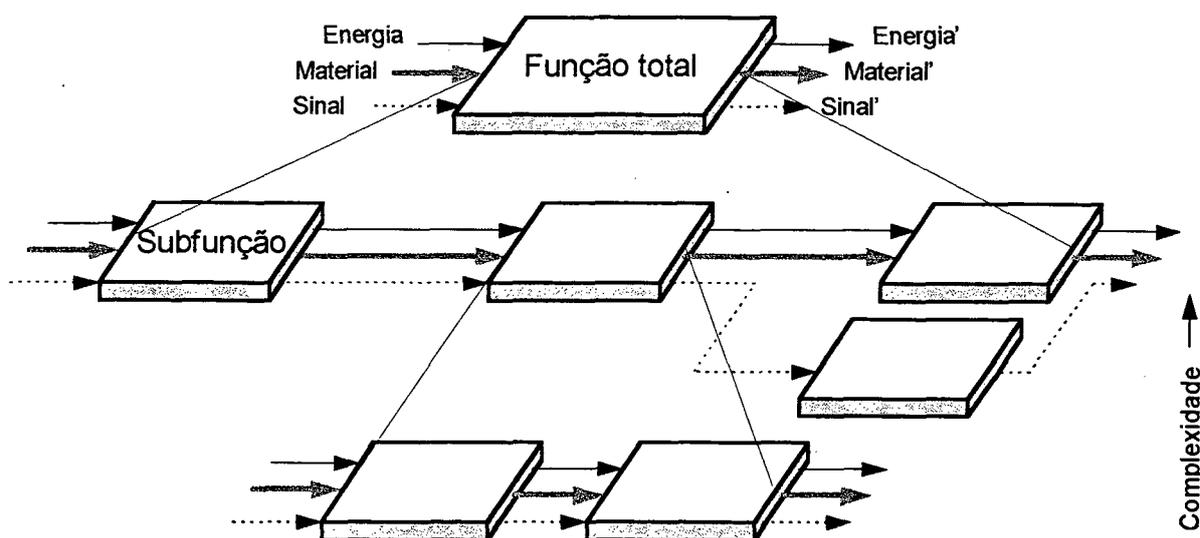


Figura 3. 4 Estabelecimento da estrutura de funções [26].

Pahl e Beitz [26] alertam para a inexistência de um número ótimo de níveis de subfunções ou de subfunções por nível. Tais serão determinados pela relativa novidade do problema e também pelo método usado na busca por soluções.

• Busca por princípios de solução

Após o estabelecimento da estrutura de funções, buscam-se princípios de solução para as várias subfunções. Um princípio de solução deve refletir o efeito físico requerido para o cumprimento da função bem como formas e materiais a serem empregados.

Os métodos e ferramentas utilizadas na busca por princípios de solução, por uma questão didática, podem ser divididos em convencionais, intuitivos e discursivos. A tabela 3.1 lista alguns dos principais métodos utilizados enquadrados desta maneira.

Tabela 3. 1 Métodos para busca de princípios de solução.

Métodos convencionais	Busca em literatura livros, jornais, patentes, brochuras de concorrentes, ... Análise de sistemas naturais biônica e biomecânica Análise de sistemas técnicos existentes produtos e métodos concorrentes ou antigos, ... Analogias Medidas e testes em modelos
Métodos intuitivos	Brainstorming livre associação de idéias, Osborn [25] Método 635 6 participantes, 3 proposições, 5 sugestões Método Delphi 3 rodadas de perguntas a especialistas Sinergia utilização sistemática de analogias Combinação de métodos
Métodos discursivos	Estudo sistemático de sistemas técnicos efeito físico representado por uma equação Uso de esquemas de classificação apresentação sistemática de dados - matriz morfológica Uso de catálogos de projeto

- **Combinação de princípios de solução**

Com base na estrutura de funções, que reflete associações de subfunções possíveis e úteis, lógica ou fisicamente, deve-se elaborar soluções gerais pela combinação de princípios de solução. O principal problema nesta combinação é assegurar a compatibilidade física e geométrica dos princípios de solução, que por

sua vez assegurará fluxos regulares de energia, material e sinal. Um segundo problema é a seleção de combinações de princípios técnica e economicamente favoráveis.

Pahl e Beitz [26] apontam para o uso da matriz morfológica, figura 3.5, na combinação de princípios de solução (S_{ij}) como sendo uma ferramenta particularmente útil.

		soluções						
		1	2	...	j	...	m	
sub-funções	1	F_1	S_{11}	S_{12}	...	S_{1j}	...	S_{1m}
	2	F_2	S_{21}	S_{22}	...	S_{2j}	...	S_{2m}
	⋮		⋮	⋮	...	⋮	...	⋮
	i	F_i	S_{i1}	S_{i2}	...	S_{ij}	...	S_{im}
	⋮		⋮	⋮	...	⋮	...	⋮
	n	F_n	S_{n1}	S_{n2}	...	S_{nj}	...	S_{nm}

Variante 1: $S_{11}+S_{22}+\dots+S_{n2}$

Variante 2: $S_{11}+S_{21}+\dots+S_{n1}$

Figura 3.5 Combinação de princípios de solução em variantes de solução [26].

• Seleção das combinações adequadas

A seguir, deve-se selecionar dentre as combinações formadas a mais, ou as mais promissoras. Pahl e Beitz [26], reconhecendo a ausência de um método completamente seguro, sugerem um procedimento sistemático e verificável visando facilitar a busca por soluções promissoras. Tal procedimento envolveria duas etapas: uma eliminatória e outra por preferência. Primeiramente todas as propostas totalmente inadequadas são eliminadas e àquelas reconhecidamente superiores é dada a preferência. Somente estas serão avaliadas ao término do projeto conceitual.

• **Desenvolvimento em variantes de concepção**

Antes que as variantes selecionadas a partir da matriz morfológica possam ser avaliadas, essas devem ser desenvolvidas com relação aos requisitos e restrições esboçados na especificação de projeto. Às mais importantes propriedades de uma combinação de princípios proposta, deve primeiramente ser dada uma definição qualitativa e freqüentemente também um esboço de definição quantitativa.

Importantes aspectos do princípio de funcionamento (tal como performance e susceptibilidade a falhas), de realização física (requisitos espaciais, peso e vida útil) e restrições específicas da tarefa devem ser conhecidas ao menos aproximadamente. Informações mais detalhadas deverão ser recolhidas para as combinações mais promissoras.

Os dados necessários são essencialmente obtidos com o auxílio de:

- cálculos preliminares;
- esboços ou desenhos em escala preliminares de leiaute, forma, compatibilidades, etc.;
- experimentos e testes em modelos;
- modelos analógicos e simulação computacional;
- patentes e literaturas específicas e
- pesquisas de mercado.

Com esses dados em mãos, é possível desenvolver as combinações de princípios mais promissoras ao ponto em que elas possam ser avaliadas. As propriedades das variantes de concepção devem revelar características tanto físicas quanto econômicas de modo a permitir uma avaliação a mais acurada possível.

• **Avaliação das variantes de concepção**

Uma vez que as combinações de princípios de solução tenham sido desenvolvidas na forma de variantes de concepção, estas devem ser avaliadas de modo a proporcionar um embasamento objetivo para decisões.

Para Pahl e Beitz [26], uma avaliação significa determinar o valor, a utilidade ou força de uma solução com respeito a um dado objetivo. Uma avaliação envolve a

comparação de variantes de concepção ou, no caso de uma comparação com uma solução ideal imaginária, uma ponderação ou grau de aproximação com o ideal.

Desta forma, o roteiro apresentado por Pahl e Beitz [26] orienta o projetista para, a partir da especificação de projeto, elaborar concepções ou variantes de concepção. Com base neste modelo procedural, o item seguinte discutirá o projeto conceitual de uma forma mais abstrata e flexível.

3.5 O processo de projeto conceitual

O projeto conceitual pode ser estudado como um processo com entradas e saídas inerentes a qualquer processo. Na verdade, o processo de projeto conceitual se insere num processo mais amplo: o processo total de projeto de um produto, conforme mostrado na figura 3.6. Este leva uma necessidade detectada no mercado ao projeto detalhado do produto: conjunto de documentos que viabilizam a realização física do produto.

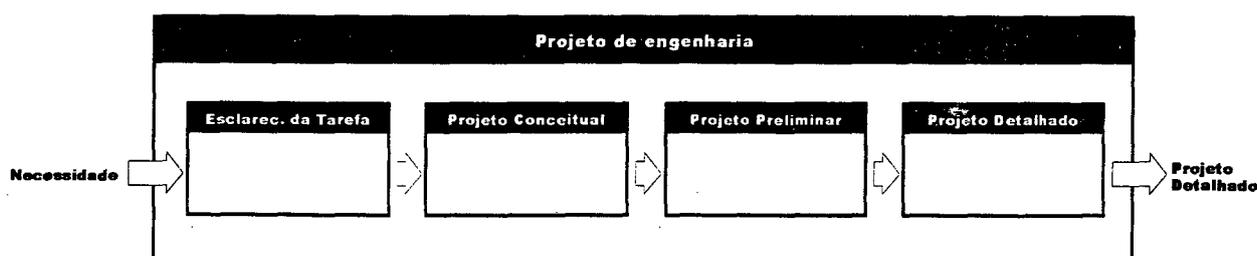


Figura 3. 6 O processo total de projeto de um produto - modelo consensual.

O processo total de projeto, bem como os seus subprocessos, manipula informações a respeito do produto que se pretende obter. Observa-se de uma maneira geral a tendência de tais informações fluírem no sentido abstrato-concreto. Desta forma a especificação de projeto é mais abstrata que a concepção do produto, que por sua vez é mais abstrata que o seu projeto preliminar e que por fim é mais abstrato que o projeto detalhado do produto. Tal constatação, no entanto, não impede que se faça uso, em qualquer etapa do processo de projeto, do recurso da abstração. Em vários momentos, o projetista se vê numa condição em que deve abstrair para que possa abordar o problema de projeto sob uma nova ótica, menos preconceituosa e

mais original, afastando-se assim das soluções mais óbvias e provavelmente menos promissoras.

No processo de projeto conceitual, ilustrado na figura 3.7, por um lado entram informações sob a forma de tarefa de projeto (ou problema de projeto) e pelo outro saem informações na forma de uma concepção de projeto.

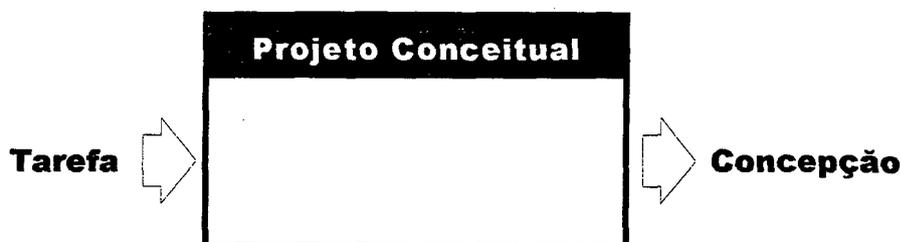


Figura 3. 7 O processo de projeto conceitual.

O projeto conceitual pode assim ser resumido como a busca por uma solução essencialmente qualitativa - uma concepção - para o problema de projeto. Poucos são os problemas para os quais se pode atribuir de imediato uma solução. Neste caso, dispensa-se o projeto conceitual, ou mesmo o próprio projeto. É o que ocorre quando se encontra no mercado um produto que satisfaz suficientemente o problema de projeto proposto. O que dificulta a busca direta por uma solução (concepção) é a complexidade intrínseca aos problemas de projeto, tais como são postos.

O projetista vale-se então da seguinte estratégia para contornar a barreira da complexidade detectada no projeto conceitual. O problema de projeto, complexo, é decomposto sucessivamente em subproblemas de menor complexidade, até que se torne possível associar sub-soluções a tais subproblemas. Em seguida, o projetista recompõe as sub-soluções (simples) em uma solução completa para o problema de projeto. Esta solução estará dessa forma num mesmo nível de complexidade em relação ao problema total, representando no entanto o produto de uma forma mais concreta. Este raciocínio é melhor percebido pela análise da figura 3.8, na qual o processo descrito anteriormente é exposto ao longo de dois eixos ortogonais: o eixo abstrato/concreto e o eixo simples/complexo. Note que a estratégia exposta se vale tanto da abordagem *top-down* de projeto, para a decomposição do problema complexo, quanto da abordagem *botton-up*, na composição da solução completa para o problema de projeto.

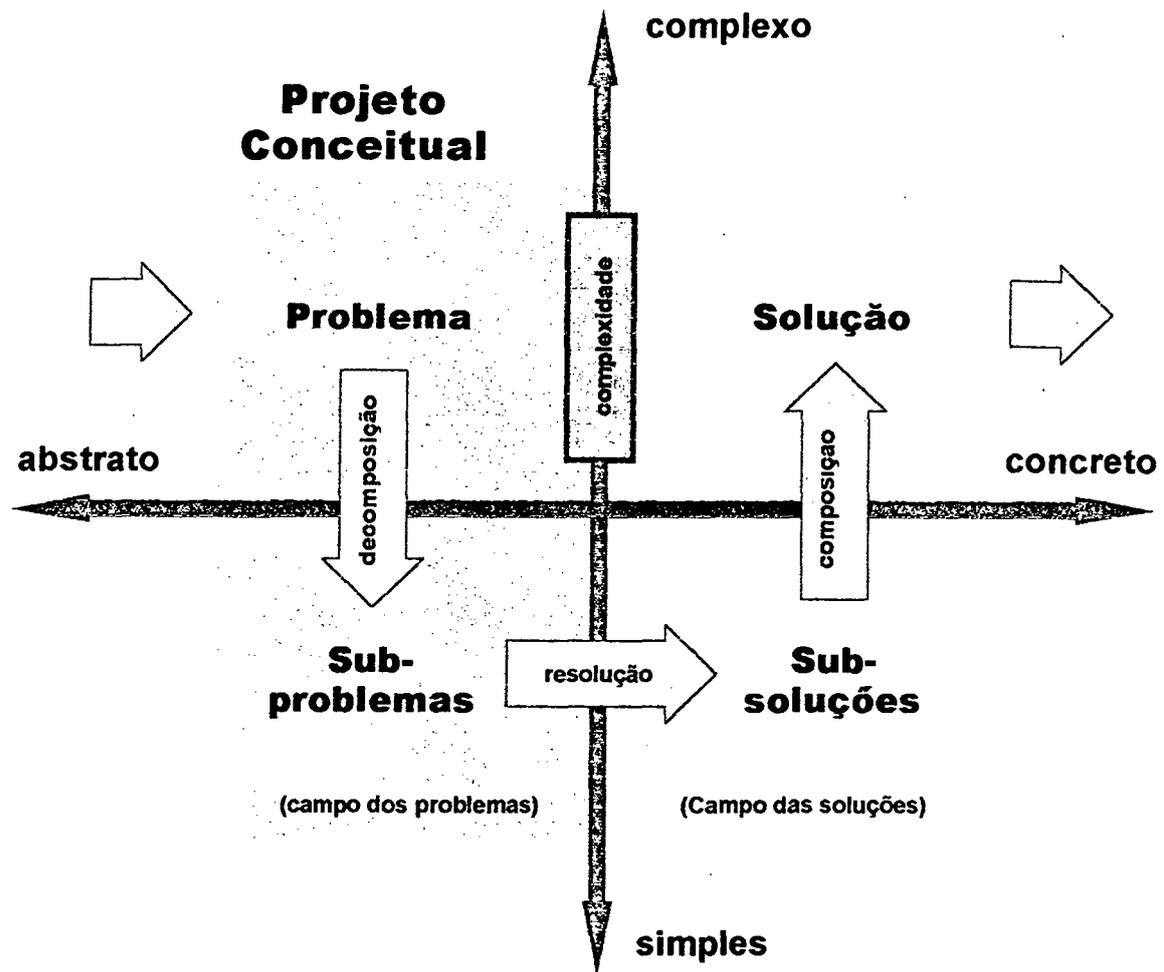


Figura 3. 8 Problema de projeto no diagrama complexidade *versus* concreticidade.

Falta agora elucidar algo mais a respeito da forma com que os problemas e soluções de projeto aparecem no projeto conceitual. Adotando uma visão funcionalista, pode-se afirmar que **um produto existe para exercer uma ou mais funções**. No início do projeto conceitual, o problema de projeto é desta forma descrito em termos da função principal, ou funções principais do produto. Tal função deve ser detectada analisando os requisitos funcionais pertencentes à especificação de projeto. A função total representará desta forma o problema de projeto, de alta complexidade, que será desdobrado em subfunções, subproblemas de menor complexidade, para as quais buscar-se-ão sub-soluções. Tais subfunções não deverão, no entanto, ser expressas de forma solta e desconectada. As subfunções devem ser estruturadas com base nos fluxos de material, energia e sinal que as mesmas manipulam no sistema. Compõe-se assim a estrutura de funções do produto.

O projetista deve em seguida buscar meios que venham desempenhar cada uma das subfunções da estrutura de funções elaborada. Se possível, várias alternativas de meio por subfunção. Tais meios conterão agora atributos de forma e material capazes de realizar efeitos físicos, químicos ou biológicos - sobretudo efeitos físicos na engenharia mecânica - que desempenharão as funções desejadas. Tais meios serão daqui por diante denominados **princípios de solução**.

A busca por princípios de solução é a etapa do projeto conceitual que exige as maiores demandas por parte do projetista. É um passo sobretudo criativo, ainda que se utilize com frequência de métodos discursivos, como o uso de catálogos de princípios de solução. É o grande passo dado do abstrato em direção ao concreto no projeto conceitual.

A estratégia de busca por princípios de solução acima exposta, contemplando funções, efeitos físicos e portadores de efeitos, é abrangente e didática. Porém, não é única. Roth [35], conforme ilustrado na figura 3.9, identifica cinco possíveis estratégias para a busca por princípios de solução para tarefas de projeto. No entanto, o entendimento da primeira estratégia, correspondente à estratégia exposta nos parágrafos anteriores, é suficiente para o entendimento das demais. Na verdade, todas as demais estratégias podem ser vistas como casos particulares da primeira.

De posse dos princípios de solução, estes são então combinados, tendo por base a estrutura de funções elaborada, em princípios de solução totais para o produto. Os melhores princípios de solução totais são então desenvolvidos em concepções para o produto.

As concepções são por fim avaliadas com relação aos requisitos da especificação de projeto e a melhor dentre elas é escolhida. Com a combinação dos princípios de solução restaura-se a complexidade perdida quando da decomposição da função total de projeto. Todo o processo anteriormente descrito está exposto na figura 3.10, mais uma vez fazendo-se uso de um diagrama complexidade *versus* concreticidade.

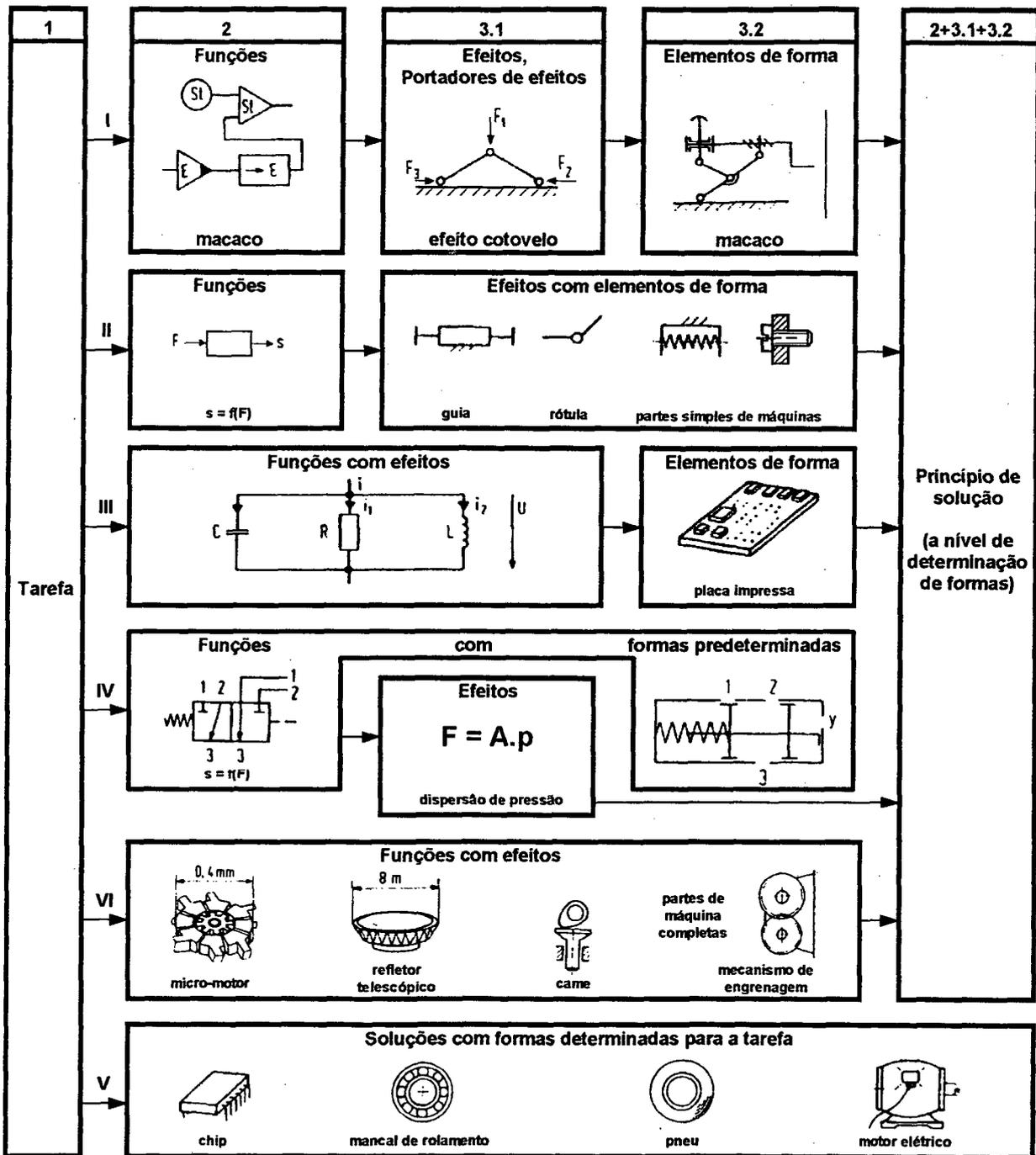


Figura 3. 9 Estratégias para o desenvolvimento de princípios de solução [35].

De acordo com o que foi acima apresentado, o processo de projeto conceitual pode ser subdividido em dois subprocessos: o processo de análise funcional e o processo de síntese de soluções, ambos ilustrados na figura 3.11. No primeiro, o produto é projetado em termos das funções que se espera que o mesmo venha a desempenhar. No segundo, em função dos meios físicos, químicos e biológicos capazes de desempenhar tais funções.

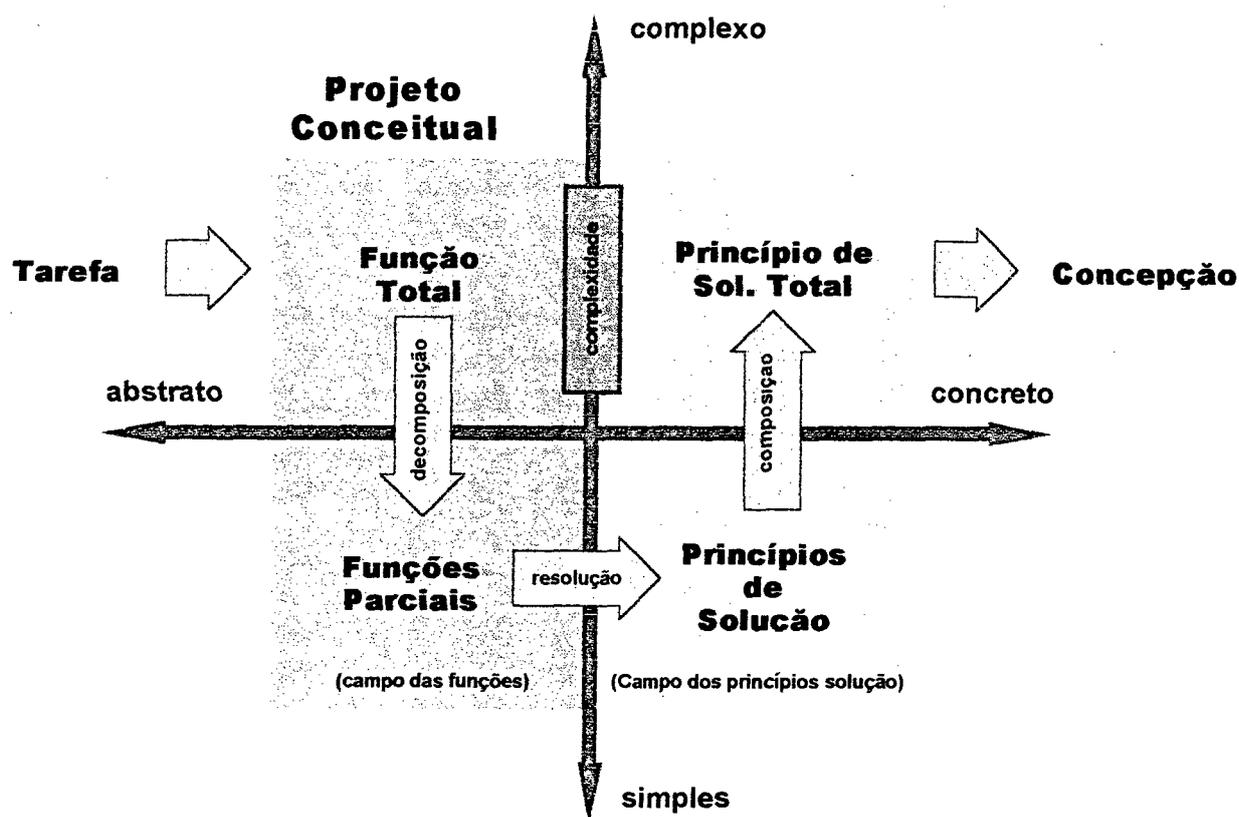


Figura 3. 10 Projeto conceitual no diagrama complexidade *versus* concreticidade.

A presente dissertação se servirá da divisão do projeto conceitual em análise funcional e síntese de soluções para estruturar o estudo dos modelos de produto desenvolvidos ao longo do projeto conceitual.

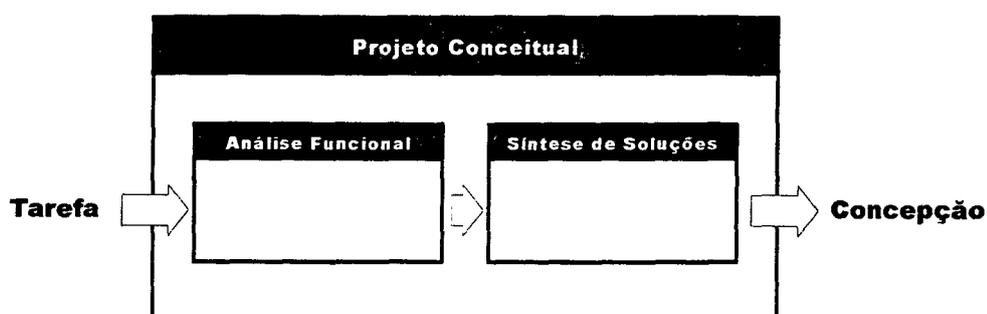


Figura 3. 11 Subprocessos do projeto conceitual.

3.6 Considerações finais

O presente capítulo buscou esclarecer a fase de projeto conceitual, onde se situarão os modelos de produtos a serem estudados ao longo do restante desta dissertação. Para o entendimento do projeto conceitual foi primeiramente esclarecido o significado e enfatizada a importância da concepção de um produto. O próprio projeto conceitual foi definido em função da geração de concepções para um produto.

A fim de familiarizar o leitor com as etapas normalmente seguidas pelo projetista para a obtenção de concepções, apresentou-se o modelo procedural do processo de projeto de Pahl e Beitz [26]. Em seguida, realizou-se uma análise mais abrangente do projeto conceitual. O projeto conceitual foi abordado como um processo com suas entradas e saídas. Detectou-se dois grandes subprocessos internos ao processo de projeto conceitual: a análise funcional e a síntese de soluções.

No primeiro e no segundo capítulo discutiram-se exaustivamente aspectos relacionados ao processo de projeto: o total e o conceitual, mais especificamente. Buscou-se com isso esclarecer e delimitar o domínio de estudo da dissertação e também esboçar uma estrutura para a mesma. O próximo passo será o estudo do que constitui o objeto de estudo da dissertação: os modelos de produto. O capítulo 4 será dedicado ao estudo da teoria de modelagem dos produtos, sem no entanto se ater a quaisquer modelos específicos que porventura venham a ser utilizados no projeto conceitual.

Capítulo 4

Os modelos de produto

4.1 Introdução

Até o presente momento, muito foi se falou a respeito do processo de projeto - o processo total e o conceituai em particular - e pouco a respeito do real objeto de estudo desta dissertação: os modelos de produto. Assim foi feito na crença de que se deva conhecer com razoável profundidade o domínio de estudo antes que se comece a análise do objeto de estudo propriamente dito. Algo como conhecer o terreno onde se pisa.

Este capítulo dará início ao estudo dos modelos de produto, porém não se aterá a qualquer modelo específico. O capítulo primeiramente apresentará conceitos gerais relativos à teoria dos modelos e da modelagem do produto. Em seguida, será oferecida uma visão geral das novas tendências para o modelamento de produtos, através da exposição de alguns trabalhos recentemente desenvolvidos na área.

4.2 Definições e generalidades

Numa primeira tentativa de esclarecer o significado da palavra “modelo”, através da sua etimologia, veja, abaixo, o correspondente verbete extraído do Vocabulário jurídico de Silva [37].

Modelo: derivado do italiano “*modello*”, que se julga remontar ao *modulus* latino, além de designar a coisa perfeita, quer tecnicamente exprimir tudo que serve de imagem, forma ou padrão, para que outras coisas se façam em sua reprodução, cópia ou semelhança.

Assim, o modelo exhibe o original. ...

Como pode ser observado, o termo “modelo” é amplo e poderá se tornar uma fonte geradora de dúvidas, caso não seja devidamente entendido. O entendimento de um conceito passa pela capacidade de defini-lo, ou seja, de estabelecer os seus limites, de saber com exatidão quais elementos se enquadram no conceito, quais não se enquadram. A definição, ou conceituação, de um termo é também uma garantia da uniformidade de linguagem no seu estudo.

Antes de estabelecer uma definição própria do termo modelo, serão apresentadas algumas visões particulares de autores envolvidos com o estudo da teoria de projetos.

Back [2] vê os modelos como “idealizações mentais para situações físicas”, realçando, desta forma, a importância dos modelos no mecanismo psicológico de compreensão da realidade pelo homem.

“Um modelo é um conjunto, teoricamente embasado, de descrições do objeto real”, afirma Tomiyama *et al* [39], enfatizando a necessidade de uma teoria que o embase. A existência de uma base teórica - uma teoria de modelagem - é, de fato, uma condição fundamental para o modelamento de um objeto.

Krause *et al* [19], em uma perspectiva orientada à integração do ciclo de vida do produto, definem modelo, de um produto especificamente, como: “a acumulação lógica de todas as informações relevantes concernentes a um dado produto durante o seu ciclo de vida”.

Hubka [15], por sua vez, afirma que “um modelo é uma representação por meios adequados do real (realizado ou proposto) sistema técnico, processo ou idéia”.

Observa-se que os termos “idealizações mentais”, de Back [2], “descrições”, de Tomiyama [39] e “acumulação lógica de informações”, de Krause *et al* [19], de certo modo convergem para o que Hubka [15], na sua definição, denominou de “representação” de um sistema, processo ou idéia. Sendo uma representação de uma entidade qualquer, um modelo, fruto de uma idealização mental, acumula informações a respeito desta entidade e assim é capaz de a descrever.

Desta forma, ao longo desta dissertação, será adotada a seguinte definição de modelo, obtida pela síntese da definição proposta anteriormente por Hubka [15]. Um **modelo é uma representação de um objeto real**.

O objeto modelado pode ter uma existência real concreta ou abstrata. Um prédio de apartamentos, objeto real concreto, é representado por conjuntos de desenhos ou mesmo por uma maquete: modelos. Uma hierarquia de cargos em uma empresa, objeto real abstrato, pode ser representada por um organograma: também, um modelo.

A criação de um modelo pode se dar **posteriormente** ou **anteriormente** à existência real do objeto.

No primeiro caso, correspondente à porção esquerda da figura 4.1, extrai-se do objeto já existente os atributos de interesse aos propósitos do modelo. O modelo é neste caso uma abstração da realidade; uma visão parcial desta, filtrada por uma teoria. É o caso de quando se constrói um modelo de elementos finitos para a análise de tensões em uma peça que apresenta falhas freqüentes.

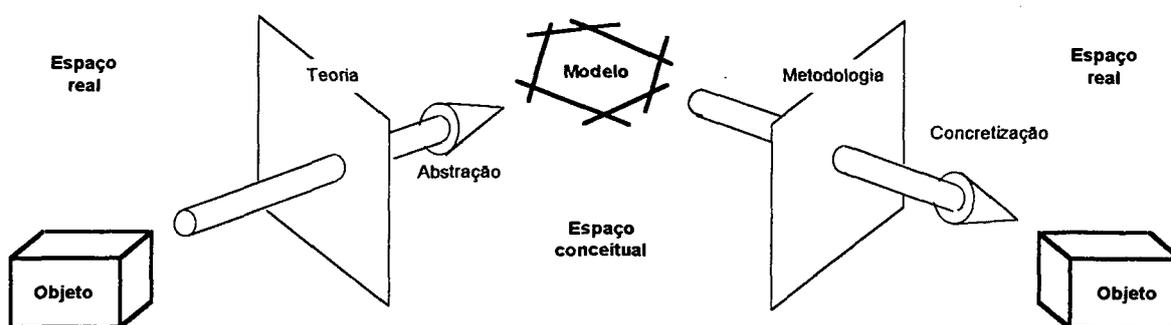


Figura 4. 1 Relação entre objeto e modelo.

No segundo caso, correspondente à porção direita da figura 4.1, quando o modelo é criado anteriormente à existência real do objeto, constrói-se um modelo contendo as propriedades ou atributos que se desejam no objeto a ser realizado. Para exemplificar este segundo caso, tem-se a própria sistemática de projeto de um novo produto. Um novo produto é projetado numa evolução sistemática de modelos. Através de processos apropriados, um modelo mais detalhado e concreto substitui

outro mais simples e abstrato, até que se obtenha um conjunto de documentos - modelos - que possibilitem a viabilização física do objeto projetado.

Entre o modelo e o objeto real existem atributos que são compartilhados, atributos da realidade que não são modelados e atributos inerentes ao modelo. Assim num modelo sólido (*mock-up*) de um equipamento eletrônico, um telefone por exemplo, têm-se atributos de forma, dimensão, cores, etc., que são compartilhados com o aparelho real; atributos próprios do modelo, como o material a ser utilizado na sua confecção: isopor, poliuretano, etc. e atributos do aparelho real que não foram modelados como o peso, funções, custo entre outros.

Um modelo pode ser representado utilizando uma variedade de meios. O papel é o meio mais comumente usado para representações planas, tais como desenhos e diagramas. Argilas e resinas são exemplos de meios para representações tridimensional de objetos. Com o advento da informática, os modelos são criados na memória do computador e exibidos em monitores ou outros dispositivos de saída. A própria mente do projetista pode ser vista como um meio no qual um modelo pode existir.

Os modelos, de uma forma geral, podem ser analisados segundo dois eixos mutuamente independentes, como foi feito na figura 3.8: o eixo abstrato-concreto e o eixo simples-complexo (ou simples-detalhado).

Um modelo é tão mais abstrato (inverso de concreto) quanto menor for a similitude das propriedades dos elementos que o compõem com as propriedades dos elementos que compõem, ou irão compor, o objeto modelado.

Variações no nível de detalhamento podem ocorrer mesmo internamente a um modelo. Assim, em um modelo de elementos finitos, determinadas regiões do objeto exigem maior detalhamento (uma malha mais refinada) que outras. É o caso das regiões onde ocorrem os maiores níveis de tensões e que por isso necessitam de uma análise mais cuidadosa. A complexidade de um modelo parece estar intimamente ligada ao seu nível de detalhamento.

Um modelo é também caracterizado por um **domínio** de modelagem. O domínio de um modelo, ou de uma modelagem, é caracterizado pelo conjunto de fenômenos físicos, químicos e biológicos e propriedades retratadas pelo modelo. Na engenharia, encontra-se uma variedade ampla de domínios de modelagem, tais como a geometria, a cinemática, a eletricidade, a transferência de calor e a resistência dos materiais. Um modelo de resistência dos materiais, por exemplo, consiste na representação de fenômenos e propriedades tais como tensões, deformações, forma e rigidez.

Por fim, vale lembrar que nem sempre se modela um objeto em todo o seu **escopo**, ou seja, na sua totalidade. O escopo representa a parte ou região do objeto representada pelo modelo. Numa análise de tensões, normalmente, apenas a parte sob tensão crítica do elemento é tida no escopo. Desde que a influência da região fora do escopo é tratada como condição de contorno, reduz-se o tamanho do modelo e o seu custo computacional.

4.3 Linguagens

Um modelo é construído utilizando-se um conjunto de conceitos que normalmente compõem uma **linguagem**. Ullman [42] classifica as linguagens utilizadas no projeto em quatro grupos.

- **Semântica:** é a representação verbal ou textual de um objeto. Inclui textos explicativos do funcionamento de um produto ou da sua estrutura física, lista de requisitos, listas de materiais, etc.;
- **Gráfica:** usa elementos da geometria para descrever o objeto. Inclui todas as formas de desenho em duas ou três dimensões, tais como, esboços, vistas ortogonais, perspectivas, etc.;
- **Analítica:** usa equações, regras ou procedimentos para representar a forma ou a função de um objeto. Inclui as equações de resistência ou performance de partes do produto, equações diferenciais que regem certos comportamentos do produto, matrizes de rigidez, etc.;

- **Física:** é representação através de um modelo sólido do objeto. Inclui maquetes, *mock-ups*, modelos para simulação em túneis de vento ou canais, protótipos, etc..

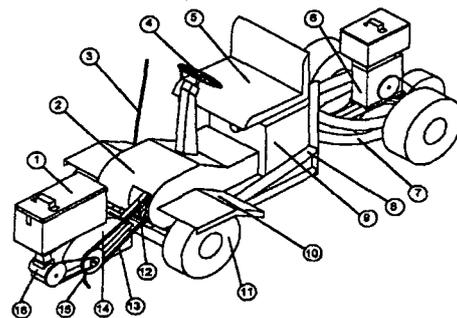
A figura 4.2 exemplifica o uso das linguagens de projeto citadas acima para o modelamento de um microtrator articulado [43]. Primeiro, (a), utiliza-se a linguagem semântica para descrever, ou seja, modelar a estrutura física e parte do funcionamento do microtrator. O primeiro modelo, (a), na realidade se relaciona com o segundo modelo, (b), que utiliza a linguagem gráfica para representar a concepção escolhida para o microtrator. Note que, embora o primeiro modelo, (a), seja naturalmente mais abstrato que o segundo, (b), ambos se encontram em um mesmo nível de detalhamento. O terceiro modelo, (c), pertencente ao domínio da cinemática, utiliza a linguagem analítica para modelar a velocidade desenvolvida pelo microtrator. O último modelo, (d), utiliza a linguagem física para a avaliação de algumas propriedades, como a estética e a dirigibilidade, de um dos projetos preliminares desenvolvidos para o microtrator. Todos os modelos da figura 4.2 tomam o microtrator na sua totalidade em seu escopo.

"O microtrator é dividido em duas partes, a dianteira (tração e preparo de sulcos adubados), unidos por uma rótula que, além de articular a máquina, permite um giro longitudinal, evitando que uma das rodas perca o contato em terrenos irregulares. A parte trazeira, composta pelo porta-implimento (7) e implimento (6), a rótula e o sistema de direção faz parte de outra dissertação, e não é descrita neste trabalho.

O microtrator possui como estrutura um chassi tubular (8), onde são montados os módulos de transmissão de potência, preparo de sulcos adubados e comando. A carenagem superior (2), esconde a parte da transmissão de potência composta pela caixa de câmbio, polias, correias e embreagens, e serve de proteção. O motor transmite potência para o sistema de preparo de sulco e para as rodas de tração (11).

O banco do operador (5) é localizado acima do motor e o volante é inclinado. Do lado direito está a alavanca (3) de levantamento do módulo de preparo de sulcos. Os paralamas servem de apoio para os pés.

No módulo de preparo de sulcos, as enxadas rotativas (15) recebem potência através da transmissão por corrente (13) e transmitem para o dosador de adubo (16). O reservatório (1) fornece adubo para o dosador, e a proteção das enxadas rotativas (14) mantém a terra no sulco. Todo o módulo é suportado pelo garfo (12), que ao se articular em torno de um eixo montado sobre o chassi, ergue as enxadas rotativas e interrompe o preparo dos sulcos."



b) Linguagem gráfica

a) Linguagem semântica

$$V_R = \frac{2\pi \cdot r_d \cdot n \cdot (1-e)}{60 \cdot i_{total}}$$

onde:

V_R = velocidade do trator (m/s);

r_d = raio dinâmico (m);

n = rotação do motor (rpm);

e = índice de escorregamento $\approx 0,5$;

i_{total} = relação de transmissão total.

c) Linguagem analítica



d) Linguagem física

Figura 4. 2 Linguagens de projeto e respectivos modelos.

A figura 4.3 ilustra os tipos de linguagens que são utilizadas preponderantemente em quais fases do processo total de projeto. Na fase de esclarecimento da tarefa, têm-se essencialmente modelos contendo declarações a respeito das propriedades e das funções que do produto são esperadas, ou seja, prepondera o uso da linguagem semântica de projeto. Tal preponderância se estende mesmo à fase de projeto conceitual, pois a análise funcional, como será vista no capítulo 6, ainda modela o produto essencialmente através da linguagem semântica. É no projeto conceitual que se inicia uso intensivo da linguagem gráfica de projeto e este uso intensivo se estende ao longo de todo o restante do projeto. Desta forma, o desenho de concepção do produto é transformado em um desenho de leiaute no projeto preliminar e em seguida em um desenho detalhado no projeto detalhado. A linguagem gráfica é a predominante no processo total de projeto de um produto. O uso da linguagem analítica se inicia fundamentalmente no projeto preliminar, aonde se faz uso intensivo de modelos matemáticos para o dimensionamento das partes que comporão o produto. Modelos de linguagem analítica também são utilizados intensivamente no projeto detalhado de produtos para fins de dimensionamentos mais precisos ou detalhados. A linguagem física é utilizada preponderantemente junto ao término do projeto. Os modelos físicos são usados tanto como uma forma de melhor ilustrar o que virá a ser o produto projetado (maquetes) quanto para a realização de testes e simulações. A figura 4.3, no entanto, não é um esquema rígido. Por exemplo, a linguagem analítica - ao contrário do que mostra a figura 4.3 - já é utilizada na metade do projeto conceitual, quando do modelamento dos efeitos físicos através de equações que representam as leis naturais. Por último, vale salientar que esta é uma evolução que se dá sentido abstrato-concreto ou ainda, no sentido subjetivo-objetivo.

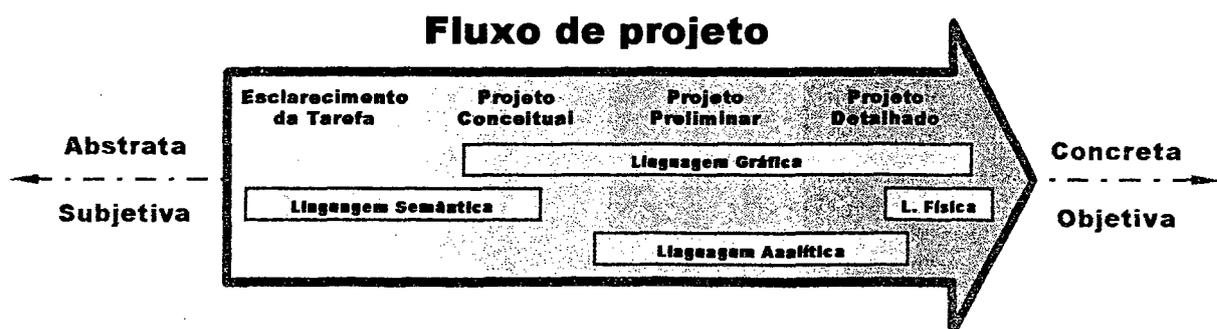


Figura 4.3 Predominância de linguagens no fluxo geral de projeto.

4.4 Propósitos

Conforme frisou Hubka [15], um modelo tem sempre um propósito definido, ou seja, uma função a executar. Dentre as propósitos relacionados aos modelos destacam-se:

- **Descrição** - o modelo é sobretudo um depósito de informações referentes ao produto. O projetista, no processo de idealização de um produto, se serve de modelos para depositar as informações referentes ao produto que vai gradualmente adquirindo. Ele tem consciência de que sua mente certamente não é o meio mais adequado e seguro para que estas informações fiquem armazenadas e acessíveis. O propósito de descrição se relaciona fortemente com o uso da linguagem semântica (textos, notas, ...) e da linguagem gráfica (croquis, desenhos, ...) na modelagem de produtos.
- **Previsão ou simulação** - os modelos podem servir para simular e prever o comportamento do produto ainda durante o seu processo de projeto. Nos ambientes de projeto de engenharia, onde a atividade de análise de sistemas é mais difundida e valorizada que a de síntese, o termo "modelo" se encontra extremamente vinculado à função de simulação, e mais fortemente ainda à simulação matemática e computacional de tais sistemas.
- **Comunicação** - através do modelo o projetista consegue comunicar suas idéias a respeito do objeto projetado. Um modelo serve assim como fator de integração dos diversos profissionais envolvidos no desenvolvimento do produto. Uma correta modelagem do produto é desta forma uma condição que se impõe à implantação de ambientes de engenharia simultânea. Quando se fala em comunicação, deve-se também pensar na facilidade da troca de dados entre os diversos computadores e máquinas envolvidos no ciclo total de vida do produto. O modelo computacional do produto com que um *software* trabalha deve ser compatível com os modelos dos demais *softwares* relacionados. Desta forma, reduz-se o tempo gasto com a conversão de modelos e assim diminui-se o tempo total de desenvolvimento do produto. Uma tentativa neste sentido é a elaboração do padrão ISO 10303 "Standard for the exchange of Product Model Data" (STEP), que tem como meta a completa e

independente representação de todos os dados relacionados aos produtos durante o seu ciclo de vida [1] [29]. O padrão STEP é apresentado mais detalhadamente no item 4.7.4.

- **Instrução** - através de um modelo, consegue-se transmitir conhecimentos. É uma forma particular de comunicação.
- **Otimização** - utilizando-se de um modelo, o projetista, por meio de técnicas matemáticas, ou mesmo gráficas, otimiza algumas variáveis relacionadas à forma ou ao desempenho do produto. Também pode ser considerado um caso de otimização o de um modelo em argila - de um automóvel, por exemplo - que é posto em um túnel de vento (prática que vem caindo em desuso com a utilização de simulações computacionais) e gradualmente tem a sua forma alterada (pela adição ou remoção de argila), buscando-se uma otimização (minoração) do coeficiente de arrasto. A otimização, como pode ser visto, está intimamente ligada ao propósito da simulação.

No projeto conceitual, os modelos têm sobretudo os propósitos de descrição e comunicação. O projetista agrega gradualmente novas informações ao modelo com que trabalha e o utiliza para descrever o produto a ser desenvolvido. Por exemplo, a estrutura de funções - um modelo - descreve o produto em termos das funções que lhes são requeridas, interna ou externamente. Posteriormente, o projetista utiliza um desenho de concepção - outro modelo - para comunicar o resultado da fase de projeto conceitual às demais pessoas envolvidas no processo de desenvolvimento do produto.

4.5 Classificação dos modelos

Diversos critérios podem ser utilizados para classificar os modelos de produtos com que se trabalha no projeto de engenharia. A linguagem predominantemente utilizada pelo modelo ou mesmo o seu propósito - discutidos em itens anteriores - são exemplos de possíveis critérios a serem utilizados. Entretanto, uma classificação, para ser considerada boa, deve primeiramente abrigar todos os elementos enquadrados pela definição do termo em que se classifica e, em segundo lugar, minimizar as interseções de elementos entre as categorias que compõem a

classificação. Os dois critérios mencionados neste parágrafo parecem não satisfazer este último aspecto a contento.

Uma abordagem clássica para a classificação dos modelos de produto é a que divide-os quanto ao princípio de funcionamento utilizado no modelamento. Back [2] e Roozenburg e Eekels [32] são exemplos de autores que seguem tal abordagem. Na visão dos autores [2][32], os modelos de produto podem ser basicamente divididos nas categorias: icônicos, analógicos e simbólicos ou matemáticos. Roozenburg e Eekels [32] incluem ainda uma quarta categoria, a dos modelos de estrutura. A principal divergência entre os autores [2][32] se encontra na definição e abrangência das categorias *icônicos* e *analógicos*. Por exemplo, um modelo em escala reduzida para simulação em um túnel de vento é considerado icônico por Roozenburg e Eekels [32] e analógico por Back [2].

A seguir será apresentada a classificação proposta por Roozenburg e Eekels [32]. Esta classificação se baseia na natureza das similaridades entre o objeto real e o modelo. Tal classificação, no entanto, não se pretende exata. Na prática, os modelos freqüentemente empregam mais de um princípio de funcionamento.

4.5.1 Modelos de estrutura

Os modelos de estrutura se baseiam na visualização da estrutura qualitativa do objeto. Como exemplo de tais modelos têm-se os fluxogramas, os diagramas de circuitos, os grafos conceituais e as estruturas de funções.

Nos modelos de estrutura, as regras de acordo com as quais as propriedades dos modelos são interpretadas em termos das propriedades do original não são explícitas e formais, mas intuitivas. Por esta razão, os modelos de estrutura são também chamados de modelos qualitativos. Não obstante, os modelos de estrutura desempenham um papel de extrema importância no projeto. Proporcionam uma primeira impressão a respeito da aparência, funcionamento, possibilidade de manufatura e freqüentemente são fontes de novas idéias. Os modelos de estrutura usualmente antecedem outros modelos mais avançados no projeto.

4.5.2 Modelos icônicos

Na visão de Roozenburg e Eekels [32], os modelos icônicos representam as propriedades do objeto original por propriedades idênticas ou similares no modelo. Deste modo, propriedades como comprimentos, forças, deslocamentos e temperaturas do modelo correspondem às mesmas propriedades no original. O modelo icônico, até certo ponto, se parece com o original. Desenhos, manequins, *mock-ups* e mesmo modelos em escala são exemplos de modelos icônicos para Roozenburg e Eekels [32].

Pode-se falar em similaridade geométrica, estática, cinemática, dinâmica, térmica, química, entre outras. Cada forma de similaridade traz consigo suas próprias condições específicas, às quais os modelos devem atender. São as chamadas condições de similaridade.

Por vezes, realizam-se testes em modelos icônicos. Assume-se nestes casos que o modelo também se comporte como o original. Além disto, as condições do ambiente também devem ser similares às condições originais.

Back [2], por sua vez, baseia sua definição de modelos icônicos na similitude entre o original e o modelo. Um modelo icônico é aquele que "se parece com o original, ou é visualmente um equivalente geométrico em escala reduzida ou ampliada. Tal modelo normalmente mostra tão somente partes ou características relevantes ao seu propósito imediato".

• Modelos em escala

Roozenburg e Eekels [32] enquadram os modelos em escala como um importante grupo dentre os modelos icônicos. Modelos reduzidos de automóveis, aviões e navios para utilização em túneis de vento e canais, modelos reduzidos de obras hidráulicas e instalações químicas e modelos acústicos de salas de concerto são exemplos de modelos em escala. Modelos em escala possibilitam a simulação de processos dos quais se sabe quais variáveis físicas e químicas atuam, mas não como as mesmas interagem. Os experimentos em modelos em escala são conduzidos

quando a realização numa réplica em tamanho original se torna cara, demorada, ou mesmo, impossível.

No uso dos modelos em escala, um problema em especial pode surgir. Ao reduzir ou ampliar um objeto, algo também muda nas relações entre as propriedades do objeto. Galileo, na sua obra *Discorsi* (1638), menciona o fato de que se um rato fosse geometricamente ampliado ao tamanho de um elefante, seus ossos seriam esmagados pelo seu peso próprio. Similaridade de modelagem nem sempre corresponde a similaridade geométrica. Dependerá do tipo de problema a ser estudado no modelo icônico, que condições de similaridade aplicar. Pode-se chegar a um modelo icônico que, visualmente, não se assemelhe ao original.

Conforme mencionado anteriormente, os modelos em escala não são considerados icônicos por Back [2], mas sim analógicos, pois o que interessa nestes modelo é o seu comportamento, que se assemelha ao comportamento do original.

4.5.3 Modelos analógicos

Num modelo analógico, de acordo com Roozenburg e Eekels [32], uma propriedade do original é representada por uma outra propriedade do modelo. Isto sob a condição de que esta outra propriedade se comporte da mesma forma que a propriedade do original, ou ao menos de acordo com uma relação conhecida.

Back [2], por sua vez, define os modelos analógicos como aqueles que se comportam como o original ou obedece às mesmas leis de ação. São sistemas que seguem os mesmos princípios do original e são úteis somente enquanto estão operando.

De grande importância são os modelos analógicos para os quais a formulação matemática do comportamento tem a mesma forma da formulação do comportamento do original a ser estudado. Por exemplo, a mesma formulação matemática pode ser dada à lei de Fourier para a condução de calor e para a condução elétrica através de um fio ou de uma barra. Através desta analogia é possível responder questões sobre condução térmica pela simulação deste processo em um modelo elétrico. De maneira similar, é possível fazer simulações elétricas e hidráulicas de sistemas mecânicos.

4.5.4 Modelos matemáticos e lógicos

Os modelos matemáticos e lógicos representam as características do objeto original por meio de símbolos - por isso também são chamados de modelos simbólicos. Como exemplo de modelos lógicos têm-se os diagramas de circuito em álgebra booleana.

Roozenburg e Eekels [32] consideram grande a importância dos modelos matemáticos para o projeto de engenharia. Distinguem os modelos matemáticos primários dos secundários. *Modelos matemáticos primários* descrevem o comportamento do produto ou do sistema em termos de princípios químicos ou físicos primários. Se as dimensões, propriedades de materiais e condições de uso de um produto são conhecidas, um modelo matemático primário permite a determinação do seu comportamento de uma maneira correta. Tomando por exemplo uma viga fixa por uma extremidade que é carregada na extremidade livre com uma carga G . De acordo com a mecânica, a deflexão d da extremidade livre é dada por

$$d = \frac{Gl^3}{3EI} \quad (4.1)$$

onde l = o comprimento da viga, I = o momento de inércia da seção transversal da viga e E = o módulo de elasticidade do material da viga.

A fórmula (4.1) é um modelo matemático primário. Para duas vigas de mesmo material, mas com seções transversais e comprimentos distintos, que são carregadas diferentemente, calcula-se a deflexão para cada viga usando as fórmulas abaixo:

$$d_1 = \frac{G_1 l_1^3}{3EI_1} \quad \text{e} \quad d_2 = \frac{G_2 l_2^3}{3EI_2}$$

Entretanto, é possível determinar d_2 em função de d_1 . Para isso, divide-se d_2 por d_1 :

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{G_2 l_2^3}{3EI_2} \cdot \frac{3EI_1}{G_1 l_1^3} = \frac{G_2 I_1}{G_1 I_2} \cdot \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^3$$

$$d_2 = \frac{G_2 I_1}{G_1 I_2} \cdot \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^3 \cdot d_1 \quad (4.2)$$

A fórmula (4.2) é denominada um *modelo matemático secundário*, pois deriva da manipulação com modelos matemáticos primários e não de princípios químicos ou físicos primários. Note que o módulo de elasticidade desapareceu da fórmula. Se, por exemplo, o módulo de elasticidade de um novo material é desconhecido, a fórmula (4.2) permite calcular a deflexão d_2 para o original com base na deflexão d_1 determinada experimentalmente num modelo icônico do mesmo material.

• Modelos físicos e algébricos

Modelos matemáticos primários devem ainda ser divididos em modelos físicos e modelos de regressão algébrica. Nos modelos físicos, normalmente sistemas de equações diferenciais, os coeficientes e constantes têm um significado físico. O mesmo não ocorre com os modelos de regressão algébrica.

A velocidade de crescimento da concentração de algas em um lago é proporcional à sua concentração, K , assim:

$$dK = aKdt$$

aonde a é uma constante relacionada à velocidade de divisão das algas.

Resolvendo-se a equação diferencial, obtém-se

$$\frac{dK}{K} = a \cdot dt$$

e assim

$$K = e^{at+C} \quad (C \text{ é a constante de integração}).$$

Assim, a concentração de algas aumenta exponencialmente com o tempo. Se não se conhecesse esta relação teórica, mas se dispusesse de uma série de medidas sucessivas da concentração de algas no lago, poder-se-ia plotar estas medidas em um gráfico e traçar uma linha curva ou reta através dos pontos, que poderia ser expressa em uma fórmula algébrica. Logo ver-se-ia que $K = at + b$ (uma linha reta) não funcionaria, mas talvez $K = at^2 + bt + c$ ou $K = at^3 + bt^2 + ct + d$ funcionassem razoavelmente. Os coeficientes a , b , c e d poderiam ser derivados dos dados

experimentais usando algum método de regressão (por exemplo, o método de mínimos quadrados).

Na teoria, os modelos físicos devem ser preferidos em relação aos algébricos. Na prática não é o que sempre acontece, seja porque o sistema de equações diferenciais se torna excessivamente complexo, ou por insuficiência de base teórica. Nestes casos, os modelos algébricos devem ser utilizados.

• Modelos estocásticos

São modelos de probabilidade usados em simulações estocásticas. A fim de exemplificar, Roozenburg e Eekels [32] citam a aplicação da técnica de Monte Carlo para a previsão da distância média percorrida por uma pessoa embriagada que parte de um poste, cambaleando. Vai a frente e volta. Vai para a esquerda e para a direita. O modelo estocástico, utilizado na técnica, consiste de dois dados, um branco, outro vermelho, por exemplo. Imagina-se um sistema de coordenadas retangulares com o poste na origem. O eixo y teria a direção da rua e o eixo x lhe seria perpendicular. Ambos os dados são jogados simultaneamente. Um número par no dado branco significa um passo a frente ao longo do eixo y. Um número ímpar, um passo a traz. Para o dado vermelho, par significa um passo a direita e ímpar, um passo a esquerda. Os movimentos da pessoa embriagada poderiam ser representados num gráfico. Assim, pode-se saber aonde a pessoa se encontra após dez passos, por exemplo. Se estiver no ponto (x_1, y_1) , a distância percorrida seria:

$$S_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}.$$

A experiência (com dez passos) seria repetida diversas vezes. A média de S_1 obtida proporcionaria uma idéia da provável distância percorrida após os dez passos, o que poderia corresponder a um tempo t. Análises estocásticas semelhantes podem ainda ser aplicadas a análises de falhas (confiabilidade) de produtos.

4.6 Simulação

Em engenharia, simular significa imitar o comportamento de um sistema por meio de um outro sistema, que sob certos aspectos se assemelha ao primeiro. Desta forma, pode-se dizer que o segundo sistema é um modelo do primeiro.

Desenhos e outras descrições típicas do projeto conceitual não contêm relações temporais, sendo por isso denominados *modelos síncronos* [32]. Uma simulação do comportamento do objeto original não é em geral possível através de modelos síncronos. Um produto é projetado para gerar certos efeitos quando operado de uma dada maneira. Além disto, os produtos estão sujeitos a influências ambientais flutuantes. Para simular estes dois efeitos no funcionamento do produto, um *modelo diacrônico* [32] é requerido. Este é normalmente chamado de "modelo comportamental".

A semelhança pictórica normalmente não é um requisito dos modelos para simulação; a semelhança estrutural, sim. Deve haver similaridades nas relações entres os elementos mais relevantes do modelo e do original. Desta forma, nem todo modelo se presta para simulações.

4.7 Tendências com relação ao modelamento

Em adição aos elementos básicos da teoria do modelamento de produtos fornecidos nos itens anteriores, será fornecida neste item uma visão geral das tendências em relação ao modelamento de produtos ao longo do seu processo de projeto e desenvolvimento, tal como: abrangência, multiplicidade de aspectos, informatização, integração e simultaneidade, suporte às primeiras fases do projeto e flexibilidade. Alguns trabalhos, recentemente desenvolvidos em instituições e institutos de pesquisa diversos, servirão para ilustrar as tendências apresentadas.

4.7.1 Abrangência

Busca-se hoje o desenvolvimento de modelos de produto, ou sistemas de modelos, capazes de representar o produto ao longo de todo o seu ciclo de vida, das etapas iniciais de seu projeto à sua retirada do mercado.

Um exemplo característico desta tendência é **modelo de cromossomos**, desenvolvido por Ferreira [9] e ilustrado na figura 4.4. O modelo de cromossomos é na verdade uma estrutura que congrega os diversos modelos utilizados ao longo do ciclo de vida de um produto, dispostos em níveis ou domínios mutuamente interligados.

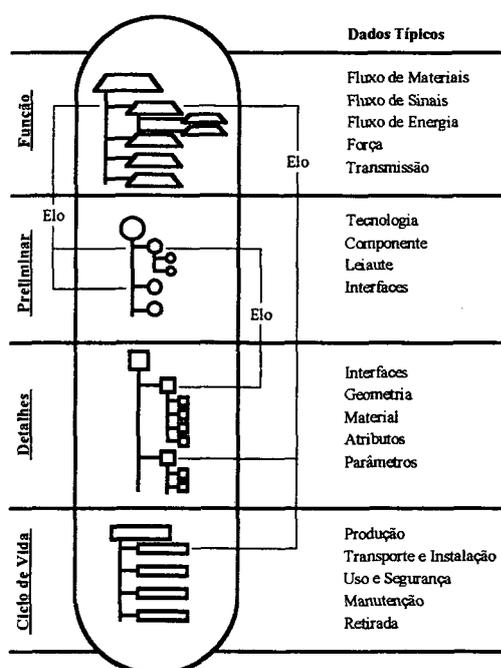


Figura 4. 4 Modelo de cromossomos [24].

Mortensen [23] utiliza o modelo de cromossomos para descrever os produtos dentro dos domínios: processo, função, órgão e componentes. Tais domínios se interligam por relações de causalidade, ou seja, relações meios/fins. Processos determinam funções, funções são realizadas por órgãos e órgãos são materializados por componentes.

Murdoch e Ball [24], no desenvolvimento do esquema de modelos de dados do produto do EDC (*Engineering Desing Center*) de Cambridge-UK, por sua vez, utilizam o modelo de cromossomos com os domínios: função, preliminar, detalhes e ciclo de

vida, como ilustrado na figura 4.4. Os modelos preliminares do produto correspondem aos modelos da segunda subfase do projeto conceitual - síntese de soluções - e aos modelos da fase de projeto preliminar, enquanto que os de detalhes correspondem aos da fase de projeto detalhado. Usando uma terminologia de certa forma inadequada, os modelos de ciclo de vida correspondem àqueles modelos de produto utilizados posteriormente ao seu projeto, da produção ao descarte.

4.7.2 Multiplicidade de aspectos

Uma segunda tendência percebida é a busca por modelos e modeladores capazes de representar o produto sob diversos aspectos, tal como geometria, esforços, materiais, entre outros.

Exemplificando esta segunda tendência, tem-se o sistema de gerenciamento desenvolvido por Yoshikawa *et al* [48], denominado **metamodelo**, que visa integrar modelos de produto de aspectos variados. Ao sistema, acoplam-se diversos modeladores externos (modeladores funcionais, geométricos, por elementos finitos, etc.), cada qual refletindo um aspecto específico do produto. O sistema é responsável pela garantia de integridade entre os modelos gerados pelos diversos modeladores acoplados ao sistema. O sistema modela as dependências existentes entre tais modelos. Uma mudança em um modelo particular é propagada, através da rede de dependências do metamodelo, a todos demais modelos de aspectos distintos que se relacionam com o mesmo.

Por representar e gerenciar as relações entre diversos modelos referentes a aspectos específicos do produto, sem, no entanto, representar um aspecto específico do produto, é que o mesmo é denominado modelo a um meta-nível ou metamodelo.

A figura 4.5 ilustra o sistema metamodelo aplicado ao modelamento de um componente mecânico. No caso, acoplam-se ao sistema de gerenciamento três modeladores de aspectos distintos: de resistência, geométrico e cinemático. O modelo de resistência - um modelador por elementos finitos, por exemplo - representa aspectos do componente relacionados a rigidez, carregamentos atuantes, esforços e deformações gerados, entre outros. O modelo geométrico - um modelador do tipo

Computer Aided Drafting - representa, por sua vez aspectos relacionados à forma e dimensões do componente. O modelador cinemático, por fim, se volta para aspectos relacionados a posições, velocidades e acelerações do componente. Acontece que as propriedades modeladas pelos três modeladores citados não se apresentam independentes. Desta forma, a aceleração, do modelador cinemático, se relaciona diretamente com a força, do modelador de resistência, e indiretamente, através da massa, com o volume, do modelador geométrico. Outras relações entre propriedades dos modelos podem ser detectadas. O metamodelo, conforme mostrado na porção superior da figura 4.5, modela tão somente tais relações, na forma de uma rede.

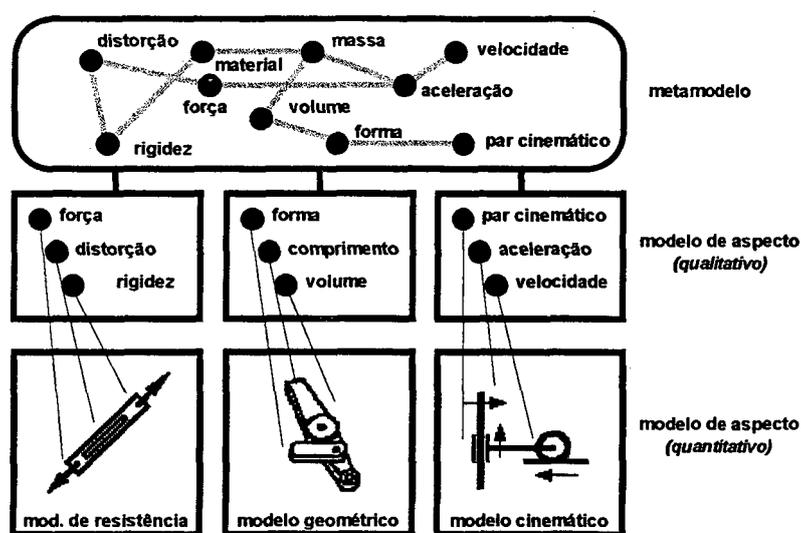


Figura 4. 5 Metamodelo [48].

4.7.3 Informatização

A crescente busca pelo auxílio computacional às atividades de projeto e desenvolvimento de produtos impele o projetista a desenvolver e trabalhar com modelos informatizados de produto. A informatização se reflete não apenas na mudança em aspectos superficiais, como na simples substituição do meio em que se modela o produto (o papel é substituído por um sistema CAD para realização de desenhos diversos); se reflete também em aspectos mais fundamentais, como na forma de se modelar um produto (mudança na teoria de modelagem).

Um exemplo de mudança na forma com que se modela um produto, advinda do processo de informatização, é a utilização do paradigma da orientação a objetos. A utilização de uma linguagem de programação ou modelamento orientada a objetos força o projetista a pensar em “classes”, “objetos”, “relações” e “herança”, termos que compõem o projeto orientado a objetos e que serão sumarizados a seguir.

Uma classe é uma generalização, uma abstração, formada a partir de objetos com características em comum. Por exemplo uma classe “mancal” representa uma abstração de todos os elementos de máquinas que, por possuir um conjunto de propriedades em comum, possibilitam o movimento relativo de rotação entre duas partes. Uma classe possui todas as definições de variáveis e funções de que necessita, por isso é dita autocontida (princípio do encapsulamento). Um objeto, ou instância, é uma entidade concreta gerada a partir de uma classe numa ação denominada instanciação. Um objeto possui individualidade. Um objeto da classe mancal poderia ser um “mancai autocompensador de esferas com diâmetro interno de 30 mm e diâmetro externo de 40 mm”.

Uma classe pode também dar origem a uma outra classe mais restrita de objetos formando assim uma hierarquia de superclasses e subclasses. Uma subclasse herda automaticamente as definições da sua superclasse, podendo lhe acrescentar variáveis e funções extras. Desta forma, uma subclasse necessita definir apenas as diferenças em relação à sua superclasse.

Dentre as vantagens da utilização da orientação a objetos no modelamento de produtos, podem-se citar a:

- **Minimização de redundâncias.** Características em comum são definidas apenas uma vez numa determinada classe e são automaticamente transferidas às suas subclasses, conforme definido na hierarquia de classes.
- **Prevenção da explosão de combinações.** Pela combinação de um número limitado de classes entre si, é possível cobrir um amplo espectro de alternativas de produtos, evitando assim o fenômeno indesejável da explosão de combinações. Como exemplo, na figura 4.6, tem-se uma representação compacta das diversas

possibilidades de lubrificação, refrigeração e isolamento elétrico para mancais de rolamento.

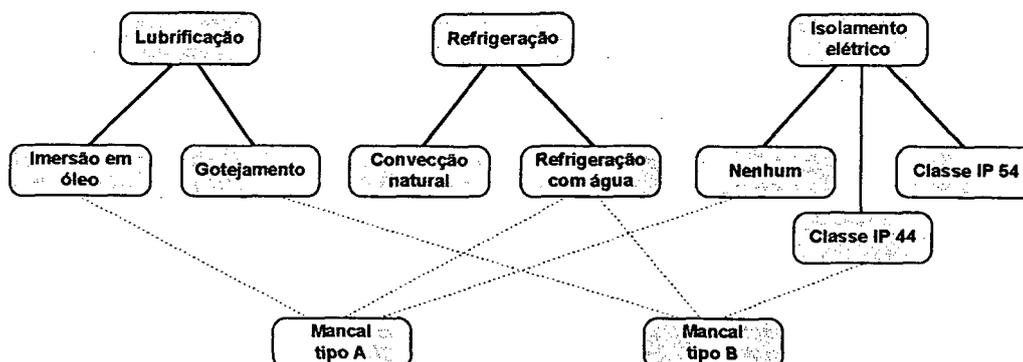


Figura 4. 6 Combinação de classes [36].

- **Reutilização e modularidade.** Uma determinada classe pode ser colocada em uma biblioteca de classes e utilizadas sob diferentes contextos.
- **Facilidade de modificações.** Toda classe é autocontida e possui uma interface com o ambiente externo claramente definida. Isto permite a fácil modificação de detalhes internos às classes sem afetar o ambiente.

4.7.4 Integração e simultaneidade

Os modelos de produto devem facilitar a integração e simultaneidade das diversas fases de desenvolvimento do produto. Assim, por exemplo, buscam-se sistemas CAD-CAM que possibilitem o acompanhamento, em tempo real, do trabalho da equipe de projeto por parte do sistema de manufatura. Ainda no contexto desta tendência, os modelos servem também como poderoso instrumento de suporte à engenharia simultânea em sistemas de produção.

Exemplificando a busca pela integração, a nível computacional, dos modelos de produto cita-se o desenvolvimento do padrão ISO 10303 "*Standard for the Exchange of Product Data Model*" (STEP) que busca definir um formato neutro para a representação e troca de dados referentes ao produto. A meta é a representação completa e independente de todos os dados relativos ao produto durante o seu ciclo de vida. Com relação ao escopo e formas de implementação, o padrão STEP vai bem além dos formatos de intercâmbio de dados anteriormente desenvolvidos, tal como o

IGES que facilita primordialmente o intercâmbio de informações de ordem geométrica. O padrão STEP é a primeira abordagem a introduzir, em uma normalização, a idéia do completo intercâmbio de modelos de produtos a nível computacional [20]. No projeto de desenvolvimento do padrão STEP, como ferramenta de suporte ao modelamento integrado de produtos, foi desenvolvida a linguagem de programação orientada a objetos EXPRESS.

4.7.5 Suporte às primeiras fases do projeto

É crescente a busca por modelos de produto a nível computacional que se adequem às primeiras fases do projeto de um produto. Conforme já mencionado anteriormente, nestas fases o produto ainda não pode ser modelado quanto à sua forma, à sua geometria ou a materiais. Aspectos mais subjetivos, tais como necessidades e funcionalidades, é que são então levadas em conta.

Dentre os trabalhos ilustrativos desta tendência cita-se o desenvolvimento de sistemas especialistas que auxiliem o projetista na análise de necessidades detectadas no mercado e conseqüente elaboração de listas de especificações de projeto de um produto.

Também ilustram a tendência de suporte às primeiras fases do projeto de um produto os diversos modeladores funcionais de produto recentemente desenvolvidos, dentre os quais o modelador FBS desenvolvido por Tomiyama *et al* [40] na Universidade de Tóquio.

O modelador de Tomiyama *et al* [40] foi desenvolvido paralelamente a uma metodologia para lidar com funções denominada modelamento FBS (*Function-Behavior-State*). Nesta metodologia, e conforme será estudado com mais detalhes no capítulo 6, uma função pode ser vista como a abstração, realizada pelo homem, do comportamento de um sistema físico. Um comportamento, por sua vez é visto como uma sequência de estados deste sistema físico. Estados e comportamentos em sistemas físicos são, desta forma, entidades que podem ser determinadas objetivamente pelos seus atributos e suas relações com outras entidades, baseadas em princípios físicos. Funções, por sua vez, incluem intenções humanas, não

podendo ser determinadas objetivamente. Seguindo a filosofia da orientação a objetos, funções e comportamentos são implementadas computacionalmente por meio de classes - ver item 4.7.3 - no modelador FBS.

O modelador FBS primeiramente auxilia o projetista no processo decomposição e estruturação funcional pois, na definição da classe função, possui como uma de suas variáveis, um conjunto de subfunções candidatas à sua decomposição. A seguir, o modelador auxilia o projeto na busca por comportamentos, ou vistas - de forma similar aos princípios de solução vistos anteriormente - capazes de cumprir as funções da estrutura funcional anteriormente desenvolvida. Forma-se, desta maneira, o que Tomiyama *et al* [40] denominam rede de vistas. De posse de uma rede de vistas, o modelador executa, com base na teoria do raciocínio qualitativo, uma simulação do comportamento previsto para o sistema. Como resultado desta simulação podem-se detectar possíveis fenômenos irrealizáveis, efeitos colaterais e funções irrealizáveis. Com o auxílio do modelador FBS, o projetista refinará repetidamente a estrutura de funções e ou a rede de vistas até que se dê por satisfeito.

O grande trunfo de Tomiyama *et al* [40] está em dividir e ao mesmo tempo relacionar a parte subjetiva (função) da parte objetiva (estado e comportamento) do sistema físico a ser projetado. Com isso, consegue-se representar a função subjetivamente e manter a consistência da parte objetiva via computador. A simulação é operada tão somente sobre a parte objetiva do sistema físico, ou seja, sobre o seu comportamento.

Ainda, como exemplo da tendência de suporte às primeiras fases do projeto de um produto, vale ressaltar as recentes tentativas de modelamento simultâneo da funcionalidade e da estrutura física de um produto por meio de estruturas de grafos conceituais. Grafos conceituais são estruturas lógicas que modelam, conjuntamente, conceitos e relações entre conceitos relativos a um dado objeto ou idéia. (nós da estrutura). Nos diagramas, ou modelos, de grafos conceituais, os conceitos são comumente representados por retângulos e as relações entre conceitos por círculos. Os conceitos são conectados às suas relações por intermédio de linhas ou setas.

Os grafos conceituais, utilizados hoje nos mais diversos domínios da ciência, foram originalmente desenvolvidos por Sowa [38] para o processamento de linguagens naturais e para a representação de modelos mentais. A figura 4.7 apresenta um exemplo simples de grafo conceitual extraído de Sowa [38]. O grafo em questão pode ser interpretado numa linguagem natural da seguinte forma: “um macaco come uma noz com uma colher feita com casca de noz”. Os conceitos modelados são: macaco, comer, noz, colher e casca, enquanto que as relações entre conceitos utilizadas são do tipo: agente, objeto, instrumento, material e parte. As direções das setas dependem de como as relações entre conceitos foram definidas por Sowa [38].

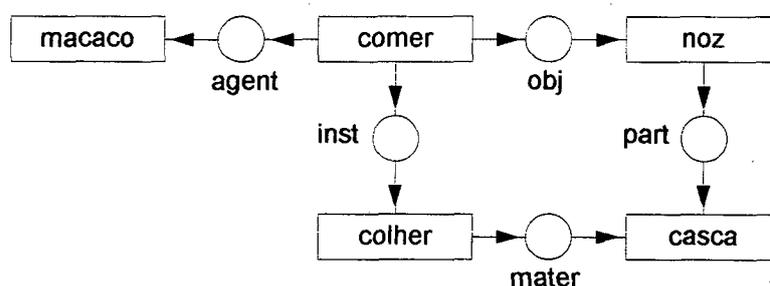


Figura 4.7 Diagrama de grafos conceituais [38].

Hashim *et al* [13], como exemplo, utilizam grafos conceituais em uma metodologia para o reprojeto de produtos. Nesta, a funcionalidade de cada entidade de projeto - seja uma *feature*, um componente, uma parte, uma montagem ou mesmo um produto - é deduzida pela observação das suas interações físicas com as entidades vizinhas. Hashim *et al* [13] apresentam as seguintes funções primitivas, ou de baixo nível, comumente encontradas em sistemas mecânicos: suportar, fixar, posicionar, restringir, selar, cobrir, impulsionar, guiar, grampear e conectar. A figura 4.8 apresenta o modelo de grafos conceituais elaborado para o reprojeto de uma válvula de diafragma.

O ponto negativo da abordagem proposta por Hashim *et al* [13] é com relação ao conceito de funcionalidade de uma entidade de projeto, que se apresenta limitado e restritivo. No exemplo da válvula de diafragma, a função do elemento diafragma se torna tão somente “selar o castelo”. A funcionalidade das entidades de projeto deve ser deduzida sobretudo das suas interações com os fluxos de energia, material e sinal

manipulados. Assim a função do diafragma pode ser mais bem descrita como a de "interromper ou controlar o fluxo de fluido".

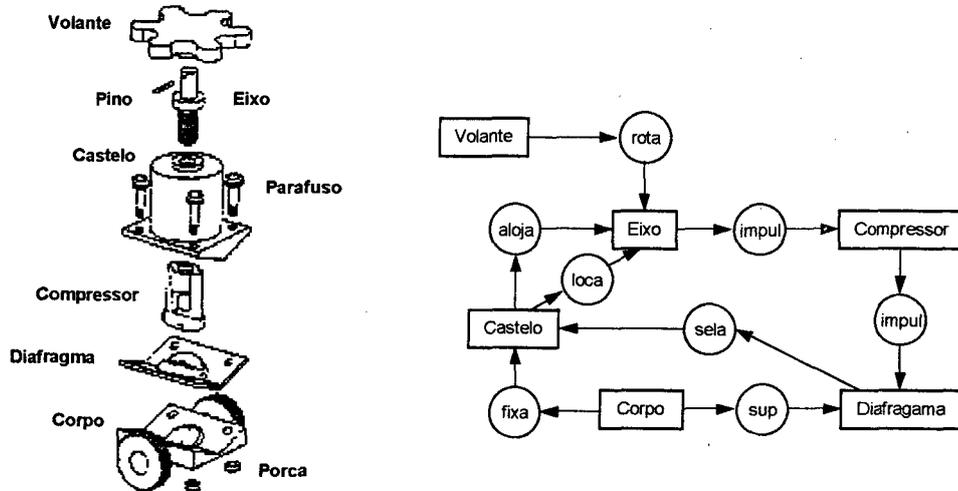


Figura 4. 8 Grafo conceitual para válvula de diafragma [13].

Um segundo exemplo da utilização de grafos conceituais no modelamento de sistemas mecânicos é encontrada em Kjellberg e Schmekel [17]. Estes utilizam grafos para a representação de estruturas de função, princípios físicos e princípios de solução, em consonância com a sistemática de projeto de Pahl e Beitz [27]. Na figura 4.9, modela-se a relação de dependência entre função e princípio de solução para o caso de um redutor.

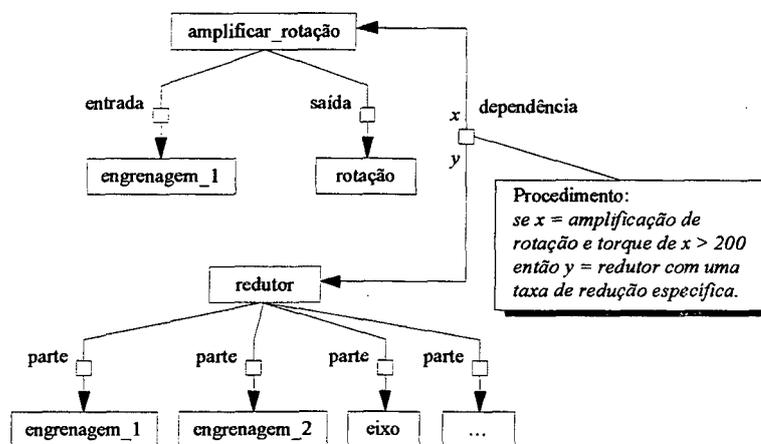


Figura 4. 9 Relação entre função e princípio de solução [17].

Conforme se pode perceber, a utilização de modelos de grafos conceituais no projeto de engenharia tem se concentrado no desenvolvimento de ferramentas computacionais de apoio ao reprojeto de produtos. No entanto, a utilização de grafos

conceituais também pode ser estendida às demais modalidades de projeto estudadas. O desafio existente é com relação à utilização de grafos conceituais no modelamento simultâneo de funções e estrutura física do produto, tal como definidos na metodologia de projeto exposta nos capítulos 2 e 3 desta dissertação.

4.8 Considerações finais

Neste capítulo apresentaram-se as definições básicas e gerais a respeito dos modelos de produto, que vêm a ser o objeto de estudo desta dissertação. A definição dada aos modelos de produto - qualquer representação de um objeto real - é ampla o suficiente para englobar os modelos usados no projeto conceitual. Evitou-se desta forma definições mais restritas, como as que enfatizam a simulação e que melhor se adequam ao projeto preliminar.

Detectou-se a existência de quatro grandes grupos de linguagens utilizadas na modelagem de produtos, a saber: semântica, gráfica, analítica e física. Observou-se a tendência de evolução da linguagem de modelamento do produto no sentido semântica, gráfica, analítica e física ao longo do seu processo de projeto. Também observou-se que a linguagem gráfica é a preponderante em todo o processo de projeto de um produto, mesmo porque o que se deseja no final deste processo é a obtenção de um conjunto de documentos, modelos, que quando fornecidos à fabricação possibilitem a realização física do produto. O projeto conceitual, em função da sua prematuridade e abstração, trabalha predominantemente com as linguagens semântica e gráfica.

Descrição e comunicação - funções intimamente ligadas às linguagens gráficas e semânticas, referidas no parágrafo anterior - são as duas principais funções que os modelos de produto desempenham no projeto conceitual. O projetista usa o modelo para depositar informações a respeito do objeto projetado e utiliza este modelo como instrumento de comunicação entre as demais pessoas envolvidas direta ou indiretamente com o projeto.

Como pode ser observado no item 4.5.2, os modelos de produto da fase de projeto conceitual se enquadram entre os modelos de estrutura - estrutura de funções

ou de órgãos [15], por exemplo - e os modelos icônicos - todas as formas de desenho. Os modelos do projeto conceitual na sua grande maioria não se prestam à simulações: não se pode reproduzir aspectos temporais do produto através destes modelos.

O capítulo também expôs algumas tendências com relação ao modelamento de produtos ao longo do seu processo de projeto e desenvolvimento, ilustradas por exemplos de trabalhos desenvolvidos em instituições e institutos de pesquisas diversos. Abrangência, multiplicidade de aspectos, informatização, integração e simultaneidade, suporte às primeiras fases do projeto e flexibilidade foram as tendências detectadas.

Dentro do projeto conceitual os modelos de produto serão estudados em dois grandes grupos: o grupo dos modelos funcionais do produto (tipicamente de estrutura) e o grupo dos modelos de solução (essencialmente icônicos e de estrutura). Antes porém de iniciar o estudo dos modelos funcionais, o capítulo 5 será dedicado ao estudo dos modelos de tarefa que constituem a entrada do processo de projeto conceitual. Apesar de pertencerem ao domínio do esclarecimento da tarefa, fase anterior ao projeto conceitual, o entendimento dos modelos de tarefa é de fundamental importância para o projeto conceitual. Os modelos de tarefa servem de início e guia para o desenrolar de toda a atividade de projeto.

A figura 4.10 ilustra como foi e como será distribuído o estudo dos diversos modelos de produto e dos processos de projeto, direta ou indiretamente envolvidos com o projeto conceitual, ao longo dos capítulos desta dissertação.

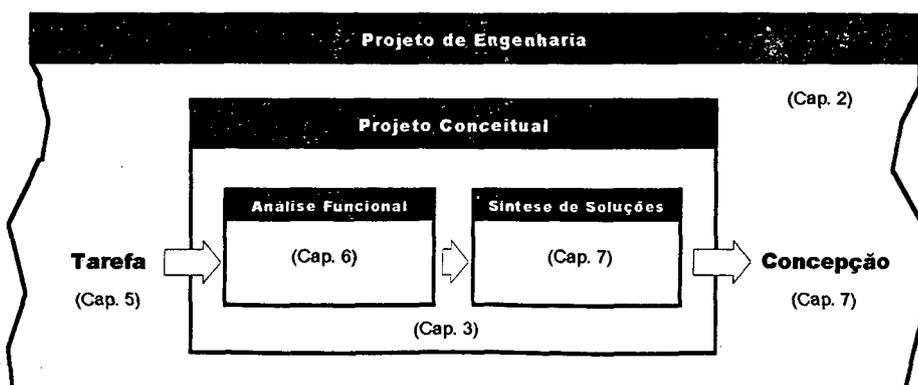


Figura 4. 10 Processo de projeto.

Capítulo 5

Modelos de tarefa

5.1 Introdução

Antes de iniciar o estudo dos modelos de produto pertencentes à fase de projeto conceitual, serão analisados aqueles pertencentes à fase anterior de esclarecimento da tarefa. Tais modelos serão aqui genericamente denominados “modelos de tarefa”. Este é um termo amplo que abrange, entre outros, necessidades, requisitos e especificações, e que também vai de encontro à designação da fase de esclarecimento da tarefa, na qual tais modelos são desenvolvidos.

Os modelos de tarefa deflagram e guiam o processo de projeto, além de servirem de parâmetro para a avaliação da evolução do produto ao longo do seu projeto. O modelo de tarefa - normalmente já na forma de uma lista de especificações de projeto - dentro da abordagem adotada neste trabalho, é visto como a principal entrada do processo de projeto conceitual.

Os modelos de tarefa não carregam consigo informações a respeito de elementos que constituirão o produto ou informações a respeito da sua estrutura. Os modelos de tarefa portam entretanto importantes informações a respeito das propriedades que o produto deverá possuir, das propriedades que não deverá possuir e de restrições que se deve impor ao seu projeto. Os modelos de tarefa modelam não somente o produto que se deseja obter, mas também os próprios processos de projeto e produção deste produto. Assim, especificações referentes a prazos de cumprimento do projeto ou referentes a limitações quanto a maquinaria e ferramental disponíveis não modelam o produto, mas sim o processo para a sua obtenção.

No estudo dos modelos de tarefa será primeiramente analisado o modelo da lista de especificações de projeto em função da sua importância e deste ser considerado o modelo de entrada para o processo de projeto conceitual, tal como definido em capítulos anteriores.

5.2 Lista de especificações

A lista de especificações de projeto - ou simplesmente “especificação de projeto” - é o último e principal modelo da fase de esclarecimento da tarefa. É a referência básica do projeto. A lista de especificações é o ponto de partida (*front-end*) e também o guia para o processo de projeto de um produto. Fornece parâmetros para avaliação dos modelos de produto desenvolvidos ao longo do processo de projeto. Nas palavras de Pugh [28], a especificação de projeto do produto (PDS - *Product Design Specification*) age como um manto envolvendo o núcleo central de atividades do projeto.

O formato e conteúdo da lista de especificações apresentam variações de autor para autor. As primeiras listas a serem propostas aceitavam tanto requisitos quantitativos quanto qualitativos. A lista proposta por Fonseca [10], mais recente, só incorpora informações mensuráveis, tal como será apresentado mais adiante na figura 5.2. Na verdade, a metodologia desenvolvida por Fonseca [10] objetiva a transformação de informações essencialmente qualitativas, as necessidades, em informações quantitativas, os requisitos de engenharia, sem no entanto estabelecer metas numéricas para estes.

Enquanto Fonseca [10] faz uso dos seus “atributos de produto” para ordenar os requisitos na lista de especificações, Pahl e Beitz [26] defendem que os requisitos sejam dispostos em ordem de subsistemas (funções ou montagens) quando os mesmos podem ser identificados, ou através de entradas de um *checklist*. Em projetos originais, aonde de início não se tem estrutura de órgãos ou de funções, a segunda abordagem parece mais sensata.

Os *checklists* constituem-se num importante auxílio à elaboração das especificações de projeto. São compostos por itens com grande probabilidade de ocorrerem numa lista de especificações.

Por vezes, a lista de especificações assume um papel legal, servindo de contrato entre o cliente do projeto e a equipe contratada para executá-lo. Neste caso, é comum denominá-la “especificação de projeto”. Isto, entretanto, não deve levá-la a uma imobilização. Modificações nas especificações devem ser acordadas entre as

partes contratantes e contratadas do projeto - cliente e equipe de projeto respectivamente.

A lista de especificações é um modelo dinâmico, evolucionário, abrangente, que após a realização do projeto deve ter evoluído de modo a representar as características do produto final. Deste modo, no final, o produto projetado deve estar em sintonia com a lista de especificações, ainda que esta tenha se modificado no decorrer do processo de projeto.

Uma questão que recentemente vem despertando crescente interesse nos meios acadêmicos e industriais se refere ao mecanismo de obtenção de boas listas de especificações de projeto a partir de necessidades existentes no mercado. A seguir, a presente dissertação se valerá do trabalho desenvolvido por Fonseca [10] para o estudo dos passos e dos modelos utilizados no processo de esclarecimento da tarefa e na conseqüente elaboração da lista de especificações.

5.3 Processo de esclarecimento da tarefa

Neste item será dada continuidade ao estudo do processo de esclarecimento da tarefa através da análise do trabalho desenvolvido por Fonseca [10] no "desenvolvimento de uma sistemática para a obtenção das especificações de projeto de produtos industriais". As principais etapas e respectivos passos desta sistemática estão ilustrados na figura 5.1.

O trabalho foi motivado pela constatação da inexistência ou precariedade das metodologias para a elaboração de listas de especificações de projeto claras, concisas e eficazes, a partir de necessidades detectadas no mercado. Também inexistia um consenso quanto à definição das personagens e dos modelos envolvidos nas primeiras fases do ciclo de desenvolvimento do produto. O trabalho também contribuiu para esta uniformização.

O trabalho realizado se junta a um esforço desenvolvido com o intuito de implementar um sistema computacional de apoio às primeiras etapas do processo de projeto de produtos industriais.

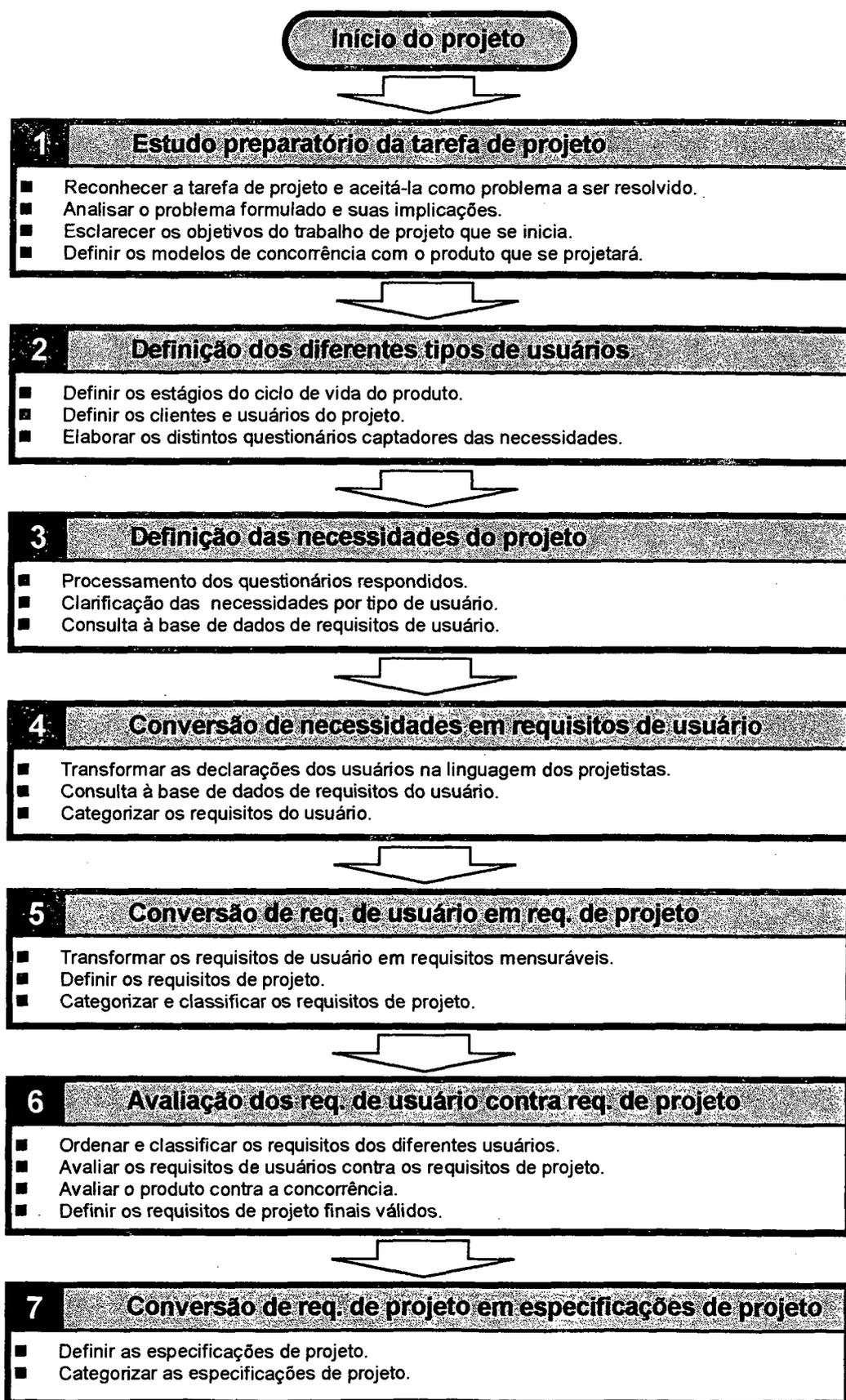


Figura 5. 1 Sistemática para a obtenção de especificações de projeto [10].

O trabalho enfatiza a busca por um conjunto ótimo de especificações para o melhor desenvolvimento de um projeto. O excesso de especificações leva a redundâncias de informações. Busca-se assim uma lista de especificações enxuta, mas ao mesmo tempo completa.

É interessante observar a evolução das informações referentes à tarefa de projeto - agrupadas no que se pode denominar modelos de tarefa - ao longo do seu esclarecimento. Conforme já afirmado no primeiro parágrafo deste item, a essência da metodologia pode ser resumida nas etapas mostradas na figura 5.1 e que inclui os passos mais importantes correspondentes a cada etapa.

Na metodologia desenvolvida, trabalha-se com quatro categorias de propriedades do produto conforme mostrado na tabela 5.1. Para cada uma destas categorias, podem-se definir os respectivos modelos de propriedades do produto. A ordem apresentada representa a evolução dos modelos da tarefa no seu processo de esclarecimento.

Tabela 5. 1 Níveis de propriedades dos produtos [10].

Categoria de Propiedades	Significado
Necessidade	Declaração direta de usuários ou clientes
Requisito de usuário	Necessidade, levada à linguagem de projeto
Requisito de projeto	Requisito mensurável, aceito para o projeto
Especificação de projeto	Característica de projeto e/ou do produto

Identificam-se no mercado três grupos de personagens - clientes, usuários internos e usuários externos - cujas necessidades devem ser apreciadas quando da elaboração da especificação de projeto, conforme mostra a tabela 5.2. Vale ressaltar que os termos cliente e usuário são definidos em relação ao projeto e não ao produto.

Tabela 5. 2 Clientes e usuários do projeto [10].

Categoria	Significado
Cliente	é aquele que requisita a elaboração do projeto.
Usuário interno	é aquele que usa o projeto para a construção do produto, ou para seu reparo, embalagem, descarte, etc.
Usuário externo	é aquele que usará indiretamente o projeto, através do produto físico construído.

Dos clientes e usuários podem ser captadas as necessidades através das seguintes técnicas ou métodos:

- **Questionários estruturados** - é o método mais usual de coleta das necessidades. Consiste na elaboração de questionários dirigidos a cada um dos diferentes clientes e usuários de um projeto.
- **Observação** - neste caso, as necessidades são captadas através da observação do procedimento dos diversos usuários na situação de uso e manipulação do produto: todas as ações que realizam, procedimentos de fabricação, reparo, descarte, etc.
- **Simulação de situações** - executam-se em algumas ocasiões simulações práticas ou computacionais e em outras ocasiões apenas suposições de como procederiam os diversos usuários em diversas situações comuns.
- **Base de dados** - requer a existência de dados acumulados das prováveis necessidades dos diferentes usuários em todas as fases do ciclo de vida do produto. Dali extraem-se as necessidades que mais se assemelham ao novo produto. Normalmente as bases de dados são elaboradas já na forma de requisitos de usuário.

Fonseca [10], na sua metodologia, dá preferência ao método dos questionários estruturados como mecanismo para a captação das necessidades. Apresenta modelos de questionários estruturados para os clientes e diversos usuários internos e externos do projeto.

Devido ao seu alto grau de subjetividade as declarações de necessidades podem não estar em uma forma adequada para uso direto do projetista. Deve-se então converter as necessidades brutas da linguagem dos usuários em requisitos do usuário.

É conveniente iniciar um trabalho de elaboração de uma base de dados de requisitos de usuário, estruturando-a por tipo de produto e desenvolvendo-a em todo o ciclo de vida do produto. Tal base de dados faria parte de um proposto "sistema especialista de apoio à elaboração das especificações de projeto de produtos industriais".

O próximo passo da metodologia consiste na conversão dos requisitos de usuário em requisitos de projeto. Utiliza-se a Casa da Qualidade do QFD como método para tal conversão. Na Casa da Qualidade, os requisitos de usuário são classificados pelo critério de ciclo de vida do produto, de acordo com a sua procedência.

Para ordenar os requisitos de projeto, as etapas do ciclo de vida do produto, mais vinculadas aos clientes e aos usuários internos e externos do produto, não são mais satisfatórias. Para classificá-los faz-se então uso do conceito de **atributos do produto**, quais sejam:

- | | |
|-----------------------------------|--|
| 1. funcional. | 6. de manutenção / reparos. |
| 2. de uso. | 7. econômico / financeiro. |
| 3. de produção / montagem. | 8. de segurança. |
| 4. ergonômico / estético. | 9. de impacto ambiental / descarte. |
| 5. comercial / venda. | 10. legal / norma. |

Os atributos do produto correspondem às soluções de projeto, que por sua vez estão muito relacionadas com os requisitos de projeto.

Fonseca [10] trabalha na elaboração de um programa computacional que auxilie a conversão do modelo de requisitos de usuário no modelo de requisitos de projeto. Também propõe a elaboração de um banco de dados de requisitos de projeto.

Contrariamente a Hauser e Clausing [14], Fonseca [10] recomenda estabelecer uma análise da Casa da Qualidade de uma forma qualitativa, sem propor metas numéricas para os requisitos de projeto, pelo fato de se estar trabalhando em uma fase muito inicial do projeto onde inexistente clareza sobre as propriedades do mesmo e aonde deve-se dar ao projetista alguma liberdade sobre o trabalho que seguirá. O mais importante da análise dos resultados da Casa da Qualidade seria então a hierarquização dos resultados e sua adequada classificação nas categorias correspondentes aos atributos do produto.

Por fim, as especificações de projeto servirão de base para os projetistas na elaboração do projeto. As especificações de projeto são obtidas fundamentalmente a partir dos requisitos de projeto da Casa da Qualidade; especialmente daqueles requisitos de projeto mais fortemente relacionados com os requisitos de usuário.

Embora os requisitos de projeto sejam a principal base para a elaboração das especificações de projeto, outros requisitos de usuários importantes, mesmo qualitativos, e ainda necessidades, formarão parte das especificações. Além disso, as especificações de projeto devem ser acompanhadas de outros elementos importantes, tais como:

- Desejos explícitos do cliente ou dos usuários.
- Restrições de uso, funcionais, financeiras, legais, de normalização e de operação importantes.
- Descrição sintética das características principais do produto ou do projeto.
- Qualquer outro elemento que se julgue importante como elemento para posterior avaliação.

As especificações de projeto, além de proporcionar um guia para projetar, devem claramente refletir os elementos em relação aos quais serão avaliados posteriormente o projeto e o produto resultante.

As especificações de projeto devem ser adequadamente categorizadas e ordenadas. Com intuito de facilitar as etapas imediatamente posteriores do projeto e com o objetivo de obter um conjunto mínimo de especificações, propõe-se que as especificações de projeto sejam classificadas segundo os atributos do produto (função, uso, ...).

Por fim, com base em trabalhos de Pahl e Beitz [26] e Hubka [15], entre outros, Fonseca [10] propõe o modelo apresentado na figura 5.2 como padrão para elaboração do modelo de especificações de projeto.

Nome: _____ Data: _____

Classif.	Nº	Especificação de projeto	D O		Unidade Medição	Objetivo	Sensores	Saídas indesejáveis	Comentários

Figura 5. 2 Modelo de lista de especificações de projeto [10].

A figura 5.3 ilustra o fluxo de modelos de produto existente na fase de esclarecimento da tarefa. Embora todos os modelos de tarefa com que se trabalha utilizem quase que exclusivamente da linguagem semântica, já se pode perceber uma leve evolução no sentido abstrato-concreto ou ainda no sentido qualitativo-quantitativo. Desta forma, uma necessidade de um usuário externo para um automóvel de passeio expressa no modelo de necessidades como: "que seja econômico", certamente tomará uma forma mais concreta ou quantitativa em modelos posteriores, como na lista de especificações. Tal seria uma possível forma: "consumo médio de combustível de 12 a 15 km/l na estrada"

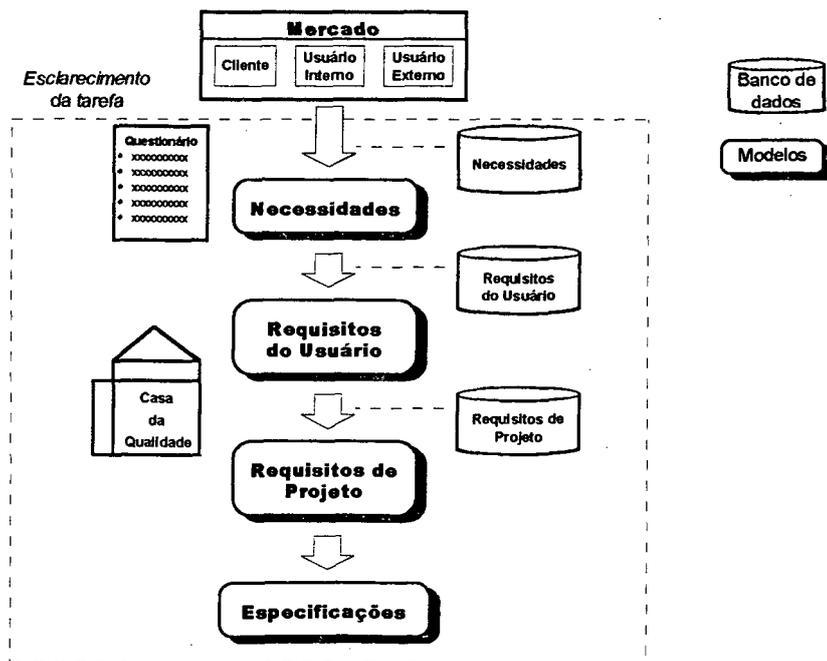


Figura 5. 3 Modelos de produto utilizados no esclarecimento da tarefa.

5.4 Considerações finais

Neste capítulo fez-se uma revisão dos modelos utilizados no processo de esclarecimento da tarefa. Para tal, utilizou-se da metodologia desenvolvida por Fonseca [10] e que está ilustrada na figura 5.1. Pôde-se observar que tal metodologia trabalha com quatro modelos de tarefa correspondentes aos quatro níveis de propriedade do produto por ele definidos: necessidades, requisitos do usuário, requisitos de projeto e especificações. Vale também exaltar o esforço desenvolvido a fim de padronizar os termos referentes aos grupos de pessoas envolvidos com o projeto: cliente, usuário interno, usuário externo, consumidor, etc.

Os clientes do projeto e os usuários do produto expressam suas necessidades através de palavras, faladas ou escritas. Desta forma, as primeiras idéias a respeito do produto são também modeladas por meio de palavras, ou seja, a linguagem semântica é predominantemente utilizada na fase de esclarecimento da tarefa.

Os modelos de tarefa, além de utilizarem predominantemente a linguagem semântica, têm como função principal descrever as propriedades e funções que do produto são requeridas, assim como as restrições impostas ao produto e ao próprio processo de projeto.

Os modelos de tarefa não carregam informações a respeito dos elementos que constituirão o produto ou informações a respeito de sua estrutura. Carregam entretanto importantes informações a respeito das propriedades deste produto.

Detectou-se a importância da lista de especificações de projeto como o último e mais importante modelo da fase de esclarecimento da tarefa. A lista de especificações, além de servir de entrada para o processo de projeto conceitual, acompanhará o projetista ao longo de todo o processo de projeto. A lista de especificações carrega informações tanto a respeito do produto quanto a respeito da própria tarefa de projeto: restrições de recursos e tempo, por exemplo. Também foi enfatizada a natureza dinâmica de uma lista de especificações: um documento que evolui de modo a, no final do projeto, vir de encontro ao produto projetado. Tal evolução se dá no sentido abstrato-concreto, no sentido simples-detalhado ou ainda no sentido qualitativo-quantitativo.

Dos modelos de lista de especificações estudados, observou-se ser o elaborado por Fonseca [10] em sua metodologia o mais completo, pois agrega importantes informações para uma definição clara e objetiva das especificações. Desta forma, tem-se, entre outros, um campo para a determinação de sensores para a medição dos parâmetros das especificações de projeto e um campo para a listagem de prováveis saídas indesejáveis.

A qualidade de um modelo de tarefa está diretamente ligada a alguns fatores que serão listados abaixo:

- *abrangência* - o modelo deve contemplar todos os aspectos relacionados ao produto durante o seu ciclo de vida. Para tal, o projetista deve se valer da ajuda de *check-lists* apropriados.
- *concisão e ausência de redundâncias* - deve-se evitar a repetição descabida de idéias ou requisitos. Se em um modelo de necessidades tem-se o item "ser bonito", um segundo item "agradável esteticamente" seria obviamente redundante.
- *uniformidade de abstração* - um dado modelo de tarefa deve apenas conter requisitos situados num mesmo nível de abstração. Desta forma, os requisitos "operação segura" e "peso entre 20 e 30 kg" não devem pertencer a um mesmo modelo de tarefa.
- *estruturação adequada* - o modelo deve possuir campos para todos os parâmetros que sejam de valia para elaboração de um bom projeto (metas, sensores, saídas indesejáveis, etc.).
- *clareza* - os requisitos devem ser postos de forma clara, em linguagem compreensível a todos que se envolvam direta ou indiretamente com o projeto.

Pode parecer, à primeira vista, que uma elaboração cuidadosa dos modelos necessários ao esclarecimento da tarefa represente um aumento do tempo de elaboração do projeto. Na realidade, o entendimento que se obtém a partir deste processo possibilita uma diminuição no tempo gasto com as demais fases do projeto, resultando assim num tempo total de projeto inferior.

O próximo capítulo dará início ao estudo dos modelos de produto específicos do projeto conceitual pela análise dos seus modelos funcionais e pelo estudo do processo de análise funcional levado a cabo no projeto conceitual.

Capítulo 6

Modelos funcionais

6.1 Introdução

Neste capítulo serão abordados os modelos funcionais do produto, ou seja, aqueles modelos que representam o produto através das suas funcionalidades, ou seja, através das suas funções, tanto as funções que o produto é capaz de realizar externamente na sua interação com o ambiente, quanto as funções internas ao produto, realizadas pelas suas partes.

A importância do modelamento funcional, e do seu estudo, pode ser inferida da própria importância da função para a existência do produto. Pode-se, até certo ponto, fundamentar esta existência na capacidade do produto de desempenhar funções. Alguns produtos até mesmo são denominados pela sua função principal: aspirador de pó, enceradeira, liquidificador, etc. Assim, formas e materiais em um produto existem para realizar funções através de efeitos predominantemente físicos. No projeto, o caminho seguido é o inverso. Primeiramente estabelecem-se as funções que do produto são requeridas e em seguida associam-se formas e materiais que as realizem através de efeitos físicos.

É no projeto conceitual, no entanto, que o modelamento funcional assume sua maior importância. Como já visto no capítulo 3, o projeto conceitual engloba duas principais subfases: a análise funcional e a síntese de soluções. No projeto conceitual, modela-se o produto primeiramente em termos da função que o produto é capaz de realizar como um todo, em seguida, em termos de estruturas de funções de menor complexidade que representem a função total do produto. De grande importância são as estruturas funcionais construídas a partir de operações básicas padronizadas, pois permitem uma melhor manipulação em busca de alternativas funcionais para o produto e facilitam o processo de busca por princípios de solução.

O presente capítulo objetiva a apresentação e análise crítica dos modelos funcionais do produto utilizados no projeto conceitual. Antes, no entanto, de deter-se no estudo de modelos específicos, será apresentada uma discussão a respeito do conceito de função e da sua modelagem.

6.2 Função

Este item é dedicado ao estudo do que vem a ser uma função, dentro do âmbito da ciência de engenharia - também denominada por alguns autores [2] "função técnica". O estudo englobará a definição do termo "função" e a análise das formas de modelamento de uma função individual.

6.2.1 Definição

Antes de buscar uma definição própria para o termo "função", serão analisadas algumas propostas de autores envolvidos com o projeto funcional de produtos.

Pahl e Beitz [26] definem função como "a relação entre entradas e saídas de um sistema". Back [2], semelhantemente, afirma que uma "função é a relação entre causas e efeitos das grandezas de entrada e saída" de um sistema. Tais autores representam uma primeira tendência que busca relacionar o conceito de função a entradas e saídas (ou causas e efeitos) de um sistema físico.

Uma segunda tendência de autores relaciona a função de um objeto ou sistema ao seu comportamento. É o que faz Ullman [41] quando afirma que função é "o comportamento necessário para cumprir os requisitos" de um projeto ou Tomiyama *et al* [40] ao afirmar que uma função é "uma descrição de comportamento abstraída pelo homem através do reconhecimento deste comportamento a fim de utilizá-lo".

Para uma definição própria de função será seguida a primeira tendência de autores, pois é a que melhor se adequa ao modelamento do produto em termos de estruturas de funções. As entradas e saídas servindo de elos entre as funções adjacentes. Ao longo do esclarecimento da definição a ser apresentada, se chegará à

formulação do conceito de função tal como apresentada pelos autores da segunda tendência.

Deste modo, pode-se sucintamente afirmar que no âmbito da engenharia uma **função é a relação existente entre as entradas e as saídas de um sistema físico**. Como já visto, pode-se também falar em termos da resposta (saída) deste sistema a um dado estímulo (entrada) ou da relação entre causa e efeito. A seguir, alguns esclarecimentos a respeito da definição apresentada.

Uma função é realizada por um sistema por meio de um dado comportamento, ou seja, uma seqüência - discreta ou contínua - de estados deste sistema. Por estado de um sistema compreende-se a totalidade dos valores de suas propriedades em um dado instante. Assim, um sistema físico, quando submetido a um dado estímulo, comportando-se de uma determinada forma, produz uma determinada resposta. Há de se realçar o caráter intencional implícito no conceito de função: estimula-se o sistema com o propósito de que o mesmo responda de uma determinada forma.

Um mesmo sistema físico pode desempenhar diversas funções através de distintos comportamentos. Uma barra metálica tanto pode conduzir eletricidade como pode transmitir uma força axial. Um determinado óleo mineral tanto pode servir para fins de lubrificação de partes em movimento relativo em um equipamento mecânico quanto para isolamento de carga em um equipamento elétrico.

Algumas vezes o mesmo comportamento pode gerar mais de uma função, dependendo da forma como o mesmo é percebido pelo homem - percepção esta de sentido utilitário. O sistema da figura 6.1, composto por um par engrenagens e respectivos eixos, através do mesmo comportamento, realiza simultaneamente duas funções distintas e interligadas: amplia o torque de entrada e reduz a velocidade de rotação de entrada. Outro exemplo seria o de um filamento incandescente que simultaneamente produz luz e calor quando submetido a uma tensão elétrica.

Por outro lado, uma mesma função também pode ser desempenhada por diversos sistemas. A figura 6.2 ilustra sistemas distintos realizando funções similares. A função "ampliar força", por exemplo, tanto pode ser desempenhada por uma alavanca quanto por um macaco hidráulico.

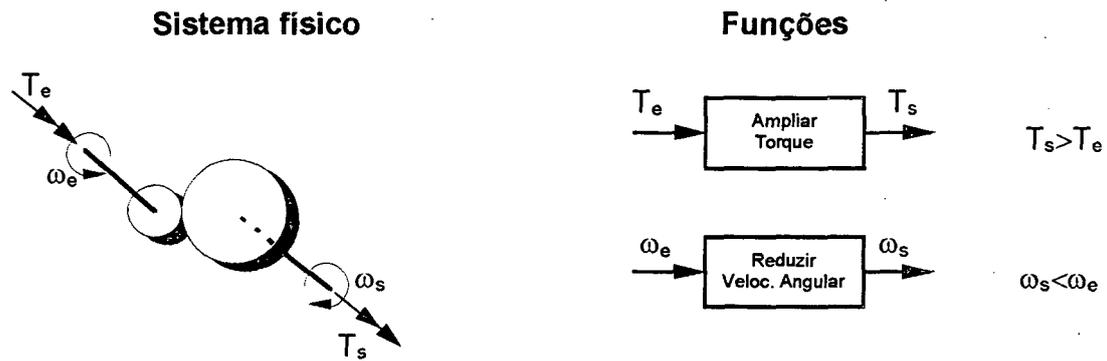


Figura 6. 1 Par de engrenagem e possíveis funções.

A função é assim uma abstração do comportamento de um sistema feita pelo homem com o intuito de utilizá-lo. É portanto um conceito subjetivo, dependente de como o comportamento é percebido e utilizado pelo homem. A figura 6.3 tenta ilustrar os conceitos de estado, comportamento e funções de um sistema. Note que a objetividade no sistema, segundo a figura, se estende tão somente ao conceito de comportamento. O conceito de função já depende da interpretação humana.

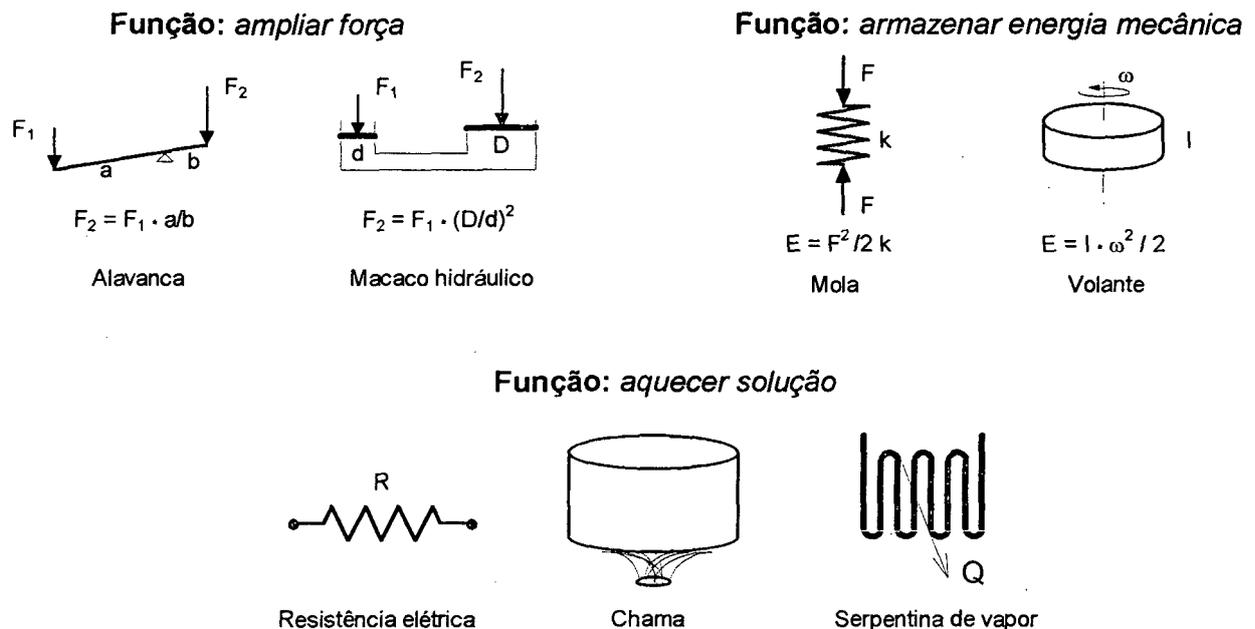


Figura 6. 2 Funções realizadas por distintos sistemas físicos.

O conceito de função, apesar de poder ser abstraído do comportamento de sistemas físicos concretos, tem existência própria e independente desses. Pode-se pensar numa determinada função dissociada de qualquer sistema físico concreto.

Repetindo, a função é a relação existente entre as entradas e saídas de um sistema. Para pensar em função, é suficiente pensar apenas nas entradas e nas saídas que se deseja, ou seja, pensar nesta relação. É desnecessário pensar em como se processará tal relacionamento entre entradas e saídas. Desta forma a função pode ser vista como uma “caixa preta”.

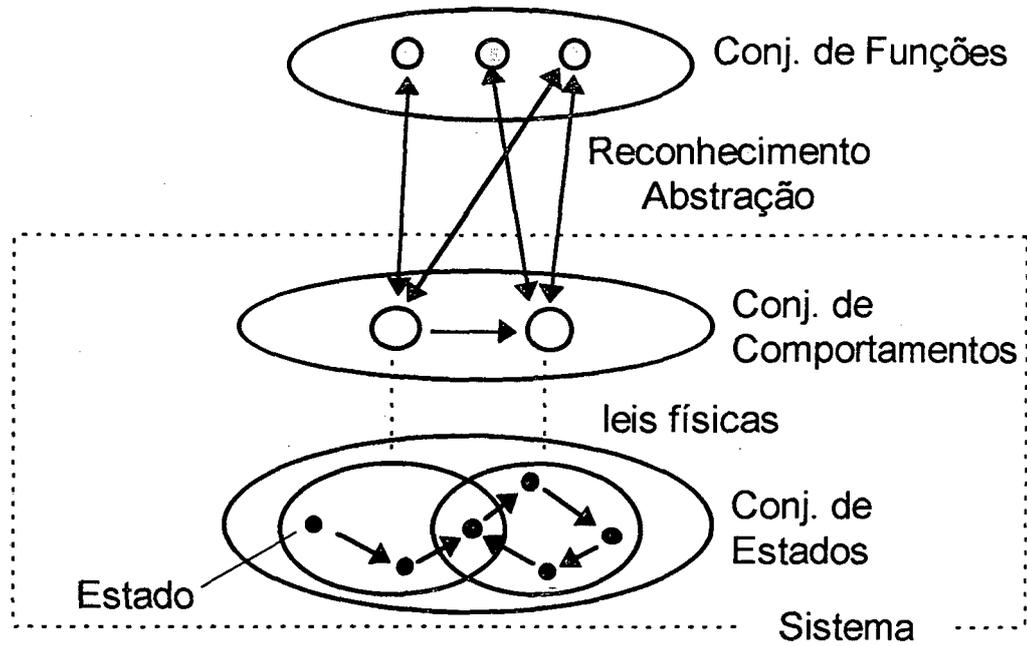


Figura 6. 3 Estados, comportamentos e funções de um sistema (adaptado de [40]).

O conceito de função no âmbito dos sistemas técnicos está intimamente ligado ao conceito de função matemática. Na matemática, uma função é a associação - relação - de uma magnitude x com uma magnitude y de forma que um único valor, ou mais de um valor (função multi-valor), de y é atribuído para cada valor de x . Também, no caso das funções técnicas, tem-se uma associação de uma (ou mais de uma) saída para cada entrada.

Como será visto mais detalhadamente em itens posteriores, as entradas e saídas de uma função técnica podem ser enquadradas dentre as categorias: energia, material e sinal. Conforme afirma Back [2]: “em um sistema técnico, apenas as propriedades e estado de energia, sinal e material, bem como os seus fluxos é que são alterados.”

6.2.2 Modelamento

Semanticamente, uma função é modelada por um par *verbo+substantivo* (ou *verbo+substantivos*): *ampliar força*, *armazenar energia*, *transformar energia mecânica em energia elétrica* ou *unir partes metálicas* (função relativamente mais complexa). Utiliza-se apenas um substantivo quando a entrada e a saída da função são coincidentes: a função apenas altera o seu estado. Assim na função *unir partes metálicas*, entram as partes metálicas soltas (estado 1) e saem as mesmas partes metálicas unidas (estado 2). Necessitam-se utilizar dois substantivos, quando as entradas e saídas da função não mais coincidem, tal como em *transformar energia mecânica em energia elétrica*.

Para fins de modelamento gráfico, uma função técnica é representada por um bloco, com setas indicando as entradas pelo lado esquerdo e as saídas pelo lado direito - ver figura 6.4. A função pode ser modelada utilizando-se sua descrição semântica (par *verbo+substantivo*) no interior do bloco (caso a) ou apenas fazendo-se referência às suas entradas e saídas - representação "caixa preta" (caso b). Também é comum a utilização de símbolos padronizados na representação das funções (caso c), principalmente em domínios específicos da engenharia, tal como a hidráulica, a pneumática e a eletrônica.

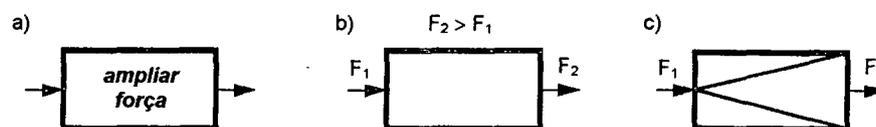


Figura 6. 4 Representações gráficas de funções técnicas individuais.

6.3 Modelos funcionais no projeto conceitual

Os modelos funcionais representam o produto através de suas entradas e saídas desejadas, de como o produto deve responder quando submetido a determinados estímulos. O produto é representado abstratamente em função do que dele é esperado obter. O modelo funcional não deve fazer menção a formas, mas sim a intenções.

Os modelos funcionais utilizados no processo de concepção de um produto são basicamente os ilustrados pela figura 6.5. Juntamente com os modelos estão representados os principais métodos utilizados na elaboração de um novo modelo a partir de um modelo anterior.

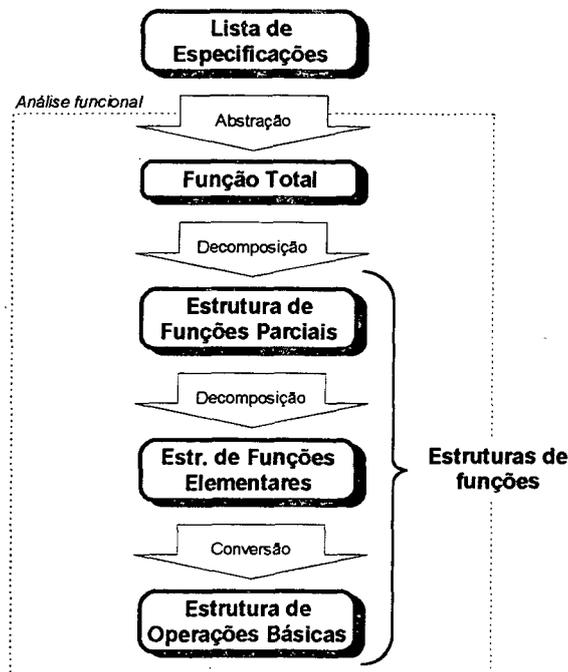


Figura 6. 5 Modelos funcionais de um produto.

6.3.1 Função total

No modelamento funcional, o primeiro passo normalmente dado na busca de uma estrutura de funções para o produto projetado é a elaboração de um modelo de **função total**, ou global, deste produto. A função total deve expressar a principal função (ou principais funções) de um produto através do relacionamento entre as suas entradas e as suas saídas. Deve ser um resumo do que se deve esperar do produto, funcionalmente.

A representação gráfica da função total é normalmente feita por meio de um bloco sujeito a fluxos de energia (E), material (M) e sinal (S): entradas e saídas do sistema, conforme mostrado na figura 6.6.

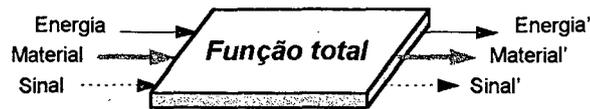


Figura 6. 6 Representação esquemática da função total.

A figura 6.7, ilustra a representação esquemática da função total de um dispositivo destinado a lavar roupas. Por um lado entra-se no sistema com roupas sujas (M), sabão (M), água limpa (M) e energia (E) - não necessariamente elétrica - e o grau de limpeza requerido (S). Por outro lado, espera-se obter do sistema roupas limpas (M), água suja (M) e energia (E). A saída "energia" representa a parcela de energia que sai do sistema sob formas indesejáveis, tais como: calor, vibrações e ruídos. Embora indesejáveis, tais saídas dificilmente são evitadas em sistemas físicos.

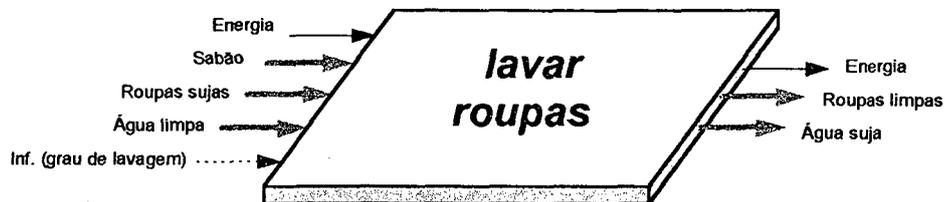


Figura 6. 7 Função total "lavar roupas".

Pode-se argumentar que a função total da figura 6.7 é a função total de uma máquina de lavar roupas comercial, destas normalmente encontradas em residências. É; mas não é só destas. É a representação da função total de qualquer dispositivo que realize as transformações dos estados das entradas e das saídas descritas na figura - talvez até um simples tanque de lavar roupas, que é acionado pela energia humana. O conceito de função, como já visto anteriormente, independe da existência de sistema físico concreto.

A função total é normalmente montada pela abstração dos requisitos funcionais contidos na lista de especificações de projeto. A seguir, apresenta-se um possível roteiro para a elaboração de uma função total a partir de um modelo de especificação de projeto.

1. Localizam-se, dentre as especificações de projeto, aquelas que dizem respeito às funções (primárias ou secundárias) do produto.

2. Detectam-se, nessas especificações funcionais, as principais entradas e saídas do sistema em termos de fluxos de energia, material e sinal.
3. Estabelecem-se os estados das principais entradas e saídas listadas no item anterior.
4. Detectam-se, dentre os fluxos listados, quais os fluxos principais de entrada e de saída do sistema.
5. Do relacionamento entre os fluxos principais de entrada e de saída do sistema (e de seus estados), tenta-se expressar a função total em termos de um par *verbo+substantivo*.
6. Organizam-se os dados levantados nos itens acima na forma de um diagrama de blocos, tal como apresentado na figura 6.6.

A elaboração da função total do sistema ajuda o projetista a sintetizar o que realmente se espera do produto projetado. Também pode servir de ponto de partida para o processo de elaboração de uma estrutura funcional para o produto, como será visto no próximo item.

Alternativamente à representação gráfica e esquemática apresentada anteriormente, pode-se trabalhar com uma função total expressa semanticamente por uma declaração única e concisa das funções mais importantes do produto. É o que faz Ullman [42] ao tentar exprimir a função total de um pára-lama removível para bicicletas do tipo mountain bike:

“Projete um dispositivo facilmente removível que possa proteger o ciclista de uma mountain bike da água e da lama sem interferir com a operação da bicicleta”

Seguindo uma linha de concisão, pode-se reformular a proposta de Ullman [42] da seguinte forma:

“Proteger ciclista de mountain bike contra água e lama”

“Ser facilmente removível” e “não interferir com a operação da bicicleta” são importantes requisitos de projeto, mas que não devem entretanto integrar a função total, pois não são requisitos funcionais.

6.3.2 Estrutura de funções

O processo de análise funcional deve culminar com a elaboração de um modelo de estrutura de funções de baixa complexidade interligadas por fluxos de energia, material e sinal. Tal é o modelo de “estrutura de funções” que, dependendo do grau de amadurecimento, pode se apresentar como uma “estrutura de funções parciais”, como uma “estrutura de funções elementares” ou ainda como uma “estrutura de operações básicas”.

Antes de prosseguir com o estudo das estruturas de funções para o produto, cabe aqui uma pequena discussão a respeito do que se entende por complexidade de uma função no âmbito do projeto de engenharia. O termo complexidade normalmente se associa a um sistema físico concreto e se relaciona ao número de elementos ou partes do qual o mesmo é composto. Uma possibilidade de definir complexidade, a nível de funções, é afirmar que uma função é menos complexa que a sua função total (ou parcial da qual foi desmembrada) por levar os valores das variáveis que definem as entradas e saídas do sistema a estados intermediários entre os seus estados iniciais e finais. Nesta definição, falta um esclarecimento do que venha a ser exatamente um estado intermediário entre dois outros estados de um dado conjunto de variáveis. Também como indicativo do grau de complexidade de uma função, pode-se pensar no número de entradas e saídas relacionadas pela função, quanto maior, mais complexa. Desta forma, a função total relaciona todas as entradas e saídas do sistema a ser projetado, enquanto as funções parcial relacionam apenas partes delas. Concluindo, pode-se afirmar que a complexidade de uma função é uma característica bastante relativa e dependente do contexto no qual a mesma está inserida.

Uma estrutura de funções é normalmente representada utilizando-se um diagrama de blocos com fluxos de energia, material e sinal. Pahl e Beitz [26] sugerem o uso dos símbolos da figura 6.8 para a elaboração de uma estrutura de funções.

A fronteira do sistema a ser projetado representa os limites deste em relação ao ambiente que com o mesmo interage. A nível de projeto funcional do produto a fronteira do sistema possui uma existência meramente abstrata. Mesmo ao término do

processo de projeto a fronteira funcional não necessariamente se concretiza fisicamente.

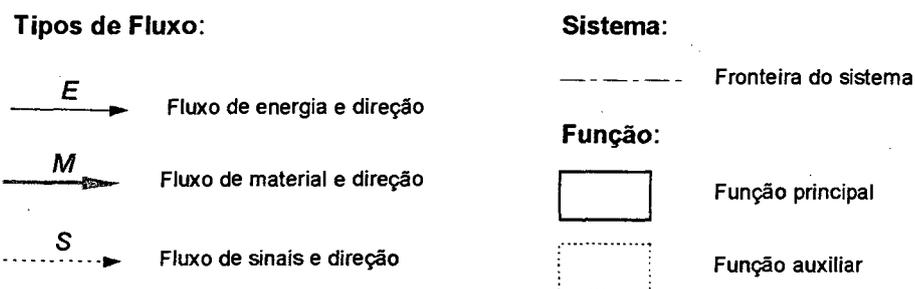


Figura 6. 8 Símbolos para a elaboração de uma estrutura de funções [26].

Uma estrutura de funções é normalmente obtida pela decomposição da função total em funções de menor complexidade. A estrutura de funções obtida é recursivamente decomposta até se obter uma estrutura com funções no nível de complexidade requerida, conforme ilustrado na figura 6.9.

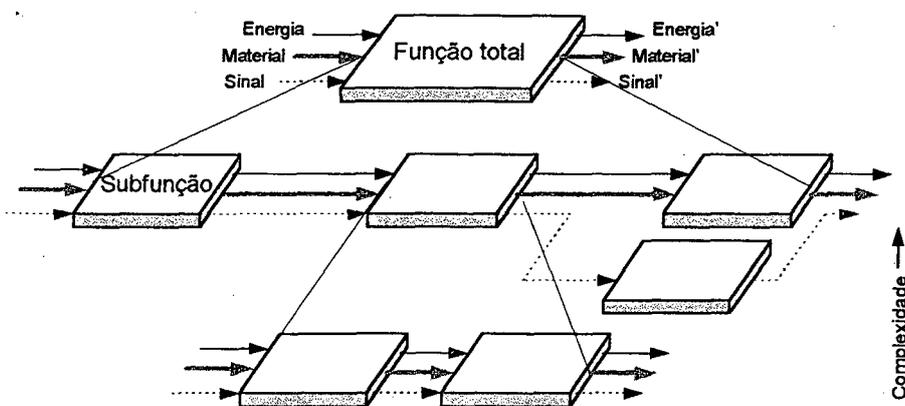


Figura 6. 9 Desdobramento da função total em funções mais simples [26].

Ullman [42], entre outros autores, recomenda que se desdobre o modelo de estrutura de funções o tanto quanto for possível. O objetivo neste caso é a elaboração de um modelo de **estrutura de funções elementares**, ou seja, um modelo de estrutura de funções que por definição não podem mais ser desdobradas. Os modelos de estruturas de funções elaboradas no caminho entre o modelo de função total e o modelo de estrutura de funções elementares são denominados de **modelos estruturas de funções parciais**.

A decomposição de uma estrutura de funções, além de facilitar a busca por soluções, proporciona um melhor entendimento do problema de projeto. A

decomposição de funções, no entanto, não é um trabalho que se faça a um só passe; é na realidade um trabalho árduo.

A função total é o principal ponto de partida para elaboração da estrutura de funções. A estrutura de funções deve em última análise refletir a função total do produto. As fronteiras da estrutura de funções podem ser obtidas a partir do contorno da função total, com as suas entradas e saídas, conforme mostrado na figura 6.10 para o caso do projeto de um dispositivo destinado a lavar roupas.

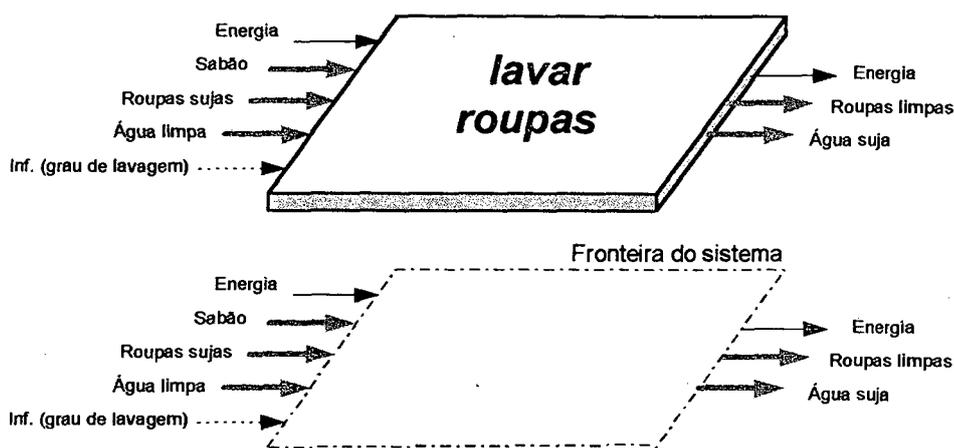


Figura 6. 10 Contorno de uma estrutura de funções.

É conveniente que se comece a esboçar o interno da estrutura de funções pelo desdobramento de um processo (existem normalmente vários) necessário à conversão do fluxo principal do sistema (entradas e saídas principais). A figura 6.11 ilustra o desdobramento do processo necessário para transformar a entrada "roupas sujas", na saída "roupas limpas", pertencentes ao fluxo principal do sistema.

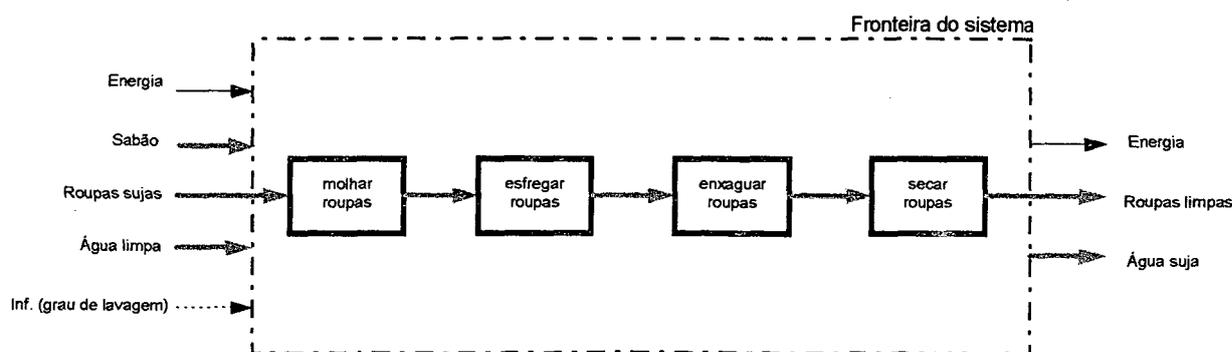


Figura 6. 11 Funções parciais para "lavar roupas".

Também é possível começar a elaborar a estrutura de funções a partir de funções cujas entradas ou saídas cruzem as fronteiras assumidas para o sistema. Destas, determinam-se as entradas e saídas para as funções vizinhas, em outras palavras, trabalha-se o sistema da fronteira para dentro, sempre compatibilizando as grandezas de entrada e de saídas das funções adjacentes.

Paulatinamente, a estrutura de funções vai se desenvolvendo pela agregação de fluxos e funções auxiliares ao fluxo principal e pelo desdobramento das funções existentes em funções de mais baixo nível. No modelo da figura 6.12, em relação ao modelo da figura 6.11, agregaram-se todos os demais fluxos que cruzam a fronteira do sistema e também as funções auxiliares “misturar água e sabão”, “produzir movimento” e “alternar movimento”. A saída “energia” não mais aparece, pois seu fluxo não agrega funções importantes para o sistema e talvez prejudicasse a visualização do diagrama, pois é um subproduto (saída) de todas as demais funções do diagrama.

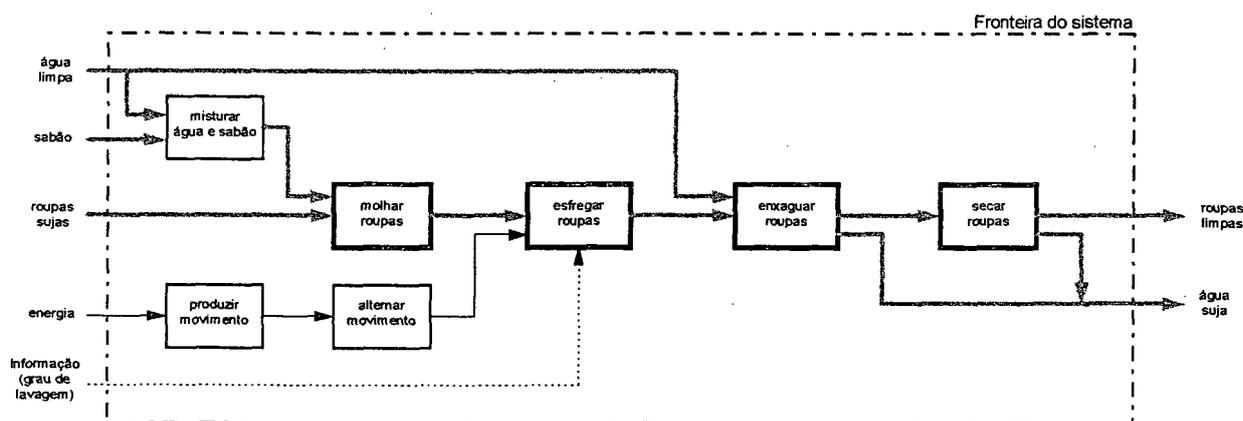


Figura 6. 12 Estrutura de funções para “lavar roupas”.

Deve-se desenvolver e desdobrar a estrutura de funções até que as suas funções se encontrem a um nível de complexidade que permita a associação de princípios de solução. Isto obviamente dependerá do contexto em que se insere o projeto. No projeto de uma instalação de bombeamento de fluidos, a função “transformar energia elétrica em energia mecânica” não necessitará ser desdobrada já que existem soluções comerciais disponíveis a um custo acessível no mercado. No entanto, esta mesma função toma um *status* de função total num escritório de projetos

de uma fábrica de motores. Neste caso, a função deverá ser sucessivamente desdobrada. Desdobrada mesmo ao nível de *features*, no que Rosa *et al* [33] denominam projeto conceitual da peça em contraposição ao projeto conceitual do produto como um todo. Também dependerá muito do grau de novidade da tarefa e da experiência do projetista o quanto as estruturas de funções serão desenvolvidas [26].

As estruturas de funções só se completam com a especificação de todos os fluxos de energia, material e sinal [26]. Deve-se garantir a compatibilidade entre funções adjacentes: as entradas para cada função devem corresponder às saídas para a função anterior. A estrutura de funções deve ser mantida tão simples quanto possível, de modo a levar a soluções simples e econômicas [26].

A análise funcional não deve nunca levar imperativamente a uma única estrutura de funções. A força da análise funcional está justamente na possibilidade de criar e comparar, num nível abstrato, alternativas para a estrutura funcional do produto.

Nos casos de reprojeto, a estrutura de funções é obtida pela decomposição do produto a ser reprojeto. Seus órgãos são analisados quanto às funções que desempenham e aos fluxos de energia, material e sinal que relacionam. A estrutura de funções é montada em função de tal análise.

Um último passo que pode ser dado no processo de desenvolvimento de um modelo de estrutura de funções é a conversão deste em um modelo de estrutura de operações básicas. Tal procedimento, não necessariamente obrigatório, deve ser aplicado de preferência à estrutura de funções maximamente desenvolvida, pois a conversão de função e operação básica é facilitada quando se trabalha com funções de baixa complexidade. Na figura 6.13, converteu-se o modelo de estrutura de funções da figura 6.12 em um modelo de operações básicas, utilizando a simbologia proposta por Koller [18]. Note que a função "*enxaguar roupas*", em razão da sua complexidade, teve que ser convertida em duas operações básicas: a primeira que mistura água limpa com a roupa suja ensaboada e esfregada e a segunda que separa o excesso da água adicionada - agora misturada com o sabão e com a sujeira - da roupa.

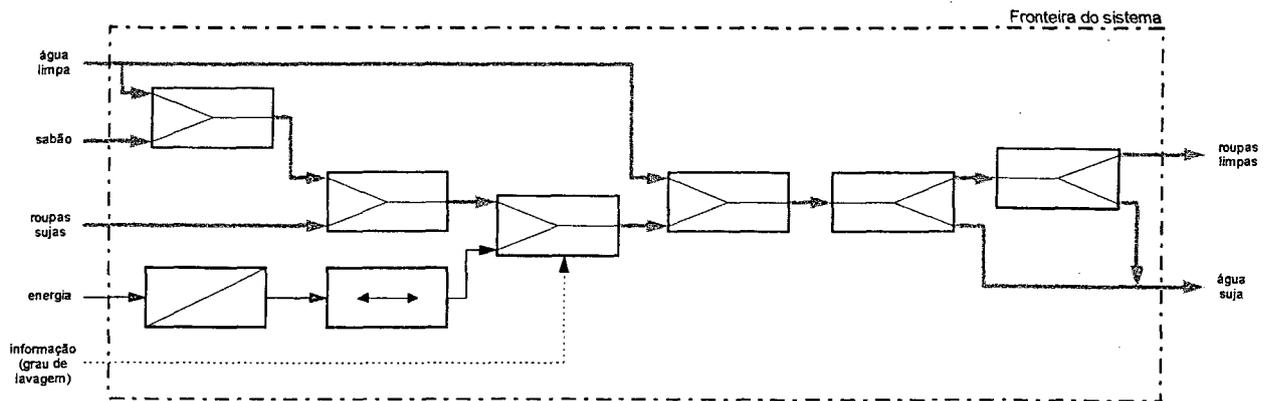


Figura 6. 13 Estrutura de operações básicas para “lavar roupas”.

A estrutura de operações básicas obtida pode ser manipulada pelos seguintes processos: desdobramento ou composição de operações, alteração das posições das operações na estrutura, alteração nas fronteiras do sistema, entre outros. Tal manipulação visa a obtenção de alternativas de estruturas funcionais para o problema que devem ser avaliadas em relação às especificações de projeto. Somente a estrutura mais promissora (ou as duas mais) deve ser levada a diante no processo de projeto do produto.

Na opinião de Back [2], a diferença entre função elementar e operação básica está na definição de suas grandezas de entrada e de saída. As grandezas deverão ser predefinidas nas funções elementares e devem ser deixadas em aberto, o quanto a formulação do problema permitir nas operações básicas. A estrutura de operações básicas se distingue da estrutura de funções elementares somente pela omissão da definição de entradas e saídas. Isto quer dizer que na estrutura de operações básicas só são definidas as operações ou ações e não o que deve ser transformado. Ainda segundo Back [2], a formulação das alternativas de solução em termos de estruturas de operações básicas é adequada quando for indiferente qual o tipo de energia, material e sinal deverá ser transformado.

A seguir, serão discutidas, um pouco mais detalhadamente, as operações básicas utilizadas no modelamento de estruturas funcionais de um produto.

6.3.3 Operações básicas

Neste item serão estudadas as operações básicas utilizadas no modelamento de produtos, como já visto superficialmente no item anterior. Serão estudadas algumas bases de operações físicas propostas e discutidas suas vantagens e limitações. Também serão apresentadas bases matemáticas e lógicas para o modelamento de sistemas técnicos.

O modelamento do produto em termos de operações básicas se baseia nos seguintes pressupostos:

- os complicados fenômenos em sistemas técnicos podem ser reduzidos a um número finito de operações físicas, matemáticas e lógicas;
- somente as propriedades e estado de energia, material e sinal, bem como os seus fluxos é que são transformados por tais operações.

6.3.3.1 Operações físicas básicas

Diferentemente do que ocorre com os processos algébricos e lógicos, a modelagem dos processos físicos em sistemas técnicos por meio de operações básicas ainda não está completamente esclarecida. Ainda não existe, por exemplo, uma base de operações que seja universalmente aceita para sistemas de engenharia em geral. A seguir será exposta a base proposta por Koller [18].

Fazendo uma analogia explícita ao fluxo de um rio, e incluindo as operações básicas de transformar, ampliar e mudar de direção, Koller [18] apresenta uma possível base composta por doze operações básicas e suas inversas - ver figura 6.14.

A cada operação listada, tem-se uma operação inversa. Na figura 6.15, uma bomba hidráulica centrífuga realiza a mistura de material (água, se for o caso, a ser bombeada) com energia em forma de pressão e movimento. Uma turbina tipo Francis, por sua vez, realiza a operação inversa: separa a energia do fluido que a propõe. Um transformador de corrente alternada tanto pode ampliar quanto reduzir a tensão de entrada no mesmo.

OPERAÇÃO	REPRESENTAÇÃO	OP. INVERSA	REPRESENTAÇÃO
Emitir (fonte)		Absorver (Absorvedouro)	
Transmitir		Isolar	
Agrupar		Dispersar	
Guiar		Não guiar	
Transformar		Retrotransformar	
Ampliar		Reduzir	
Mudar de direção		Mudar de direção	
Retificar		Oscilar	
Ligar		Interromper	
Misturar		Separar	
Unir		Dividir	
Acumular		Desacumular	

Figura 6. 14 Operações físicas básicas, segundo Koller [18].

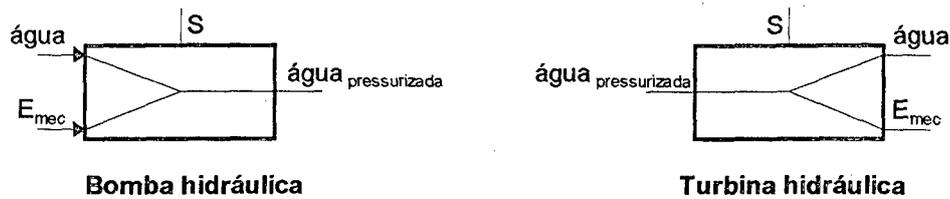


Figura 6. 15 Operações básicas inversas de misturar e separar.

Cada operação básica apresenta entradas e saídas. Na maioria dos casos permite-se ainda a introdução de uma grandeza de controle. Uma alavanca, como a mostrada na figura 6.16, é um sistema que realiza uma ampliação ou redução de uma força e além disso pode permitir a introdução de uma grandeza de controle: a relação a/b entre os braços da alavanca.

Função: *ampliar força*

Operação básica: ampliar

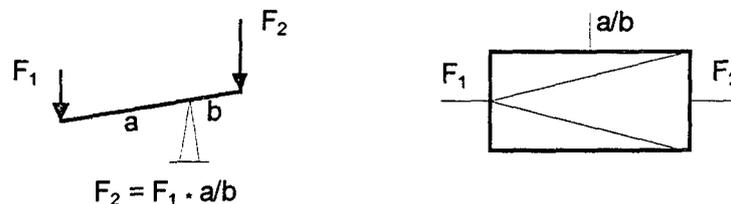


Figura 6. 16 Alavanca com relação entre braços variável.

Um das grandes vantagens de se trabalhar com operações básicas padronizadas é a possibilidade de utilização de catálogos para a busca de princípios de solução, como o apresentado por Roth [34], por exemplo. Nestes catálogos os princípios de solução são tabelados de acordo com a operação básica e com os fluxos manipulados: energia, material e sinal. Abre-se desta forma uma possibilidade de automação parcial do projeto conceitual pela formação de bancos de dados computacionais de princípios de solução.

A base apresentada por Koller [18], como já dito anteriormente, não é a única. Pahl e Beitz [26], por exemplo, trabalham com uma base de cinco operações básicas - denominadas *funções genericamente válidas* - derivadas das características tipo, magnitude, número, lugar e tempo com respeito à conversão de energia, material e sinal [26], conforme mostrado na tabela 6.1. Base esta, na realidade, proposta por Krumhauer [21].

Tabela 6. 1 Funções genericamente válidas de Pahl e Beitz [26].

Característica	Funções gener. válidas	Símbolos	Explicações Entrada (E)/Saída (S)
Tipo	Transformar		Tipo e forma de E e S diferem
Magnitude	Variar		$E < S$ $E > S$
Número	Conectar		Número de $E > S$ Número de $E < S$
Lugar	Conduzir		Lugar de $E \neq S$ Lugar de $E = S$
Tempo	Armazenar		Tempo de $E \neq S$

Embora inexista uma convergência quanto à identificação e à representação das operações básicas, pode-se perceber uma equivalência entre as propostas de diversos autores para bases de operações básicas. Esta equivalência é apresentada por Pahl e Beitz [27] na figura 6.17.

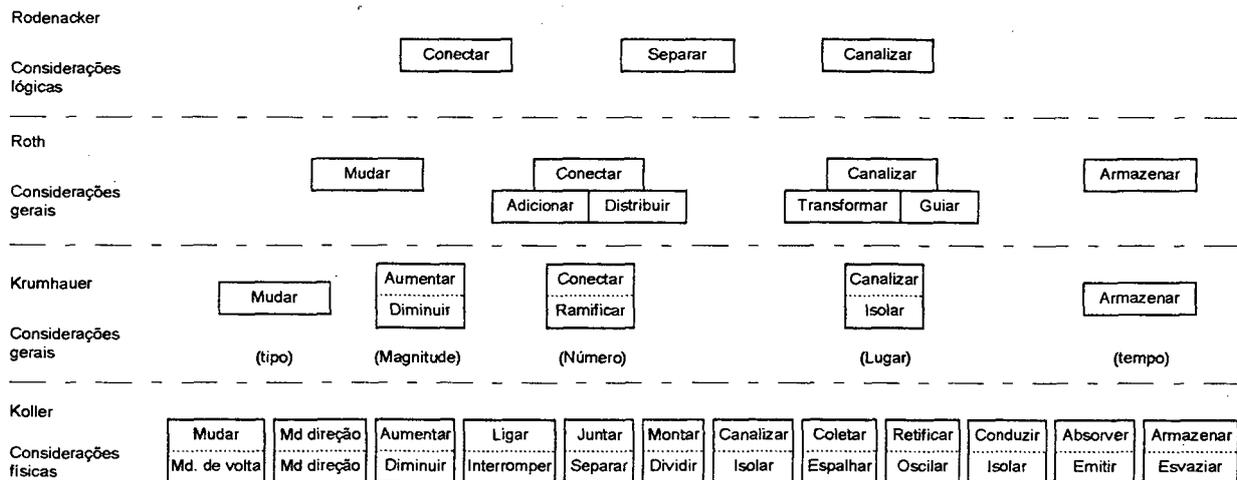


Figura 6. 17 Equivalência entre bases de operações básicas [27].

Como pode ser apercebido na figura 6.17, Rodenacker [31] trabalha apenas com as operações “conectar”, “separar” e “canalizar”. Roth [34] lhe acrescenta as operações “mudar”, relativa à variação do tipo do fluxo e a operação “armazenar”, relativa à acumulação de fluxo no tempo. A base proposta por Krumhauer [21] se

assemelha com a de Roth [34]. Krumhauer [21], no entanto, distingue claramente qual o aspecto do fluxo (tipo, magnitude, número, lugar e tempo) será manipulado por cada uma de suas operações básicas. A última proposta, de Koller [18], já discutida anteriormente, é a que se apresenta mais extensa e também a mais adequada para o processo de busca por princípios de solução pois melhor discrimina as possíveis operações.

6.3.3.2 Operações lógicas e matemáticas básicas

Paralelamente às operações físicas básicas, os sistemas técnicos podem ser descritos com auxílio de operações matemáticas e lógicas básicas. Isto se deve ao fato das operações físicas serem insuficientes para representar as diversas e complexas operações a que podem se submeter os fluxos de sinais em um sistema técnico. As quatro operações matemáticas básicas e suas inversas estão mostradas na figura 6.18, juntamente com seus respectivos símbolos.

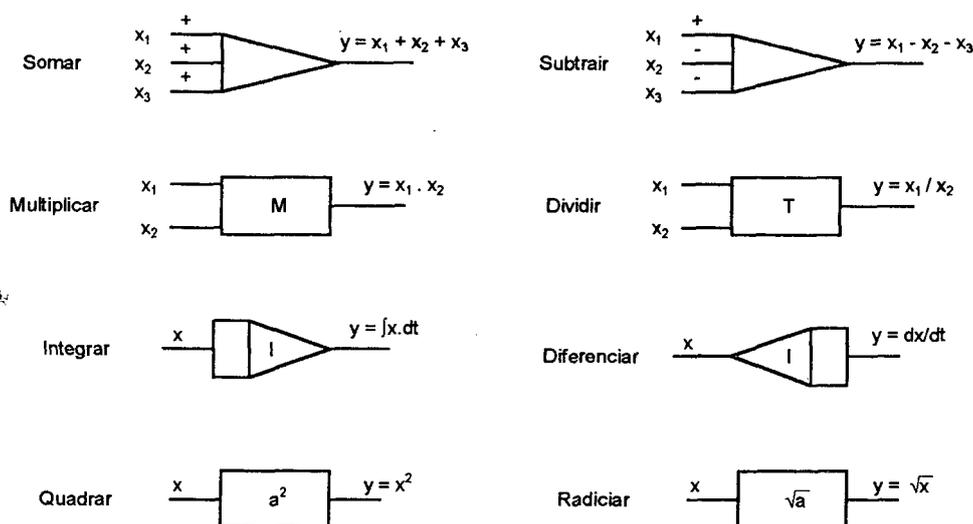


Figura 6. 18 Operações matemáticas básicas [2].

Modelos formados a partir de operações matemáticas básicas relacionam tão somente sinais: informações numéricas mais especificamente. Devido à carência de informações quantitativas nas primeiras etapas do processo de projeto, tais modelos não são intensivamente utilizados no projeto conceitual de um produto. Estes modelos prestam-se mais às fases de projeto preliminar e detalhado do produto.

As operações lógicas básicas são empregadas em dispositivos de segurança em máquinas e elevadores, por exemplo. Estas operações correspondem aos exemplos de inversão ou função *not*, função *and*, função *nor* e função *nand*, como mostra a figura 6.19.

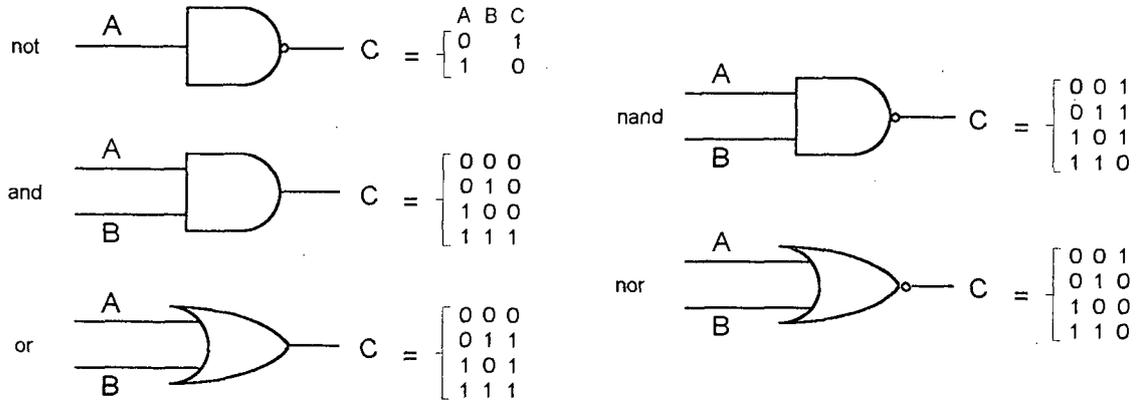


Figura 6. 19 Funções lógicas básicas [2].

Como exemplo aplicado ao projeto conceitual de um produto, suponha que se deseje projetar um dispositivo para promover a reação de um ácido X com um álcool A ou um álcool B, indiferentemente, formando um éster Y, na presença dos aditivos 1,2 e 3 e na ausência de uma umidade superior a 80%. Uma última condição para o início do processo de mistura seria que os reagentes estivessem em um ambiente hermeticamente fechado devido à possibilidade de escape de gases nocivos. As condições para o acionamento do dispositivo que promoverá a mistura podem ser modeladas pelo diagrama da figura 6.20. Este modelo poderia obviamente ser simplificado, mas para fins didáticos a forma apresentada parece ser a melhor.

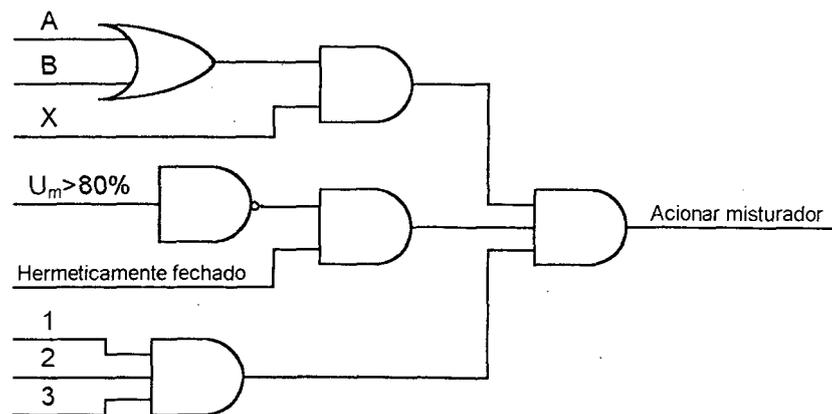


Figura 6. 20 Modelo de operações lógicas para o acionamento de um misturador.

6.5 Considerações finais

Neste capítulo foram analisadas as formas de se modelar o produto projetado em termos das funções que do mesmo são requeridas. Tal corresponde à análise funcional, normalmente a primeira etapa a ser seguida no projeto conceitual de um produto.

Dada a importância das atividades envolvidas no modelamento funcional do produto, alguns autores preferem enquadrá-las em uma fase à parte ao projeto conceitual: seria a fase de projeto funcional do produto, posterior ao esclarecimento da tarefa e anterior ao projeto conceitual. Ao projeto conceitual caberia apenas a busca de princípios de solução e sua composição em concepções de projeto.

Neste capítulo, o conceito de função foi analisado utilizando-se os conceitos de sistemas técnicos, estados e comportamentos. A função é vista como uma abstração feita pelo homem do comportamento de um sistema técnico, para fins utilitários. Apesar de definida em relação ao comportamento, a função continua sendo tratada vinculadamente ao conceito de efeito físico. O efeito físico é derivado objetivamente do comportamento de um sistema técnico, enquanto que a função depende da interpretação subjetiva deste efeito físico e, em última análise, do comportamento do sistema.

Também, o conceito de função foi tratado independentemente dos conceitos de forma e de princípio de solução. Tal independência é criticada por autores como Ullman [41]. Estes argumentam que o desenvolvimento de função só é possível com o desenvolvimento paralelo de formas ainda que abstratas. Apesar disto, a desvinculação do conceito de função do conceito de forma no projeto conceitual é uma situação ideal que deve ser perseguida pois permite que se trabalhe a um nível maior de abstração e desta forma possibilita maiores inovações.

Outra consideração que se faz ao modelamento funcional é quanto à sua aplicação irrestrita nas metodologias gerais de projeto. Nestas metodologias, o ponto de partida do projeto de um produto (após o esclarecimento da tarefa) é o estudo das funções deste produto. Tal visão funcionalista submete a existência de um produto à sua capacidade de realizar funções. Acontece que, em alguns produtos, os aspectos

operacionais, ergonômicos, de uso ou mesmo estéticos superam em importância o seu aspecto funcional. Tome-se, como exemplo, uma cadeira. A beleza de uma cadeira é muitas vezes mais importante para o consumidor que a sua função: acomodar uma pessoa na posição sentada. Para tais produtos, a abordagem tradicional de projeto provavelmente não será a mais adequada.

Os modelos funcionais estudados são ainda essencialmente semânticos e altamente abstratos. São entretanto os primeiros modelos a incorporar informações a respeito da estrutura do produto a ser projetado, pois a sua estrutura de órgãos, ou princípios de solução, se reflete na estrutura funcional do produto. Os fluxos de energia, material e sinal possuem arranjos bastante semelhantes tanto na estrutura de princípios de solução, quanto na estrutura de funções. Na classificação apresentada por Mortensen [22], os modelos funcionais constituem os primeiros modelos de constituição do produto.

Os modelos trabalhados ao longo da análise funcional estão seqüencialmente ilustrados na figura 6.21. A porção central da figura representa a seqüência clássica de modelos funcionais defendida por Pahl e Beitz [26], entre outros autores. Esta seqüência vai do modelo de função total a um modelo de estrutura de funções, passando por tantas estruturas de funções parciais quanto se julgue necessário. Também admite uma possível conversão do modelo de estrutura de funções para um modelo de estrutura de operações básicas. No lado direito da figura, apresenta-se a seqüência de modelos funcionais utilizada no caso de um reprojeto de um produto. Neste caso, as funções são obtidas pela análise das partes do objeto a ser reprojeto.

Deve-se, por fim, ter em mente que o modelamento funcional não é um fim em si próprio, visa facilitar a descoberta de soluções, e que, a exemplo do que ocorre com a lista de especificações, a estrutura de funções também deve ser atualizada e refinada à medida que o projeto se desenvolve.

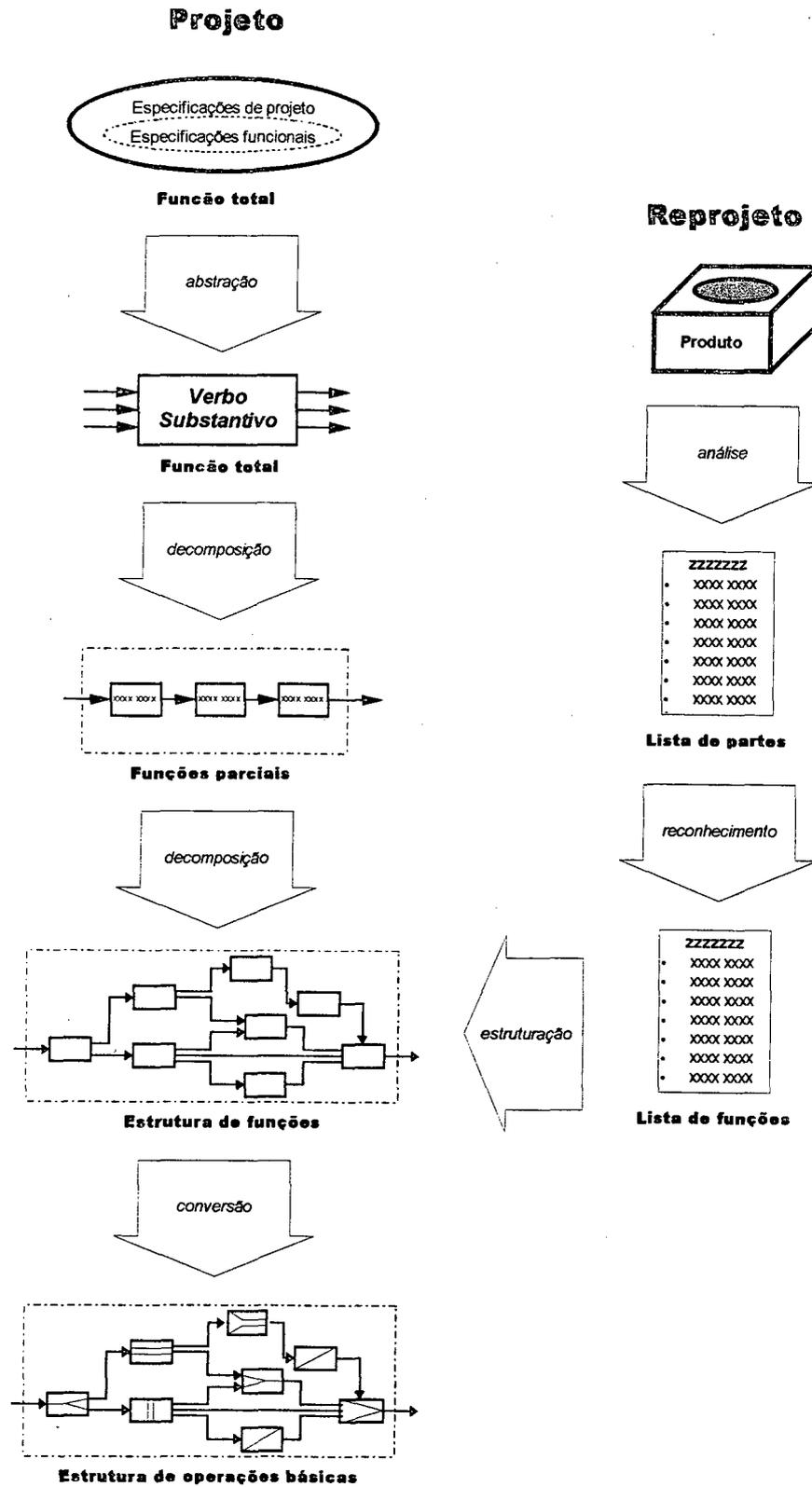


Figura 6. 21 Seqüência de modelos funcionais do projeto conceitual.

Capítulo 7

Modelos de princípio de solução e de concepção

7.1 Introdução

No capítulo anterior foram estudadas formas de modelar o produto em termos das suas funcionalidades, ou seja, em termos dos relacionamentos entre entradas e saídas deste produto, visto como um sistema físico. Neste capítulo, serão vistas formas de modelar o produto em termos de entidades físicas concretas, incluindo forma e material, ainda que muito qualitativamente.

Os modelos trabalhados neste capítulo fazem parte do processo definido no terceiro capítulo desta dissertação como síntese de soluções, segunda subfase do projeto conceitual. Ao final deste processo, o modelo de estrutura de funções é convertido num modelo de concepção do produto. Primeiramente, buscam-se princípios de solução individuais para as funções de baixa complexidade que compõem a estrutura de funções selecionada. Em seguida, estes princípios de solução individuais são combinados em “princípios de solução totais” do produto e estes, por fim, desenvolvidos de modo a gerar modelos de concepção para o produto. A figura 7.1 ilustra os principais modelos de produto utilizados no processo de síntese de soluções, bem como os principais processos e métodos utilizados na manipulação de tais modelos.

Na análise do processo de síntese de soluções, surgem duas importantes questões a serem abordadas. A primeira se refere à definição do princípio de solução e sua obtenção a partir de funções de baixa complexidade pertencentes a uma estrutura de funções. Existe um consenso de que se devem associar princípios de solução à estrutura funcional do produto, porém inexiste um consenso quanto à definição exata de princípio de solução. Este capítulo buscará oferecer um esclarecimento a respeito do que, entre os estudiosos do projeto de engenharia, se

entende por princípio de solução. A segunda questão diz respeito à definição da concepção de um produto no âmbito do projeto de engenharia, ou seja, o que é, como deve ser modelada, o que deve conter, o que não deve conter, entre outros. O esclarecimento desta última questão servirá para delimitar a extensão do projeto conceitual, pois dirá o quanto os modelos de concepção do produto deverão ser desenvolvidos.

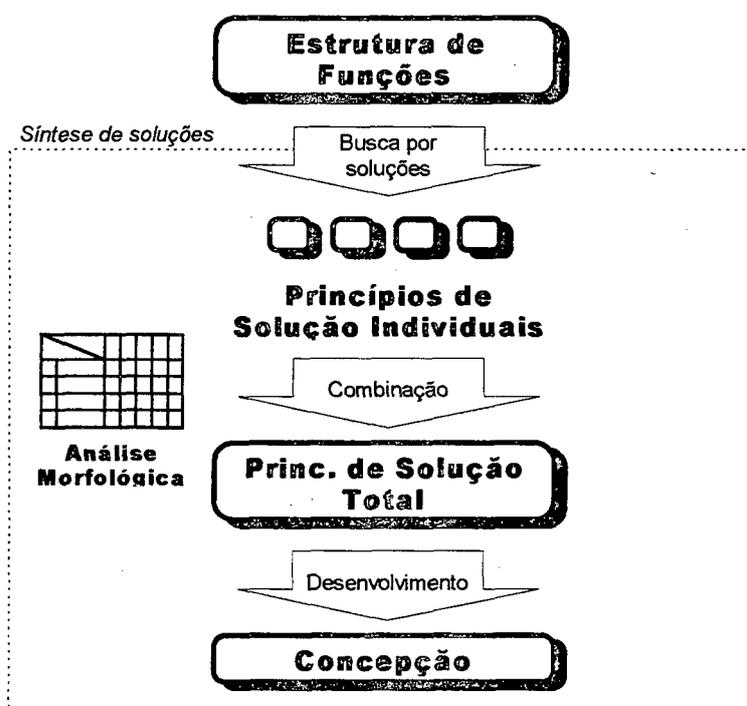


Figura 7. 1 Modelos de produto na síntese de soluções.

Três importantes processos estão envolvidos na conversão do modelo de estrutura de funções em um modelo de concepção do produto: a busca por princípios de solução, a combinação destes princípios em princípios de solução totais e o desenvolvimento destes em concepções do produto.

O processo de busca por princípios de solução é um tema que, pela sua amplitude e profundidade, não cabe no escopo desta dissertação. A busca por princípios de solução envolve, de acordo com classificação proposta por Pahl e Beitz [26], métodos convencionais, intuitivos e discursivos, tal como ilustrado na tabela 3.1. Os métodos intuitivos englobam os métodos de criatividade aplicado à engenharia tal como o *brainstorming* e o método da sinergia. Tais métodos vêm sendo estudados conjuntamente por engenheiros e psicólogos cognitivos. Para um aprofundamento no

estudo da busca e geração de soluções e da criatividade, sugere-se a consulta aos seguintes autores: Comella [3], Dick [4], French *et al* [12], Koller [18], Osborn [25], Pahl e Beitz [26][27], Raudsepp [30], Roozenburg e Eekels [32], Roth [34], Ullman [42], Walker *et al* [46].

Os métodos de desenvolvimento do princípio de solução total agregarão propriedades a este modelo que permitirão a avaliação de importantes aspectos do produto tal como aparência, ergonomia e uso, manufatura e custos, ao lado do funcionamento técnico. Ao término do presente capítulo, as características básicas de um modelo de concepção de um produto são definidas e algumas diretrizes para a sua correta obtenção são expostas.

O primeiro passo no estudo dos modelos de produto da síntese de soluções será a análise da unidade básica para o modelamento de uma concepção de produto, que aqui é denominado de princípio de solução.

7.2 Princípio de solução

Uma função, conforme visto no capítulo 6, se origina da abstração do comportamento de um sistema técnico pelo homem, com o intuito de utilizá-lo. Após o processo de análise funcional do produto, o projetista deve buscar soluções na forma de sistemas físicos que, por meio de certos comportamentos, realizem as funções de projeto desejadas. Em consonância com a estratégia de busca por soluções delineada no capítulo 3, as soluções são buscadas para as funções de baixa complexidade que compõem a estrutura de funções selecionada. Tais soluções, no projeto conceitual, tomam a forma de “princípios de solução”.

Para uma definição formal do termo, será empregada a que segue: “um **princípio de solução** é a representação idealizada da estrutura de um sistema ou subsistema, na qual as características dos elementos e as relações que são essenciais ao seu funcionamento são qualitativamente determinados.” [32]

Desta forma, o princípio de solução para uma função individual da estrutura funcional do produto modela qualitativamente a estrutura de uma parte do sistema

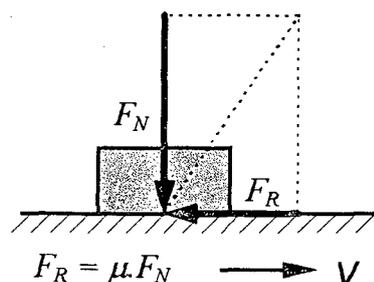
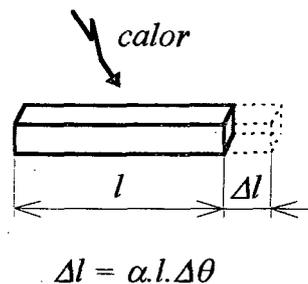
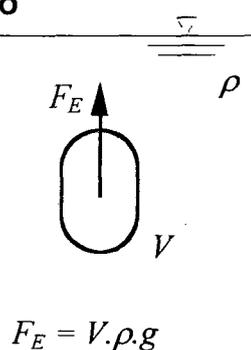
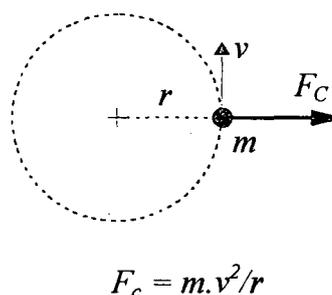
total a ser projetado. Utiliza predominantemente a linguagem gráfica, ainda que possa vir a fazer uso de pequenos textos explicativos ou equações.

7.2.1 Efeitos físicos

Os comportamentos dos sistemas físicos na natureza não ocorrem aleatoriamente. São governados por princípios físicos, químicos e biológicos, regidos por leis da natureza. Comportando-se de acordo com tais leis da natureza, os sistemas desenvolvem efeitos físicos, químicos e biológicos capazes de realizar funções sobre o ambiente que os cercam. Assim, no caminho da busca por princípios de solução, o projetista é guiado a raciocinar primeiramente em termos de efeitos físicos, químicos e biológicos que possam realizar a função requerida. No domínio da engenharia mecânica - onde este trabalho foi desenvolvido - trabalha-se fundamentalmente com efeitos físicos. Portanto, quando se utilizar isoladamente o termo "efeito físico", também se estará referindo indiretamente a efeitos químicos e biológicos que poderão ser desenvolvidos em sistemas técnicos.

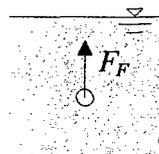
Os efeitos físicos são primordialmente modelados por meio de leis da física - linguagem analítica - que governam as quantidades físicas envolvidas. Assim, o efeito de fricção é modelado pela lei de Coulomb, $F_F = \mu \cdot F_N$; o efeito do empuxo pela lei de Arquimedes, $F_E = V \cdot \rho \cdot g$; o efeito da dilatação térmica pela lei da dilatação, $\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta \theta$ e o efeito da centrifugação pela lei da força e aceleração centrífuga, $F_C = m \cdot v^2 / r$. Tais efeitos físicos estão ilustrados na figura 7.2. Como pode ser observado, pequenos desenhos esquemáticos e mesmo notas explicativas ajudam a esclarecer o efeito físico a ser empregado.

Algumas vezes, mais de um efeito físico é necessário para cumprir uma determinada função, ainda que elementar. Assim, na operação de um par bimetálico, combinam-se os efeitos da dilatação térmica com o efeito da elasticidade para cumprir a função "fechar contato", que pode ser representada pela operação básica "ligar" de Koller [18], ilustrada na figura 6.14.

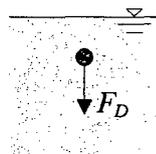
Fricção**Dilatação térmica****Empuxo****Centrifugação****Figura 7. 2** Efeitos físicos de uso na engenharia.

Nos sistemas técnicos, também uma mesma função pode ser desempenhada utilizando-se diversos efeitos físicos alternadamente. A separação de partículas sólidas em um meio líquido poderá ser efetuada utilizando-se o efeito da flutuação ou da decantação, o efeito de centrifugação ou mesmo os efeitos da atração magnética ou eletrostática. Tais efeitos estão ilustrados na figura 7.3, modelados analiticamente pelas equações que os regem e graficamente por desenhos esquemáticos. Tais desenhos não modelam os sistemas físicos que possam vir a desempenhar os efeitos físicos em questão, apenas auxiliam o entendimento das grandezas envolvidas no modelamento analítico do efeito físico.

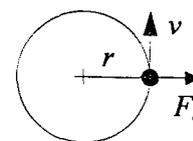
“Ampliar força” é um segundo exemplo de função que pode ser realizada por uma ampla variedade de efeitos físicos. O efeito da alavanca, o efeito da cunha, efeitos hidráulicos e efeitos eletromagnéticos são exemplos de possíveis efeitos físicos a serem utilizados na realização daquela função.

Flutuação

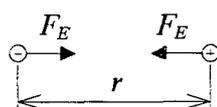
$$F_F = V \cdot (\rho_{liq} - \rho_{par}) \cdot g$$

Decantação

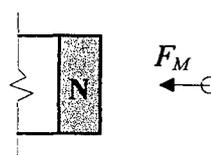
$$F_D = V \cdot (\rho_{part} - \rho_{liq}) \cdot g$$

Centrifugação

$$F_c = m \cdot v^2 / r$$

Atração elétrica

$$F_E = k \cdot Q \cdot q / r^2$$

Atração magnética

$$F_M = c_M \cdot Q_1 \cdot Q_2 / r^2$$

Figura 7. 3 Efeitos físicos para a separação de partículas sólidas em líquidos.

7.2.2 Portadores de efeito

Definições a respeito dos efeitos físicos a serem utilizados não são entretanto suficientes para estruturar e definir convenientemente um modelo de concepção para o produto. No caminho rumo à concretização, devem-se buscar sistemas físicos capazes de portar os efeitos físicos necessários à realização das funções pertencentes à estrutura funcional desenvolvida para o produto.

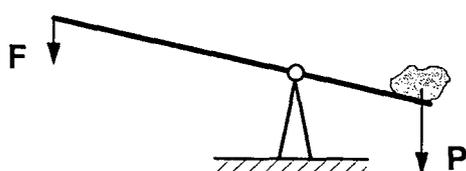
Um portador de efeito é desta forma um sistema físico, com seus elementos e suas relações entre elementos, definido qualitativamente, capaz de realizar o efeito físico esperado. Ao se definir um portador para um efeito físico em questão, define-se o princípio de solução a ser utilizado. A figura 7.4, ilustra o relacionamento entre os termos efeito físico, portador do efeito e princípio de solução, tal como usado nesta dissertação. O termo “princípio de solução” equivale ao “princípio de trabalho” de Pahl e Beitz [26], bem como à “solução básica” de Back [2].



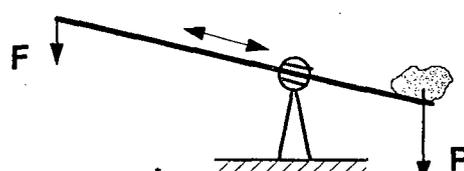
Figura 7. 4 Constituição de um princípio de solução.

O modelo do portador do efeito deve representar qualitativamente o sistema que desempenhará a função desejada. Deverá, desta forma, conter informações a respeito dos elementos que compõem o sistema bem como das relações entre estes elementos. A figura 7.5 ilustra o modelamento de portadores de efeito, e conseqüentemente de princípios de solução, relacionados ao efeito físico da alavanca utilizado para a realização da função "ampliar força".

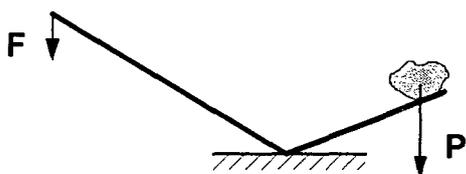
Efeito físico da alavanca



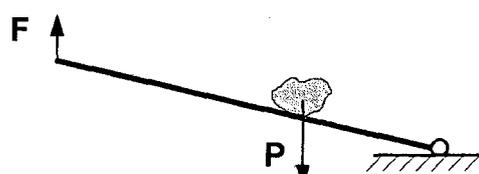
Alavanca com relação entre braços fixa



Alavanca com relação entre braços variável



Ponto de apoio incorporado à alavanca



Ponto de apoio na extremidade e carga do lado da força

Figura 7. 5 Portadores para o efeito físico da alavanca.

Dentre as informações a respeito dos elementos que constituem o princípio de solução incluem-se: tipo do elemento, quantidade, forma, posição, movimentos e atributos de material.

Referências com relação a formas no modelo de princípio de solução não necessitam nem devem ser precisas. As formas apresentadas no modelo devem ser apenas suficientes para definir a função e o comportamento dos elementos no contexto total do princípio de solução. Não devem ser detalhadas ao ponto em que possa induzir o projetista a optar por determinadas soluções técnicas em detrimento de outras. Assim, no princípio de solução da roldana para a função “ampliar força” uma linha é suficiente para o modelamento do elemento flexível utilizado e círculos são suficientes para modelamento das roldanas, conforme ilustrado na figura 7.6. Outras representações mais detalhadas, como o desenho de cabos, poderão induzir o projetista a se fixar em determinadas soluções - cabos de aço ou de outro material - em detrimento do uso de outras soluções, como as correntes, por exemplo. As formas devem ser representadas da maneira mais simplificada possível, sem entretanto prejudicar o perfeito entendimento do princípio de solução.

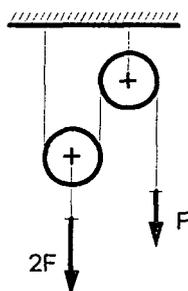


Figura 7. 6 Modelamento do princípio de solução da roldana.

O modelo de princípio de solução deve modelar as formas aproximadas dos elementos, porém não deve fazer referência às suas dimensões, salvo no caso daquelas necessárias ao entendimento da função ou do comportamento do princípio de solução. A atribuição de dimensões aos elementos do modelo do produto se dá primordialmente nas fases de projeto preliminar e detalhado.

Uma forma adequada de representar os princípios de solução no domínio da mecânica é através de “diagramas de linhas” ou “diagramas de esqueleto” tal como utilizado por Hubka [15] na figura 7.7, para o modelamento de dois princípios de

solução para uma morsa. Nesta forma de representação, os elementos que compõem os princípios de solução são representados por intermédio de desenhos esquemáticos contendo tão somente linhas.

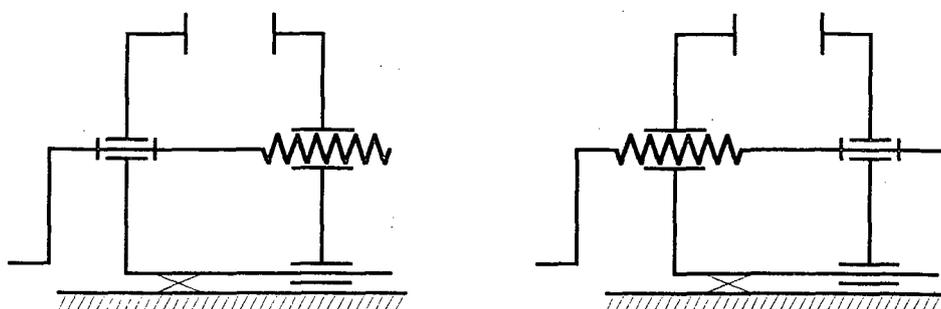


Figura 7. 7 Princípios de solução para uma morsa. [15]

Também as informações referentes aos movimentos necessários aos elementos do princípio de solução para o cumprimento de sua função podem ser modelados no princípio de solução, por intermédio de símbolos apropriados. Tais símbolos devem indicar a natureza dos movimentos realizados, mas não a magnitude de suas amplitudes, velocidades ou acelerações. A figura 7.8 ilustra os modelos de alguns princípios de solução para um posicionador para soldagem, com indicações de movimentos entre as suas partes. A peça a ser soldada é posicionada no topo do posicionador, sobre uma plataforma com possibilidade de giro em torno do seu eixo axial. Também existe a possibilidade de giro da plataforma em torno de um eixo paralelo à base do posicionador. Existe, por fim, a possibilidade de deslocamento vertical do conjunto da plataforma, através de um mecanismo situado na base do posicionador.

No modelo de princípio de solução, ainda não se deve fazer qualquer menção explícita a materiais específicos a serem utilizados. Apenas atributos referentes às propriedades destes materiais devem ser especificados. Ductilidade, rigidez, fragilidade, transparência, condutibilidade elétrica, ponto de fusão e propriedades ferromagnéticas são exemplos de atributos de material que podem vir a estar contidos em um modelo de princípio de solução.

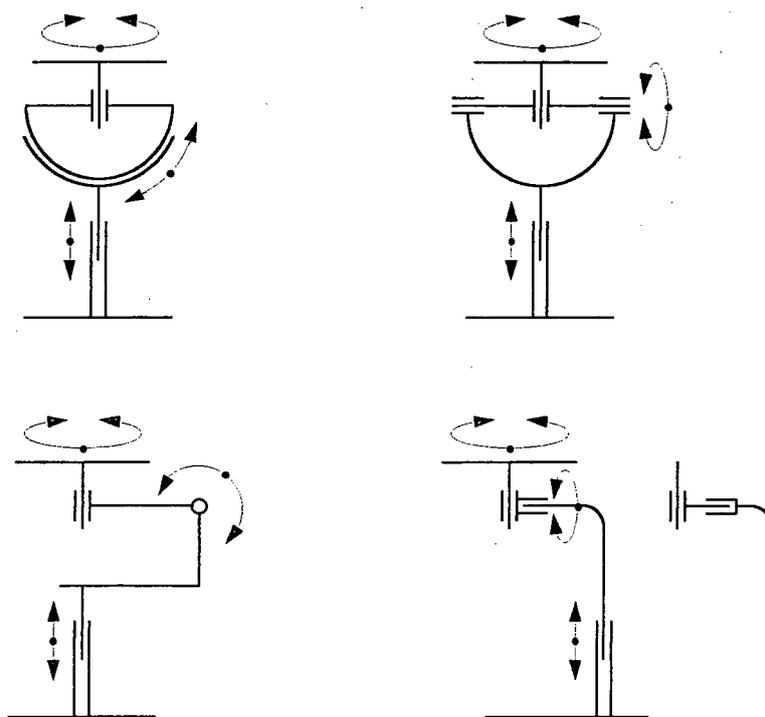


Figura 7. 8 Princípios de solução para posicionador para soldas. [15]

Um ponto a se destacar é inexistência de normalizações com respeito a representações de princípios de solução em sistemas mecânicos, o que por sua vez dá margem a interpretações variadas. Exceções são algumas poucas áreas específicas, como a hidráulica, a elétrica e a tecnologia térmica, onde se tem um número relativamente pequeno de elementos constitucionais e estes são designados por símbolos padronizados, tais como aqueles para válvulas, interruptores e transistores.

7.2.3 Princípio de solução total

De posse de alternativas de princípios de solução para as várias funções que compõem a estrutura de funções desenvolvida e selecionada para o sistema, o próximo passo em direção à elaboração de modelos de concepção é a combinação dos princípios de solução individuais em princípios de solução totais para o produto.

Uma importante ferramenta para a combinação de princípios de solução individuais em princípios de solução totais para o produto é o modelo da matriz morfológica. A matriz morfológica modela simultaneamente as funções que compõem

a estrutura funcional escolhida para o produto e as diversas possibilidades de solução para as mesmas. A matriz morfológica, na realidade, possibilita uma análise das possíveis configurações para o produto projetado. Por ser um tema já exaustivamente estudado na literatura do projeto de engenharia, esta dissertação não exporá métodos para a elaboração da matriz morfológica ou mesmo críticas quanto ao seu uso ou eficácia. Para um aprofundamento no estudo do modelo da matriz morfológica, recomenda-se a leitura dos seguintes autores: Back [2], Pahl e Beitz [26], Roozenburg e Eekels [32] e Ullman [42].

O princípio de solução total do produto apenas difere dos princípios de solução individuais pelo que modela o produto em sua totalidade, ou seja, em todo o seu escopo. Todas as observações feitas no item 7.2.2 com relação ao modelamento de princípios de solução individuais, continuam válidas para o modelamento do princípio de solução total do produto.

A figura 7.9 ilustra um modelo de princípio de solução total para um elevador de automóveis de passeio. Um motor elétrico aciona um redutor que por sua vez aciona, por meio de uma corrente, o eixo de um parafuso de movimento. O giro do parafuso faz subir ou descer o garfo que sustenta o automóvel, impedido de girar por uma guia. A segunda coluna é acionada pela primeira, por meio de uma segunda corrente.

A figura 7.10, por sua vez, ilustra o modelo de princípio de solução total para um resfriador industrial de fluidos, equipamento estático encontrado em instalações de processamento químico. Este resfriador em particular é composto por um corpo e um cabeçote unidos por um par de flanges aparafusados. O cabeçote é dividido em duas metades interligadas por um feixe de tubos dobrados em "u". O fluido a ser resfriado entra pela parte superior do cabeçote, circula pelo feixe de tubos e sai do resfriador pela porção inferior do cabeçote. O fluido é resfriado pelo borrifamento de água sobre o feixe de tubos. O borrifamento é feito por "sprinklers" distribuídos ao longo de um tubo fixo ao corpo do resfriador. Por fim, um coletor no fundo do equipamento recolhe a água de resfriamento e um ciclone permite o escape de vapores d'água.

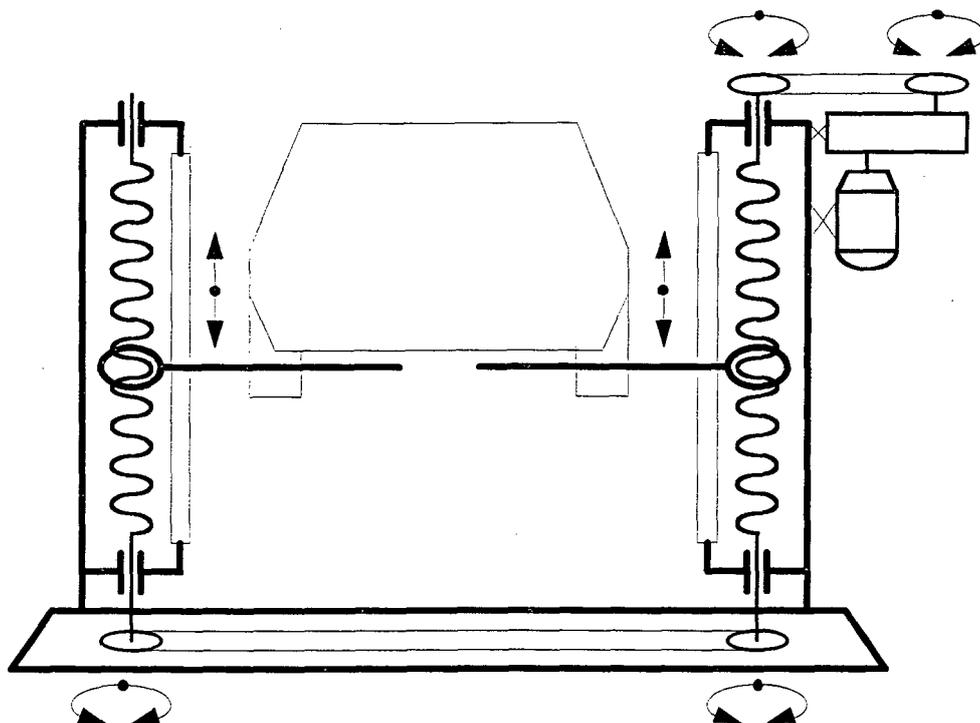


Figura 7. 9 Princípio de solução para um elevador de automóveis.

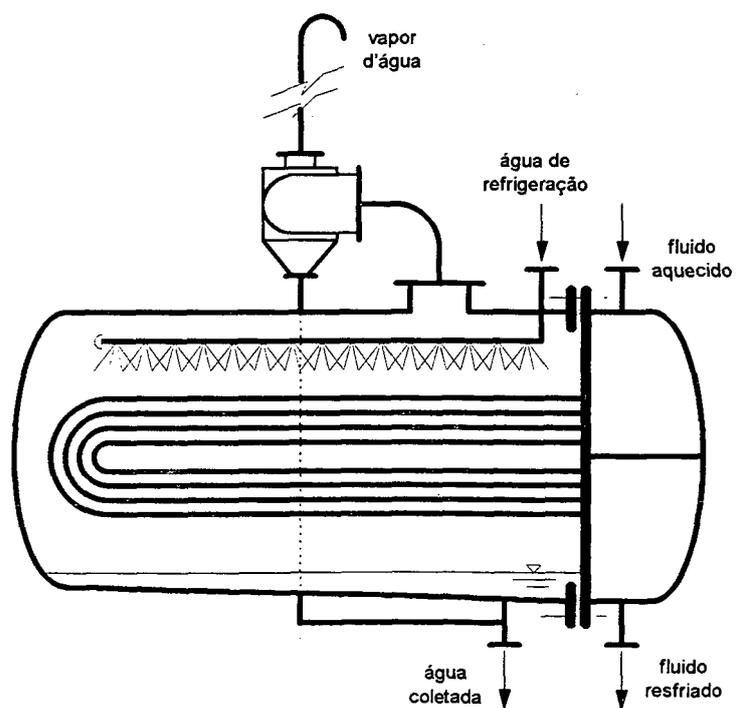


Figura 7. 10 Princípio de solução para um resfriador de fluidos.

Como pode ser observado, os modelos apresentados nos dois exemplos anteriores exibem os elementos que constituem o produto bem como os seus inter-relacionamentos, incluindo a sua estrutura. Os modelos, entretanto, não se referem a formas exatas (tampas torisféricas, elípticas ou planas no resfriador), dimensões (diâmetro do corpo do resfriador, altura das colunas do elevador), todas as quantidades dos elementos (numero de “*sprinklers*”, número de tubos no feixe) e a materiais.

7.4 Modelo de concepção

Os modelos de princípio de solução total do produto representam o produto em termos das propriedades físico-técnicas que são essenciais ao seu funcionamento. Acontece que a avaliação e a escolha de um determinado princípio de solução não deve apenas se basear em critérios de natureza técnica. Também critérios relacionados a uso, aparência, produção, custos, entre outros, devem ser levados em consideração. Deste modo, os modelos de princípios de solução total de produto devem ser desenvolvidos, com base nos requisitos da lista de especificações de projeto, em modelos de concepção do produto.

Resta uma pergunta: o quanto devem ser desenvolvidos os modelos de princípio de solução do produto para a obtenção de concepções? De acordo com French [11], devem ser desenvolvidos “ao ponto onde o meio para realizar cada função principal tenha sido fixado, assim como os relacionamentos espaciais e estruturais dos principais componentes. Um esquema (modelo de concepção) deve ser suficientemente detalhado para ser possível suprir custos, pesos e dimensões totais aproximadas, e a exeqüibilidade deve ser assegurada tanto quanto as circunstâncias permitam. Um esquema deve ser relativamente explícito com relação a *features* ou componentes especiais, mas não necessita ir a muitos detalhes com relação à prática estabelecida.”

Colocando de uma forma um pouco mais clara, os princípios de solução total devem ser desenvolvidos pela:

- Definição das **formas** dos seus elementos. Assim, no princípio de solução do elevador de automóveis da figura 7.9, deve-se buscar a definição do perfil aproximado da colunas de sustentação e as formas aproximadas do par parafuso e cubo dos garfos de sustentação do automóvel, entre outros.
- Definição dos **arranjos** dos seus elementos. Por exemplo, na figura 7.9 precisa ser mais claramente explicitada a configuração do conjunto motor elétrico, redutor e elementos de transmissão.
- Definição das **classes de materiais** utilizados nos elementos. Para o elevador de automóveis, pode-se indicar que sua estrutura será construída fundamentalmente por chapas de aço carbono laminadas, sem indicar precisamente qual o aço carbono será utilizado. No caso da chapa laminada já há uma indicação da forma com que o material será apresentado, do processo a que foi submetido o material (laminação e não extrusão, por exemplo) e também de alguns dos possíveis processos envolvidos na construção do produto: corte, dobramento, aparafusamento e soldagem de chapas finas. Estas informações fornecem subsídios para uma estimativa bem preliminar de custos.
- **Dimensionamento preliminar** (matemático ou intuitivo) dos principais elementos. Deve-se buscar as dimensões mais significativas que possam servir de base para a estimativa de pesos, custos e outros critérios para a avaliação de concepção. Para o elevador pode-se estimar as alturas e distâncias dos parafusos e das colunas em função das dimensões dos automóveis e das alturas a que devem ser elevados. A espessura da chapa pode ser dimensionada intuitivamente pela própria experiência do projetista. A potência do conjunto moto-redutor pode ser grosseiramente estimado pela multiplicação da velocidade de elevação pelo peso do automóvel, aplicando-se os devidos coeficientes de incerteza. Outras dimensões devem desta forma ser estimadas e outras ainda, com menores implicações, devem ser deixadas para o projeto preliminar.

Aplicando as diretrizes e exemplificações expostas nos itens anteriores, pode-se obter o modelo de concepção exposto na figura 7.11 para um elevador de automóveis de passeio, a partir do desenvolvimento do princípio de solução total da figura 7.9. No caso, optou-se por utilizar um desenho de duas vistas de projeção

ortogonal (frontal e superior). Também são de grande valia os modelos de concepção esboçados em perspectiva, tal como fez Valdieiro [43] para modelar suas concepções para um microtrator articulado, como mostrado na figura 7.12. Note que, na figura 7.11, apesar do modelo de concepção conter algumas dimensões, o mesmo não se apresenta em escala.

Ainda com relação ao modelamento de uma concepção, uma importante possibilidade que se apresenta é a da realização tridimensional de *mock-ups* e maquetes - utilização da linguagem física. Tais modelos, hoje essencialmente utilizados nas fases de projeto preliminar e detalhado, facilitam a avaliação da concepção quanto a aspectos qualitativos, tais como a usabilidade e a estética e também como um meio para a obtenção de importantes informações através da interação deste modelo com usuários e clientes do produto.

O modelo de concepção é o último e principal modelo de produto da fase de projeto conceitual. Representa o produto sobretudo em linguagem gráfica, ou seja, em desenhos esquemáticos ou esboços. Enquanto o modelo de princípio de solução total, quanto ao princípio de funcionamento, podia ser enquadrado como um modelo de estrutura, o modelo de concepção já é essencialmente icônico, suas propriedades já se assemelham razoavelmente com as propriedades pretendidas no produto - o modelo de concepção deve, na medida do possível, se parecer com o produto pretendido. Suas funções principais são a descrição e a comunicação das idéias básicas que constituem a concepção elaborada.

Um mesmo princípio de solução total pode dar origem a uma variedade de concepções, dependendo de como o mesmo foi desenvolvido em consonância com as especificações de projeto. Este processo está ilustrado na figura 2.6, extraída da VDI 2222 [45], que retrata as convergências e divergências no processo de projeto. Para o elevador de automóveis, por exemplo, poder-se-ia ter chegado a outras alternativas de concepção, tal como uma que utilizasse estruturas de concreto armado ao invés das metálicas propostas.

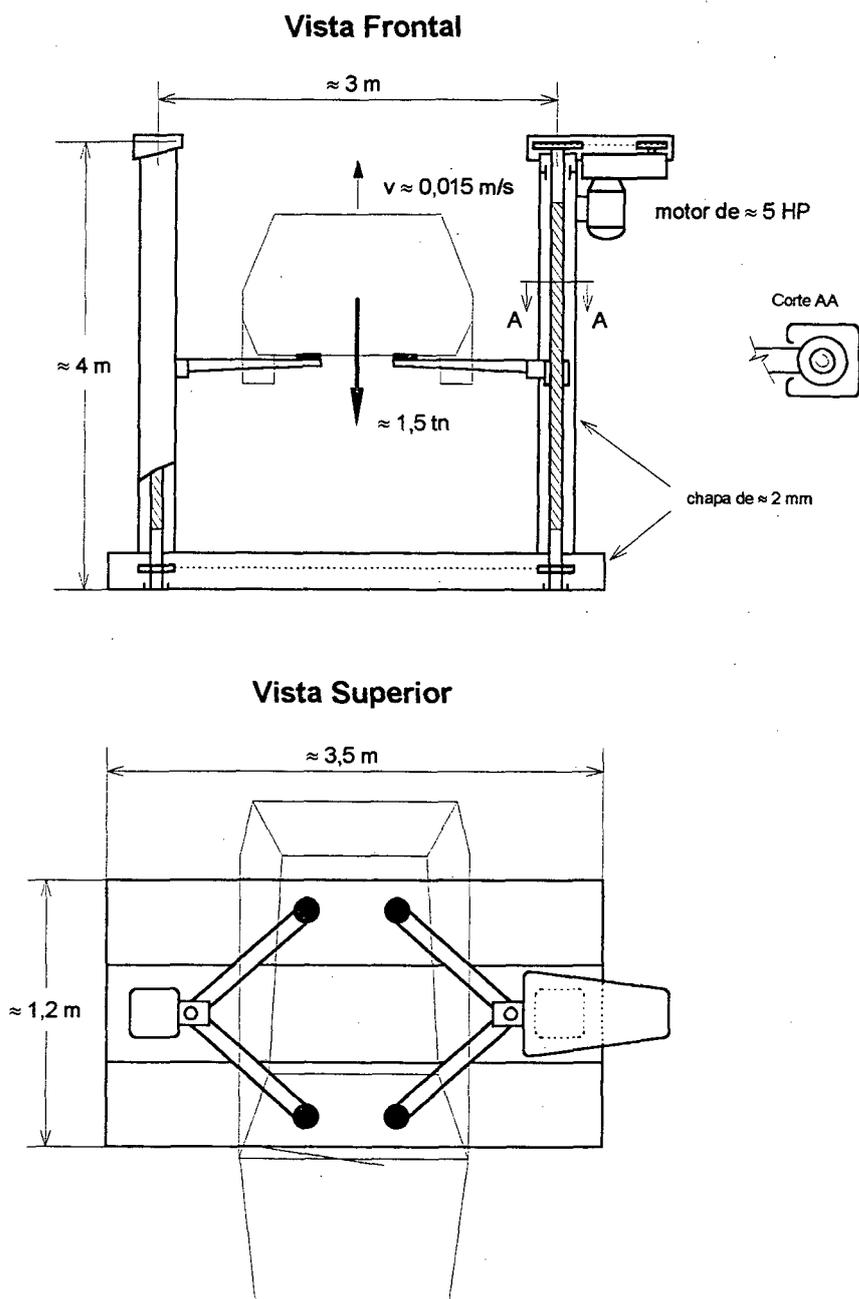


Figura 7. 11 Modelo de concepção para um elevador de automóveis.

A percepção do que vem a ser uma concepção para Hubka [16] parece não coincidir com a desenvolvida nesta dissertação. Para Hubka [16], o grau de concretização de uma concepção varia entre amplos limites. Tal variação se reflete na sua modelagem. A concepção, para Hubka [16], tanto pode ser modelada por um diagrama de blocos, similar à estrutura funcional, quanto pode ser modelado por diagrama de linhas, conforme mostrado na figura 7.13. O modelo de concepção de Hubka [16] não contém referências a formas, dimensões ou materiais. O modelo de

concepção de Hubka [16] parece desta forma coincidir com o modelo de princípio de solução total proposto nesta dissertação, no sentido de expressar tão somente os aspectos físicos e técnicos que são essenciais ao funcionamento do produto.

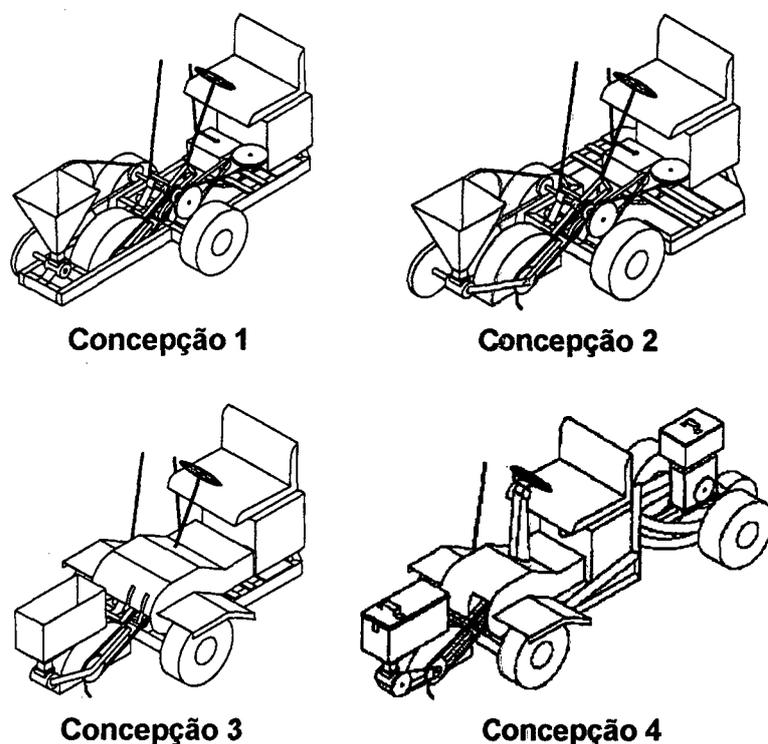


Figura 7. 12 Modelos de concepção para microtrator articulado [31].

Uma última questão se refere à importância dos auxílios computacionais (CAD's gráficos) para a elaboração de esboços no projeto conceitual. Tais esboços englobam os princípios de solução, individuais e totais, e os próprios modelos de concepção. Dentre os autores estudados, há os que defendem o desenho a mão livre como o melhor meio para modelar as representações do projeto conceitual. Dörne *et al* [5] chegam a afirmar que os esboços - quase 70% dos documentos produzidos nos projetos conceitual e detalhado - não podem ser gerados por um sistema CAD. Parece ser um exagero dos autores [5]. Sem querer subestimar a importância da aprendizagem do desenho a mão livre na formação do engenheiro, nem tampouco enaltecer o poder da computação na manipulação e armazenagem de informações gráficas, é possível afirmar que é possível sim a elaboração de quaisquer esboços em plataformas de computação gráfica. Se assim ainda não é feito, foi pela falta de prática ou mesmo pela natural rejeição a novas formas de trabalho por parte dos

projetista. Não obstante, não se pode deixar de reconhecer a carência de recursos dos CAD's gráficos comerciais que auxiliem o projetista na execução de esboços já que estes sistemas, na sua grande maioria, estão voltados para o modelamento do produto nas fases preliminar e detalhada do seu projeto.

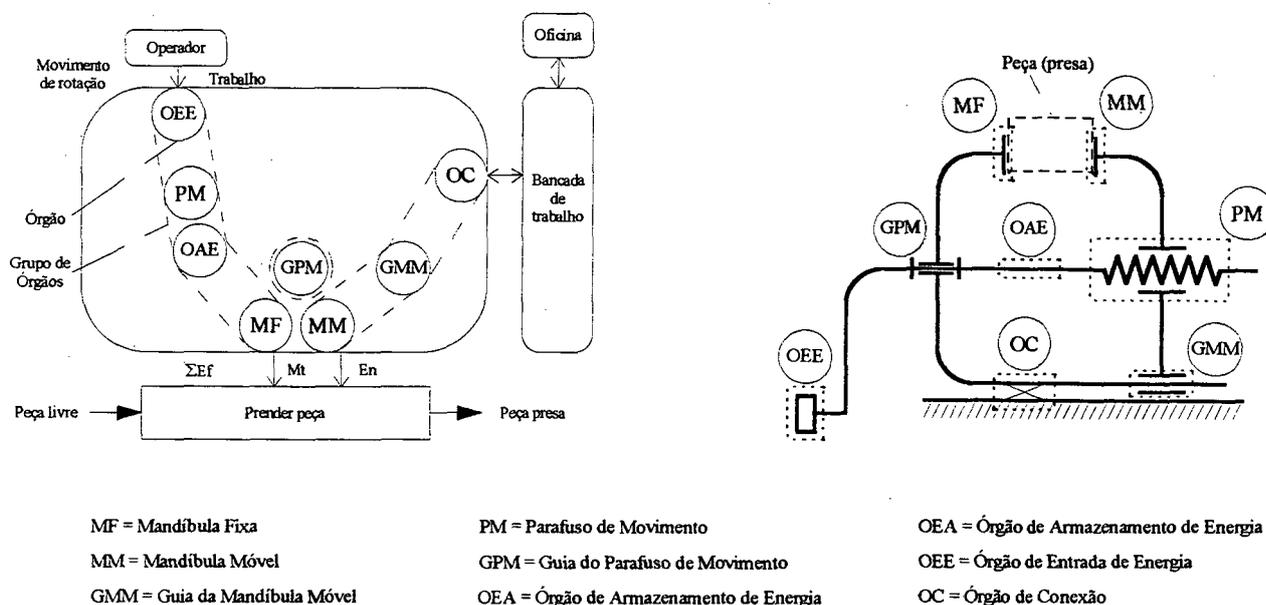


Figura 7. 13 Modelos de concepção para uma morsa, segundo Hubka [16].

7.5 Considerações finais

O presente capítulo buscou analisar de forma crítica os modelos de produtos utilizados na segunda subfase do projeto conceitual, denominada no terceiro capítulo síntese de soluções. Nesta análise, o princípio de solução é apresentado como a unidade básica na modelagem de soluções a nível conceitual. As soluções para as funções individuais da estrutura funcional buscadas pelo projetista são justamente modeladas sob a forma destes princípios de solução.

Na tentativa de definir o princípio de solução, foi primeiramente apresentado o conceito de efeito físico (químico ou biológico): uma abstração de uma classe de comportamentos regidos por uma determinada lei da física (química ou biologia). Estes são fundamentalmente modelados por meio de equações representativas das

leis que os regem e também com o auxílio de gráficos que visam auxiliar o entendimento das grandezas envolvidas naquelas equações.

Em seguida, foi apresentado o conceito de portador de efeito, um sistema físico definido qualitativamente, capaz de realizar um dado efeito esperado. Conforme visto, o princípio de solução nasce então da escolha do efeito físico a ser utilizado e do seu respectivo portador, conforme foi ilustrado na figura 7.4. Várias considerações foram traçadas em relação a formas de modelamento do portador de efeito e conseqüentemente do princípio de solução. Indicou-se a possibilidade de utilização de diagrama de linhas, conforme sugere Hubka [15], para o modelamento de princípios de solução para mecanismos e apontou-se para a inexistência de normalização referente a este assunto.

O modelo de princípio de solução total do produto foi apresentado como o resultado da combinação de diversos princípios de solução individuais obtida a partir de uma análise morfológica. O modelo do princípio de solução total apenas difere de modelo de princípio de solução individual quanto ao escopo modelado. Conforme pôde-se constatar, as regras para o modelamento são as mesmas para ambos os casos.

Por fim, apresentou-se o modelo de concepção e o processo para a sua obtenção a partir de um modelo de princípio de solução total do produto. Constatou-se que o modelo de princípio de solução total do produto, tal como definido, não é suficiente para uma avaliação de aspectos não somente técnicos, como custo, aparência, produção, entre outros. Conforme visto, o modelo de concepção do produto é obtido pela agregação de algumas importantes propriedades ao seu modelo do princípio de solução total, tal como formas, arranjos, classes de materiais e mesmo dimensões.

O modelo de concepção do produto foi apresentado como o último e mais importante modelo do processo de síntese de soluções e por que não dizer do próprio projeto conceitual. É na realidade a saída do processo de transformação de informações em que se constitui o projeto conceitual, tal como definido na figura 3.7.

Neste capítulo tentou-se definir o mais precisamente possível os termos efeito físico, portador de efeito, princípio de solução (individual e total) e concepção e em

função de tais definições uniformizar o seu modelamento. Este trabalho é de fundamental importância porque visa uniformizar a linguagem e o entendimento dos que de uma forma ou de outra se relacionam com o projeto conceitual. Também porque tal uniformização é pré-requisito para o desenvolvimento de sistemas computacionais que auxiliem o projetista na fase conceitual do projeto de um produto.

Capítulo 8

Conclusões e recomendações

8.1 Introdução

O trabalho apresentado nesta dissertação, desenvolvido no Laboratório de Projeto da Universidade Federal de Santa Catarina, surgiu do reconhecimento da inexistência de um conhecimento claro a respeito do modelamento de produtos nas primeiras etapas do processo de projeto e também do reconhecimento da importância de tal conhecimento para a otimização do processo de projeto de um produto e, por conseguinte, para o aumento da sua qualidade e do seu grau de competitividade. O conhecimento da modelagem de produtos também foi visto como condição necessária ao desenvolvimento de ferramentas computacionais de apoio ao projeto.

Recapitulando brevemente a distribuição de conteúdos ao longo da dissertação, o segundo capítulo tratou do processo de projeto de engenharia como um todo. Detectou-se a convergência dos diversos modelos de processo de projeto existentes para o que se denominou modelo consensual do processo de projeto, que compreende as fases de: esclarecimento da tarefa, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado. O terceiro capítulo tratou da fase de projeto conceitual, como um processo de geração de concepções a partir de necessidades detectadas no mercado. O projeto conceitual também foi apresentado como um processo em que o problema de projeto, complexo, é decomposto em subproblemas de menor complexidade e a estes são associadas sub-soluções, que são posteriormente recompostas em uma solução completa para o problema de projeto. O quarto capítulo introduziu a teoria da modelagem de produtos dentro do contexto do projeto de engenharia. Definiu-se amplamente o modelo de produto como uma representação de um objeto real. O quarto capítulo também serviu para expor algumas recentes tendências no estudo e na prática da modelagem de produtos. Os modelos de produtos trabalhados ao longo da fase de esclarecimento da tarefa foram analisados

no quinto capítulo, com base no trabalho de Fonseca [10]. Enfatizou-se a importância do modelo da lista de especificações de projeto como a principal entrada do processo de projeto conceitual. Os modelos de produto especificamente utilizados no projeto conceitual foram estudados no sexto e no sétimo capítulo da dissertação. O sexto capítulo analisou os modelos funcionais de produto. A função foi definida independentemente de sistemas físicos concretos em favor de uma maior abstração e da maior possibilidade de inovações por parte do projetista. Por fim, o sétimo capítulo analisou o modelo de princípio de solução e de concepção do produto. Esclareceu-se o significado e propôs-se uma representação para entidades de projeto como efeito físico, portador de efeito, princípio de solução e concepção. Estabeleceu-se ainda uma correlação entre efeito físico e comportamento, elos de ligação entre funções e princípios de solução. O modelo de concepção foi proposto como o resultado do desenvolvimento de um modelo de princípio de solução total obtido da composição de princípios de solução individuais.

O trabalho desenvolvido utilizou intensivamente do processo lógico verbal de definição ou conceituação dos termos que designam os entes (modelos, processos, ...) com que se trabalha no processo de projeto. De pouco adiantaria falar sobre o modelamento funcional sem conhecer claramente o significado do termo função. Assim como, de pouco adiantaria falar do modelo de concepção sem antes definir o que se entende por concepção no contexto de um produto de engenharia.

8.2 Conclusões

Uma primeira conclusão obtida do trabalho desenvolvido se refere à forma de melhor orientar o projetista em seu trabalho. Constatou-se ser o estabelecimento claro de estágios de desenvolvimento do produto mais eficaz do que a apresentação de roteiros de atividades a serem desempenhadas. Estabelecem-se os estágios, sua definição e seu modelamento, deixando, entretanto, o projetista livre na escolha do método a ser utilizado para a transição de um modelo para o seu conseqüente. Estimula-se, assim, a flexibilidade, a criatividade e, por conseqüência, aumenta a possibilidade de inovações.

Não se deve, entretanto, negar a importância dos métodos e procedimentos no desenvolvimento de um projeto. Estes devem ser até mesmo sugeridos ao projetista - principalmente àqueles que se iniciam no projeto. Para a implantação de sistemas computacionais de apoio ao projeto, devem-se estabelecer claramente os métodos ou processos a serem utilizados. Na elaboração de tais procedimentos, deve-se ter em mente que a elaboração de processos ou procedimentos excessivamente detalhados leva inevitavelmente a domínios específicos de projeto, o que, ao menos no desenvolvimento de teorias e metodologias gerais (domínios diversos), não é desejável. Tem-se então uma relação de compromisso a ser verificada.

Também se conclui ser possível o desenvolvimento de estruturas funcionais, ou melhor, do projeto funcional, desvinculado de sistemas físicos concretos, de princípios de solução. Tal conclusão se embasa na definição objetiva dada para o ente de projeto "função": "relação existente entre as entradas e as saídas de sistema físico". A busca por um projeto funcional desvinculado de sistemas físicos existentes se justifica no que, ao abstrair, ao se desvincular de princípios de solução preconcebidos, amplia-se novamente a possibilidade de inovação.

8.2 Recomendações

Uma primeira sugestão, não exatamente como uma continuidade do trabalho desenvolvido, mas como complemento deste, é a realização de um estudo aprofundado sobre os mecanismos, métodos e técnicas existentes para a busca por princípios de solução de engenharia, com uma possível implementação computacional. Tal trabalho envolveria um esforço interdepartamental em função dos conhecimentos de psicologia, informática, entre outros, envolvidos.

Outra sugestão de trabalho a ser realizado, diz respeito à padronização do modelamento de princípios de solução, ao menos no domínio específico da mecânica. Hoje, como já visto anteriormente, inexistente um consenso em relação ao modelamento de tais entidades de projeto. Algumas poucas áreas, como a hidráulica e a eletrônica, possuem normalizações a este respeito. Esta dissertação oferece uma definição qualitativa do modelo de princípio de solução e algumas diretrizes para a sua

obtenção, porém não chega a propor uma simbologia básica a ser utilizada. O trabalho envolveria também o desenvolvimento de ferramentas, a serem agregadas a sistemas CAD comerciais, para o modelamento computacional de princípios de solução totais para o produto.

Espero que, da mesma forma com que este trabalho se baseou em conceitos e conhecimentos anteriormente desenvolvidos no departamento, o mesmo, com seus conceitos e conhecimentos gerados, também sirva de embasamento para futuros trabalhos a serem desenvolvidos no departamento. Este compromisso é fundamental para o desenvolvimento de uma base teórica interna, necessária a qualquer departamento que pretenda desenvolver um trabalho promissor no campo da teoria de projeto. Também se deve buscar uma consonância entre os conceitos e conhecimentos desenvolvidos no departamento e os conceitos e conhecimentos desenvolvidos em outros centros de pesquisa. Num mundo de poucas fronteiras, a pesquisa deve ser conduzida cooperativamente entre os grandes centros.

Espero, por fim, que esta dissertação auxilie aqueles que, por razões quaisquer, um dia se envolvam na gratificante atividade de concepção de produtos de engenharia.

Referência bibliográfica

- [1] ALBERTS, L. K., WOGNUM, P. M., MARS, N. J. I. Integration of design knowledge into STEP product models. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, 9, Aug. 17-19, 1993, The Hague. **Anais...** The Hague, 1993, p. 1627-1633.
- [2] BACK, Nelson. **Metodologia de projeto de produtos industriais**. Rio de Janeiro : Guanabara Dois, 1983. 389 p.
- [3] COMELLA, Thomas M. How to manage creativity without killing it. **Machine design**, Cleveland : Penton, p. 68-72, mar. 1975.
- [4] DICK, Michael. Creative problem-solving for engineers. **Machine design**, Cleveland : Penton, p. 97-101, feb. 1985.
- [5] DÖRNE, D., EHRENSPIEL, K. *et al.* Empirical investigation of representations in conceptual and embodiment design. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, 10, Aug. 22-24, 1995, Praha. **Anais...** Praha, 1995, p. 631-637.
- [6] DUFFY, A. H. B., ANDREASEN, M. M. *et al.* Design co-ordination for concurrent engineering. **International Journal of Engineering Design**, [s.l.] : [s.n.], v. 4, n. 4, p. 1-15, dec. 1993.
- [7] EVBUOMWAN, N. F. O., SIVALOGANATHAN, S., JEBB, A. A survey of design philosophies, models, methods and systems. **Journal of Engineering Manufacture**, [s.l.] : [s.n.], p. 301-320, 1996.
- [8] FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Novo dicionário Aurélio da língua portuguesa**. 2. ed. rev. aum. Rio de Janeiro : Nova fronteira, 1986. 1838 p.
- [9] FERREIRINHA, P. *et al.* TEKLA, a language for developing knowledge based design systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, 7, Aug. 1990, Dubrovnick. **Anais...** Dubrovnick, 1990.
- [10] FONSECA, Antonio Jorge Hernandez. **Desenvolvimento de uma sistemática para a obtenção das especificações de projetos de produtos industriais**.

Florianópolis, 1996. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.

- [11] FRENCH, M. J. **Conceptual design for engineers**. 2. ed. London : Design Council, 1985. 226p.
- [12] FRENCH, M. J., CHAPLIN, R. V., LANGDON, P. M. A creativity aid for designers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, 9, Aug. 17-19, 1993, The Hague. **Anais...** The Hague, 1993, p. 53-59.
- [13] HASHIM, Fakhruddin Mohd., JUSTER, Neal P., PENNINGTON, Alan de. A functional approach to redesign. **Engineering with computers**, London : Springer-Verlag, n. 10, p. 125-139, 1994.
- [14] HAUSER, J. R., CLAUSING, D. The house of quality. **Harvard Business Review**, Boston : [s.n.], p. 63-73, may-june 1988.
- [15] HUBKA, Vladimir, EDER, W. Ernest. **Theory of technical systems** : a total concept theory for engineering design. London : Springer-Verlag, 1988. 275 p.
- [16] HUBKA, Vladimir. **WDK, - Principles of engineering design**. Tradução por W. E. Eder. Zurich : Heurista, 1980. 118 p. Original em alemão.
- [17] KJELLBERG, Torsten, SCHMECKEL, Hans. Product modelling and 'information-integrated' engineering systems. In: GENERAL ASSEMBLY OF CIRP, 43, Aug. 23-29, 1992, Aix-en-Provence. **Anais...** Aix-en-Provence, 1992, p. 201-204.
- [18] KOLLER, Rudolf. **Konstruktionslehre für den Maschinenbau**. 2. ed. Berlin : Springer-Verlag, 1985. 327 p.
- [19] KRAUSE, F.-L., KIESEWETTER, T., KRAMER, S. Distributed product design. In: GENERAL ASSEMBLY OF CIRP, 44, Aug. 21-27, 1994, Singapore. **Anais...** Singapore, 1994, p. 149-152.
- [20] KRAUSE, F.-L., KIMURA, F., LU, C.-Y. Product modellig. In: GENERAL ASSEMBLY OF CIRP, 43, Aug. 22-28, 1993, Edinburgh. **Anais...** Edinburgh, 1993, p. 695-706.
- [21] KRUMHAUER, P. **Rechnerunterstützung für die konzeptphase der konstruktion**. Berlin, 1974. Dissertação - Technische Universität Berlin, 1974.

- [22] MORTENSEN, Niels Henrik. Linking product modelling to design theory. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, 10, Aug. 22-24, 1995, Praha. **Anais...** Praha, 1995, p. 1403-1408.
- [23] MORTENSEN, Niels Henrik. Product modelling in a designers workbench. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, 9, Aug. 17-19, 1993, The Hague. **Anais...** The Hague, 1993, p. 1507-1514.
- [24] MURDOCH, Tim, BALL, Nigel. A layered framework for sharing design data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, 10, Aug. 22-24, 1995, Praha. **Anais...** Praha, 1995, p. 1471-1476.
- [25] OSBORN, A. F. **Applied imagination** : principle and procedures of creative thinking. New York, Scribners, 1963.
- [26] PAHL, Gerhard, BEITZ, Wolfgang. **Engineering design** : a systematic approach. Tradução por Arnold Pomerans e Ken Wallace. London : Design Council, 1984. 397 p. Original em alemão.
- [27] PAHL, Gerhard, BEITZ, Wolfgang. **Engineering design** : a systematic approach. 2. ed. Tradução por Ken Wallace, Luciënne Blessing e Frank Bauert. London : Springer, 1995. 544 p. Original em alemão.
- [28] PUGH, Stuart. **Total design**. Massachussets : Addison-Wesley, 1991. 278 p.
- [29] QIZHEN, Y., BIN, S. **A STEP-based product data modeling and implementation approach to support concurrent engineering**. In: CE95 CONFERENCE, 1995, [s.l.]. **Anais...** [s.l.], 1995. p. 99-106.
- [30] RAUDSEPP, Eugene. Forcing ideas with synectics ... a creative approach to problem solving **Machine design**, Cleveland : Penton, p. 134-139, oct. 1969.
- [31] RODENACKER, Wolf G. **Methodisches konstruieren**. 4 ed. aum. Berlin : Springer, 1991. 336 p.
- [32] ROOZENBURG, N. F. M., EEKELS, J. **Product design** : fundamentals and methods. New York : Wiley, 1995. 408 p.
- [33] ROSA, Edson da, FORCELLINI, Fernando *et al.* Novos enfoques para a concepção de produtos com o uso de sistemas CAE/CAD/CAM. **Máquinas e metais**, [s.l.] : [s.n.], p. 138-148, jun. 1995.
- [34] ROTH, Karlheinz. **Konstruieren mit konstruktions-katalogen**. Berlin : Springer-Verlag, 1982. 475 p.

- [35] ROTH, Karlheinz. New design methods for the development of promising products. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, 10, Aug. 22-24, 1995, Praha. **Anais...** Praha, 1995, p. 508-516.
- [36] SEIFERT, H., DRISIS, L. Object-oriented product design. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, 10, Aug. 22-24, 1995, Praha. **Anais...** Praha, 1995, p. 1390-1396.
- [37] SILVA, De Plácido E. **Vocabulário jurídico**. 12. ed. [s.l.] : Forense, 1993. 507 p. 3 v.
- [38] SOWA, N. P. **Conceptual structures, information processing, in mind and machine**. [s.l.] : Addison-Wesley, 1984.
- [39] TOMIYAMA, T., KIRIYAMA, T. *et al.* Metamodel: a key to intelligent CAD systems. **Research in Engineering Design**, [s.l.] : [s.n.], v. 1, n. 1, p. 19-34, 1989.
- [40] TOMIYAMA, Tetsuo, UMEDA, Yasushi, YOSHIKAWA, Hiroyuky. A CAD for functional design. In: GENERAL ASSEMBLY OF CIRP, 43, Aug. 22-28, 1993, Edinburgh. **Anais...** Edinburgh, 1993, p. 143-146.
- [41] ULLMAN, David G. A new view on function modeling. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, 9, Aug. 17-19, 1993, The Hague. **Anais...** The Hague, 1993, p. 21-28.
- [42] ULLMAN, David G. **The mechanical design process**. New York : McGraw-Hill, 1992. 337 p.
- [43] VALDIERO, Antônio Carlos. **Desenvolvimento e construção do protótipo de um microtrator articulado** : tração e preparo de sulcos. Florianópolis, 1994. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.
- [44] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. VDI 2221 - **Systematic approach to the design of thechnical systems and products**. [s.l.], 1987.
- [45] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. VDI 2222 - **Konzipieren technischer produkte**. Düsseldorf, 1973.
- [46] WALKER, David J., DAGGER, Barry J. K., ROY, Robin. **Creative techniques in product and engineering design**: a practical workbook. Cambridge-UK : Woodhead, 1991. 141 p.

- [47] WOLTER, J., CHANDRASEKARAN, P. Knowledge representation for functional design of mechanical assemblies. In: NSF DESIGN AND MANUFACTURING SYSTEMS CONFERENCE, 1991, Austin. **Anais...** Austin, 1991.
- [48] YOSHIKAWA, Hiroyuki, TOMIYAMA, Tetsuo et al. An integrated modelling environment using the metamodel. In: GENERAL ASSEMBLY OF CIRP, 44, Aug. 21-27, 1994, Singapore. **Anais...** Singapore, 1994, p.121-124.
- [49] YOSHIKAWA, Hiroyuki. Design philosophy: the state of the art. In: GENERAL ASSEMBLY OF CIRP, 39, Aug. 21-26, 1989, Trondheim. Trondheim, 1989, p. 579-586.

Glossário

Abstração - processo em que se ignora o que é particular e enfatiza-se o que é geral e essencial.

Ambiente - conjunto de elementos externos ao sistema.

Ambiente ativo - conjunto de elementos externos ao sistema, que se relacionam com elementos do sistema.

Cliente - aquele que requisita a elaboração do projeto. [10]

Comportamento - seqüência, discreta ou contínua, de estados de um sistema.

Concepção - idéia do que é ou do que poderá vir a ser o produto.

Domínio (do modelo) - conjunto de fenômenos físicos e propriedades retratados pelo modelo.

Efeito - ação de um objeto sobre outro que acarreta mudanças em propriedades deste último, de acordo com leis da natureza.

Efeito físico - efeito de um objeto sobre outro, governado por uma lei da física.

Escopo (do modelo) - parte ou região do objeto representada pelo modelo.

Especificação de projeto - característica de projeto e/ou do produto. [10]

Estado - totalidade de valores das propriedades de um sistema em um dado instante.

Estrutura - conjunto de relações invariantes de um sistema.

Fronteira - linha arbitrária e imaginária que divide o sistema do seu ambiente.

Função (1) - relação entre entradas e saídas de um sistema físico. (definição objetiva)

Função (2) - é a abstração do comportamento de um sistema físico, feita pelo homem, com o intuito de utilizá-lo. (definição subjetiva)

Função elementar - função que, por definição, não pode ser desdobrada em subfunções de menor complexidade.

Modelo - representação de um objeto real.

Modelo consensual - modelo do processo de projeto - obtido a partir da convergência de diversos modelos anteriores ([11], [16], [26] e [44], por exemplo) - que divide-o em quatro fases: esclarecimento da tarefa, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado.

Necessidade - declaração direta de usuários ou clientes. [10]

Operação básica (física) - representação de uma função técnica, através de um símbolo apropriado. Juntamente com um conjunto de outras operações básicas, compõe uma base capaz de representar a estrutura funcional de qualquer sistema técnico existente.

Portador de efeito - sistema físico, definido qualitativamente, capaz de realizar um dado efeito físico.

Princípio de solução - "representação idealizada da estrutura de um sistema ou subsistema, na qual as características dos elementos e as relações que são essenciais ao seu funcionamento são qualitativamente determinadas". [32]
Compreende os conceitos de efeito físico e de portador de efeito.

Projeto - idealização de algo real para satisfazer da melhor maneira possível uma necessidade.

Projeto conceitual - fase do processo de projeto que gera, a partir de uma necessidade detectada e esclarecida, uma concepção para um produto que atenda da melhor maneira possível esta necessidade, sujeita às limitações de recursos e às restrições de projeto.

Relação - dependência entre atributos de dois elementos.

Requisito de projeto - requisito mensurável, aceito para o projeto. [10]

Requisito de usuário - necessidade, levada à linguagem de projeto. [10]

Sistema - conjunto de elementos reconhecidos pelas suas propriedades ou atributos e que se relacionam entre si.

Tarefa - designação genérica do conjunto de informações que caracterizam o problema de projeto. Engloba os conceitos de necessidade, requisitos de usuário, requisitos de projeto e especificações de projeto.

Usuário externo - aquele que usará indiretamente o projeto, através do produto físico construído. [10]

Usuário interno - aquele que usa o projeto para a construção do produto, ou para seu reparo, embalagem, descarte, etc. [10]