

ANTÓNIO GABRIEL MARQUES DUARTE DOS SANTOS

**O PROJECTO DE PRODUTOS ÚNICOS
DESENVOLVIDOS EM EMPRESAS DE
PEQUENA DIMENSÃO**

LISBOA

2010

Dissertação de Doutoramento

Autor: António Gabriel Marques Duarte dos Santos

Título: O Projecto de Produtos Únicos Desenvolvidos em Empresas de Pequena Dimensão

Instituição: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Local: Lisboa

Ano: 2010

Endereço: DEMI – FCT – UNL
Quinta da Torre
2829 – 516 Caparica

e-mail: agms@fct.unl.pt

Copyright:

Nº de arquivo:



UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial

ANTÓNIO GABRIEL MARQUES DUARTE DOS SANTOS

**O PROJECTO DE PRODUTOS ÚNICOS
DESENVOLVIDOS EM EMPRESAS DE
PEQUENA DIMENSÃO**

Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica na especialidade de Projecto de Máquinas pela Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

**LISBOA
2010**

Agradecimentos

Ao Professor António Manuel Gonçalves Coelho, pelos importantes contributos prestados na orientação deste trabalho, pela confiança que sempre me transmitiu, pelas proveitosas trocas de ideias e, particularmente, por me ter dado a conhecer a Teoria Axiomática de Projecto e por me ter introduzido nesta fascinante área de estudo. Agradeço também toda a disponibilidade para o acompanhamento deste trabalho e para a revisão do texto.

Ao Professor Arlindo Silva, pelas sugestões, que foram fundamentais para a definição do tema e para o arranque deste trabalho. Agradeço toda a disponibilidade para a co-orientação e para a troca de ideias, assim como os elementos bibliográficos que me facultou, a revisão do texto e, em especial, o incentivo e apoio para a apresentação de artigos em conferências.

Aos meus Pais, Avós e Irmãos, por toda a ajuda que sempre me deram e pelas oportunidades que me proporcionaram, as quais muito contribuíram para a minha formação e foram essenciais para a realização deste trabalho.

À Susana, ao Pedro e à Margarida, pelo tempo que me concederam e por toda a sua compreensão para a minha tão prolongada ausência, quantas vezes, em momentos importantes. Ao Pedro agradeço também a ajuda na construção das tabelas deste trabalho.

À Mano e aos seus colaboradores, que têm sido o meu laboratório, por excelência, para a prática de projecto de máquinas, de sistemas e equipamentos mecânicos, electromecânicos e mecatrónicos, proporcionando-me o contacto com os vários sectores da actividade económica, com diversas empresas, tanto nacionais como estrangeiras e, acima de tudo, a oportunidade de realizar numerosos projectos em colaboração com diversos projectistas, de várias nacionalidades, com diferentes formações e com diversos métodos de trabalho.

Aos colegas mais próximos agradeço o forte incentivo que tenho recebido e toda a colaboração que me têm prestado nos mais diversos aspectos. À Helena Navas, agradeço o empréstimo de livros e de elementos bibliográficos muito úteis, ao Alberto Martinho, agradeço a preciosa ajuda na formatação e impressão deste documento e ao João Fradinho, agradeço a excelente ajuda na revisão do texto final, reconhecendo a forma voluntária como todos o fizeram.

Quero ainda agradecer o óptimo acolhimento que, desde o início da minha licenciatura, tenho recebido por parte de todos aqueles com quem tenho contactado nesta Universidade.

Sumário

O projecto de máquinas novas, desenvolvido em Pequenas e Médias Empresas Industriais, nos casos em que as quantidades de produtos produzidos, a partir do mesmo projecto, são muito pequenas, apresenta as características do projecto de protótipos, sendo cada projecto desenvolvido caso a caso e em função das necessidades particulares de cada cliente.

Por outro lado, os factores de escala dessas empresas e os prazos de entrega impostos pelo mercado inviabilizam a obtenção e utilização de dados rigorosos, sendo o desenvolvimento dos projectos realizado sob condições de grande incerteza, de diversos tipos e origens, acabando o produto final, que será entregue ao cliente, por ser um protótipo, cujos ensaios são feitos, muitas vezes, em condições reais de utilização.

Dada a inviabilidade de se reduzir por via experimental essas incertezas, foi desenvolvida uma metodologia para o processo de projecto de produtos únicos, de modo a torná-los insensíveis, dentro de limites razoáveis, às incertezas presentes na fase inicial do processo de projectar.

Com esta metodologia, que foi desenvolvida de acordo com as mais recentes teorias e métodos existentes no âmbito da actividade de projecto, pretende-se minimizar o esforço necessário para a redução daquelas incertezas, sendo os produtos resultantes desses projectos capazes de se adaptar às diversas condições a que possam vir a estar sujeitos.

Na metodologia criada, são utilizadas técnicas de projecto que incorporam soluções passíveis de serem adaptadas a diferentes situações, quer por modificação dos seus componentes, quer por intermutabilidade de componentes, em concepções modulares, cuja arquitectura é baseada em estruturas do tipo “plataforma”, as quais constituem a base comum a vários tipos de produtos, consoante os módulos que sejam adicionados à referida plataforma.

A metodologia proposta proporciona uma base lógica para uma estratégia do projecto de engenharia, que leva em conta os modelos do processo de projecto mais adequados ao projecto de produtos únicos, e que procura integrar, na medida do possível, as práticas de projecto seguidas na indústria. Faz-se, assim, a ligação entre a teoria e a prática do projecto de produtos únicos.

Abstract

The design of new machines that is developed in small and medium enterprises, for the cases where the amount of products based on the same design is very small, has the characteristics of the design of prototypes, each design being developed in a one-by-one basis, according to the particular needs of each customer.

Because of the small scale of those enterprises and of the delivery times imposed by the market, it is impossible to obtain accurate data, and the design development is carried out under conditions of large uncertainty of several types and origins, making the final product a prototype to be delivered to the customer, which tests are often performed under real production conditions.

Due to the impracticability of using experiments to diminish those uncertainties, it was developed a methodology for the design process of one-off products, in order to make them insensitive, within reasonable limits, to the uncertainties that are always present at the initial steps of every design process.

This methodology, which was developed in accordance with the most recent theories and methods for designing, is intended to minimize the effort that is required to reduce those uncertainties and to make the designs easy to adapt to the most diverse conditions that may occur.

The new methodology recommends the use of solutions to be able to match different situations of use, allowing either the adaptation of the existing components, or the use of interchangeable components that are defined according to modular concepts, that is, through the adoption of a platform-type architecture that is the common basis for different products depending on the modules that are put together with the platform.

The methodology herein proposed provides a logical base for a dependable strategy in engineering design that agrees with the design process models most suitable for the one-off products design, and that includes the best practices used in the industry, thus bridging theory and practice for the design of one-off products.

Índice

Agradecimentos	vii
Sumário	ix
Abstract	x
Índice	xi
Índice de Figuras	xvi
Índice de Tabelas	xxiv

1 Introdução	27
1.1 Motivação	32
1.1.1 Dificuldades de Início de Carreira	36
1.1.2 Escassez de Literatura Vocacionada para as Actividades Típicas de Pequenas e Médias Empresas	37
1.2 Apresentação do Problema	38
1.2.1 Definição do Problema	39
1.2.2 Oportunidade do Trabalho	40
1.2.3 Objectivo	42
1.3 Âmbito da Investigação	44
1.3.1 A Actividade de Projecto de Produtos Únicos Produzidos em PME	45
1.3.2 Teorias de Projecto Actuais	47
1.3.3 Sistematização de Procedimentos	50
1.3.4 Originalidade e Contributo da Tese	51
1.4 Método de Investigação – Teoria e Validação	52
1.5 Organização da Tese	54
1.5.1 Capítulo 1 – Introdução	54
1.5.2 Capítulo 2 – O Estado da Arte	54
1.5.3 Capítulo 3 – Projecto de Produtos Únicos em PME	55
1.5.4 Capítulo 4 – Análise do Processo de Projectar	56
1.5.5 Capítulo 5 – Aspectos Principais da Metodologia	56

1.5.6	Capítulo 6 – Compilação da Metodologia.....	57
1.5.7	Capítulo 7 – Aplicação da Metodologia e Análise de Casos Práticos.....	57
1.5.8	Capítulo 8 – Conclusões e Futuros Desenvolvimentos	58
1.5.9	Referências Bibliográficas.....	59
1.5.10	Anexos.....	59
2	O Estado da Arte	61
2.1	Análise e Caracterização das Filosofias, Teorias, Métodos e Ferramentas de Projecto	62
2.1.1	Projecto de Produtos Únicos	67
2.1.2	Filosofias de Projecto	68
2.1.3	Classificação em Função do Nível de Abstracção, da Extensão ou da Especialização	72
2.1.4	Objectivo Comum - Compreensão, Racionalização, Ensino e Transmissão dos Princípios da Actividade de Projectar.....	76
2.2	Teorias de Projecto	80
2.2.1	Teoria Axiomática de Projecto – TAP	82
2.2.2	Teoria da Resolução dos Problemas de Invenção – TRIZ	99
2.2.3	Semelhanças e Complementaridades entre a TAP e a TRIZ.....	111
2.2.4	Integração de Ferramentas de Projecto na Teoria Axiomática de Projecto..	114
2.2.5	Teoria Geral de Projecto – “ <i>General Design Theory – GDT</i> ”	116
2.2.6	Teoria C – K de Projecto - “ <i>C-K Design Theory</i> ”.....	117
2.3	Metodologias de Projecto – Descrição Sistemática e Generalista do Processo de Projectar	118
2.4	Sequência das Actividades do Processo de Projecto	120
2.4.1	Engenharia Simultânea ou Engenharia Concorrente.....	121
2.4.2	Abordagens “De Cima para Baixo” e “De Baixo para Cima”	125
2.5	Ferramentas de Projecto – Métodos e Operações Utilizadas no Processo de Projectar	127
2.6	Tendências e Perspectivas Futuras na área de Projecto de Máquinas	129

3 O PROJECTO DE PRODUTOS ÚNICOS EM PME.....	135
3.1 Enquadramento da Actividade de Projecto no Ciclo de Vida do Produto.	136
3.2 Características Particulares dos Produtos Únicos	138
3.3 Empresas Industriais de Pequena e Média Dimensão.....	141
3.4 O Projecto em Empresas Industriais de Pequena e Média Dimensão.....	142
3.5 A Actividade de Movimentação de Materiais.....	143
3.6 Minimizar o Processo Iterativo	144
4 ANÁLISE DO PROCESSO DE PROJECTAR.....	147
4.1 Modelos do Processo de Projectar (<i>Design Models</i>).....	157
4.2 Modelos Prescritivos, Baseados no Modo de Projectar	158
4.2.1 Modelo de J. C. Jones	159
4.2.2 Modelo de Arthur D. Hall.....	162
4.2.3 Modelo de Morris Asimow	163
4.2.4 Modelo de G. Pahl e W. Beitz	166
4.2.5 Modelo de Verein Deutscher Ingenieure – VDI 2221	170
4.2.6 Modelo de British Standards Institution – BS 7000	174
4.2.7 Modelo de R. D. Watts	176
4.2.8 Modelo de D. L. Marples.....	177
4.2.9 Modelo de L. B. Archer	179
4.2.10 Modelo de Krick	181
4.2.11 Modelo de Nigel Cross	182
4.2.12 Modelo de Vladimir Hubka	185
4.2.13 Modelo de David Wilson.....	192
4.2.14 Modelo de Michael French.....	194
4.2.15 Modelo de Sir Alan Harris.....	196
4.2.16 Modelo de Projecto de Atila Ertas e Jesse C. Jones	197
4.2.17 Modelo de Gerard Volland	200
4.2.18 Modelo de Roozenburg – Eekels.....	202
4.2.19 Modelo de Actividade de Projecto Total de Pugh	205
4.2.20 Modelo de Don P. Clausing.....	209

4.2.21	Modelo de Ullman.....	212
4.2.22	Modelo de Ulrich - Eppinger.....	219
4.2.23	Modelo de Dieter e Schmidt.....	223
4.2.24	Modelo de Shirwaiker e Okudan.....	226
4.2.25	Modelo de Derrick Tate.....	229
4.2.26	Modelo de Bulent Gumus.....	233
4.3	Modelos Descritivos	236
4.3.1	Modelo de March	237
4.3.2	Modelo de J. Darke.....	239
4.3.3	Modelo de Bryan Lawson	240
4.3.4	Modelo de Vinod Goel	243
4.3.5	Modelo de E. Matchett	245
4.3.6	Modelo de Gero.....	249
4.4	Processo de Projecto de Engenharia, de Arquitectura e Assistido por Computador	256
5	ASPECTOS PRINCIPAIS DA METODOLOGIA	261
5.1	Enunciado do Problema e Concepção da Solução	263
5.2	Modelos Teóricos Simplificados	266
5.3	Soluções Ajustáveis	269
5.4	Soluções Alternativas.....	271
5.5	Arquitectura Modular.....	276
5.6	Planos de Contingência e Opções	277
6	COMPILAÇÃO DA METODOLOGIA	279
6.1	Especificações.....	283
6.2	Estrutura Funcional.....	284
6.3	Princípios para Soluções	285
6.4	Composição Modular.....	288
6.5	Anteprojecto.....	291
6.5.1	Escolha dos Materiais.....	292
6.5.2	Determinação dos Esforços Internos - Construção de Modelos.....	293

6.5.3	Estabelecimento das Dimensões de Cada Peça	294
6.5.4	Cálculos de Dimensionamento	295
6.5.5	Compatibilidade Geométrica das Soluções	296
6.6	Projecto Final - Comunicação e Apresentação do Projecto	296
6.6.1	Elaboração e Realização do Projecto	297
6.7	Documentação do Produto	298
6.7.1	Documentação para Apoio Comercial	299
6.7.2	Colocação em Serviço, Exploração e Operação	300
6.7.3	Conservação, Manutenção e Fim de Vida Útil	301
7	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E ANÁLISE DE CASOS PRÁTICOS....	303
7.1	Enunciado do Problema e Concepção da Solução	304
7.2	Modelos Teóricos Simplificados	308
7.3	<i>Minimum Constraint Design</i> e a Teoria Axiomática de Projecto	315
7.4	Soluções Ajustáveis	326
7.5	Soluções Alternativas	327
7.6	Arquitectura Modular	329
7.7	Planos de Contingência e Opções	336
8	CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS	341
8.1	Resultados Obtidos	341
8.2	Conclusões	343
8.3	Desenvolvimentos Futuros	344
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	347
	ANEXOS	359
A.1	Principais trabalhos existentes sobre Projecto	360
A.2	Artigos relacionados com a Teoria Axiomática de Projecto	372
A.3	Definições de Projecto, compiladas por [Hubka et al., 2001]	373
A.4	Matriz de Contradições da TRIZ, retirado de [Altshuller, 2005]	375

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Processamento de informação pelo Processo de Projecto, retirado de [Hubka <i>et al.</i> , 2001].....	28
Figura 1.2 – Transformação de informação pelo Processo de Projecto, retirado de [Hubka <i>et al.</i> , 2001].....	29
Figura 1.3 – Exemplos de produtos típicos, segmentados em função da quantidade de produtos iguais que serão produzidos e da dimensão da empresa que os produzirá.	44
Figura 2.1 – O enquadramento racional das categorias, domínios e trajetórias da investigação em Projecto de Engenharia, retirado de [Horváth, 2004].....	66
Figura 2.2 – Comparação entre o método científico e o método de projecto [Dieter <i>et al.</i> , 2009].....	70
Figura 2.3 – Classificação dos vários trabalhos existentes na área de Projecto em função do nível de abstracção e da generalidade de aplicação.....	72
Figura 2.4 – Classificação e enquadramento das ferramentas de projecto no ambiente/universo de projecto, retirado de [Smith, 2001].	75
Figura 2.5 – Representação dos domínios que constituem o universo do projecto, com os seus conteúdos e as inter-relações entre os mesmos, adaptada de [Santos <i>et al.</i> , 2009].....	84
Figura 2.6 – Representação da decomposição hierárquica em zigue-zague, entre os domínios funcional e físico, relativa ao projecto de um motor, retirado de [Gonçalves-Coelho <i>et al.</i> , 2003].....	87
Figura 2.7 – Configuração das categorias básicas da matriz de projecto, adaptada de [Suh, 1990]	89
Figura 2.8 – Cálculo da probabilidade de sucesso num projecto com um RF e um PP, retirado de [Navas, 2007].	92
Figura 2.9 – Domínios e vectores de características do ambiente de projecto do Modelo de Gumus – TDPL, retirado de [Gumus, 2007].	97
Figura 2.10 – Domínios do ambiente de projecto no modelo de análise do processo administrativo, retirado de [Campatelli <i>et al.</i> , 2009].....	97
Figura 2.11 – Processo de decomposição em zigue-zague de acordo com a abordagem sequencial de projecto, retirado de [Gonçalves-Coelho <i>et al.</i> , 2007].....	98
Figura 2.12 – Processo de decomposição em zigue-zague de acordo com a abordagem de Engenharia Concorrente, retirado de [Gonçalves-Coelho <i>et al.</i> , 2007].....	98

Figura 2.13 – Exemplos de representação de Triângulos Substância-Campo, retirado de [Altshuller, 1999].	108
Figura 2.14 – Modos de encadear as tarefas de um projecto, retirado de [Navas, 2007].	123
Figura 2.15 – A Decomposição em zigue-zague num ambiente de Engenharia Sequencial e num ambiente de Engenharia Simultânea, retirado de [Gonçalves-Coelho, <i>et al.</i> , 2007].	124
Figura 2.16 – Representação gráfica do “Modelo em V” para o projecto de produtos, retirado de [Suh, 2005].	127
Figura 2.17 – Representação gráfica da aplicação da “Casa da Qualidade” nos vários domínios do universo de projecto, retirado de [Hauser <i>et al.</i> , 1988].	129
Figura 3.1 – Representação esquemática do ciclo de vida, genérico, de produtos.	136
Figura 3.2 – Representação esquemática do ciclo de vida dos produtos únicos.	138
Figura 4.1 – Representação esquemática do Processo Geral de Resolução de Problemas, retirado de [Pahl <i>et al.</i> , 2007].	149
Figura 4.2 – Representação esquemática do Ciclo Iterativo, ou retroalimentado, do Processo de Projecto, retirado de [Wilson, 1980].	150
Figura 4.3 – Representação esquemática do Ciclo Iterativo, ou retroalimentado, do Processo de Projecto, retirado de [Suh, 1990].	150
Figura 4.4 – Representação do Ciclo Iterativo, ou de controlo do Processo de Projecto, em que um dos percursos corresponde ao ciclo Síntese-Análise-Avaliação e o outro percurso corresponde ao ciclo Reformulação-Formulação-Avaliação, retirado de [Aleixou, 2007].	151
Figura 4.5 – Representação da conversão de energia, material e sinais, através de um sistema técnico, retirado de [Pahl <i>et al.</i> , 2007].	153
Figura 4.6 – Representação da conversão de energia, material e sinais, através de um processo de manufactura, retirado de [Wilson, 1980].	153
Figura 4.7 – Representação da decomposição do sistema global nos subsistemas que o compõem, retirado de [Pahl, <i>et al.</i> , 2007].	154
Figura 4.8 – Mapa para decomposição por actividades do processo de projecto, retirado de [Tate, 1999].	155
Figura 4.9 – Representação esquemática do processo Decomposição-Integração COPE, retirado de [Guenov <i>et al.</i> , 2005].	156
Figura 4.10 – Representação esquemática do procedimento para Decomposição-Integração COPE, retirado de [Guenov <i>et al.</i> , 2005].	157

Figura 4.11 – Representação esquemática do processo de projecto, executado de forma racional, (Projectista como Computador) retirado de [Jones, 1970].	159
Figura 4.12 – Representação esquemática do processo de projecto, executado de forma intuitiva (Projectista como Mágico), retirado de [Jones, 1970].	159
Figura 4.13 – Carta de Selecção de ferramentas de Projecto, retirado de [Jones, 1970].	161
Figura 4.14 – Representação bidimensional do processo de projecto de sistemas de engenharia, retirado de [Birmingham <i>et al.</i> , 1997].	162
Figura 4.15 – Representação do Processo de Projecto de Engenharia, retirado de [Asimow, 1962].	164
Figura 4.16 – Morfologia do Projecto, retirado de [Asimow, 1962].	166
Figura 4.17 – Passos do planeamento do Processo de Projecto, retirado de [Pahl <i>et al.</i> , 2007].	168
Figura 4.18 – Estrutura de um sistema, sendo: S – fronteira do sistema; S ₁ -S ₅ - subsistemas de S; S ₂₁ -S ₂₄ – subsistemas ou elementos de S ₂ ; I ₁ -I ₃ – entradas (<i>Inputs</i>); O ₁ -O ₂ - saídas (<i>Outputs</i>), retirado de [Pahl <i>et al.</i> , 2007].	169
Figura 4.19 – Esquema genérico do Processo de Projecto, segundo VDI 2221, retirado de [Roozenburg <i>et al.</i> , 1995].	172
Figura 4.20 – Esquema da sequência de pensamento Divergente e Convergente no processo de projecto, segundo VDI 2221, retirado de [Roozenburg <i>et al.</i> , 1995].	173
Figura 4.21 – Esquema de desenvolvimento do problema para a solução, segundo VDI 2221, retirado de [Cross, 2008].	174
Figura 4.22 – O modelo do processo de projecto (à esquerda) e o modelo de desenvolvimento de produto (à direita), segundo BS 7000, retirados de [Evbuomwan <i>et al.</i> , 1996] e [Cross, 2008], respectivamente.	175
Figura 4.23 – O modelo do processo de projecto proposto por Watts, retirado de [Evbuomwan <i>et al.</i> , 1996].	176
Figura 4.24 – O modelo do processo de projecto proposto por Marples, a “Árvore de Marples”, retirado de [Evbuomwan <i>et al.</i> , 1996].	178
Figura 4.25 – O modelo do processo de projecto proposto por Archer, retirado de [Evbuomwan <i>et al.</i> , 1996].	181
Figura 4.26 – O modelo do processo de projecto proposto por Nigel Cross, retirado de [Evbuomwan <i>et al.</i> , 1996].	182

Figura 4.27 – O modelo do processo de projecto proposto por Nigel Cross, retirado de [Cross, 2008].	183
Figura 4.28 – O modelo do processo de projecto proposto por Vladimir Hubka, retirado de [Hubka, 1982].	186
Figura 4.29 – Estrutura hierárquica das actividades do processo de projecto, segundo Vladimir Hubka, retirado de [Hubka, 1982].	187
Figura 4.30 – Representação gráfica da sequência cronológica das actividades do processo de projecto, segundo Vladimir Hubka, retirado de [Hubka, 1982].	188
Figura 4.31 – Tácticas (métodos e ferramentas) de Projecto recomendadas por Vladimir Hubka, para as fases do “Modelo Procedimental Geral do Processo de Projecto”, retirado de [Hubka, 1982].	189
Figura 4.32 – Representação Gráfica dos Estados dos Sistemas Técnicos, durante o desenvolvimento do projecto, retirado de [Hubka, 1982].	190
Figura 4.33 – O ciclo de Projecto segundo David Wilson, retirado de [Wilson, 1980].	192
Figura 4.34 – Representação alternativa do ciclo de Projecto, enfatizando o ponto de decisão central, retirado de [Wilson, 1980].	194
Figura 4.35 – Diagrama de Blocos referente ao processo de projecto segundo French, retirado de [French, 1999].	195
Figura 4.36 – Diagrama de Blocos referente ao processo de projecto de engenharia, segundo Ertas e Jones, retirado de [Ertas <i>et al.</i> , 1996].	198
Figura 4.37 – Parâmetros de projecto importantes, retirado de [Ertas <i>et al.</i> , 1996].	199
Figura 4.38 – Representação gráfica do processo de projecto de engenharia, retirado de [Volland, 2004].	202
Figura 4.39 – Representação gráfica do ciclo básico do processo de projecto, retirado de [Roozenburg <i>et al.</i> , 1995].	203
Figura 4.40 – Representação da Estrutura Iterativa do processo de projecto, retirado de [Roozenburg <i>et al.</i> , 1995].	204
Figura 4.41 – Comparação dos ciclos básicos de projecto e de pesquisa científica empírica, retirado de [Roozenburg <i>et al.</i> , 1995].	205
Figura 4.42 – Representação gráfica do Modelo de Actividades de Projecto Total, retirado de [Birmingham <i>et al.</i> , 1997] [Pugh, 1998].	207
Figura 4.43 – Interligação entre as fases do processo de desenvolvimento de produto, ou Projecto Total, e os métodos e ferramentas de projecto adequadas a cada fase, retirado de [Pugh, 1998].	209

Figura 4.44 – Representação esquemática do processo de desenvolvimento de produto, retirado de [Clausing, 1994].....	212
Figura 4.45 – Representação do Ciclo de Vida do Produto, retirado de [Ullman, 2010].....	213
Figura 4.46 – Representação do Ciclo de Tomada de Decisão, retirado de [Ullman, 2010].....	214
Figura 4.47 – Representação do modelo do processo de projecto, numa representação em cascata, retirado de [Ullman, 2010].....	215
Figura 4.48 – Representação do modelo de projecto em engenharia mecânica, numa representação em espiral, retirado de [Ullman, 2010].....	216
Figura 4.49 – Representação da fase de Planeamento do Projecto, retirado de [Ullman, 2010].	216
Figura 4.50 – Representação da fase de Definição do Produto, retirado de [Ullman, 2010].....	217
Figura 4.51 – Representação da fase de Projecto Conceptual, retirado de [Ullman, 2010].....	217
Figura 4.52 – Representação da fase de Desenvolvimento de Produto, retirado de [Ullman, 2010].	218
Figura 4.53 – Representação da fase de Apoio ao Produto, retirado de [Ullman, 2010]. ..	218
Figura 4.54 – Os Ciclos de Avaliação do Projecto, retirado de [Ullman, 2010].	219
Figura 4.55 – As Fases do Processo de Projecto, retirado de [Ulrich <i>et al.</i> , 2008].	219
Figura 4.56 – Processo Genérico de Desenvolvimento de Produto, mostrando as seis fases e as responsabilidades da funções fundamentais da organização, retirado de [Ulrich <i>et al.</i> , 2008].....	221
Figura 4.57 – Fase de desenvolvimento do conceito, expandida nas suas actividades principais, retirado de [Ulrich <i>et al.</i> , 2008].	223
Figura 4.58 – As actividades de projecto que constituem as três primeiras fases do processo de projecto de engenharia, retirado de [Dieter <i>et al.</i> , 2009].	224
Figura 4.59 – Diagrama de fluxos para o modelo sinérgico de resolução de problemas, usando a TRIZ e a TAP, retirado de [Shirwaiker <i>et al.</i> , 2007].....	227
Figura 4.60 – O mapa do processo de projecto, retirado de [Tate, 1999].....	229

Figura 4.61 – Domínios e Vectores de características do Desenvolvimento Transdisciplinar do Ciclo de Vida do Projecto, retirado de [Gumus, 2008].	234
Figura 4.62 – Sequência de Actividades que constituem o processo de Desenvolvimento Transdisciplinar do Ciclo de Vida do Projecto, retirado de [Gumus, 2008].	235
Figura 4.63 – Diagrama do modelo PDI (produção/dedução/indução), apresentado por March para o processo de projecto, retirado de [Birmingham, 1997].	238
Figura 4.64 – Diagrama do modelo para o processo de projecto, apresentado por Darke, retirado de [Birmingham, 1997].	239
Figura 4.65 – O projecto como uma transformação entre áreas de conhecimento, retirado de [Lawson, 2007].	240
Figura 4.66 – Fases do processo de projecto, segundo RIBA, retirado de [Lawson, 2008].	241
Figura 4.67 – Actividades desenvolvidas ao longo das fases do processo de projecto, segundo Tom Markus e Tom Maver, retirado de [Lawson, 2008].	242
Figura 4.68 – Ciclo iterativo do processo de projecto, retirado de [Lawson, 2008].	242
Figura 4.69 – O processo negocial inerente ao processo de projecto, retirado de [Lawson, 2008].	243
Figura 4.70 – Representação do processo de projecto e correlação entre os sistemas de simbologias e os correspondentes processos cognitivos, aplicáveis em cada uma das fases do processo de projecto, retirado de [Goel, 1995].	244
Figura 4.71 – Representação esquemática do processo de projecto segundo Matchett, retirado de [Jones, 1970].	248
Figura 4.72 – Representação Esquemática Inicial do modelo evolucionário de projecto segundo Gero, retirado de [Evbuomwan <i>et al.</i> , 1996].	249
Figura 4.73 – Representação da Ontologia FBS de projecto segundo Gero, retirado de [Gero <i>et al.</i> , 2004].	251
Figura 4.74 – Interacção entre o projectista e os três mundos: a) modelo geral; b) modelo especializado para representações de projecto, retirado de [Gero, <i>et al.</i> , 2009].	254
Figura 4.75 – O modelo <i>Situated FBS</i> , retirado de [Gero, <i>et al.</i> , 2009].	255
Figura 5.1 – Representação do modelo simplificado idealização (<i>The simplified ideation framework</i>), retirado de [Marques <i>et al.</i> , 2008].	265

Figura 5.2 – Representação do Subsistema de Recombinação no modelo de idealização (<i>The recombination subsystem of the ideation framework</i>), retirado de [Marques <i>et al.</i> , 2008].	266
Figura 5.3 – Representação do projecto com as várias soluções alternativas dispostas em planos paralelos.	272
Figura 5.4 – Representação do projecto com os vários processos alternativos dispostos em planos paralelos.	274
Figura 5.5 – Representação do projecto na perspectiva da engenharia simultânea, com as várias soluções alternativas e os vários processos alternativos dispostos em planos paralelos.	275
Figura 5.6 – Utilizações diferentes das especificações de projecto de uma motorizada.	278
Figura 6.1 – Modelo de Base proposto para aplicação no Projecto de Produtos Únicos.	282
Figura 6.2 – Representação da decomposição de um problema global de projecto e da composição da solução global.	286
Figura 7.1 – Vista geral do “Sistema de Verificação de Peso e Recondição de Caixas Não Conformes para Correção”	307
Figura 7.2 – Representação esquemática da solução proposta.	309
Figura 7.3 – Desenho de Conjunto Geral e Implantação dos vários elementos que constituem a solução, no seu local de funcionamento.	310
Figura 7.4 – Aspecto geral da Solução para Verificação de Peso e Retorno de Caixas Não Conformes para correção.	311
Figura 7.5 – Sistema de Separação e Espaçamento de caixas.	311
Figura 7.6 – Sistema de Pesagem Electrónico.	312
Figura 7.7 – Sistema de Transferência Lateral de caixas não conformes.	312
Figura 7.8 – Sistema Pneumático de Elevação das Correias de transferência lateral.	312
Figura 7.9 – Instalação Eléctrica e Automação do funcionamento da solução.	312
Figura 7.10 – Possibilidade de orientação do eixo do Cilindro Pneumático, conferido pela fixação do tipo rótula.	314
Figura 7.11 – Fotografias do Cilindro Pneumático que actua o Batente Retráctil.	315
Figura 7.12 – Representação dos Graus de Liberdade presentes nos apoios do Parafuso Sem-fim e das Reacções para imobilização dos Graus de Liberdade, respectivos.	316

Figura 7.13 – Representação do Parafuso Sem-fim suportado por um rolamento rígido em A e livre em B'. Os Graus de Liberdade permitidos estão representados na cor verde e os Graus de Liberdade restringidos estão representados na cor laranja.....	320
Figura 7.14 – Representação do Parafuso Sem-fim suportado por um rolamento rígido em A e forçado, de modo a que a extremidade B' coincida com o apoio B.....	321
Figura 7.15 – Representação das pressões de contacto verificadas na extremidade de apoio A e no rolamento de apoio dessa extremidade A.....	322
Figura 7.16 – Representação dos Graus de Liberdade presentes e restringidos (imobilizados) na situação de apoio em <i>Minimum Constraint Design</i>	323
Figura 7.17 – Transportadores de Parafuso Sem-fim, projectados de acordo com o princípio de <i>Minimum Constraint Design</i>	325
Figura 7.18 – Exemplos de Sistemas de Transportadores de Rolos Motorizados para movimentação de cargas unitárias.	331
Figura 7.19 – Exemplo de Transportadores de Rolos Motorizados com transmissão de movimento através de polias e correias, a partir de um veio longitudinal.	332
Figura 7.20 – Fases da montagem do Sistema de Verificação de Peso no local, referentes à introdução de equipamentos novos no sistema existente.	339

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Os 39 Parâmetros de Engenharia, ou características dos Sistemas Técnicos, identificados por Altshuller, que eram resolvidos, tradicionalmente, por soluções de compromisso, adaptado de [Altshuller,1999].	104
Tabela 2.2 – Os 40 Princípios de Invenção da TRIZ para desenvolvimento de Conceitos de Soluções, sem necessidade de compromissos, adaptado de [Altshuller,2005].	105
Tabela 2.3 – Tabela de Contradições da TRIZ, para resolução de contradições, indicando o princípio de invenção (indicado nas células) que deverá ser utilizado para resolução de contradições entre os princípios de invenção, que se pretende melhorar (linhas) e que pioram (colunas) com a melhoria dos primeiros, adaptado de [Altshuller, 2005].	107
Tabela 2.4 – Situações Problemáticas e Exemplos, retirado de [Navas, 2007].	110
Tabela 4.1 – Os cinco passos sequenciais do modelo FBS, retirado de [Vermaas et al., 2007].	252
Tabela 4.2 – Os três passos iterativos (<i>loop back</i>) do modelo FBS, retirado de [Vermaas et al., 2007].	253
Tabela A.1 – Lista dos trabalhos existentes compilados por Hubka e Eder (<i>parte I</i>), retirado de [Hubka et al., 2001].	360
Tabela A.2 – Lista dos trabalhos existentes compilados por Hubka e Eder (<i>parte II</i>), retirado de [Hubka et al., 2001].	361
Tabela A.3 – Lista dos trabalhos compilados por G. Pahl/ W. Beitz/ J. Feldhusen/ K. H. Grote (<i>parte I</i>), retirado de [Pahl et al., 2007].	362
Tabela A.4 – Lista dos trabalhos compilados por G. Pahl/ W. Beitz/ J. Feldhusen/ K. H. Grote (<i>parte II</i>), retirado de [Pahl et al., 2007].	363
Tabela A.5 – Lista dos trabalhos compilados por G. Pahl/ W. Beitz/ J. Feldhusen/ K. H. Grote (<i>parte III</i>), retirado de [Pahl et al., 2007].	364
Tabela A.6 – Lista dos trabalhos compilados por G. Pahl/ W. Beitz/ J. Feldhusen/ K. H. Grote (<i>parte IV</i>), retirado de [Pahl et al., 2007].	365
Tabela A.7 – Lista dos trabalhos compilados por G. Pahl/ W. Beitz/ J. Feldhusen/ K. H. Grote (<i>parte V</i>), retirado de [Pahl et al., 2007].	366
Tabela A.8 – Lista dos principais trabalhos compilados por Mats Nordlund, retirado de [Nordlund, 1996].	367

Tabela A.9 – Lista dos trabalhos sobre projecto, compilados e classificados de acordo com as áreas de aplicação, por Yong-Suk Kim, retirado de [Kim, 2002]. ...	368
Tabela A.10 – Classificação de teorias e metodologias de projecto, em função da sua utilidade para as fases de clarificação e formulação do problema, retirado de [Coatanéa, 2005]......	369
Tabela A.11 – Classificação de teorias e metodologias de projecto, em função da sua utilidade para as fases de clarificação, síntese, avaliação e adequabilidade, retirado de [Coatanéa, 2005]......	370
Tabela A.12 – Classificação de teorias e ferramentas de projecto, classificadas em função das aplicações, retirado de [Eagan et al., 2002].	371
Tabela A.13 – Classificação de artigos relacionados com a Teoria Axiomática de Projecto, publicados entre 1990 e 2009, retirado de [Kulak et al., 2010]......	372

1 Introdução

O conceito de “Projecto” (*Designing*) é utilizado em todas as áreas de conhecimento, assumindo diferentes significados, dependendo da perspectiva em que esteja a ser considerado e da área do conhecimento em que seja utilizado.

Vários autores definiram e caracterizaram este conceito das mais diversas formas, conforme se pode constatar, por exemplo, na resenha apresentada por Hubka [Hubka *et al.*, 2001], o qual procurou esclarecer o que cada um deles entende por “projecto” e qual o seu significado no contexto em que a palavra “projecto” seja referida, alertando para a ambiguidade da própria palavra, que admite diferentes significados consoante o contexto em que esteja inserida.

Os produtos (objectos físicos, *softwares*, organizações, etc.) obtidos como resultado da actividade de projecto têm associado o conceito de entidades artificiais, uma vez que são criados pelo Homem e não pela Natureza [Simon, 1996], [Zamenopoulos, 2008].

Com base nos aspectos comuns encontrados, por Evbuomwan, em definições de Projecto de vários autores, “Projecto” (*Design*) pode ser descrito como “o processo para estabelecimento de requisitos, baseado em necessidades humanas, que as transforma em especificações de desempenho e funções, as quais são convertidas em soluções de projecto (respeitando os

constrangimentos e usando criatividade, princípios científicos e conhecimentos técnicos) que podem ser construídas e produzidas, com viabilidade económica” [Evbomwan *et al.*, 1996].

No âmbito deste trabalho, consideraremos que a actividade de projecto se enquadra na definição anterior e, num modo mais sucinto, podemos dizer que esta consiste num processo que tem início com a identificação de uma necessidade e que transforma ideias em elementos reais (que poderão ser materiais ou intangíveis) capazes de satisfazer as necessidades que os originaram.

Associada a esta transformação, está a noção de “resolução de problemas”, em que o projecto relaciona “o que queremos alcançar” com “o modo como o alcançaremos”, promovendo a passagem do “imaginário” para o “real” e a transição do “presente” para o “futuro”.

O processo de projecto de engenharia é uma actividade de processamento de informação [Nordlund, 1996] que transforma informação acerca de necessidades, requisitos e respectivos constrangimentos numa descrição completa de um sistema que satisfará essas necessidades, conjuntamente com a informação sobre o modo como realizar esse sistema [Hubka *et al.*, 2001]. Na Figura 1.1, é apresentado o diagrama de processamento de informação pelo processo de projecto.

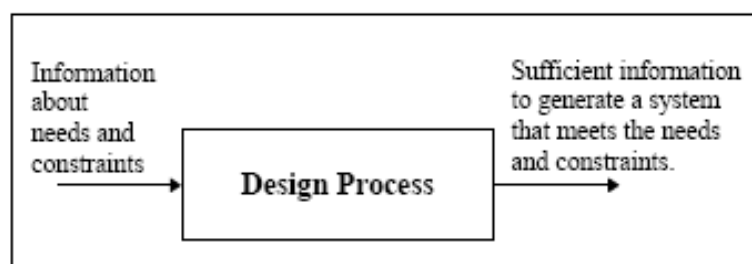


Figura 1.1 – Processamento de informação pelo Processo de Projecto, retirado de [Hubka *et al.*, 2001].

Durante o processo, o projectista terá acesso à informação existente e gerará nova informação, correspondendo à transformação de informação entre os dois estados representados na Figura 1.2.

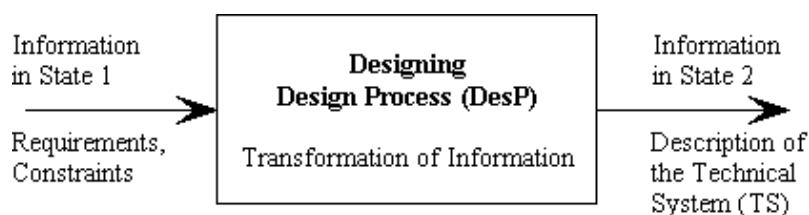


Figura 1.2 – Transformação de informação pelo Processo de Projecto, retirado de [Hubka *et al.*, 2001].

Por se tratar de um processo baseado na transformação de informação e, normalmente, envolvendo mais do que um interveniente, a comunicação de informação assume um papel muito importante, sendo uma das actividades humanas que utiliza mais meios de comunicação — desde a forma oral e escrita, abrangendo textos, cálculos, tabelas, gráficos, diagramas, esquemas, desenhos, passando por modelos físicos e maquetas, até à simulação virtual, com modelos geométricos, representação de tensões e de deformações, de fluxos, de temperatura, de pressões, de deslocamentos e trajectórias, tendo sido, nos últimos anos, desenvolvidos diversos programas para realização destas tarefas em computador.

A simulação denominada “realidade virtual” [Tideman, 2008] constitui, actualmente, a forma mais explícita de mostrar ao exterior aquilo que se está a projectar, permitindo, para além da visualização do objecto que ainda não existe, a visualização de todos os efeitos provocados por acções exteriores que, eventualmente, possam vir a ser-lhe aplicadas [Liu *et al.*, 2009]. Apesar disso, a forma de comunicação através de desenho continua a ter uma grande importância na comunicação de informação ao longo de todo o processo de projecto [Purcell, 1998], [Lawson, 2007].

Independentemente de serem esboços (*sketches*) executados à mão livre ou serem desenhos elaborados com recurso a programas de desenho em computador (ferramentas CAD — *computer-aided design*) [Ye *et al.*, 2008], os desenhos são parte do processo de projectar.

Com efeito, constituem a forma preferida pelos projectistas de representar ideias, proporcionando a coexistência de vários níveis de abstracção simultaneamente [Cross, 1998], [Zamenopoulos, 2008].

Um simples esboço constitui a forma mais prática e rápida de representar uma ideia que exista, apenas, no cérebro do projectista. Segundo David Ulman e colegas [Ulman *et al.*,

1990], desenhar constitui uma janela para “espreitar” o processo cognitivo de resolução de problemas, usado pelos projectistas, que tal como a representação gráfica, o registo diário de ideias e o “pensar em voz alta” são uma extensão do processo cognitivo [Coley et al., 2007].

Além disso, os desenhos fazem parte da documentação final do projecto, registando as várias ideias e desenvolvimentos que foram levados a cabo ao longo do processo.

O estudo da actividade de projectar tem sido desenvolvido por investigadores das mais diversas áreas, sendo abordado segundo a perspectiva da formação de base de cada um. Em particular, verifica-se que o estudo da actividade de projectar tem merecido mais atenção, principalmente, por parte dos grupos enquadrados nos sectores a seguir mencionados:

- No âmbito da Engenharia, sendo a investigação dirigida no sentido da formulação científica da actividade, a qual pode ser designada por “Actividade de Projecto de Engenharia” (*Engineering Design*);
- No âmbito da Arquitectura, sendo colocado mais ênfase nos aspectos artesanais, intuitivos e artísticos que envolvem a actividade de projecto;
- No âmbito da Psicologia, onde o interesse é, essencialmente, focado no processo cognitivo do projectista ao desenvolver actividades de projecto;
- No âmbito da Gestão, havendo interesse específico pelo planeamento e controlo das actividades desenvolvidas ao longo do processo de projecto.

Embora a abordagem seja distinta, permanece um modo de actuação comum, geralmente designado por “*Design Thinking*”, podendo este modo como os projectistas resolvem os problemas ser aplicado a problemas de qualquer tipo [Lockwood, 2009]. Kees Dorst compilou várias reflexões acerca da actividade desenvolvida pelos projectistas [Dorst, 2006].

Neste trabalho, foram feitas pesquisas em todas as áreas relacionadas com a actividade de projecto, no entanto, o âmbito desta investigação enquadra-se na perspectiva da “Actividade de Projecto de Engenharia”.

O “Processo de Projecto” no âmbito da Engenharia está incluído no “Processo de Desenvolvimento do Produto”, o qual, para além do processo de projectar, inclui todas as actividades inerentes ao “Ciclo de Vida do Produto”, desde o surgimento da necessidade que

dá origem ao produto, até ao desmantelamento do produto no final da sua vida útil e à reciclagem dos seu componentes, passando por todas as restantes actividades de *marketing*, financiamento, produção, ensaios, promoção, utilização, conservação, manutenção, etc. Sendo uma parte do ciclo de vida do produto, o “Processo de Projecto”, é a parte que analisa, equaciona e define todo o ciclo de vida do produto.

O processo de projectar consiste na transformação de informação, através da compilação de conhecimento existente e do conjunto de decisões que agregam e estruturam a informação, de modo a que a informação daí resultante possa ser transmitida e permita a construção de entidades capazes de satisfazer as necessidades que motivaram o desenvolvimento desse processo de projecto.

A “actividade de projectar” é uma tarefa complexa, exigindo informação de diversos domínios de conhecimento distintos, envolvendo não só as ciências puras e aplicadas, as ciências sociais e de comportamento, mas também as ciências económicas e actividades legislativas, tratando-se de um processo multidisciplinar. Mesmo o projecto dos objectos mais simples requer o conhecimento de princípios científicos, competências em engenharia e muitas vezes a criatividade artística do projectista [Eagan, 2002].

Ao longo do tempo, muitos projectistas desenvolveram os seus projectos iterativamente, empiricamente e intuitivamente, baseando-se em anos de experiência, habilidade, ou criatividade, e envolvendo muita tentativa e erro [Suh, 2001, p. 4].

Esta forma de resolução do problema é, frequentemente, resultante do facto de muitas das decisões terem que ser tomadas com base em informação incompleta ou errada, levando à necessidade de, mais tarde, terem que ser verificadas e validadas ou corrigidas. Cai-se, assim, num processo iterativo com ciclos de “verificação e ajustamento” ou “tentativa e erro”, com elevado consumo de recursos e aumento do tempo de realização do produto.

Para melhorar o processo de projectar, têm sido desenvolvidas diversas teorias e ferramentas de projecto, cujo propósito consiste em representar a informação necessária e melhor compreender a estrutura dos fluxos de informação no processo de projectar de forma mais eficaz [Gebala *et al.*, 1991], assim como tornar o processo mais sistematizado e baseado em procedimentos científicos [Hubka *et al.*, 2001], [Suh, 1990].

Dada a grande quantidade de informação presente na actividade de projecto e as crescentes exigências impostas pelo mercado, fazem com que a actividade de projecto continue a ser um desafio para os projectistas [Gumus, 2005].

Neste trabalho, foi desenvolvida uma metodologia, para servir de guia aos projectistas de produtos únicos, realizados em pequenas e médias empresas (PME), sugerindo e recomendando a utilização de diversos tipos de soluções para melhorar a eficiência do processo de projectar, especialmente nas situações em que a informação disponível não seja suficiente ou seja pouco credível, bem como para melhorar a qualidade dos projectos e a satisfação das necessidades que originaram o desenvolvimento de tais projectos.

Os objectivos acima indicados são demonstrados no Capítulo 7, com exemplos concretos de projectos desenvolvidos com base na metodologia indicada, e no Capítulo 8, são apresentadas as conclusões e são sugeridos possíveis desenvolvimentos futuros.

1.1 Motivação

Pode perguntar-se: Porquê estudar metodologias de projecto e de desenvolvimento de produto, se a humanidade pratica a actividade de projectar, produtos e serviços, há milhares de anos?

A resposta é: Porque existe uma necessidade, permanente, de novos produtos, com elevada qualidade e obtidos a custos reduzidos, o que origina a necessidade de ter modelos de projecto e de ciclos de vida de produtos melhores e mais estruturados, baseados nas práticas melhor sucedidas e em princípios científicos [Gumus 2005].

A principal motivação para a investigação nesta área resultou da constatação de que os métodos utilizados no processo de projectar “Produtos Únicos” eram ineficientes e pouco eficazes, principalmente em situações novas, relativamente às quais não existe histórico de soluções adoptadas, dando origem a diversas deficiências no projecto desses produtos, obrigando a correcções e modificações, executadas depois de o produto ter sido construído.

Neste tipo de produtos — feitos por encomenda e especialmente “talhados” para as necessidades específicas de uma determinada situação em concreto — devido, regra geral às

reduzidas quantidades a produzir, não é economicamente viável a criação de protótipos nem a realização de ensaios, sendo o produto a fornecer ao cliente um verdadeiro protótipo. Por outro lado, nem sempre é possível reproduzir as condições e o ambiente em que os produtos irão funcionar, pelo que os ensaios de funcionamento são muitas vezes realizados em situação real de utilização.

Assim, a exigência cada vez maior de reduzir os custos e de encurtar os prazos de entrega dos produtos, dos quais se esperam sempre melhores desempenhos e mais qualidade, requer o aperfeiçoamento dos métodos utilizados no processo de projectar.

Pelo contacto com projectistas de várias especialidades, actuando em diversos sectores de actividade económica, tanto nacionais como estrangeiros, e com diversos graus de experiência, desde iniciados até seniores, o autor deste trabalho constatou várias necessidades, passando-se, seguidamente, a identificar as principais:

- A fase conceptual do projecto de um produto tem uma grande influência na qualidade do produto, a qual está relacionada com a capacidade de satisfazer as necessidades para as quais foi especificado, de assegurar a fiabilidade do seu funcionamento e de determinar os processos a desenvolver na sua produção. No entanto, os procedimentos seguidos no processo de projectar assentam sobretudo em ciclos de tentativa e erro, em vez de seguirem procedimentos sistematizados que, em conjunto com as diversas ferramentas e metodologias de projecto actuais, proporcionariam soluções inovadoras e em menos tempo. Consequentemente, são utilizados recursos e é dispendido tempo a produzir, a tentar melhorar e a otimizar produtos que foram projectados de forma deficiente, em vez de se produzirem produtos inovadores e de elevada qualidade;
- Os métodos actualmente utilizados no processo de projecto desenvolvido em PME são, na grande maioria dos casos, mal estruturados e pouco sistematizados, dificultando as tarefas de análise do desenvolvimento dos produtos nas várias fases do projecto, ficando estas actividades bastante dependentes da experiência do projectista e dos conhecimentos adquiridos em projectos anteriores;
- Existe uma tendência natural para se utilizarem soluções desenvolvidas anteriormente que tenham sido bem sucedidas, fazendo-se apenas os ajustamentos necessários à nova situação (normalmente diferente daquela para a qual o projecto existente tinha sido

desenvolvido), em vez de se desenvolver todo o projecto de raiz, correndo-se o risco de não se ser tão bem sucedido. Este procedimento obriga à fastidiosa tarefa de ter que se procurar as informações necessárias em documentação antiga e, mesmo quando se encontram os elementos técnicos do projecto anterior, na maioria das vezes, a descrição poderá não ser completa ou o formato da solução pode ser diferente, e raramente se encontram elementos relativamente à racionalidade do processo. Tipicamente, consegue-se saber o que foi projectado, mas nada se sabe sobre as razões que determinaram a escolha das soluções adoptadas, ou que levaram a tomar certas decisões, assim como não se conhecem as soluções alternativas que foram consideradas, nem as soluções alternativas que foram rejeitadas e os motivos que levaram a essas decisões;

- Quando se pretende lembrar o que foi feito (e como foi feito) num projecto anterior bem sucedido, com o objectivo de reutilizar tal informação num novo projecto, existe a dificuldade de encontrar informação sistematizada acerca dos requisitos do projecto, dos pormenores construtivos, dos componentes utilizados, etc. sobretudo por falta de métodos adequados de recolha e de arquivamento dessas informações, que tornem fácil o acesso às mesmas;
- Em termos industriais, as informações referentes ao projecto de um produto são registadas na forma de especificações, em apontamentos de reuniões com os clientes ou com a equipa de projecto, em esboços, desenhos técnicos e maquetas. No entanto, estas informações são referentes ao domínio físico, existindo, para os indivíduos que não são os autores do projecto, a dificuldade de determinar quais as funções exactas de cada componente, bem como as relações e dependências existentes entre as várias funções;
- A realização de projectos com arquitectura modular, com base em plataformas comuns, facilita a reutilização de projectos anteriores e reduz a necessidade de modificações apenas aos módulos funcionais que sejam diferentes dos projectos anteriores. Este aspecto é um dos procedimentos que será integrado na metodologia de projecto a desenvolver e cuja compatibilidade com as teorias de projecto actuais será verificada;
- No caso de novos produtos, é frequente serem realizadas modificações ao projecto original, quando este já se encontra construído, montado e em fase de ensaios, quer seja para melhorar o desempenho do produto, quer seja para corrigir situações que não tenham

sido detectadas pelo projectista durante a fase de concepção e que, em muitos casos, se devem à incerteza dos dados iniciais e à falta de informação completa;

- Quando se trata da produção unitária de produtos novos de baixo valor económico, a diferença existente entre o preço de venda e os custos de produção, assim como os prazos de entrega curtos, não permitem o esclarecimento das incertezas, sendo preferível observar o desempenho do próprio produto e fazer os necessários ajustamentos de acordo com os resultados;
- No caso da produção em grandes séries, o desempenho dos produtos é avaliado através de ensaios com protótipos físicos, à escala ou em tamanho real, sendo as correcções ao projecto dos produtos ou dos respectivos processos de produção efectuadas em função dos resultados obtidos com os protótipos [Yang *et al.*, 2005];
- Não obstante as recentes evoluções na área da “prototipagem em computador” [Ye *et al.*, 2008], que têm facilitado a execução dos protótipos virtuais, reduzindo os custos desta prática, no caso de produtos únicos, por questões económicas e de prazos, o protótipo é, quase sempre, o próprio produto;
- A optimização dimensional do projecto de produtos únicos está também na mesma situação do esclarecimento de incertezas, uma vez que, a partir de determinado grau de optimização, o custo da continuação do processo de optimização é mais elevado do que deixar, deliberadamente, o produto sobredimensionado. Em muitos casos, o sobredimensionamento tem ainda a vantagem de conferir ao produto a aparência de robustez, resistência e durabilidade, e, desde que não seja exagerado, pode ser considerado como um investimento na imagem do produto e da empresa que o produz;
- Para reduzir a necessidade de modificações posteriores, nos casos em que não é possível conhecer os valores exactos que deverão apresentar determinados atributos (parâmetros) do produto – sabendo-se, porém, que esses valores estarão compreendidos entre dois valores limites, máximo e mínimo – uma boa prática consiste na utilização de soluções ajustáveis ou flexíveis. Também este aspecto é um dos procedimentos que será integrado na metodologia a desenvolver, devendo ser verificada a sua compatibilidade com as teorias de projecto.

Do contacto com alunos finalistas da Licenciatura em Engenharia Mecânica, na disciplina de Projecto Mecânico, e do contacto com engenheiros recém-licenciados, durante os estágios profissionais que realizavam a nível empresarial e de indústria, sob a orientação do autor deste trabalho, constatou-se uma dificuldade generalizada em dois aspectos específicos da actividade de projecto, devido à falta de informação completa e rigorosa relativamente aos dados do problema:

- Na estruturação do enunciado do problema, ou seja, na passagem do domínio do cliente para o domínio funcional;
- Na concepção de soluções, no âmbito do domínio físico, que desempenhem as funções pretendidas, independentemente das eventuais variações que as condições reais de funcionamento possam apresentar.

A escassez de literatura específica para projecto de produtos únicos, motivou o autor do presente trabalho a analisar tal situação e a desenvolver uma metodologia que, incorporando alguns dos ensinamentos adquiridos pelo autor ao longo da sua actividade profissional, ajudasse os projectistas que se iniciam na profissão a ultrapassarem algumas das dificuldades com que se deparam.

1.1.1 Dificuldades de Início de Carreira

Uma das principais dificuldades com que, de uma forma geral, os projectistas em início de carreira se deparam é originada, essencialmente, pela diferença existente entre os problemas académicos — cujos enunciados descrevem situações perfeitamente definidas e com dados necessários à resolução dos problemas — e os problemas com que são confrontados na actividade prática — que começam pelo estabelecimento do próprio enunciado e pela recolha dos dados necessários à resolução desses problemas.

Com este trabalho, pretende chamar-se a atenção para os aspectos inerentes à passagem da situação real para o modelo a estudar, que representará o enunciado do problema, e indicar quais as formas de lidar com os aspectos relativos à definição do problema, tais como:

- A “interpretação das informações” transmitidas por quem sente a necessidade;
- A “compilação das especificações do problema”, os seus “requisitos” e os seus “constrangimentos”;
- A “recolha e quantificação de dados” do problema, como sejam a configuração geométrica e dimensional do espaço em que o produto irá desempenhar as suas funções, as suas interligações e as interacções que o produto terá com os elementos que lhe serão exteriores, as características do ambiente onde ele irá funcionar, etc.
- A “percepção da incerteza” relativamente aos dados do enunciado e o “estabelecimento dos limites aceitáveis” para os dados incertos, assim como a definição das soluções e das formas de lidar com a falta de informação completa e rigorosa relativa aos enunciados.

O elevado grau de incerteza e a inviabilidade de a reduzir, associados ao projecto de produtos únicos, torna a actividade de projectar uma tarefa complexa [Lee, 2003]

Por outro lado os projectistas em início de carreira têm pouco conhecimento relativamente às diversas soluções previamente utilizadas com sucesso em situações semelhantes àquelas com que se deparam, pelo que, numa outra vertente, este trabalho abordará o tipo de soluções, modulares e flexíveis, que deverão ser usadas para fazer face às incertezas impossíveis de eliminar, no sentido de reduzir a necessidade de alterações e correcções aos produtos depois destes estarem construídos.

1.1.2 Escassez de Literatura Vocacionada para as Actividades Típicas de Pequenas e Médias Empresas

Verifica-se que a literatura existente para o projecto de máquinas está muito vocacionada para o projecto de órgãos de máquinas ou para produtos de grande consumo, destinados a serem produzidos em grandes séries. Possivelmente tal situação é devida aos avultados ganhos que se obtêm pelo aperfeiçoamento do projecto deste tipo de produtos.

Consequentemente, também a literatura relativa aos processos produtivos está mais vocacionada para os processos produtivos do tipo “linhas de fabrico” e “linhas de montagem” dedicadas à produção de grandes séries.

Se, em termos absolutos, os ganhos obtidos pela optimização dos projectos de produtos produzidos em grandes séries são significativos, em termos percentuais, as consequências dos erros de projecto de produtos protótipo, cujas margens são muito apertadas, podem ter custos superiores ao valor do próprio produto.

Embora os estudos, teorias e ferramentas que têm sido desenvolvidos tenham em vista, na maior parte dos casos, o projecto de produtos de grande consumo e de processos de produção em série, são também válidos para o projecto de produtos de produção unitária (*one-off products*). É, no entanto, necessário ter em consideração as particularidades inerentes aos produtos únicos, de produção por encomenda, os quais são, na sua maioria, desenvolvidos em pequenas e médias empresas, com características muito próprias.

Os trabalhos existentes relacionados com este tipo de produtos são raros e têm, normalmente, como base produtos de grandes dimensões e de grande complexidade, cuja produção é executada em unidades de produção do tipo “Estaleiro” [Dilworth, 1993].

A grande maioria dos projectos de máquinas industriais realizados em Portugal enquadra-se no tipo de produtos de produção unitária ou em séries de muito pequena dimensão, destinados a serem construídos em empresas de pequena e média dimensão.

Actualmente, não existem estudos ou trabalhos que proporcionem ferramentas para resolver as incertezas presentes no projecto deste tipo de equipamentos, nem orientações específicas para o desenvolvimento de soluções suficientemente flexíveis (ajustáveis) capazes de se adaptarem às circunstâncias das empresas de pequena e média dimensão.

1.2 Apresentação do Problema

A inspiração para este trabalho teve origem na percepção das dificuldades com que se deparam os projectistas de produtos únicos, desenvolvidos em PME, verificadas ao nível da recolha e compilação de informação adequada, a partir de situações reais, que lhes permitam

definir o enunciado de um problema, de modo levá-los a construir modelos teóricos simplificados e a encontrar soluções robustas.

Em seguida, pormenorizam-se os aspectos relacionados com a definição do problema que motivou esta investigação, assim como a sua oportunidade e os objectivos que através dela se pretendem atingir.

1.2.1 Definição do Problema

O problema que é objecto deste trabalho pode resumir-se às duas questões seguintes:

- Como transformar um “caso real” (complexo e difícil de equacionar) num “modelo de estudo” (simplificado e possível de ser resolvido) e estabelecer o “enunciado do problema” (caderno de encargos) que deverá ser satisfeito?
- Como projectar “soluções” cujo sucesso não seja influenciado por pequenas variações nos dados do enunciado (incertezas que não é viável eliminar), através da utilização de “estratégias e táticas de projecto”?

Ambas as questões acima mencionadas têm em comum a necessidade de se lidar com incertezas.

A primeira questão está relacionada com as incertezas existentes no processo de estabelecimento do enunciado do problema (passagem do domínio do cliente para o domínio funcional).

A segunda questão está relacionada com a robustez das soluções para vencer as incertezas; ou seja, trata-se de saber se as soluções virão a realizar as funções pretendidas, mesmo em condições de incerteza quanto aos dados do problema e aos resultados das soluções, quando estas são postas a funcionar em ambiente real (variação das propriedades dos materiais com as condições ambientais, humidade, temperatura, “enjambamentos”, etc.).

As duas questões acima mencionadas são muito gerais, pelo que foram decompostas em vários subproblemas, incidindo a investigação na busca de subsoluções que resolverão cada um dos subproblemas. No final, foi compilada uma metodologia para projecto de produtos

únicos, adequada à estrutura organizacional e ao tipo de actividades desenvolvidas em PME, que incorpora as subsoluções estudadas.

1.2.2 Oportunidade do Trabalho

A actividade de projectista, de construtor e de instalador de máquinas e sistemas destinados à movimentação de materiais proporcionou ao autor deste trabalho o contacto com as diversas actividades de todos os sectores económicos (dado o âmbito de aplicação dos referidos equipamentos) e, tal como anteriormente referido, o contacto com projectistas de várias áreas e de diversas especialidades, tanto nacionais como estrangeiros, com diversos graus de experiência.

Ao longo da sua actividade profissional tem constatado a existências de várias necessidades com que os projectistas se deparam, muitas delas derivadas da falta de estudos ou trabalhos que proporcionem ferramentas para resolver as incertezas inerentes ao processo de Projectar Produtos Únicos (*One-Off Products*) as quais assumem uma maior importância no caso de empresas de pequena dimensão (PME).

Neste trabalho, são analisadas as boas práticas utilizadas na indústria e é verificada a sua compatibilidade com as teorias actuais de projecto, tendo alguns dos conhecimentos adquiridos pelo autor deste trabalho nos projectos que desenvolveu, sido integrados na metodologia desenvolvida para o projecto de produtos únicos realizados em PME.

De um modo geral, e as PME não são excepção, existem vários objectivos que levam as empresas a aplicar as teorias e metodologias de projecto aos seus processos de desenvolvimento de produtos, nos quais se incluem:

- A poupança dos recursos (materiais, tempo, mão-de-obra, capitais, etc.) utilizados no desenvolvimento de novos produtos;
- O melhoramento das funcionalidades dos produtos;
- O melhoramento da fiabilidade dos produtos;
- A redução dos custos dos produtos em todas as fases do seu ciclo de vida (*life-cycle costs*)

- A redução do tempo de produção;

A redução do tempo de desenvolvimento do produto tem-se tornado cada vez mais importante, especialmente na indústria automóvel, não só pela redução de custos indirectos (*overheads*), como também pela utilização mais eficiente dos meios de engenharia e de produção, o que torna os produtos mais competitivos. No entanto, a principal razão para a redução do tempo de desenvolvimento do produto prende-se com a necessidade de colocar os produtos no mercado antes dos restantes concorrentes e antes que as tendências e os gostos dos clientes mudem.

No mercado actual, fortemente dominado pela competitividade baseada na redução de prazos de desenvolvimento (*time-to-market*), a minimização do tempo que decorre desde o início da concepção até à realização do produto é um factor crítico de sucesso (*it is key for success*) [Ulrich and Eppinger, 2000], [Utterback, 1994] e [Fine, 1998], citados por [Kim, 2002].

A denominada “abordagem sequencial” ao processo de projecto (*sequential approach*) não é competitiva no ambiente de mercado actual, sendo esta forma de encarar o desenvolvimento de um projecto muito pouco utilizada em empresas de pequena dimensão.

Uma forma de reduzir os prazos de entrega de um produto é diminuir o número de ciclos iterativos no processo de projecto, causados por constrangimentos existentes em fases posteriores do desenvolvimento do produto e por modificações desnecessárias em fases avançadas de desenvolvimento do produto, resultantes de decisões inapropriadas tomadas na fase inicial do projecto.

Várias metodologias (Engenharia Concorrente ou Simultânea, *Robust Design*, entre outras) têm proposto uma nova forma de projecto, que considere, na sua fase inicial (de concepção do produto), os aspectos relacionados com todas as fases subsequentes, até aos aspectos relacionados com o reaproveitamento, o desmantelamento e a reciclagem do produto em fim de vida, de modo a evitar potenciais problemas que possam surgir mais tarde [Andreasen, 1987], [Clausing, 1994] e [Clark and Fugimoto, 1991], citados por [Kim, 2002].

Também no caso dos produtos-protótipos é preferível utilizar soluções ajustáveis, em vez de se terem que fazer modificações na fase final de ensaio do produto.

Embora o processo de produção deste tipo de produtos apresente, normalmente, características bastante flexíveis (devido ao pequeno valor do produto, comparado com o sistema de produção), geralmente, é preferível projectar o produto em função dos meios de produção que serão utilizados para o produzir.

No caso dos produtos únicos, numa situação extrema, em que cada produto fosse completamente diferente do antecessor e do seguinte, seria necessário modificar o processo produtivo para cada produto a produzir.

Modificar um processo produtivo poderá ser bastante oneroso e demorar bastante tempo [Heragu, 1997], citado por [Kim, 2002], o que comprometeria a viabilidade económica da grande maioria dos produtos únicos de baixo preço.

1.2.3 Objectivo

O objectivo principal que se pretende atingir com este trabalho consiste na obtenção de uma metodologia aplicável à actividade de projecto de produtos únicos, desenvolvidos em pequenas e médias empresas industriais, capaz de minimizar o esforço que seria necessário para a redução das incertezas inerentes ao desenvolvimento de projectos deste tipo de produtos no ambiente em questão. Pretende-se, assim, que esta metodologia ajude a produzir projectos de produtos cujo desempenho, dentro de limites razoáveis, não seja significativamente afectado pelas variações das diversas condições indefinidas a que estes possam vir a estar sujeitos.

Procurou-se que a metodologia desenvolvida sirva de guia aos projectistas de máquinas, do tipo protótipo, fornecendo-lhes orientações específicas para desenvolvimento de soluções suficientemente flexíveis capazes de se adaptarem às situações reais, tendo em consideração as circunstâncias específicas e as capacidades das empresas de pequena e média dimensão.

O modelo proposto incorpora várias tácticas de projecto, que reflectem a estratégia de projecto que é utilizada para projectar produtos únicos de pequenas dimensões, (de baixo

valor económico e com pequenas margens comerciais/financeiras) em empresas de pequena dimensão.

O modelo proposto utiliza a Teoria Axiomática para ajudar a compreender o processo cognitivo que tem lugar durante a actividade de projecto, tendo as várias tácticas de projecto, incorporadas na metodologia proposta, sido verificadas à luz da Teoria Axiomática.

A utilização da Teoria Axiomática melhora a qualidade dos anteprojectos, evitando-se, através da utilização dos axiomas, a busca aleatória de soluções, o que diminui o número de iterações em fases subsequentes e facilita a integração de outras ferramentas de projecto.

O modelo proposto alargará a aplicação da Teoria Axiomática a todo o processo de desenvolvimento de produto, sendo todas as entidades dos vários domínios desenvolvidas sistematicamente, ficando identificadas e documentadas, assim como as decisões tomadas e as hipóteses admitidas no desenvolvimento das entidades dos domínios e nas suas relações.

A metodologia proposta deve proporcionar modelos e orientações, de modo a que a documentação e os conhecimentos adquiridos com a realização de um projecto possam ser partilhados e reutilizados noutros projectos, como um módulo comum, ou plataforma, em vários produtos.

A metodologia deverá orientar os projectistas no sentido de realizarem uma análise “de cima para baixo” (*top-down*) no estabelecimento dos requisitos funcionais, nas soluções adoptadas e nos componentes a utilizar, devendo orientá-los na realização de uma síntese “de baixo para cima” (*bottom-up*) para a execução dos cálculos de dimensionamento, na elaboração dos desenhos de pormenor, assim como no estabelecimento das variáveis de processo e na realização dos ensaios de funcionamento.

O estudo aprofundado do processo de projecto, cujo resumo se apresenta no Capítulo 4, teve como objectivo conhecer a interpretação que dele é feita pelos vários investigadores, que mais atenção têm dedicado a este assunto — havendo bastantes diferenças, consoante a formação de base do investigador e a área do conhecimento em causa — e compilar os trabalhos mais importantes que têm sido realizados nesta área.

Avaliou-se a adequabilidade de cada uma das interpretações para o caso do projecto de produtos únicos, tendo sido seleccionadas as actividades mais adequadas para compilar a respectiva metodologia, a qual é apresentada no Capítulo 6

Deste estudo, foram obtidos ensinamentos muito importantes que ajudam a compreender e que justificam as práticas que são seguidas no projecto de produtos únicos, realizados por equipas de projecto reduzidas em empresas de pequena dimensão.

1.3 Âmbito da Investigação

A investigação realizada incidiu sobre o processo de projecto de produtos únicos, desenvolvidos em empresas de pequena dimensão e realizados por equipas de projecto compostas por poucos elementos.

De uma forma simplificada, podemos classificar as empresas de acordo com a sua dimensão e os produtos pelas quantidades que são produzidos a partir do mesmo projecto. Na Figura 1.3, encontram-se exemplos de produtos típicos, ordenados em função desta classificação.

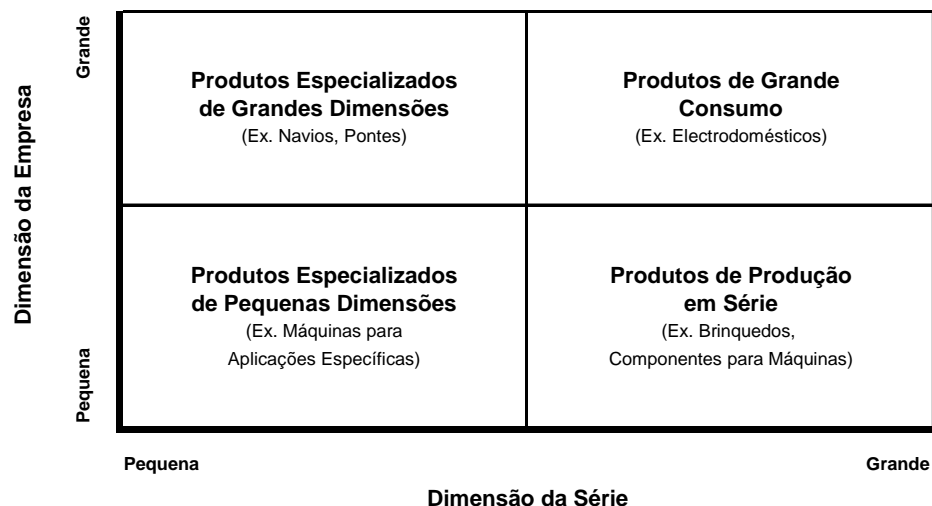


Figura 1.3 – Exemplos de produtos típicos, segmentados em função da quantidade de produtos iguais que serão produzidos e da dimensão da empresa que os produzirá.

Nesta investigação, foram utilizados vários projectos realizados pelo autor, tendo sido tomado para exemplo um “Sistema de Movimentação Automática de uma Linha de Produção de Equipamentos Electrónicos”, no qual foram integrados alguns projectos que utilizaram as táticas incorporadas na metodologia proposta.

Os resultados desses projectos são analisados no Capítulo 7, onde são comprovados os benefícios proporcionados pela utilização das partes incorporadas na metodologia, sendo também avaliadas as consequências da sua não aplicação. Esta aproximação é a mais adequada para esta investigação, a qual é considerada suficiente para provar que a aproximação proposta proporciona vantagens relativamente à sua não utilização.

1.3.1 A Actividade de Projecto de Produtos Únicos Produzidos em PME

O processo de projecto de produtos únicos desenvolvidos em empresas de pequena dimensão apresenta características específicas próprias. Embora os procedimentos gerais das teorias de projecto e as diversas ferramentas existentes para a actividade de projecto lhe sejam aplicáveis, o facto de se projectar um novo produto, do qual, na maior parte dos casos, só é construído um exemplar, e o facto de os recursos disponíveis serem escassos, condiciona a condução do processo, obrigando à adopção de estratégias que tornem o processo mais eficiente.

Como principais aspectos que distinguem a actividade de projecto de novos produtos, no contexto acima descrito, podem-se indicar os seguintes:

- A forte personalização do produto, em função das necessidades específicas de cada cliente faz com que cada produto seja único, tratando-se de um produto novo, ou com atributos diferentes de todos os produtos existentes, requer bastante criatividade no processo de projecto;
- Existe uma grande pressão, por parte do mercado, para a redução dos prazos de entrega requeridos pelos clientes, que têm a tendência para fazer uma comparação com os prazos de entrega de produtos semelhantes, mas não personalizados, existentes no mercado;

- Os custos inerentes à obtenção de dados rigorosos e os prazos de entrega curtos inviabilizam a realização de ensaios e a optimização do produto, impondo a necessidade de “fazer bem à primeira vez”;
- O protótipo é o próprio produto, sendo os ensaios e os eventuais ajustamentos realizados depois de o produto estar construído;
- Não é viável esclarecer previamente grande parte das incertezas relativas aos dados do problema e ao desempenho das soluções, bem como as relacionadas com o processo produtivo;
- Em empresas de pequenas dimensões, as equipas de projecto são também bastante reduzidas, proporcionando ao projectista a oportunidade de envolvimento e actuação em todas as áreas da actividade de projecto, ao mesmo tempo que lhe são exigidas soluções não só para todos os aspectos do Projecto, mas também do processo de produção;
- O mesmo projectista tem responsabilidades nos vários domínios (dos requisitos funcionais, dos parâmetros de projecto e das variáveis de processo).

Neste ambiente, a prática de “Engenharia Simultânea” (*Concurrent Engineering*) surge naturalmente, uma vez que o projectista, ao conceber as peças, já tem em mente os processos produtivos que serão utilizados para a sua construção.

O processo de projecto fica restringido apenas à fase de protótipo, conforme indicado por Pahl e Beitz [Pahl *et al.*, 2007], ficando excluída a restante parte do processo de desenvolvimento de produto.

Neste caso, não existe o Domínio de Ensaio (*Test Domain*), que foi introduzido pelo modelo de projecto proposto por Gumus e por ele denominado “*Transdisciplinary Product Development Lifecycle Model*” [Gumus, 2008].

O facto de não haver lugar a esclarecimento de incertezas no processo de projecto de produtos únicos, de baixo valor económico, faz com que o projectista fique muito exposto ao risco e tenha de assumir pessoalmente as consequências das suas decisões [Cross, 1999].

Neste aspecto, a actividade de projecto não é confortável, nem fácil. Para além da reputação do projectista, que é construída com base nos riscos que assume e ultrapassa com sucesso,

existem as consequências perniciosas que, em caso de fracasso do projecto, poderão advir a tudo o que se encontre nas proximidades do produto, ou que com ele tenha alguma interacção.

1.3.2 Teorias de Projecto Actuais

Embora a actividade de projecto seja praticada há milhares de anos, só a partir de meados do século passado é que começaram a ser desenvolvidos alguns esforços no sentido de compreender o modo como o projecto é realizado, tendo em vista a estruturação e organização de todo o processo [Evbomwan *et al.*, 1996].

Até então, os estudos na área do projecto abordavam-no do ponto de vista da resistência dos materiais, com vista à optimização das geometrias e configurações das peças, para adequação da sua resistência mecânica.

Os trabalhos existentes na área de projecto de máquinas eram muito especializados e abordavam projectos concretos — como sejam a análise de mecanismos, o projecto de órgãos de máquinas e o projecto de dispositivos ou de equipamentos — destinados a aplicações específicas e concretas, com particular incidência em equipamentos de cariz generalista, para utilização nos processos produtivos de várias indústrias.

A parte conceptual das soluções era considerada como uma arte, dependente dos dotes criativos de cada artesão, não sendo, portanto, possível tratá-la cientificamente, assim como o próprio processo de projectar era ignorado.

A partir de meados da década de 60, começaram a ser desenvolvidos os primeiros trabalhos com vista à descoberta da racionalidade subjacente à actividade de projectar, tendo em consideração os mecanismos cognitivos dos projectistas e o processo por eles desenvolvido [Hubka 2001].

Há quem defenda que uma teoria de projecto não deve ser semelhante às teorias das ciências exactas ou das ciências naturais [Hooker 2004], uma vez que o processo de projecto é essencialmente uma prática desenvolvida por pessoas, devendo as teorias ser semelhantes às

da medicina. Ainda assim, tem-se assistido a um grande desenvolvimento das teorias de projecto, as quais se baseiam, cada vez mais, em procedimentos científicos.

Na área do projecto de arquitectura, Christopher Alexander — autor do livro “*Notes on the Synthesis of Form*” onde, pela primeira vez, foi abordado o tema da racionalidade subjacente ao processo de projecto e foi apresentado um método para construção dos diagramas de projecto — rejeita o conceito de basear o processo de projecto em procedimentos teóricos e científicos, uma vez que, segundo ele, é absurdo separar a prática de projecto do processo de projectar [Alexander 1971].

Ken Friedman considera que são necessárias teorias de projecto para a evolução da profissão e estabelece as bases em que deve ser desenvolvida uma teoria de projecto (*design theory*) para poder fazer face aos complexos desafios do mundo actual [Friedman, 2003].

Simultaneamente aos desenvolvimentos registados na teoria de projecto, começaram a surgir, também, ferramentas de projecto específicas para sistematizar e melhorar a eficiência das tarefas desenvolvidas em cada uma das fases do processo de projectar, de que são exemplo as ferramentas para:

- Recolha de dados, captura de requisitos e definição do problema;
- Geração e avaliação de ideias para soluções;
- Tomada de decisão;
- Materialização, configuração e dimensionamento das soluções;
- Documentação e comunicação do projecto;
- Aumento da qualidade e da fiabilidade das soluções

Por outro lado, vários autores — de entre os quais se destacam “Pahl/Beitz”, “Hubka/Eder”, “Ulrich/Eppinger”, “Nigel Cross”, “French”, “Ertas”, “Roozenburg”, “David Ulman”, “Pugh” e “Dieter”, — descreveram o processo de projectar, estruturando-o na sequência cronológica em que o processo se desenvolve, e compilaram as várias ferramentas que podem ser utilizadas para ajudar a desempenhar as tarefas inerentes a cada fase do processo de projecto.

Actualmente, o processo de projecto é encarado como uma parte do ciclo de vida do produto, sendo o processo de projecto a parte que relaciona, equaciona e define todas as fases do ciclo de vida do produto, desde a percepção da necessidade até ao desmantelamento do produto (que foi desenvolvido para satisfação dessa necessidade), quando este já não está em condições de desempenhar a sua missão.

Tomando como critério de segmentação o nível de abstracção e a generalidade de aplicação dos vários trabalhos existentes, obtêm-se os três grupos distintos a seguir indicados:

Num primeiro grupo, de nível de abstracção mais elevado, incluem-se os trabalhos relacionados com o processo cognitivo dos projectistas durante a actividade de projectar, baseados em princípios de orientação e procedimentos científicos, como é o caso da TRIZ [Altshuller, 1984], da Teoria Axiomática [Suh, 1990], da GDT [Yoshikawa, 1987, citado por Horváth, 2004] ou da “*C-K Theory*” [Hatchuel *et al.*, 2003].

Os trabalhos que descrevem o processo de elaboração de um projecto podem ser incluídos num grupo de nível de abstracção intermédio, e têm como objectivo comum a sistematização e racionalização do processo de projectar. Estes trabalhos consistem em “modelos de projecto” que abordam todas as actividades do processo de projectar, de uma forma generalista e sistemática, desde a concepção até ao desmantelamento do produto, analisando as diversas ferramentas, princípios, boas práticas e exemplos de soluções bem sucedidas que podem ser utilizados em cada uma das fases da actividade de projecto.

No último grupo, incluem-se os trabalhos mais especializados, dedicados a actividades específicas das várias fases de projecto, os quais constituem ferramentas para utilizar em fases concretas do processo de projectar.

Embora os trabalhos existentes na área do projecto de engenharia tenham sido desenvolvidos com vista ao projecto de produtos de grande consumo, os princípios que lhes estão subjacentes também são válidos para o projecto de produtos de produção unitária.

Muitas vezes, os próprios projectistas adaptam as ferramentas existentes aos seus projectos de produtos únicos, tendo em conta as especificidades próprias destes produtos e do ambiente em que estes são desenvolvidos.

A dimensão reduzida das equipas de projecto de produtos únicos faz com que algumas das abordagens existentes, como é o caso da Engenharia Concorrente, surjam naturalmente e que outras ferramentas de projecto não sejam aplicáveis na sua extensão (como é o caso da realização de *brainstormings* formais ou da construção de matrizes de projecto). No entanto, é de toda a conveniência conhecer os princípios subjacentes a todas as metodologias na sua forma original.

O facto de as ferramentas não serem utilizadas de forma exaustiva faz com que não sejam registadas as alternativas consideradas, os critérios de selecção adoptados, as decisões tomadas, entre outros pormenores justificativos do projecto; levando o processo do projecto a ficar indevidamente documentado.

1.3.3 Sistematização de Procedimentos

Neste trabalho, foi compilada uma metodologia para projecto de produtos únicos, desenvolvidos em ambiente de PME, que faz a adequação dos procedimentos que integram o processo de projecto, com as várias teorias e ferramentas existentes actualmente para a actividade de projecto.

A metodologia contribui para que os procedimentos de projecto sejam desenvolvidos de uma forma sistemática, aplicando as várias teorias e ferramentas actuais à disposição dos projectistas.

A metodologia fornece uma estrutura robusta e um pensamento sistemático que incentiva à utilização de estratégias que tornem o processo de projectar mais eficiente, evitando os ciclos de tentativa-erro e minimizando as iterações.

O objectivo desta metodologia consiste em guiar os projectistas numa lógica de pensamento científico que será utilizada para captar, analisar e gerir o conhecimento ao longo do processo de projecto, estruturando-o. Procura-se, assim, evitar que estes aspectos sejam deixados ao critério da intuição do projectista.

Esta metodologia baseia-se na descrição do processo de projecto, conforme é apresentada na norma VDI 2221 [VDI, 1987], sendo a mesma complementada com as interpretações de

outros investigadores, no sentido de a especializar para a utilização no projecto de produtos únicos, sendo as tácticas de projecto introduzidas na metodologia validadas pela Teoria Axiomática de Projecto.

Nesta perspectiva, os projectistas serão guiados, cronologicamente, no desenvolvimento das tarefas inerentes ao processo de projectar, no sentido de realizarem uma análise “*top-down*” no estabelecimento dos requisitos funcionais, nas soluções adoptadas e nos componentes a utilizar; e no sentido de realizarem uma síntese “*bottom-up*” para a realização dos cálculos de dimensionamento, na execução dos desenhos de pormenor, no estabelecimento das variáveis de processo e dos ensaios de funcionamento.

1.3.4 Originalidade e Contributo da Tese

Embora tenham sido desenvolvidos, ao longo de muitas décadas, muitos modelos para descrever o processo de projectar e tenha sido feito muito trabalho de exame e de melhoramento das metodologias existentes, a originalidade desta tese reside no facto de apresentar uma metodologia de projecto destinada a produtos únicos e de pequenas dimensões, os quais não têm sido objecto de estudos dedicados às suas especificidades, tendo-lhes sido aplicadas as teorias de projecto gerais e a parte das metodologias de projecto que vai até à realização dos protótipos.

Nesta metodologia foram introduzidas estratégias de projecto que permitem a obtenção de projectos robustos face às incertezas dos dados do problema, inerentes ao facto de se tratar de produtos novos (únicos), não havendo, portanto, histórico de situações semelhantes e de não ser economicamente viável o esclarecimento de grande parte das incertezas.

Na metodologia proposta, são introduzidas, como linhas de orientação (*guidelines*), tácticas de projecto ou boas práticas, para utilizar no processo de projectar produtos únicos e aplicáveis nas actividades seguintes:

- Enunciação do problema e concepção da solução;
- Construção de modelos teóricos simplificados;

- Utilização de soluções ajustáveis;
- Representação de soluções alternativas;
- Concepção de arquitectura modular;
- Preparação de planos de contingência e opções.

Nesta tese, foi adoptada a Teoria Axiomática de Projecto para a validação dos procedimentos que serão introduzidos na metodologia, o que lhe confere uma estrutura robusta e um pensamento sistemático para apoio às actividades de projecto, aplicando o conceito de arquitectura de sistema e estruturando os elementos do projecto hierarquicamente.

Tradicional e tipicamente, a documentação do projecto é criada no final do processo de projecto e, na quase totalidade dos casos, representa o produto final, omitindo as alternativas que não foram eleitas, a discussão e a racionalidade subjacentes ao processo de tomada de decisão, assim como as justificações para as decisões de projecto tomadas.

A documentação que será criada, de forma sistemática durante a aplicação da metodologia, contribuirá para evitar esta situação e facilitar a comunicação entre os vários membros das equipas de projecto.

Foi também feito o enquadramento das estratégias de projecto, introduzidas na metodologia, na Teoria Axiomática de Projecto e, no caso das opções e soluções alternativas existentes, em projectos modulares, foi criada uma terceira dimensão no esquema da decomposição em zigue-zague, sendo a representação de soluções alternativas feita em planos paralelos.

1.4 Método de Investigação – Teoria e Validação

A informação recolhida para a elaboração desta tese foi utilizada para analisar projectos existentes, metodologias de desenvolvimento de produtos e práticas correntes na indústria. Pretendeu-se, assim, compilar uma metodologia que seja aplicável ao projecto de produtos únicos, de baixo valor económico, desenvolvidos por equipas de projecto reduzidas e em empresas de pequena dimensão.

A eficiência e a validade da metodologia proposta podem ser demonstradas de três formas [Gumus 2005]:

- 1) Analisando-se diversos projectos numa perspectiva histórica;
- 2) Construindo-se casos/exemplos de estudo (“*case studies*”) com vista à obtenção de confirmações e contra-exemplos;
- 3) Realizando-se experiências em projectos.

A primeira aproximação consiste em fazer observações em projectos existentes e comparar os resultados do trabalho com os resultados esperados pela aplicação da metodologia proposta. Esta aproximação requer um estudo extensivo de um grande número de exemplos, sendo alguns deles realizados de acordo com a metodologia e outros não.

A segunda aproximação pode ser efectuada de duas formas:

- a) Analisar o sistema projectado, sem utilizar a metodologia proposta, e provar que poderia ter-se obtido melhores resultados com a aplicação da metodologia proposta.
- b) Projectar um sistema utilizando a metodologia proposta e mostrar a melhor/pior performance relativamente a outras metodologias.

A terceira aproximação consiste em atribuir a mesma tarefa a dois grupos diferentes, sendo apenas um dos grupos conhecedor da metodologia proposta, e comparar os resultados. Esta aproximação não é fácil de implementar, uma vez que é praticamente impossível reunir duas equipas de projecto idênticas e assegurar que uma delas não conhece nenhum dos procedimentos recomendados na metodologia.

Nesta investigação, foram utilizados vários projectos que o autor realizou e nos quais utilizou partes da metodologia proposta. Nesses projectos, são evidenciados os efeitos da

utilização das recomendações incorporadas na metodologia e são estimadas as consequências da sua não aplicação.

Assim, a segunda forma (alínea b)) da segunda aproximação é a mais adequada para esta investigação, sendo suficiente para provar que a utilização da metodologia proposta proporciona vantagens relativamente à sua não utilização.

1.5 Organização da Tese

O trabalho desenvolvido é constituído por oito capítulos, cujos títulos correspondem aos itens 1.5.1 a 1.5.8, e compreendem as actividades principais neles indicadas.

Devido à diversidade de termos utilizados na literatura e à inexistência de histórico de tradução para a língua portuguesa de muitos dos termos anglo-saxónicos, nalguns casos, acompanhando a tradução proposta, apresenta-se, entre parênteses, os termos originais, em língua inglesa.

1.5.1 Capítulo 1 – Introdução

No primeiro capítulo é apresentada uma síntese do trabalho e a organização para ele adoptada, sendo caracterizados os vários aspectos em que o trabalho se enquadra.

É também apresentada a definição do problema, a motivação para este trabalho, o seu âmbito e a sua oportunidade, assim como os procedimentos que foram seguidos na investigação realizada.

1.5.2 Capítulo 2 – O Estado da Arte

Neste capítulo são apresentadas, resumidamente, várias teorias, metodologias e ferramentas existentes, vocacionadas para o processo de projectar ou para algumas das actividades que o compõem. A exposição feita resulta da análise efectuada às várias teorias e métodos existentes actualmente para a actividade de projectar, assim como aos estudos recentemente

desenvolvidos na área da actividade de projectar, vocacionados para as formas de elaboração mental, incluindo a tomada de consciência dos processos cognitivos e dos critérios que regem as decisões dos projectistas, de modo a que estes processos possam ser percebidos e apreendidos por novos projectistas que se iniciam na profissão.

São apresentadas as partes dessas teorias, metodologias e ferramentas com relevância para o presente trabalho, que foram seleccionadas durante a pesquisa e análise efectuada à bibliografia existente nesta área de estudo (projecto de engenharia), relacionadas e aplicáveis à actividade de projecto desenvolvida em pequenas e médias empresas, para produtos únicos, relativamente às quais a investigação das possibilidades de aplicação das mesmas, ou de algumas das suas partes, no processo de elaboração de projectos de produtos únicos, comumente desenvolvidos em pequenas e médias empresas industriais, se tenham mostrado proveitosas.

1.5.3 Capítulo 3 – Projecto de Produtos Únicos em PME

No terceiro capítulo, são analisadas as características específicas, tanto dos Produtos Únicos como das Pequenas e Médias Empresas que os produzem, aproveitando-se também para esclarecer a oportunidade da elaboração deste trabalho.

São tratados em pormenor os temas relacionados com os tópicos seguintes:

- Características específicas dos produtos únicos, feitos por encomenda, bastante personalizados para o cliente a que se destinam, e com bastantes incertezas relativamente aos dados do problema.
- Enquadramento do projecto de produtos únicos no seu ciclo de vida.
- Características das pequenas e médias empresas, em termos organizacionais e dos processos de produção.
- Análise do processo de projectar e da transmissão das boas práticas de projecto, por meio do *know-how* dos intervenientes no processo de projectar.

- Aplicação de metodologias de arquitectura de produto a PME, com vista à sistematização dos procedimentos, de modo a poupar tempo e reduzir custos.

1.5.4 Capítulo 4 – Análise do Processo de Projectar

O processo de projectar foi analisado, exhaustivamente na parte aplicável ao projecto de engenharia e ao projecto de arquitectura, tendo sido também analisados os aspectos relacionados com a execução de programas (*software*), para a elaboração de projecto em computador.

Foram estudados vários modelos que representam o processo de projectar, com o objectivo de avaliar a sua adequabilidade ao projecto de produtos únicos e a recolher os elementos necessários à construção da metodologia a utilizar no projecto de produtos únicos.

A pesquisa exhaustiva da literatura existente na área do projecto de engenharia e do projecto de arquitectura permitiu conhecer as interpretações dos vários investigadores nessas áreas do projecto e compreender melhor as teorias, metodologias e ferramentas mais importantes existentes. Apresenta-se, assim, neste capítulo um resumo actualizado que reúne os trabalhos mais relevantes relacionados com o projecto de engenharia.

1.5.5 Capítulo 5 – Aspectos Principais da Metodologia

No capítulo 5, é proposta a utilização de novas ferramentas, adequadas às particularidades do processo de projecto de produtos únicos, de que são exemplo:

- o estabelecimento do enunciado do problema e a utilização de modelos de criatividade para concepção das soluções.
- a utilização de modelos teóricos simplificados, como forma de tornar os projectos desacoplados ou desacopláveis.
- a identificação do papel desempenhado pelas soluções flexíveis, como forma de introduzir tolerâncias no projecto de produtos únicos, tornando-os insensíveis às variações dos dados do problema e das condições de utilização a que estarão sujeitos.

- a introdução das soluções alternativas no universo de projecto definido pela Teoria Axiomática de Projecto, tendo sido proposta uma terceira dimensão no esquema da decomposição em zigue-zague para representação de cada solução alternativa em planos paralelos.
- a utilização de concepções modulares, com arquitectura baseada em estruturas do tipo “plataforma modular”, como forma de facilitar a mudança entre soluções alternativas ou a transformação noutras soluções, através da substituição de módulos, viabilizando, assim, os “planos de contingência”, como sejam as alterações introduzidas à montagem no local ou durante a fase de ensaios de funcionamento.

1.5.6 Capítulo 6 – Compilação da Metodologia

A metodologia desenvolvida é exposta neste capítulo, através da apresentação de um modelo que representa as várias actividades que são desenvolvidas ao longo do processo de projectar e as suas inter-relações. Estas actividades são agrupadas em função dos resultados intermédios que permitem alcançar, desde o estabelecimento das “Especificações”, passando pela construção da “Estrutura Funcional”, pela definição dos “Princípios a Utilizar nas Soluções” e pela “Composição Modular”, até à elaboração do “Anteprojecto”, do “Projecto Final” e da “Documentação do Produto”.

Neste capítulo, são explicadas, sucintamente, as várias actividades integradas no modelo que constitui o processo de projectar produtos únicos.

1.5.7 Capítulo 7 – Aplicação da Metodologia e Análise de Casos Práticos

A aplicação da metodologia teve em consideração as particularidades do projecto de produtos realizados por encomenda, o qual é orientado para a satisfação do cliente, pretendendo-se que as características físicas e o desempenho das funcionalidades do produto correspondam aos requisitos do cliente.

Sendo este processo desenvolvido em pequenas e médias empresas, é fortemente influenciado pelas características económicas do mercado, quer em termos do tipo de

equipamentos que deverão ser projectados, quer em termos do modo como os mesmos deverão ser construídos.

Para validação da metodologia, foram utilizados exemplos de máquinas destinadas à movimentação de materiais que, por natureza, se destinam a interligar outros equipamentos existentes, os quais estabelecem requisitos e constrangimentos imperativos relativamente aos tipos de produtos, às localizações de partida e de chegada, às cadências e sequências de funcionamento, etc. Assim, as máquinas destinadas à movimentação de materiais são, portanto, concebidas em função das necessidades concretas e específicas do contexto em que irão operar.

Nos casos práticos, reais, que são apresentados e nos quais são comprovados os benefícios da aplicação da metodologia que é o objecto deste trabalho, foram utilizados projectos de máquinas e sistemas para movimentação de materiais, que evidenciam as vantagens da utilização da metodologia proposta, na qual foram incorporados os procedimentos indicados no capítulo 5.

1.5.8 Capítulo 8 – Conclusões e Futuros Desenvolvimentos

Por fim, é feito um resumo da investigação realizada, são analisados os resultados obtidos com a realização deste trabalho, são apresentadas as conclusões a que conduzem os resultados dos trabalhos desenvolvidos e são indicadas algumas sugestões para futuros desenvolvimentos, relacionados com o tema deste trabalho, compreendendo os aspectos seguintes:

- Análise dos resultados obtidos
- Apresentação das conclusões
- Sugestão de temas para realização de futuros trabalhos e investigações.

1.5.9 Referências Bibliográficas

São apresentadas as referências bibliográficas que foram utilizadas para a elaboração deste documento tendo sido indicadas apenas aquelas que mais se adequam ao tema deste trabalho. Embora tenham sido consultadas muitas outras obras, publicações e artigos, que também poderiam ter sido incluídas, o contributo das mesmas para complemento deste trabalho e para ajudar à sua compreensão não seria significativo.

1.5.10 Anexos

Foram incluídos, em anexos, os elementos e dados que, pela sua extensão, quebrariam a continuidade do texto.

2 O Estado da Arte

Este capítulo é dedicado à apresentação e análise das partes seleccionadas durante a pesquisa efectuada à bibliografia existente, de modo a fazer o enquadramento teórico desta dissertação com as várias Teorias, Métodos e Ferramentas, assim como, com as Práticas Correntes utilizadas na indústria, aplicáveis aos vários aspectos do processo de projecto.

Um dos objectivos desta pesquisa bibliográfica consistiu em aprender as várias teorias, ferramentas e métodos de projectar, bem como compreender as práticas utilizadas correntemente na indústria e confirmar a lacuna existente no que se refere ao processo de projectar novos produtos únicos.

Outro objectivo desta pesquisa foi seleccionar os melhores procedimentos encontrados na pesquisa teórica e nas práticas correntes, a fim de as incluir na metodologia desenvolvida para ajudar a projectar produtos únicos, de forma mais eficiente.

A descrição das teorias, métodos e ferramentas de projecto a seguir apresentadas não pretende descrever exhaustivamente, nem explicar, as referidas teorias, métodos e ferramentas existentes para a actividade de projectar, mas apenas dar a conhecer um resumo, actualizado, das partes das teorias com interesse para a metodologia que foi objecto deste trabalho, de modo a facilitar o acompanhamento e compreensão das práticas recomendadas na metodologia desenvolvida.

Ao longo das descrições a seguir enunciadas, são indicadas fontes bibliográficas que, na opinião do autor deste trabalho, melhor descrevem, explicam e que tornam mais fácil a compreensão de cada uma das teorias, métodos e ferramentas de projecto relacionadas com o tema desta dissertação.

A par das referências bibliográficas que descrevem e explicam de forma pormenorizada as várias teorias, métodos e ferramentas de projecto, na maior parte das vezes pelas próprias palavras dos seus autores, são apresentadas também referências bibliográficas mais recentes, nas quais são apresentados complementos a essas teorias, sendo as mesmas analisadas e comparadas, em trabalhos efectuados por outros que não os autores das teorias originais.

Para além das teorias, metodologias e ferramentas de projecto reconhecidas, foram também analisados diversos artigos, *papers*, publicações e comunicações recentes que aprofundam determinados aspectos, relacionam as várias teorias e ferramentas de projecto, abordam o tema de projecto de diferentes perspectivas, não só num contexto tecnológico, de engenharia e indústria, mas também num contexto de arquitectura, de psicologia, ou de planeamento e gestão do processo de projecto do ponto de vista empresarial.

2.1 Análise e Caracterização das Filosofias, Teorias, Métodos e Ferramentas de Projecto

A documentação específica sobre o Processo do Projecto, abordando o tema de uma forma genérica e baseada na racionalidade subjacente à actividade de projectar, é relativamente recente [Coley *et al.*, 2007], sendo as publicações que têm em consideração o processo cognitivo posteriores a meados do século passado [Evbuomwan *et al.*, 1996], cujo grande desenvolvimento se deu nas décadas de 70 e 80 [Cross, 2006], mantendo-se nos últimos anos uma tendência de crescimento sustentado do número de trabalhos na área cognitiva do projecto (*design cognition*) [Liu *et al.*, 2009], no sentido de perceber a racionalidade subjacente aos problemas de projecto e à forma como os mesmos são resolvidos.

Até então, salvo raras excepções, a documentação existente na área de projecto de máquinas era muito especializada e abordava projectos concretos, como sejam a análise de

mecanismos, o projecto de órgãos de máquinas e o projecto de dispositivos ou de equipamentos, destinados a aplicações específicas e concretas, com particular incidência nos equipamentos de cariz generalista, utilizados em processos produtivos de várias indústrias.

No âmbito do projecto de máquinas, entre as abordagens seguidas por vários autores até final da década de 70, destaca-se a obra de P. Orlov [Orlov, 1976] como um excelente exemplo de uma abordagem especialmente dirigida aos Componentes de Máquinas e Dispositivos Mecânicos, os quais, segundo a versão actual da “Directiva Máquinas” [Directiva 2009/127/CE – 4] e a sua transposição para a legislação portuguesa, através do decreto-lei correspondente [Decreto-Lei n.º 103/2008 - 5] são, actualmente, classificados como “Quase Máquinas”.

Na sua obra, Orlov apresenta diversas soluções típicas para situações concretas, identificando as funcionalidades de cada uma das soluções, definindo os esforços e tensões a que as várias peças ficam sujeitas quando em serviço e apresenta a dedução das expressões para cálculo de esforços internos, tensões e deformações, no sentido de permitirem o dimensionamento das peças.

Ao apresentar diversas soluções, caracteriza-as e apresenta as suas vantagens e inconvenientes, além de indicar as situações para as quais cada uma das soluções é mais adequada.

Na área dos Órgãos de Máquinas, a obra de G. Niemann [Niemann, 1995 – 1960] é um dos exemplos mais conhecidos para o projecto de “Elementos Mecânicos de Máquinas”, onde são descritos, pormenorizadamente, vários tipos de meios de junção (soldadura, rebites, parafusos, etc.), molas, rolamentos, casquilhos, uniões de veios, transmissões por engrenagens, por atrito e por correntes, acoplamento de veios por atrito, freios e embraiagens.

No 1º Volume, Niemann apresenta boas práticas, em contraponto com soluções que originariam problemas, de acordo com o processo de fabrico que será utilizado para produzir as peças, assim como apresenta configurações que facilitam a armazenagem e o transporte, ou ainda soluções que facilitam a montagem, correspondendo às recomendações actualmente conhecidas como “*Design for X*”.

A actividade de projecto tem-se baseado em conhecimentos adquiridos em projectos anteriores, bem-sucedidos e mal-sucedidos, tendo sido ensinada através da exposição e explicação de exemplos de boas soluções e de más soluções, ou soluções incorrectas, conforme exposto em muitos livros de projecto de máquinas.

No entanto, para poder evoluir como profissão e fazer face aos desafios que o complexo mundo actual coloca aos projectistas é necessário que a actividade de projecto seja baseada em teorias, sistemáticas e tão científicas quanto possível [Friedman 2003].

Nas últimas quatro décadas do século passado foram desenvolvidos diversos trabalhos nesse sentido, havendo vários autores que apresentam listas dos mesmos.

Hubka e Eder apresentam um levantamento (*survey*) dos desenvolvimentos e tendências, através de uma tabela que ordena cronologicamente as “escolas de projecto” (*design scholars*) e os autores de livros, distribuídos por quatro colunas, cada uma delas referente a uma região geográfica [Hubka *et al.*, 2001]. A referida tabela encontra-se reproduzida na Tabela A.1 e na Tabela A.2, do Anexo A.1.

G. Pahl / W. Beitz / J. Feldhusen / K. H. Grote apresentam uma lista das principais publicações na área das metodologias de projecto, ordenada cronologicamente [Pahl *et al.*, 2007], que se encontra reproduzida na Tabela A.3, na Tabela A.4, na Tabela A.5, na Tabela A.6 e na Tabela A.7, do Anexo A.1.

Mats Nordlund apresenta, na sua tese de doutoramento, uma lista resumida das principais publicações na área das metodologias de projecto, ordenada cronologicamente, constituída por quatro colunas, referentes ao autor, designação do trabalho, país e ano em que foi publicado [Nordlund, 1996], encontrando-se essa lista reproduzida na Tabela A.8 do Anexo A.1.

Yong-Suk Kim apresenta, na sua tese de doutoramento, uma lista resumida das principais publicações na área das metodologias de projecto, incluindo uma classificação de acordo com as áreas para as quais cada teoria é mais adequada [Kim, 2002], encontrando-se essa lista reproduzida na Tabela A.9 do Anexo A.1.

Eric Coatanéa classifica, na sua Tese de Doutoramento, algumas teorias e metodologias de projecto, de acordo com a sua aptidão para o desenvolvimento de tarefas e com os métodos

que utiliza [Coatanéa, 2005]. As tabelas em que são apresentadas as classificações encontram-se reproduzidas na Tabela A.10 e na Tabela A.11, do Anexo A.1.

Robert J. Eagan *et al.* apresentam uma lista resumida das ferramentas de projectos que analisaram, classificando-as em função da sua adequabilidade para as várias aplicações. Essa lista encontra-se reproduzida na Tabela A.12, do Anexo A.1.

O rápido desenvolvimento ocorrido nas últimas décadas no estudo do processo de projectar resultou numa situação caótica, em termos de ordenamento do conhecimento de projecto que tem sido obtido (gerado e adquirido) nesta área, quer por exploração empírica, quer por compreensão racional, conforme refere Imre Horváth [Horváth, 2004], citando [Arciszewski 1990]; [Hundal 1990]; [Tomiyama 1990].

Por outro lado, as fronteiras do conhecimento relativas ao projecto de engenharia são difusas, havendo sobreposição do conhecimento específico de projecto com outros domínios de conhecimento, tanto científico como tecnológico, social, psicológico, etc.

Horváth [Horváth, 2004] propõe uma ordenação estruturada por níveis de domínio de investigação, tal como se encontra reproduzido na Figura 2.1, de modo a permitir uma argumentação fundamentada (*grounded argumentation*) acerca da ordem nas áreas de investigação em projecto de engenharia, assim como acerca da articulação do conhecimento em projecto de engenharia.

Nesta estrutura, são representadas as categorias de conhecimento e investigação, por ele denominadas como “*Source*”, “*Channel*”, e “*Sink*”, existindo em cada uma destas categorias “domínios de investigação”, “trajectórias” e “abordagens” (*research domains, trajectories, and approaches*), relacionados numa estrutura hierárquica.

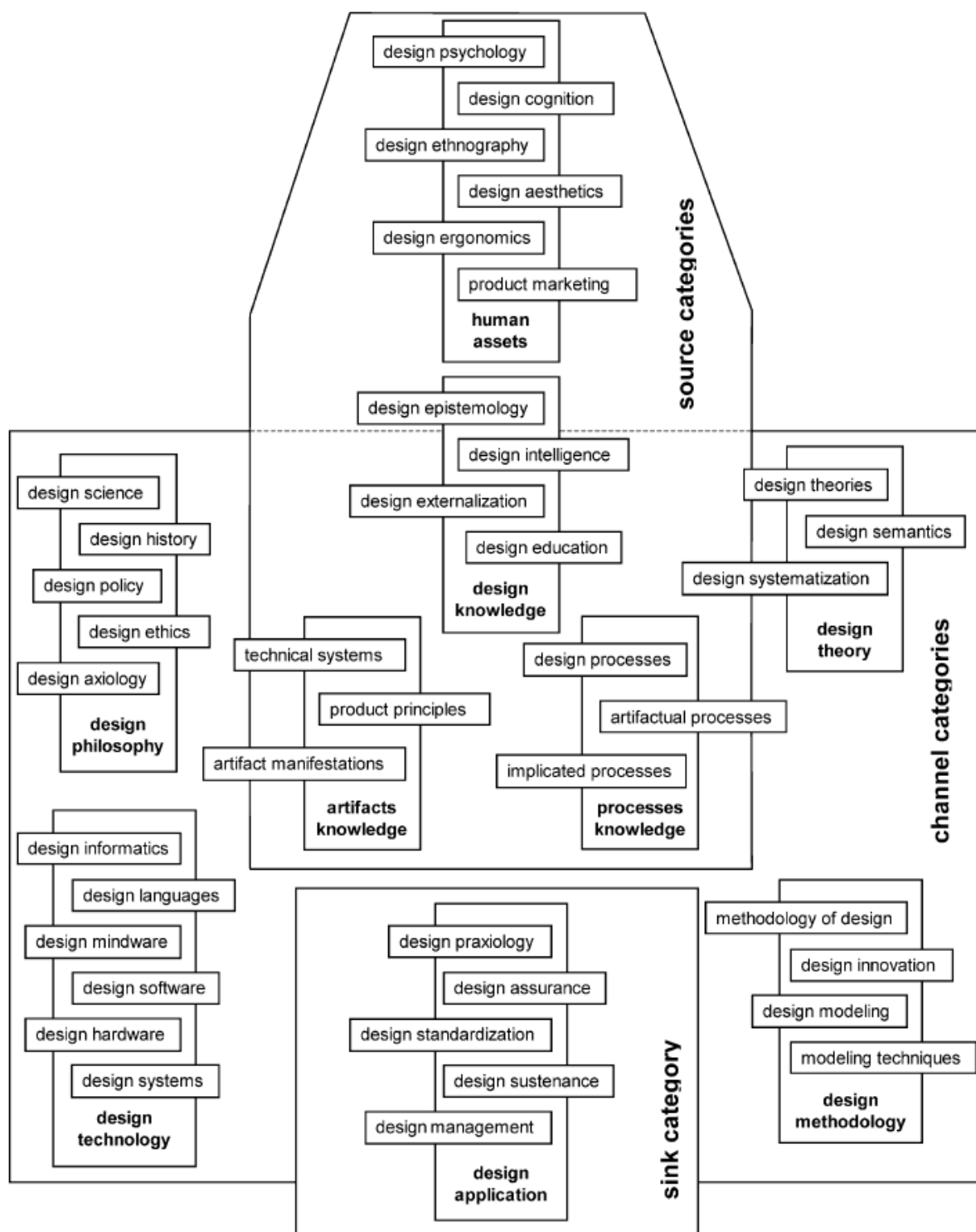


Figura 2.1 – O enquadramento racional das categorias, domínios e trajectórias da investigação em Projecto de Engenharia, retirado de [Horváth, 2004].

Muito embora a investigação que tem sido realizada na área de projecto seja predominantemente vocacionada para uma perspectiva tecnológica e de engenharia, existem

também trabalhos realizados numa vertente das ciências sociais, tendo Verschuren e Hartog [Verschuren *et al.*, 2005] analisado o processo de projecto nessa perspectiva, formulando-o em seis fases (*First Hunch and Initiative; Requirements and Assumptions; Structural Specifications; Prototype; Implementation; Evaluation*), e apresentado uma metodologia de avaliação e investigação como uma entrada sistemática (*systematic input*) no processo de projecto.

Também na perspectiva das ciências sociais, Jonh Hooker [Hooker, 2004] defende que uma teoria de projecto não deverá ser semelhante às teorias das ciências exactas ou das ciências naturais, visto o Processo de Projecto ser essencialmente uma prática, desenvolvido por pessoas, devendo a teoria ser semelhante às teorias da medicina. No entanto, a medicina lida com objectos naturais – seres vivos – e a engenharia lida com objectos artificiais, criados pelo Homem, cujo grau de complexidade é possível controlar e é bastante menor do que nos seres vivos. Por outro lado, os maiores desenvolvimentos realizados nas áreas das teorias de projecto de engenharia têm sido, cada vez mais, baseados em procedimentos científicos.

Entre os mais recentes desenvolvimentos, existentes na área do projecto e do desenvolvimento de produtos, os trabalhos que mais se relacionam com o tema desta investigação são os trabalhos desenvolvidos por Gumus Bulent [Gumus *et al.*, 2008] e [Gumus, 2005], que propõem um novo modelo para desenvolvimento de produtos, o “*Axiomatic Product Development Lifecycle (APDL) Model*” baseado na teoria axiomática, mas introduzindo mais um domínio, o “Domínio de Testes”, estendendo o modelo de projecto a todo o “ciclo de vida do produto”.

2.1.1 Projecto de Produtos Únicos

Relativamente ao projecto de produtos únicos, não se conhecem metodologias específicas e que particularizem as teorias de projecto, de modo a adaptá-las a este tipo de projectos, nem o processo de projecto aplicável a este tipo de produtos está devidamente caracterizado.

Hubka e Eder [Hubka *et al.*, 2001] identificam os produtos únicos, fabricados por encomenda, como sendo um tipo específico de produtos, designando-os como “*Special Purpose Equipment*”, com particularidades muito próprias, caracterizando o tipo de projecto e o tipo de empresas que desenvolvem este tipo de projectos e que produzem este tipo de

produtos, no entanto, consideram que as teorias de projecto existentes actualmente são de aplicação genérica, sendo-lhes também aplicáveis.

G. Pahl / W. Beitz / J. Feldhusen / K. H. Grote [Pahl *et al.*, 2007] limitam-se a considerar o projecto de produtos únicos (“*one off products*”) como sendo uma parte do projecto geral, não considerando os aspectos particulares, nomeadamente a relação de custos entre desenvolver exaustivamente um projecto, testar protótipos e corrigi-los em função dos resultados práticos que sejam obtidos, nem considerando a possibilidade de utilizar um processo de projecto específico, incorporando estratégias e ferramentas de projecto que dispensem o estudo exaustivo das soluções e as correcções posteriores.

No entanto, referem a tendência para o futuro da actividade de projecto como sendo o projecto de produtos específicos e de produtos únicos que requererá a maior atenção por parte dos projectistas: “*In the future, routine tasks such as variante designs will be largely undertaken by the computer, leaving designers free to concentrate on new designs and customer-specific one-off products.*” [Pahl *et al.*, 2007].

No caso de produtos únicos, uma vez que o processo de projecto não comporta a fase de ensaios e correcções ao produto em função dos resultados dos testes e ensaios práticos, o projecto deste tipo de produtos deverá incorporar estratégias e ferramentas de projecto para lidar com as incertezas e facultar orientações específicas para o desenvolvimento de soluções suficientemente flexíveis capazes de se adaptarem às circunstâncias das empresas de pequena e média dimensão, de modo a dispensarem a necessidade de efectuar correcções após a realização de ensaios.

2.1.2 Filosofias de Projecto

Tem havido diversas “escolas de pensamento” (*schools of thought*), nas quais projectistas e investigadores se pronunciam sobre como é o Projecto, como deve ser ou como deveria ser [Evbuomwan *et al.*, 1996].

Segundo Broadbent, citado por [Evbuomwan *et al.*, 1996], as várias “escolas de pensamento” poderiam ser classificadas em três grupos:

Um primeiro grupo, que acredita que o processo de projecto é caótico e criativo, baseado no argumento de que projectar é uma arte e, como tal, não pode ser ensinado, o que implica que só é projectista quem tem esse dom (*designers are born and not made*);

Um segundo grupo, que considera que o processo de projecto pode ser organizado e disciplinado, pelo que os métodos sistemáticos surgem naturalmente, de acordo com uma ou mais do que uma das três condições seguintes: as consequências de estar errado são graves; a probabilidade de estar errado é elevada; a quantidade de variáveis interligadas (*interacting*) é grande.

Um terceiro grupo, que considera que o processo de projecto deveria ser imposto ao projectista, como se se tratasse da aplicação de receitas.

Nigel Cross [Cross, 1991], reportando-se ao trabalho de Lawson [em “*Cognitive strategies in architectural design*”], onde é feita uma comparação das formas como os engenheiros e os cientistas resolvem os problemas, afirma (*states that*):

“Os cientistas têm tendência para usar a estratégia de exploração sistemática do problema, na busca de regras que lhes permitam gerar a solução correcta e óptima.

Em contrapartida, os projectistas tendem a sugerir várias possíveis soluções até encontrarem uma que seja boa, ou satisfatória.

Podemos dizer que os cientistas resolvem o problema por análise (*problem-solve by analysis*), enquanto os projectistas resolvem o problema por síntese (*problem-solve by synthesis*).

Os cientistas usam estratégias focadas no problema (*problem-focused*) e os projectistas usam estratégias focadas na solução (*solution-focused*).”

Percy Hill [em “*The Science of Engineering Design*”, de Holt, Rinehart and Winston, New York, 1970], citado por Dieter e Schmidt [Dieter *et al.*, 2009], comparou o método científico com o método de projecto, esquematizando essa comparação na forma de diagrama, encontrando-se o mesmo reproduzido na Figura 2.2.

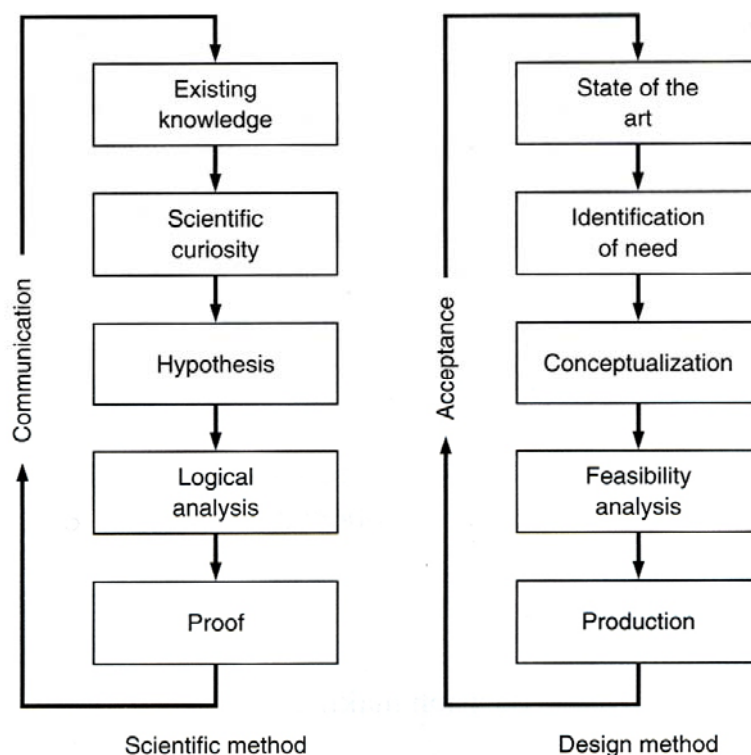


Figura 2.2 – Comparação entre o método científico e o método de projecto [Dieter *et al.*, 2009]

Também Herbert A. Simon (prémio Nobel da Economia em 1978) referia que a ciência se ocupa da criação de conhecimento acerca de objectos e fenómenos que ocorrem na Natureza, ao passo que o projecto se ocupa da criação de conhecimento acerca de fenómenos e objectos artificiais, entendidos como entidades feitas pelo Homem e não pela Natureza. [Simon, 1996].

A ciência é baseada em estudos do observável, enquanto o projecto é baseado em conceitos artificiais, caracterizados em termos de funcionalidades, objectivos e adaptações. Segundo [Petroski, 1996], é a capacidade de adaptação da Natureza às necessidades humanas que distingue o engenheiro projectista do cientista.

Yoshikawa classifica as várias filosofias de projectos como pertencentes a três “escolas de pensamento” [Yoshikawa, 1989]:

“Semantics School”

Esta “escola de pensamento” é atribuída a Rodenacker [Rodenacker, W. G. – *Methodisches Konstruieren*, 1970] e tem como dogma central que “qualquer máquina, enquanto objecto de projecto, é algo que transforma três formas de *inputs* (substancia, energia e informação) em três *outputs* relativos a cada *input*, mas em estados diferentes dos *inputs*. A diferença entre os *inputs* e os *outputs* é denominada funcionalidade.

Os requisitos são normalmente apresentados como funcionalidades e são analisados numa estrutura lógica que os interliga e decompõem em sub-funcionalidades.

“Syntax School”

Esta “escola de pensamento” está associada ao esforço de dar formalismo ao processo de projecto, dando especial atenção aos aspectos processuais da actividade de projectar do que ao projecto do objecto em si.

O processo de abstracção é considerado como a premissa para melhoramento (*improvement*) da universalidade dos modelos de projecto pertencentes a esta “escola de pensamento”.

“Past Experience School”

Nesta “escola de pensamento”, os argumentos avançados pelos seus seguidores são, normalmente, os de que a universalidade (que é o objectivo de muitos metodologistas de projecto), é contraditória à utilização prática e a criatividade dos projectistas pode ser dificultada (*hampere*d) e pode deteriorar-se, caso sejam adoptadas metodologias de projecto.

Nesta escola, a ênfase é colocada na significância de casos históricos de projecto, incluindo o conhecimento necessário para ser aprendido e melhorar a habilidade de projectar, pelo que a habilidade/aptidão (*ability*) para projectar não pode ser adquirida eficientemente numa forma teórica, mas sim através da experiência prática experimental.

Actualmente, torna-se evidente que as abordagens ao processo de projecto (*design approaches*) se enquadram na *Syntax school*, baseados em modelos prescritivos (*prescriptive models*) [Evbuomwan *et al.*, 1996].

A necessidade de formar e treinar jovens engenheiros, assim como de apoiar equipas de projecto colaborativo, ver-se-á obrigada a adoptar uma abordagem estruturada e sistemática ao processo de projecto.

2.1.3 Classificação em Função do Nível de Abstracção, da Extensão ou da Especialização

Conforme referido no ponto 1.3 do Capítulo 1, quando analisámos os vários trabalhos existentes em função do nível de abstracção e da generalidade de aplicação de cada um deles, identificámos os três grupos distintos a seguir enunciados, os quais se encontram representado na Figura 2.3 – Classificação dos vários trabalhos existentes na área de Projecto em função do nível de abstracção e da generalidade de aplicação. Esta figura serve, também, para enquadrar a metodologia desenvolvida no presente trabalho, em termos do seu nível de abstracção e da sua generalidade de aplicação.

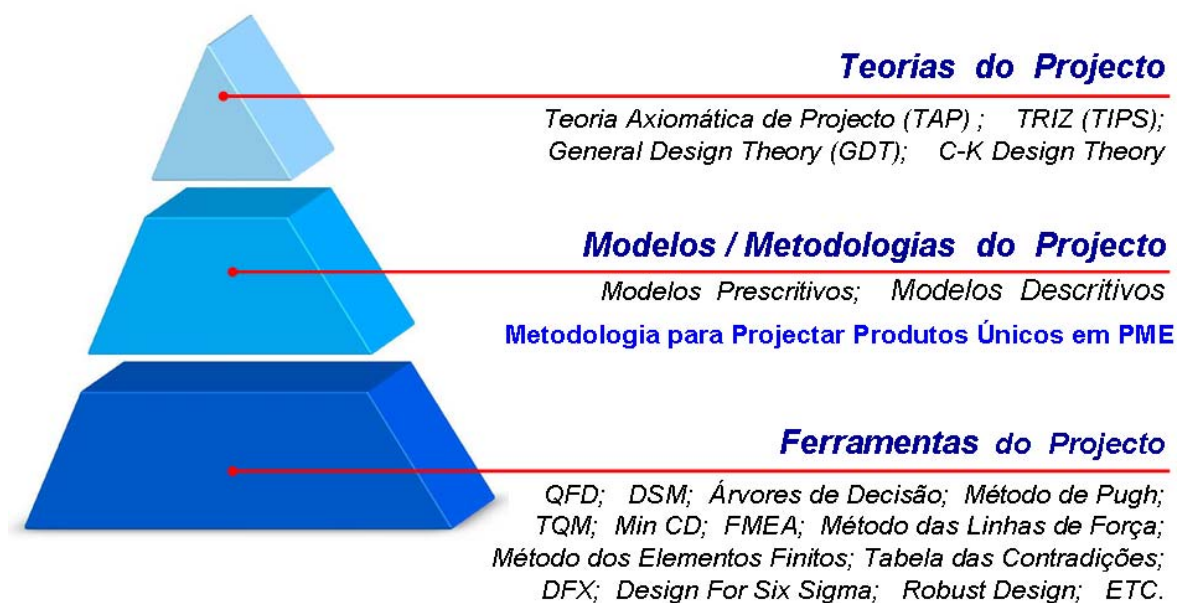


Figura 2.3 – Classificação dos vários trabalhos existentes na área de Projecto em função do nível de abstracção e da generalidade de aplicação

Num primeiro grupo, incluem-se os trabalhos de nível de abstracção mais elevado, que podem ser identificados como “Teorias de Projecto”, as quais abordam o processo cognitivo dos projectistas durante a actividade de projectar, descrevendo o processo e estruturando-o com base em princípios de orientação e procedimentos científicos, como é o caso da TRIZ [Altshuller, 1995 (Primeira Edição 1984)][Altshuller, 1999][Altshuller, 2005], da Teoria Axiomática [Suh, 1990][Suh, 2001] e dos trabalhos delas derivados.

Ambas as teorias são aplicáveis a qualquer tipo de projectos (quer sejam produtos, processos, organizações ou *softwares*) e muito vocacionadas para a parte conceptual do processo de projectar, fornecendo princípios para o projecto ideal (Teoria Axiomática: -2 axiomas; TRIZ o projecto ideal será aquele em que o objecto (material) não existe, mas a função é realizada).

Para além das teorias acima descritas, têm sido apresentadas outras teorias, mas que não têm tido grande aceitação por parte da comunidade científica nem por parte dos utilizadores, sendo a “C-K Theory” [Hatchuel e tal., 2003] [Hatchuel e tal., 2009] a proposta mais recente e General Design Theory [Yoshikawa H (1987) General design theory as a formal theory of design.], citado por Horváth [Horváth 2004], a mais elaborada e mais conhecida entre elas.

Num outro grupo, podemos incluir os trabalhos que descrevem o processo de elaboração de um projecto, numa perspectiva faseada (*phase oriented*) [Gumus, 2005], e que podem ser identificados como “Metodologias de Projecto” abordando, de forma generalista e sistemática, todas as actividades do processo de projectar, desde a concepção até ao desmantelamento do produto, analisando as diversas ferramentas, princípios, boas práticas e exemplos de soluções bem-sucedidas que podem ser utilizados em cada uma das fases da actividade de projecto.

Os trabalhos de autores como [Pahl / Beitz], [Hubka/Eder], [Ulrich/Eppinger], [Ulman], [Cross], [Dieter], [Pugh], etc , têm como objectivo comum a sistematização e estruturação do processo de projectar, utilizando métodos e ferramentas que reduzem a subjectividade com que o processo de projectar é desenvolvido, com vista à obtenção de produtos que realizem as funcionalidades pretendidas, maximizando a eficiência da combinação de materiais, energia, informação, com vista a reduzir os custos inerentes a todo o processo.

Os métodos de projecto moderno são baseados no conhecimento profundo de problemas e limitações que possam surgir, quer no fabrico, quer na futura utilização do produto, sendo cada vez maior a integração de todo o ciclo de vida do produto na elaboração do projecto e cada vez mais utilizada a metodologia de “Engenharia Concorrente” ou “Engenharia Simultânea”, que se baseia no paralelismo das actividades de desenvolvimento, quer de concepção quer de execução, encurtando, desse modo, o ciclo de desenvolvimento dos produtos.

Embora a “Engenharia Concorrente” ou “Engenharia Simultânea” não sejam propriamente processos de projectar, constituem abordagens ao modo de execução do processo de projecto, recomendando a sobreposição temporal das actividades funcionais, de modo a reduzir as modificações tardias ao projecto inicial, resolvendo diversos problemas de projecto simultaneamente, procurando soluções em paralelo, contando com a integração plena de todas as etapas da vida do produto, assim como de diversas áreas funcionais da empresa.

Os benefícios que advêm deste tipo de actuação são de vária ordem, desde a redução dos custos e dos tempos de produção, até ao aumento da motivação daqueles que participam no processo produtivo, passando pela satisfação do cliente e pela preservação do ambiente e da natureza, sendo esta metodologia cada vez mais adoptada pelas equipas de projecto, facto para o qual muito têm contribuído os progressos nas áreas de processamento e comunicação de informação, proporcionados pelas redes de computadores e tecnologias multimédia o que torna a comunicação entre os vários membros das equipas de projecto muito mais fácil.

Num último grupo, podemos incluir os trabalhos mais especializados e com menor nível de abstracção, que podem ser identificados como “Ferramentas de Projecto”, e que definem as operações a realizar em actividades específicas das várias fases do processo de projectar [QFD, DSM], [*Brainstormings*, Cartas Morfológicas, Analogias], [Tomada de Decisão, Teoria Prospectiva, Árvores de Decisão, Método de Pugh],[Método das Linhas de força, *Minimum Constraint Design*, *Elastic Design*; Axiomas e Teoremas da Teoria Axiomática de Projecto, Tabela de Contradições da TRIZ, Optimização de Projecto Multi-disciplinar, Método dos Elementos Finitos], [*Deterministic Design – Peer-Review Evaluation Process* (PREP) - FRDPPV], [*Robust Design*, TQM, FEAM, *Design for Six Sigma*, DFX].

Os princípios subjacentes aos trabalhos supra-referidos, muito embora, na maior parte dos casos, tenham sido desenvolvidos tendo em consideração o projecto de produtos de grande consumo e de processos de produção em série, são também válidos para o projecto de produtos de produção unitária, salvaguardando as especificidades próprias desses produtos e do ambiente em que são desenvolvidos.

Devido, essencialmente, à dimensão das equipas de projecto, em muitos casos não se justifica a utilização exhaustiva dos vários métodos existentes (como sejam a realização de “*brainstormings*” formais, o preenchimento de quadros ou a construção das matrizes), no

entanto é sempre de grande utilidade ter conhecimento dos princípios subjacentes a todas as metodologias na sua forma original.

Pelo facto das ferramentas não serem utilizadas de forma exaustiva, faz com que não sejam registadas as alternativas consideradas, os critérios de selecção adoptados, as decisões tomadas, entre outros pormenores justificativos do projecto, e o processo do projecto não ficará devidamente documentado.

Larry Smith [Smith, 2001] propõe a aplicação do modelo desenvolvido por Peter Senge, que classifica os níveis de pensamento em termos de eventos/acontecimentos (*events*), padrões/modelos (*patterns*) ou estruturas/estratégias (*structure*), ao ambiente de projecto conforme é definido por Nam Suh [Suh, 1990] na versão original da Teoria Axiomática e faz o enquadramento de algumas teorias, metodologias e ferramentas de projecto nesse contexto, tendo em vista a definição das áreas de actuação das metodologias “*Six Sigma*” e “*Design for Six Sigma*”. Esta representação encontra-se reproduzida na Figura 2.4.

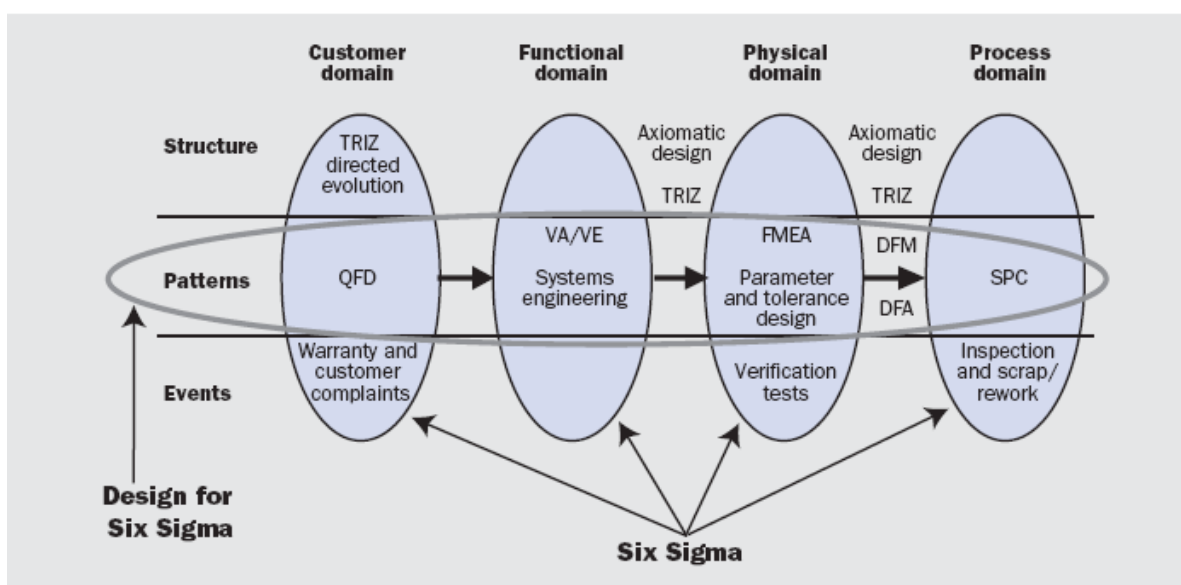


Figura 2.4 – Classificação e enquadramento das ferramentas de projecto no ambiente/universo de projecto, retirado de [Smith, 2001].

Esta classificação em três níveis distintos encontra paralelo em diversas áreas do conhecimento, podendo as actividades ou as decisões que as originam, ser classificadas, de uma forma genérica, como Estratégicas, Táticas e Operacionais.

2.1.4 Objectivo Comum - Compreensão, Racionalização, Ensino e Transmissão dos Princípios da Actividade de Projectar

A capacidade/habilidade/aptidão/competência/talento (*ability*) para projectar é fruto da inteligência humana e é uma das actividades que a distingue dos outros animais e (por enquanto) das máquinas. Esta aptidão é natural e distribuída por todos os seres humanos, comprovada desde os artefactos desenvolvidos por civilizações primitivas até aos mais sofisticados produtos existentes no mundo de hoje [Cross, 1998]. No entanto, há pessoas com maior aptidão para a prática de projectos do que outras, quer seja por herança genética quer seja por desenvolvimento dessa aptidão por via social ou educacional (formação).

Foi nas décadas de 50 e 60 do século passado que apareceram os primeiros estudos que explicavam a actividade de projectar do ponto de vista cognitivo [Coley *et al.*, 2007], tentando compreender o modo de pensar dos projectistas, e a partir de finais dos anos 80 começaram a surgir vários trabalhos de investigação nessa área.

Nos últimos anos, os estudos da componente cognitiva da actividade de projecto (*design cognition*), ou seja, a compreensão da racionalidade subjacente aos problemas de projecto e ao modo como os mesmos são resolvidos, têm aumentado continuamente [Liu *et al.*, 2009], existindo trabalhos de investigação (*research*) que abrangem uma vasta gama de tópicos na área de projecto, tais como, o processo cognitivo do projecto, o comportamento cognitivo dos projectistas, ou o estudo dos métodos desenvolvidos para capturar o comportamento cognitivo dos projectistas.

O sucesso do projecto está, também, muito dependente das competências próprias do projectista (conhecimentos de matérias básicas – física, matemática, desenho, tecnologia, órgãos de máquinas, etc.), da sua criatividade, da sua capacidade para visualização no espaço, da habilidade para representar as suas ideias em desenhos e, ainda, muito dependente daquilo que habitualmente se designa pela “sensibilidade do projectista”, a qual é adquirida ao longo da sua experiência profissional [Coley *et al.*, 2007], [Ullman *et al.* 1990], [Ullman, 1997], [Cross, 1998].

Existe actualmente uma grande variedade de métodos, que têm sido utilizados com o objectivo de compreender o processo mental executado pelos projectistas durante a actividade de projectar, abrangendo os vários tipos de projectos e os vários graus de

experiência dos projectistas, desde os iniciados (noviços) aos projectistas mais experientes e conceituados [Cross, 1998].

Segundo [Coley *et al.*, 2007], os métodos correntemente mais utilizados são:

- A “*protocol analysis*”, que se tornou uma técnica popular, mas que tem sérias limitações;
- Pensar alto (*thinking aloud*);
- A observação dos esboços dos projectistas que, para muitos, constitui a visualização dos seus pensamentos, servindo os mesmos para memorizar e registar conceitos;
- A etnografia, que se tem revelado um método bastante útil;
- Relativamente ao método de escrever no diário não foram obtidos resultados bem-sucedidos;

A investigação sobre a resolução de problemas distingue claramente problemas que não são de projecto (*non-design problems*), tais com problemas matemáticos (bem definidos) e problemas de projecto (mal definidos) e de resposta aberta. Para resolver problemas de projecto, os projectistas criam subtarefas para realizar a solução da forma mais eficiente. Por tal motivo, as competências e as características individuais alteram o processo de projectar e o resultado final do seu trabalho. Este facto constitui uma desvantagem para os modelos dos processos de projectar, uma vez que, embora os projectistas sigam todos os passos e recomendações do modelo, o resultado não será universal.

Por outro lado, é reconhecido que a resolução dos problemas de projecto varia consoante o nível de experiência do projectista, tendo-se sido verificado que os projectistas noviços seguem mais um modelo de tentativa e erro, enquanto os mais experientes têm mais capacidade para avaliar os conceitos na fase inicial, reduzindo o tempo para realizar a solução final.

Mark A. Robinson [Robinson *et al.*, 2005] apresenta o método utilizado para identificação de competências próprias do ser humano que facilitam a execução das tarefas de projecto, conforme defendido pelas abordagens baseadas em competências, tendo identificado o perfil do engenheiro projectista do futuro, como sendo composto por 42 competências, as quais poderiam ser agrupadas nas seis categorias seguintes (por ordem decrescente de criticidade):

- Atributos pessoais;
- Gestão de projectos;
- Estratégias cognitivas;
- Aptidões cognitivas;
- Aptidões técnicas;
- Comunicação.

Neste estudo, foram detectadas evidências de mudança no perfil do engenheiro projectista, o que demonstram que apesar de as competências técnicas se manterem no futuro, a sua importância, comparativamente com competências não técnicas, deverá decrescer.

A capacidade para visualização no espaço e a habilidade para representar ideias em desenhos, ou noutras representações gráficas, são as competências que mais ajudam o projectista na realização das suas tarefas de projecto, verificando-se que, regra geral, todos os projectistas têm uma grande capacidade de visualização no espaço e uma grande facilidade em se exprimirem através de representações gráficas.

Pelas razões mencionadas por David G. Ullman [Ullman *et al.* 1990], Nigel Cross [Cross 1998], A. T. Purcell and J. S. Gero [Purcell *et al.* 1998], Vinod Goel [Goel,1995] e Bryan Lawson [Lawson,2004], entre outros, a prática de representar graficamente, por esboços, desenhos, diagramas, esquemas, etc., desempenha um papel importantíssimo na actividade de projectar.

Embora a Humanidade pratique a actividade de projectar há milhares de anos e exista uma infinidade de produtos que funcionam, e que funcionam bem, a necessidade de estudar e aperfeiçoar o processo de projectar resulta da exigência continuada de novos produtos, de elevada qualidade e a custos reduzidos, para que as empresas consigam sobreviver num mercado global e cada vez mais competitivo [Ullman, 2010].

Tal como David Ullman, que descreve no prefácio do seu livro “*The Mechanical Design Process*” [Ullman, 2010] que, apesar da sua facilidade em fazer projecto e da sua vasta experiência nessa actividade, sentia dificuldade em explicar e ensinar aos seus alunos aquilo

que ele fazia tão naturalmente – projectar – também outros autores sentiram a necessidade de desenvolver teorias que descrevessem a actividade de projectar.

Nas suas aulas de projecto, Ullman podia mostrar exemplos de projectos de boa qualidade e projectos de má qualidade; podia relatar casos concretos de actividades desenvolvidas por projectistas; podia sugerir ideias para projectar, no entanto, não conseguia dizer-lhes o que deveriam fazer para resolver um problema de projecto, sem uma descrição racional e sistemática do processo de projectar.

Ullman relata um episódio em que, ao tentar patinar de costas, o instrutor lhe disse que observasse o que ele fazia e fizesse igual. Face ao insucesso do método, ele compreendeu a frustração dos seus alunos, que não conseguiam obter bons resultados com o método de ensino de mostrar bons e maus exemplos.

De um modo geral, os trabalhos existentes, relacionados com o tema desta tese, têm como objectivo comum a racionalização do processo de projectar, utilizando métodos e ferramentas cuja utilização reduz a subjectividade do processo de projectar, especialmente na criação de produtos que permitam obter as funcionalidades pretendidas, maximizando a eficiência da combinação de materiais, energia, informação, com vista a reduzir os custos inerentes a todo o processo.

Os estudos existentes apresentam justificações racionais para muitos dos procedimentos seguidos pelos projectistas, proporcionando uma maior consciencialização das razões que conduzem ao seguimento de determinados métodos e a aplicação de determinados princípios, para que estes processos possam ser percebidos e apreendidos por novos projectistas.

De um modo geral, esta tendência tem sido seguida em diversas áreas onde se realiza projecto, como é o caso do projecto de *software* (entidades imateriais) [Friedrich, 1996].

Para que seja possível ensinar a projectar ou para que seja possível criar máquinas capazes de realizar tarefas de projecto na área conceptual, é necessário compreender as formas de elaboração mental, incluindo a tomada de consciência dos processos cognitivos e dos critérios que regem as decisões dos projectistas, bem como estabelecer teorias e modelos que reduzam a subjectividade do processo.

Relativamente ao ensino da actividade de projecto e à transmissão de conhecimentos dos projectistas mais experientes (que se vão reformando) para os mais novos que se iniciam na profissão, deverão ser utilizados outros métodos que não apenas daquele que consiste em mostrar exemplos de soluções bem-sucedidas e mal-sucedidas.

Quanto às máquinas, podemos dizer que estas não devem servir para executar as tarefas que as pessoas gostam de executar e nas quais são competentes, mas sim para executar as tarefas que são árduas e difíceis de executar para os seres humanos e que estes não conseguem levar a cabo sem ajuda [Cross, 1998].

2.2 Teorias de Projecto

Projectar envolve a resolução de problemas, a criação de algo novo, ou a transformação de situações indesejáveis em situações preferíveis. Para isso os projectistas têm de saber como e por que as coisas funcionam, o que requer análise e explicação, sendo este o propósito da teoria [Friedman, 2003]. No seu artigo “*Theory construction in design research: criteria: approaches, and methods*”, Ken Friedman [Friedman, 2003] apresenta uma metodologia para construção de uma teoria na área de projecto.

Na sua forma mais básica, uma teoria é um modelo que ilustra como determinada coisa funciona, mostrando os seus elementos e as relações existentes entre eles, eventualmente dinâmicas, descrevendo um processo ou uma acção.

De acordo com [Evbuomwan *et al.*, 1996], uma Teoria de Projecto (*Design Theory*) pode ser entendida como uma colectânea de princípios, úteis para explicar o processo de projecto e proporcionar os fundamentos teóricos para a compreensão básica necessária para propor metodologias úteis. Segundo Christopher Alexander, alguns destes princípios são intemporais, mantendo-se actuais em qualquer época — “*There is one timeless way of building. It is thousands of years old, and the same today as it has always been*” [Alexander, 1979].

Por outro lado, as Metodologias de Projecto são constituídas por colectâneas de procedimentos, ferramentas e técnicas para serem utilizadas pelos projectistas ao longo do processo de projecto.

As metodologias de projecto têm um carácter prescritivo, uma vez que indicam como fazer projecto, enquanto as teorias de projecto são descritivas, uma vez que indicam em que consiste o projecto.

Neste contexto, na área de projecto podemos considerar como teorias de projecto as três teorias seguintes:

“Teoria da Resolução dos Problemas de Invenção (TRIZ / TIPS)”, desenvolvida por Genrich Altshuller, na antiga URSS, em finais dos anos quarenta do século XX e vocacionada para a geração de soluções e resolução de problemas de invenção;

“Teoria Axiomática de Projecto (Axiomatic Design)”, desenvolvida por Nan Pyo Suh, no MIT – EUA, em finais dos anos oitenta do século passado, vocacionada para a estruturação do processo de projectar e para definição de critérios para avaliação de soluções;

“Teoria Geral de Projecto (*General Design Theory – GDT*)” desenvolvida por Hiroyuki Yoshikawa, na Universidade de Tóquio, no início dos anos oitenta do século passado, vocacionada para a descrição matemática do processo de projectar, baseada em topologias e dirigida para a construção de sistemas de projectos assistido por computador (*computer-aided design – CAD – systems*).

Para além das teorias acima mencionadas, têm surgido outras propostas de teorias para projecto, de entre as quais se destacam a “*Universal Design Theory*”, apresentada por Hans Grabowski, Ralf-Stefan Lossack e El-Fathi El-Mejbri [Grabowski *et al.*, 1999] e por Ralf Lossack e Hans Grabowski [Lossack *et al.*, 2000]) e a “*C-K Design Theory*” desenvolvida por Armand Hatchuel e Benoît Weil [Hatchuel *et al.*, 2003] [Hatchuel *et al.*, 2009].

As teorias de projecto acima mencionadas são descritas a seguir, de modo sucinto.

2.2.1 Teoria Axiomática de Projecto – TAP

A Teoria Axiomática do Projecto – TAP é a única teoria de projecto que descreve matematicamente todo o processo de projecto, em conformidade com o modo como a mente humana funciona durante a realização das operações de projecto, estruturando todo o processo de projectar e fornecendo critérios para auxiliar as tomadas de decisão, inerentes ao processo de projectar.

Deste modo, a TAP proporciona uma abordagem sistemática ao processo de projectar, baseada em procedimentos científicos, através da utilização do conceito de Domínios, da sistematização do processo por decomposição em zigue-zague, traduzida pelas Matrizes de Projecto, sendo as decisões, tomadas ao longo do processo, fundamentadas em dois Axiomas, Corolários e Teoremas, derivados dos axiomas, que constituem a TAP.

A Teoria Axiomática do Projecto (*Axiomatic Design – AD*, na terminologia anglo-saxónica) foi desenvolvida por Nam Pyo Suh, no “*Massachusetts Institute of Technology – MIT*”, e encontra-se explicada, pormenorizadamente, em [Suh, 1990] e [Suh, 2001].

A primeira proposta para uma abordagem axiomática foi apresentada por Suh, N. P., Bell, A. C. e Gossard, D. C., através da publicação, em 1978, do artigo intitulado “*On an Axiomatic Approach to Manufacturing Systems*”, no “*Journal of Engineering for Industry, Transactions of A.S.M.E.*”, 100, pp 127-130”, e assumia a existência de princípios universais aplicáveis especificamente ao projecto e à manufactura. Dos sete hipotéticos axiomas propostos nessa altura, emergiram dois conceitos principais em Projecto, que são: “A independência funcional deve ser mantida” e “a complexidade deve ser minimizada” [Wilson, 1980].

A principal motivação de Suh para desenvolver a TAP foi o ensino da prática (actividade) de projectar, no sentido de ensinar a tomar boas decisões em projecto e criar uma disciplina de projecto e manufactura, baseada em princípios e métodos fundamentais, sem a qual não seria possível evoluir da natureza “*ad hoc*” tradicional da actividade de projecto [Nordlund, 1996].

O aparecimento da TAP constituiu uma alteração qualitativa importante na actividade de projecto, a qual passou a ter uma fundamentação teórica de acordo com os padrões da ciência moderna, conforme explicado em [Suh, 2001] “... *to establish a scientific base for*

design and to improve design activities by providing the designer with a theoretical foundation based on logic and rational thought processes and tools.”

A TAP proporciona um método sistemático e lógico para conduzir, documentar e otimizar a actividade de projecto, ajudando a evitar os tradicionais ciclos de Projecto-Construção-Ensaio-Reformulação do projecto na busca da solução e para determinar o melhor projecto entre os vários propostos (soluções alternativas) [Suh, 2001].

A Teoria Axiomática do Projecto preocupa-se essencialmente com a avaliação antecipada de soluções e com o controlo do processo de elaboração do projecto.

Através do estabelecimento dos Requisitos Funcionais (RFs) e dos Constrangimentos (Cs), a TAP estabelece uma formulação clara para os objectivos do projecto, o que favorece bastante a criatividade.

Por outro lado, fornece os critérios para a avaliação das boas e das más soluções de projecto, o que permite a eliminação das más opções o mais cedo possível, deixando os projectistas disponíveis para se concentrarem nas soluções mais promissoras.

A TAP também proporciona um fluxo sistemático de procedimentos, desde a criação dos conceitos até à elaboração do projecto de pormenor, através da formalização (estruturação) do processo de decomposição dos requisitos funcionais e das soluções de projecto.

De acordo com o método da TAP, o processo de projectar consiste na repetição dos procedimentos seguintes [Tae-Sik Lee, 1999]:

- i. Identificar os requisitos funcionais num ambiente neutro relativamente às soluções;
- ii. Desenvolver as soluções de projecto;
- iii. Determinar as Matrizes de Projecto e assegurar que os Axiomas são satisfeitos;
- iv. Verificar a consistência do projecto relativamente às decisões de níveis hierárquicos superiores;
- v. Repetir os passos de 1 a 4 para o próximo nível hierárquico inferior, até atingir as soluções de projecto localizadas no nível mais baixo.

A TAP é uma teoria aplicável ao projecto de qualquer natureza, quer se trate de um objecto, de um artefacto, de um processo, de uma organização, de um *software*, ou de qualquer tipo de sistema técnico, tangível ou intangível, e baseia-se nos fundamentos e conceitos a seguir enunciados, de forma sucinta:

O Ambiente de Projecto

Na terminologia da TAP, o universo do projecto é composto pelos quatro domínios seguintes [Suh, 2001]: o Domínio do Cliente; o Domínio Funcional; o Domínio Físico e o Domínio do Processo.

Estes domínios encontram-se representados na Figura 2.5 e os seus conteúdos podem ser descritos conforme se segue:

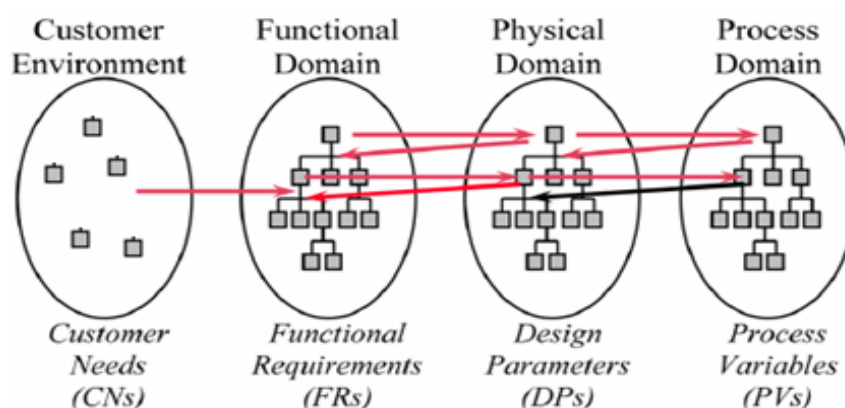


Figura 2.5 – Representação dos domínios que constituem o universo do projecto, com os seus conteúdos e as inter-relações entre os mesmos, adaptada de [Santos *et al.*, 2009]

Domínio do cliente: Contém as Necessidades do Cliente (NCs) ou os Atributos que o cliente procura no produto ou no sistema e que serão a solução resultante do projecto;

Domínio Funcional: Contém os Requisitos Funcionais (RFs) do objecto de projecto. Num bom projecto, os requisitos funcionais são o menor conjunto de requisitos independentes que descrevem completamente as necessidades funcionais da solução do projecto;

Domínio Físico: Contém os Parâmetros de Projecto (PPs) da solução. Estes parâmetros são os elementos escolhidos para constituírem a solução do projecto que satisfará os requisitos funcionais especificados;

Domínio do Processo: Contém as Variáveis de Processo (VPs) que caracterizam o processo de produção da solução, isto é, que satisfazem os Parâmetros de Projecto especificados.

Em cada par de domínios adjacentes, o domínio da esquerda, relativamente ao domínio à sua direita, representa “O que se pretende obter, isto é, o objectivo”. O outro domínio representa “Como é que será obtido, isto é, a forma de alcançar o objectivo”.

O projecto é realizado através de interacções entre os objectivos do projecto e o modo que será usado para alcançar esses objectivos. Os objectivos do projecto são especificados no domínio funcional (onde existem apenas elementos imateriais) e o modo de os alcançar é proposto no domínio físico (onde são representadas algumas das possíveis soluções reais, capazes de desempenhar as funcionalidades especificadas).

O processo de projecto consiste no mapeamento das relações entre os domínios, que são representadas através de matrizes, como por exemplo, a matriz de projecto que representa as relações entre os requisitos funcionais (RFs) e os parâmetros de projecto (PPs), ou a matriz de processo que representa as relações entre os parâmetros de projecto (PPs) e as variáveis de processo (VPs).

Os constrangimentos constituem as fronteiras das soluções aceitáveis, que poderão ser de dois tipos: Constrangimentos das entradas (*input constraints*) e constrangimentos do sistema (*system constraints*). Os constrangimentos das entradas são impostos como fazendo parte das necessidades do cliente e os constrangimentos do sistema são impostos pela solução de projecto que vai sendo criada.

O “mapeamento” entre os requisitos funcionais (RFs) e os parâmetros de projecto (PPs) podem ser resumidos na Equação 2.1, em que $\{RF\}$ é o vector dos requisitos funcionais, $\{PP\}$ é o vector dos parâmetros de projecto e $[A]$ é a matriz de projecto.

$$\{RF\} = [A] \cdot \{PP\} \quad (2.1)$$

Onde
$$A_{ij} = \frac{\partial RF_i}{\partial PP_j} \quad (2.2)$$

Se o parâmetro de projecto PP_j afecta o requisito funcional RF_i , ou seja, se o requisito funcional RF_i varia com a variação do parâmetro de projecto PP_j , então o elemento A_{ij} correspondente, na matriz de projecto, é diferente de zero. Caso contrário é zero.

Hierarquia e Decomposição em Zigue-zague

Outro conceito importante na Teoria Axiomática de Projecto é a Decomposição Hierárquica em Zigue-zague entre os domínios, começando pelo domínio “o Que se pretende” e indo até ao domínio “Como se alcançará” e voltando ao nível hierárquico imediatamente inferior do domínio “o Que se pretende”, e assim sucessivamente, desde o nível mais elevado da hierarquia, o nível do sistema global, até ao nível mais inferior da hierarquia, isto é, ao nível mais elementar e de maior pormenor [Suh, 1990].

Depois de resolver o nível mais elevado, os Requisitos Funcionais (RFs) e os Parâmetros de Projecto (PPs) são identificados de modo a proporcionar informação de projecto suficiente, sendo seguidamente decompostos até o projecto atingir o nível final, que corresponde ao nível de pormenor elementar, criando assim o projecto que possa ser realizado. A hierarquia que vier a ser estabelecida entre os RFs e os PPs representa a estrutura do projecto, a qual é também conhecida como a arquitectura do sistema [Gumus *et al.*, 2007]. Os PPs do nível mais inferior não deverão necessitar de ser decompostos ou de serem reprojectados.

Um exemplo de uma decomposição em zigue-zague entre os domínios funcional e físico, relativo ao projecto de um motor, é apresentado na Figura 2.6.

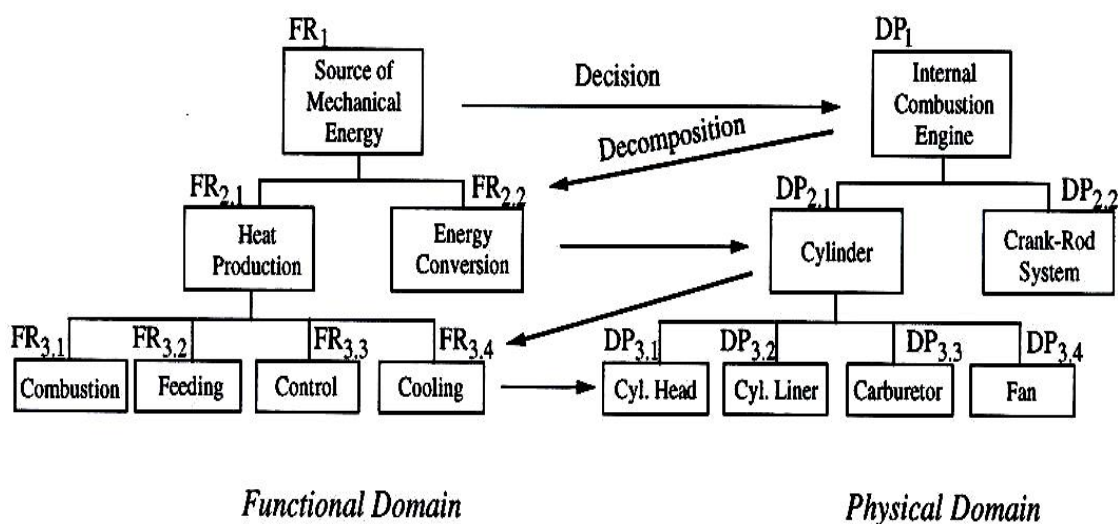


Figura 2.6 – Representação da decomposição hierárquica em zigue-zague, entre os domínios funcional e físico, relativa ao projecto de um motor, retirado de [Gonçalves-Coelho *et al.*, 2003]

Os Princípios de Projecto

A hipótese subjacente à Teoria Axiomática de Projecto é a existência de princípios fundamentais que regem as boas práticas de projecto.

Há dois princípios de projecto, ou axiomas, que são utilizados na Teoria Axiomática de Projecto e que constituem uma ferramenta para análise.

Os dois axiomas de projecto podem ser enunciados conforme se segue:

O Axioma da Independência (ou primeiro axioma):

Manter a independência dos requisitos funcionais (RFs).

Isto significa que cada um dos requisitos funcionais (RF) deve ser satisfeito por ajustamento de apenas um parâmetro de projecto (PP), sem afectar o desempenho de qualquer outro requisito funcional.

O Axioma da Informação (ou segundo axioma):

Minimizar o conteúdo de informação de um projecto.

Este axioma tem como objectivo ajudar a descobrir a solução de projecto alternativa com maior probabilidade de satisfazer os requisitos funcionais (RFs).

Durante a decomposição, deve ser aplicado o axioma da independência e os constrangimentos na matriz de projecto, para garantir que se obtém uma matriz de projecto desacoplada ou desacoplável, em cada nível do processo de projecto.

Uma vez que o processo de projecto não conduz a uma solução única, o axioma da informação deve ser utilizado para comparar as soluções alternativas que foram previamente encontradas.

O Primeiro Axioma

O primeiro axioma estabelece que, num projecto ideal, deve verificar-se uma relação estritamente de “um-para-um” entre os requisitos funcionais (RFs) e os parâmetros de projecto (PPs). Assim, o número de requisitos funcionais (RFs) deve ser igual ao número de parâmetros de projecto (PPs). Tais projectos são conhecidos por projectos desacoplados e caracterizam-se por uma matriz de projecto diagonal, o que indica a relação de “um-para-um” entre os requisitos funcionais (RFs) e os parâmetros de projecto (PPs) e garante que os requisitos funcionais (RFs) podem ser satisfeitos de uma forma absolutamente independente. No entanto, no mundo real, onde as interacções entre factores são usuais, não é fácil encontrar projectos completamente desacoplados.

Os projectos onde a concretização de algum dos requisitos funcionais (RFs) depende de mais do que um parâmetro de projecto (PP) são aceitáveis, desde que a matriz de projecto [A] seja triangular. Estes projectos são designados como projectos desacopláveis. Um projecto desacoplável também verifica o axioma da independência, desde que os parâmetros de projecto (PPs) possam ser especificados numa sequência tal que cada requisito funcional (RF) possa ser controlado por apenas um parâmetro de projecto (PP).

Qualquer outra configuração da matriz de projecto, que não possa ser transformada numa matriz triangular por simples troca de linhas ou de colunas, representa um projecto acoplado, isto é, contém interdependências entre os requisitos funcionais que não podem ser evitadas. De acordo com a teoria axiomática de projecto, os projectos acoplados devem ser preteridos.

As três categorias básicas de projecto, acima apresentadas, são baseadas nas três configurações básicas da matriz de projecto, representadas na Figura 2.7, nas quais “X” representa elementos diferentes de zero.

$$\begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix}$$

Desacoplado

$$\begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix}$$

Desacoplável

$$\begin{bmatrix} X & X & X \\ X & X & X \\ X & X & X \end{bmatrix}$$

Acoplado

Figura 2.7 – Configuração das categorias básicas da matriz de projecto, adaptada de [Suh, 1990]

De uma forma sucinta, podemos dizer que: um projecto é desacoplado quando cada um dos requisitos funcionais é satisfeito por ajuste de um único parâmetro de projecto; é desacoplável quando a independência entre os requisitos funcionais é garantida ajustando os parâmetros de projecto numa sequência apropriada; ou é acoplado se o ajuste de qualquer dos parâmetros de projecto perturbar mais do que um requisito funcional.

O Segundo Axioma

O Axioma da Informação proporciona uma forma de avaliar a qualidade do projecto facilitando, assim, a selecção entre os vários projectos alternativos.

A avaliação é conseguida através da comparação do conteúdo de informação presente em cada uma das soluções alternativas, medida em termos da sua probabilidade de satisfazer os requisitos funcionais RFs.

O critério da informação mínima é uma ferramenta muito poderosa (*powerfull tool*) tanto na optimização e simulação dos processos do projecto como na sua construção, onde existem várias variáveis que devem ser optimizadas [Suh, 2001]. A avaliação do conteúdo de informação pode ser utilizada para escolher a melhor solução entre as várias soluções propostas, independentemente do número de variáveis envolvidas. Em termos do axioma da informação, a melhor solução é aquela que contiver o menor conteúdo de informação e simultaneamente satisfaça o primeiro axioma, ou seja, entre todas as soluções propostas que satisfaçam o Primeiro Axioma, o melhor projecto é aquele que tiver a menor quantidade de informação.

A noção de quantidade de informação foi introduzida por Shannon, tendo tomado a base logarítmica para medir a quantidade de informação [Shannon, 1948]. A unidade resultante da utilização da base 2 é o “dígito binário”, ou “*bit*” (que corresponde à abreviatura de “*binary digits*” proposta por J. W. Tukey [Tukey, 1928]).

Um dispositivo com duas posições estáveis, como por exemplo, um relé consegue armazenar um *bit* de informação. Em n dispositivos desse tipo consegue-se armazenar n *bits*. A utilização da notação logarítmica resulta do facto de esses n dispositivos, de duas posições

estáveis cada um, possibilitarem 2^n estados diferentes e $\log_2 2^n = n$, que corresponde à quantidade de informação que é possível de armazenar nesses n dispositivos.

A quantidade de informação “ I ”, associada a um projecto (sistema) com um único requisito funcional (RF) e um único parâmetro de projecto (PP), é expressa em *bit*, como o logaritmo do inverso da probabilidade de sucesso “ p ”, sendo dada por [Suh, 2005]:

$$I = \log_2 \frac{1}{p} = -\log_2 p \quad (2.3)$$

onde:

I – quantidade de informação associada a um sistema com um único requisito funcional, expressa em *bit*;

p – probabilidade de satisfazer o requisito funcional.

No caso simples de a probabilidade ter uma distribuição uniforme, a equação acima pode ser escrita como:

$$I = \log_2 \left(\frac{\text{área do domínio do Sistema}}{\text{área comum}} \right) \quad (2.4)$$

Onde a área do domínio do sistema é calculada a partir da função densidade de probabilidade e a área comum é a fracção da área do domínio do sistema que está contida nos limites de variação do projecto, tal como se encontra representado na Figura 2.8.

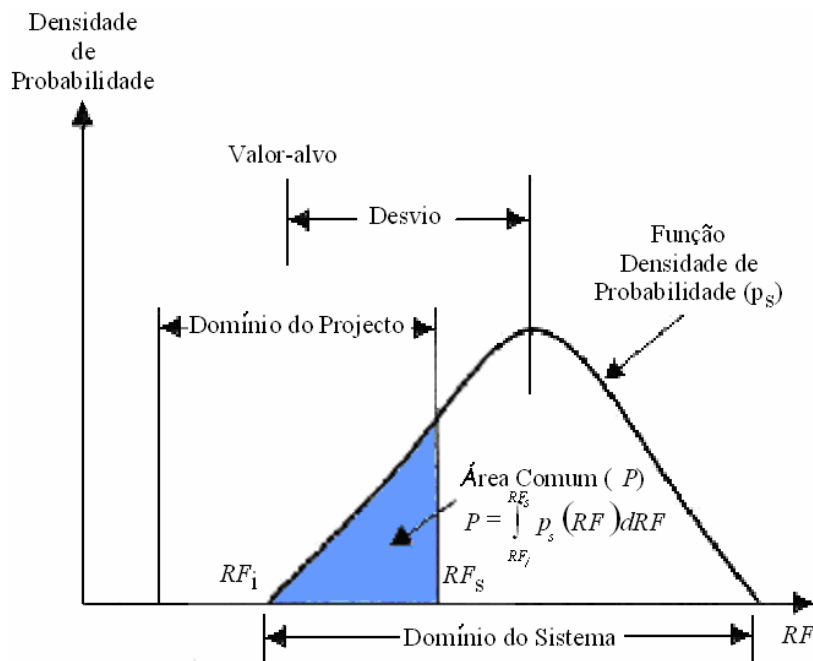


Figura 2.8 – Cálculo da probabilidade de sucesso num projecto com um RF e um PP, retirado de [Navas, 2007].

O domínio do sistema representa a capacidade do sistema actual em termos de variação, o domínio do projecto define a gama aceitável associada ao parâmetro de projecto PP especificado e a área comum diz respeito à quantidade de sobreposição entre o domínio do projecto e o domínio do sistema.

Para um projecto desacoplado com n requisitos funcionais RFs, o conteúdo total de informação, I , pode ser calculado através da seguinte expressão [Suh, 1990]:

$$I = \sum_{i=1}^n -\log_2 p_i = \sum_{i=1}^n I_i \tag{2.5}$$

Onde p_i é a probabilidade do RF_i ser satisfeito pelo PP_i . Quando todas as probabilidades, p_i , são iguais a 1, então o conteúdo de informação é zero. Inversamente, o conteúdo de informação é infinito quando uma ou mais probabilidades de sucesso, p_i , for igual a zero.

Os sistemas complexos requerem uma quantidade de informação substancial para terem o desempenho esperado e os grandes sistemas, que são constituídos por muitos componentes, não são necessariamente complexos.

Por outro lado, sistemas com poucos componentes são complexos, se a sua probabilidade de sucesso/desempenho (*accomplishment*) for baixa [Gonçalves-Coelho, 2003]

Corolário e Teoremas

Apresentam-se, em seguida, os enunciados dos corolários e dos teoremas que se consideram mais relevantes para a análise de soluções, e que foram derivados por Suh a partir dos dois axiomas da Teoria Axiomática de Projecto [Suh, 1990] [Suh, 2001]:

Corolário 1: Desacoplamento de um Projecto Acoplado.

Desacoplar diferentes componentes ou características de uma solução, se os RFs forem acoplados, tornando-os interdependentes.

Corolário 2: Minimização de RFs.

Minimizar o número de RFs e de CFs (Constrangimentos Funcionais).

Corolário 3: Integração de Componentes Físicos.

Integrar vários PPs num único componente, desde que os RFs se mantenham independentes.

Corolário 4: Aplicação de Normalização.

Usar componentes normalizados ou intermutáveis, se isso for compatível com os RFs e CFs do projecto.

Corolário 5: Utilização de Simetria.

Sempre que possível, utilizar componentes com formas simétricas. Os componentes simétricos requerem menos informação para a sua fabricação e montagem.

Corolário 6: Maior Tolerância.

Especificar para os RFs tolerâncias tão amplas quanto possível.

Corolário 7: *Projecto Desacoplado com Menos Informação.*

Procurar sempre soluções desacopladas com menos informação do que soluções acopladas.

Corolário 8: *Reangularidade Efectiva de um Escalar.*

A reangularidade efectiva R de uma matriz acoplada escalar ou de um elemento é a unidade.

Teorema 1: *Acoplamento Devido ao Número Insuficiente de PPs.*

Quando o número de PPs é menor do que o de RFs, então o projecto ou é acoplado, ou os RFs não podem ser satisfeitos.

Teorema 2: *Desacoplamento de um Projecto Acoplado.*

Quando um projecto é acoplado por ter um número de RFs maior do que o de PPs (i.e., $m > n$), então o projecto pode tornar-se desacoplável por adição de PPs, fazendo com que os números de RFs e PPs sejam iguais, desde que a matriz do projecto contenha uma submatriz triangular de dimensão $n \times n$.

Teorema 3: *Projecto Redundante.*

Quando o número de PPs é superior ao de RFs, o projecto ou é redundante ou é acoplado.

Teorema 4: *Projecto Ideal.*

Num projecto ideal, o número de PPs é igual ao de RFs.

Teorema 5: *Necessidade de um Projecto Novo.*

Quando o conjunto de RFs que define um problema é alterado (pela adição de RFs, ou pela sua substituição total ou parcial), então a solução original, representada por um determinado conjunto de PPs, deixa de satisfazer o novo conjunto de RFs. Consequentemente, deve procurar-se uma nova solução.

Teorema 6: *Independência da Sequência de um Projecto Desacoplado.*

A informação associada a um projecto desacoplado é independente da sequência escolhida, segundo a qual os PPs são ajustados para satisfazer um dado conjunto de RFs.

Teorema 7: *Dependência da Sequência de Projectos Acoplados e Desacopláveis.*

A informação associada aos projectos acoplados ou desacopláveis depende da sequência escolhida, segundo a qual os PPs são ajustados.

Teorema 8: *Independência e Intervalos de Tolerância de um Projecto.*

Um projecto pode ser considerado desacoplado sempre que os intervalos de tolerância especificados para os RFs obedecem à condição expressa pela desigualdade seguinte:

$$T_i \geq \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq 1}}^n \frac{\partial RF_i}{\partial PP_j} \Delta PP_j, (i = 1, \dots, m)$$

onde:

T_i - intervalo de tolerância do requisito RF_i .

Neste caso, os elementos não diagonais da matriz de projecto podem não ser considerados no projecto.

Para além dos 26 teoremas de projecto formulados por Suh [Suh, 2001], nos quais estão incluídos os 8 teoremas anteriormente apresentados, foram também formulados 9 teoremas relacionados com o projecto e a decomposição de grandes sistemas, 3 teoremas para o projecto e a operação de grandes organizações, 2 teoremas relacionados com o projecto de *software* e 10 teoremas relacionados com a complexidade [Suh, 2005], sendo a complexidade entendida como uma medida de incerteza na compreensão daquilo que se deseja saber ou na obtenção de requisitos funcionais.

Outros teoremas têm sido propostos por outros investigadores, como é o caso de [El-Haik, 2005] e [Gonçalves-Coelho, 2010].

Na Tabela A.13 do Anexo A.2, encontram-se os artigos relacionados com a Teoria Axiomática de Projecto, compilados por [Kulak *et al.*, 2010] entre os anos 1990 e 2009, sendo os mesmos classificados em 4 grupos principais: (1) segundo o tipo de axioma a que se refere; (2) de acordo com a área de aplicação; (3) em função do método seguido, e (4) em termos do tipo de avaliação efectuada.

Evoluções Recentes

A Teoria Axiomática de Projecto tem sido estudada por vários investigadores que a têm aplicado às mais diversas actividades, mantendo o permanente desenvolvimento e evolução desta teoria, quer por introdução de novos teoremas, conforme acima referido, quer por adaptações introduzidas aos procedimentos e ao alargamento dos conceitos.

Nalguns casos, os desenvolvimentos consistem na adaptação dos conceitos da teoria às particularidades das actividades em que esta teoria será aplicada, tal como é o caso da aplicação da Teoria Axiomática de Projecto à fabricação de estruturas compósitas, de robots, de máquinas-ferramentas e de automóveis [Lee et al, 2006].

Noutros casos, foram introduzidos domínios específicos no universo/ambiente de projecto, como é o caso de Bulent Gumus, que introduziu o domínio de testes, tendo em vista a adequação da Teoria Axiomática ao projecto de produtos que serão produzidos em grandes séries, propondo o universo de projecto conforme representado na Figura 2.9.

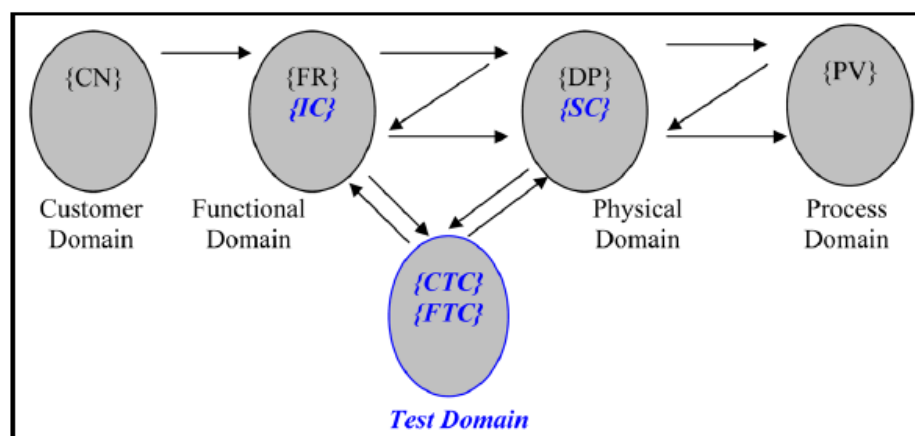


Figura 2.9 – Domínios e vetores de características do ambiente de projecto do Modelo de Gumus – TDPL, retirado de [Gumus, 2007].

Ainda no âmbito do universo do projecto, Campatelli propôs a inclusão de um domínio de recursos, conforme se representa na Figura 2.10, para desenvolvimento de um modelo de avaliação do acoplamento entre actividades do processo administrativo, identificação das actividades críticas, e avaliação das soluções alternativas para redução do acoplamento e aumento da eficiência [Campatelli *et al.*, 2009]

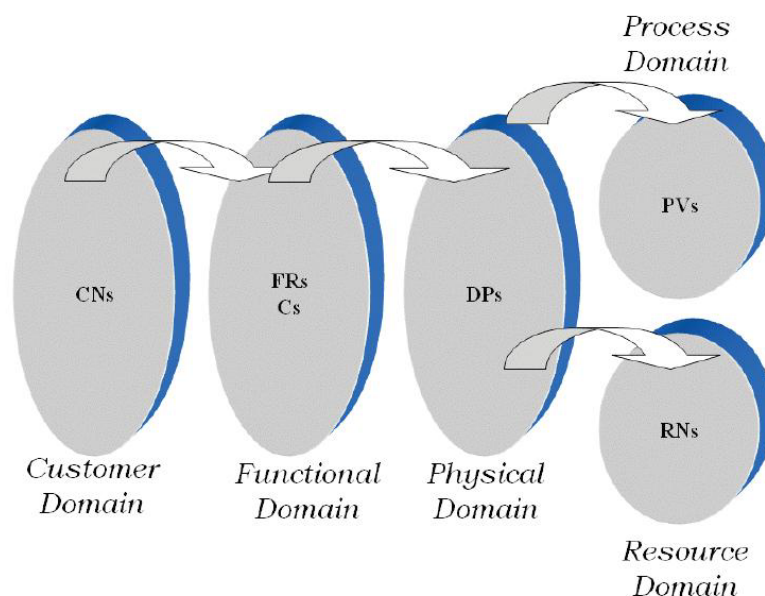


Figura 2.10 – Domínios do ambiente de projecto no modelo de análise do processo administrativo, retirado de [Campatelli *et al.*, 2009].

O procedimento de construção da estrutura hierárquica e de decomposição do projecto, de acordo com a Teoria Axiomática de Projecto, foi analisado por Albano [Albano *et al.*, 1994], e por Gonçalves-Coelho [Gonçalves-Coelho *et al.*, 2004], que apresentou a representação da decomposição em zigue-zague em conformidade com a abordagem da engenharia concorrente. Na Figura 2.11 encontra-se representado o processo de decomposição de acordo com a abordagem sequencial de projecto e na Figura 2.12 encontra-se reproduzida a representação do processo de decomposição de acordo com a abordagem da engenharia concorrente, ou simultânea.

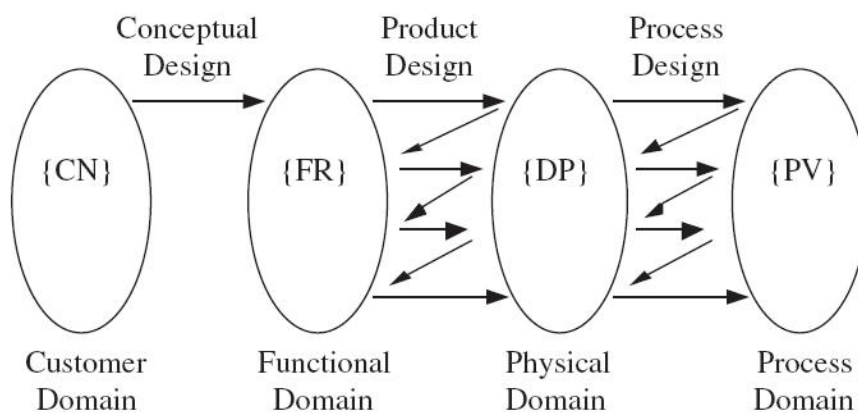


Figura 2.11 – Processo de decomposição em zigue-zague de acordo com a abordagem sequencial de projecto, retirado de [Gonçalves-Coelho *et al.*, 2007].

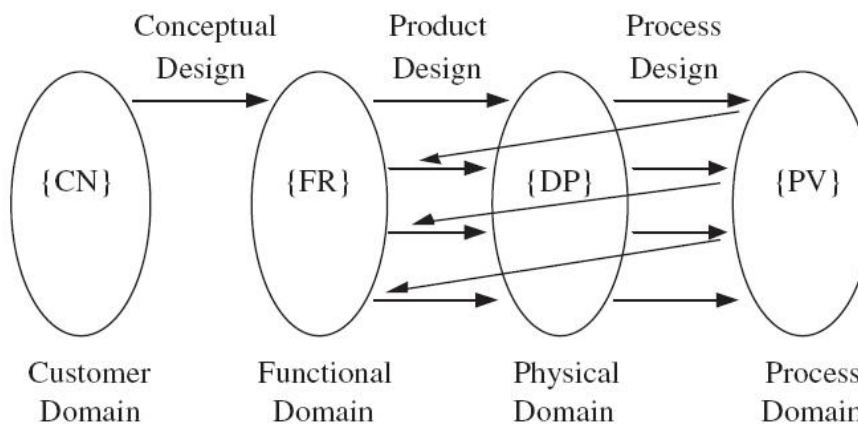


Figura 2.12 – Processo de decomposição em zigue-zague de acordo com a abordagem de Engenharia Concorrente, retirado de [Gonçalves-Coelho *et al.*, 2007].

Para facilitar a aplicação prática da Teoria Axiomática de Projecto foi desenvolvida uma ferramenta informática, denominada “Aclaro”, que contribuiu para alargar o espectro de utilização dos computadores na actividade de projecto e para melhorar a documentação referente aos aspectos racionais do processo de projecto [Harutunian *et al.*, 1996]. Este programa informático, que se encontra em evolução, facilita a construção das matrizes de projecto, com vista a avaliar as várias soluções alternativas e auxiliar o processo de tomada de decisões ao longo do desenvolvimento do projecto, promovendo uma sequência adequada para as acções a desenvolver no processo do projecto.

2.2.2 Teoria da Resolução dos Problemas de Invenção – TRIZ

A Teoria da Resolução dos Problemas de Invenção, mais conhecida pelo seu acrónimo russo TRIZ (TIPS, na terminologia anglo-saxónica), é uma metodologia especialmente apropriada para a resolução de problemas novos, nas áreas da ciência e da engenharia, vocacionada para a geração de soluções.

Esta abordagem foi desenvolvida por Genrich Altshuller, na ex-URSS, desde 1946 [Altshuller, 1995] que, a partir da examinação de mais de um milhão e meio de patentes, descobriu que os problemas de invenção (i.e., problemas para os quais não existe solução conhecida) envolvem, pelo menos, uma Contradição (ou seja, a melhoria de uma característica provoca a deterioração de outras), e que, muitas vezes, certos problemas são resolvidos em diferentes campos técnicos, usando somente um pequeno número de princípios de invenção.

Esse trabalho [Altshuller, 2005] proporcionou-lhe a percepção das tendências, ou dos padrões, apresentados pela “Evolução dos Sistemas Técnicos”, sendo um sistema técnico entendido como algo que realiza uma função. Proporcionou-lhe também a noção de que “a evolução de todos os sistemas técnicos é governada por leis objectivas”, sendo os princípios de resolução de problemas de invenção repetitivos e previsíveis, pelo que é possível estabelecer uma teoria, para que qualquer pessoa possa inventar.

A TRIZ é uma teoria aplicável a qualquer entidade que realize uma função, sendo essas entidades definidas, na TRIZ, como “Sistemas Técnicos”. O desenvolvimento integral da TRIZ é baseado nos fundamentos e conceitos seguintes:

- a) 5 Níveis de Inovação;
- b) Lei da Idealidade;
- c) Modos de Evolução;
- d) Contradições;
- e) 40 Princípios de Invenção;
- f) Tabela das Contradições;
- g) Princípios de Separação;
- h) Efeitos Científicos e Base de Dados de Conhecimento
- i) Análise Substância-Campo
- j) 76 Soluções-Padrão;
- k) ARIZ – Algoritmo para Resolução de Problemas de Invenção.

a) Níveis de Inovação

Para Altshuller, o processo de invenção consistia na remoção de contradições com o auxílio de certos princípios [Altshuller, 2005].

Diz-se que existe uma contradição sempre que a melhoria de um atributo do sistema leva à degradação de outros. No caso do projecto de um avião, por exemplo, existe a contradição entre a necessidade de garantir uma boa resistência estrutural e, simultaneamente, a exigência de peso reduzido.

Altshuller sistematizou as soluções descritas em registos de patentes, dividindo-as em cinco níveis, em função do valor inventivo da invenção [Altshuller, 2005] [Altshuller, 2001 citado por [Navas, 2007]]:

- **Nível 1:** Soluções de rotina para melhoramento de sistemas técnicos existentes, utilizando métodos bem conhecidos na respectiva área da especialidade. Esta categoria constitui cerca de 30% da totalidade e não é considerada como inovação, uma vez que não remove nenhuma contradição;
- **Nível 2:** Pequenas correcções em sistemas existentes recorrendo a métodos conhecidos na indústria. Esta categoria constitui cerca de 45% da totalidade e corresponde à resolução de uma contradição técnica;
- **Nível 3:** Melhorias importantes que resolvem contradições em sistemas típicos de um dado ramo da indústria. Esta categoria constitui cerca de 20% do total e é onde aparecem soluções criativas de projecto, correspondendo à resolução de Contradições Físicas;
- **Nível 4:** Soluções baseadas na aplicação de novos princípios científicos. Esta categoria constitui cerca de 4% do total, sendo o problema técnico resolvido por substituição da tecnologia existente por uma nova tecnologia;
- **Nível 5:** Soluções inovadoras baseadas em descobertas científicas não exploradas anteriormente. Nesta categoria estão menos de 1% da totalidade dos casos.

A TRIZ tem por objectivo auxiliar a elaboração de projectos dos níveis 3 e 4 (cerca de um quarto da totalidade), onde a simples aplicação de “boas práticas de engenharia” não produz resultados assinaláveis. Tais problemas contêm, normalmente, contradições técnicas fundamentais que, tradicionalmente, são resolvidas por via de compromisso, ao passo que a TRIZ procura superar esses conflitos através da aplicação de soluções criativas

b) Lei da Idealidade

O objectivo de qualquer sistema técnico é a realização de, pelo menos, uma função (funcionalidade). Para a realização dessa função são gerados efeitos úteis (*useful effects*) e efeitos prejudiciais (*harmful effects*) sendo o grau de idealidade entendido como a razão entre os efeitos úteis e os efeitos prejudiciais.

A “Lei da Idealidade” [Altshuller, 2005] estabelece que qualquer sistema técnico, ao longo da sua existência, tende a tornar-se mais fiável, mais simples e mais eficiente.

Os sistemas técnicos evoluem no sentido de se aproximarem da idealidade. A evolução de uma parte do sistema, um subsistema, conduz ao conflito com outro subsistema, levando ao melhoramento da parte menos evoluída.

Este processo, auto-alimentado (*self-sustaining process*), conduz o sistema para um estado mais próximo do ideal, em que conseguirá realizar as funções pretendidas sem efeitos prejudiciais (*harmful effects*) e sem acrescentar complicações. A compreensão deste processo de evolução permite a previsão de tendências futuras no desenvolvimento dos sistemas técnicos.

No caso dos automóveis, por exemplo, o desenvolvimento tem sido no sentido de realizarem cada vez mais funções, com mais fiabilidade, mais intensidade e utilizando cada vez menos recursos. O carro ideal seria aquele que não existindo, fisicamente, realizaria a função de transporte.

Assim, de acordo com a TRIZ, o projecto ideal é aquele em que o objecto não existe mas a função é realizada.

c) Modos de Evolução;

Altshuller estabeleceu oito modos (*patterns*), ou linhas, de evolução que os sistemas técnicos seguem no sentido de se aproximarem da idealidade, os quais são identificados a seguir e cujo desenvolvimento poderá ser encontrado em [Altshuller, 1999]:

- 1) Fases de Evolução do ciclo de vida de um sistema técnico;
- 2) Evolução no sentido de aumento da idealidade;
- 3) Desenvolvimento não uniforme de elementos de um sistema técnico;
- 4) Evolução através de aumento de dinamismo e controlabilidade;
- 5) Aumento de Complexidade seguido de Simplificação;

- 6) Evolução através de Sincronização e Dessincronização de elementos;
- 7) Evolução através de transição níveis Micro e aumento do uso de Campos;
- 8) Evolução através de redução do envolvimento humano.

d) Contradições

Uma contradição [Altshuller, 2005] corresponde à situação em que a melhoria de uma característica (ou de um parâmetro) de um sistema técnico provoca a deterioração de outras.

Um sistema técnico pode ter várias características, como sejam peso, tamanho, configuração, velocidade, rigidez, cor, etc., que descrevem o seu estado físico e determinam as contradições técnicas. Como exemplo de uma contradição técnica podemos considerar o caso do aumento de velocidade de um avião, que requer a instalação de um motor mais potente e mais pesado, o que obriga a reforçar as asas do avião, aumentando as suas dimensões e o seu peso, tornando o avião mais lento. As contradições técnicas são resolvidas utilizando os 40 princípios da TRIZ.

Para além das contradições técnicas existem as contradições físicas, que ocorrem quando, ao sistema técnico ou a uma das suas partes, são requeridas propriedades (ou atributos) opostas (antagónicas).

Por exemplo, um avião deve ter trem de aterragem, para poder aterrar e descolar mas, quando em voo, não deve ter trem de aterragem, para não aumentar a resistência ao avanço. A contradição física consiste em querer que o avião tenha trem de aterragem e querer que o avião não tenha trem de aterragem. A eliminação das contradições físicas resolve-se através da utilização dos Princípio de Separação [Altshuller 1999], como sejam a separação dos requisitos contraditórios, no tempo (trem de aterragem) ou no espaço (viaduto), mudança do estado físico da substância, etc.

Altshuller identificou 39 parâmetros de engenharia ou características dos sistemas técnicos que os engenheiros resolviam tradicionalmente por recurso a soluções de compromisso [Altshuller,1999]. Na Tabela 2.1, apresentam-se esses 39 parâmetros de engenharia.

1. Peso (objecto móvel)	21. Potência
2. Peso (objecto imóvel)	22. Perda de energia
3. Comprimento (objecto móvel)	23. Perda de massa
4. Comprimento (objecto imóvel)	24. Perda de informação
5. Área (objecto móvel)	25. Perda de tempo
6. Área (objecto imóvel)	26. Quantidade de matéria
7. Volume (objecto móvel)	27. Fiabilidade
8. Volume (objecto imóvel)	28. Precisão de medição
9. Velocidade	29. Precisão de fabrico
10. Força	30. Factores prejudiciais que actuam sobre o objecto
11. Tensão, pressão	31. Efeitos colaterais prejudiciais
12. Forma	32. Manufacturabilidade
13. Estabilidade do objecto	33. Conveniência de uso
14. Resistência	34. Reparabilidade
15. Durabilidade (objecto móvel)	35. Adaptabilidade
16. Durabilidade (objecto imóvel)	36. Complexidade do dispositivo
17. Temperatura	37. Complexidade no controlo
18. Claridade	38. Nível de automação
19. Energia dispensada (objecto móvel)	39. Produtividade
20. Energia dispensada (objecto imóvel)	

Tabela 2.1 – Os 39 Parâmetros de Engenharia, ou características dos Sistemas Técnicos, identificados por Altshuller, que eram resolvidos, tradicionalmente, por soluções de compromisso, adaptado de [Altshuller,1999].

e) 40 Princípios

As ferramentas utilizadas para resolver as contradições são designadas por princípios e consistem em sugestões genéricas para realizar acções no sistema técnico, com vista à eliminação de uma determinada contradição.

Apesar da grande diversidade tecnológica, Altshuller constatou que havia apenas 1250 conflitos típicos de sistema, e que todos esses conflitos podem ser resolvidos através da aplicação de somente 40 princípios de invenção [Altshuller, 1999] [Altshuller, 2005], muitas vezes denominados “Técnicas para Vencer Conflitos de Sistema” (TVCS).

Os 40 princípios, que se representam na Tabela 2.2 seguinte, permitem o desenvolvimento de numerosos conceitos de soluções para todos os problemas técnicos, sem necessidade de compromissos [Altshuller, 2005]. O trabalho do engenheiro projectista consiste na implementação dos conceitos seleccionados.

1. Segmentação	21. Urgência
2. Extracção	22. Conversão de prejuízo em proveito
3. Qualidade local	23. Retroacção
4. Assimetria	24. Mediação
5. Combinação	25. Auto - serviço
6. Universalidade	26. Imitação
7. Recorrência	27. Utilizar objecto económico com vida curta
8. Equilíbrio	28. Substituição do sistema mecânico
9. Neutralização prévia	29. Sistemas pneumáticos ou hidráulicos
10. Acção prévia	30. Películas flexíveis ou membrana fina
11. Amortecimento prévio	31. Utilização de materiais porosos
12. Equipotência	32. Mudança de cor
13. Inversão	33. Homogeneidade
14. Esfericidade	34. Rejeição e regeneração de componentes
15. Dinamismo	35. Transformação de Propriedades
16. Acção atenuada ou acentuada	36. Mudança de fase
17. Mudança para nova dimensão	37. Expansão térmica
18. Vibração mecânica	38. Utilização de oxidantes enérgicos
19. Acção periódica	39. Ambiente inerte
20. Acção contínua	40. Materiais compósitos

Tabela 2.2 – Os 40 Princípios de Invenção da TRIZ para desenvolvimento de Conceitos de Soluções, sem necessidade de compromissos, adaptado de [Altshuller,2005].

f) Tabela das Contradições

Altshuller construiu uma tabela de contradições, representada parcialmente na Tabela 2.3, formando uma matriz de 39 linhas, nas quais são colocadas as características do sistema (sob o título de “atributo a melhorar”) por 39 colunas com as características com as quais pode haver conflito (sob o título de “atributo que pioram”) [Altshuller, 2005]. No Anexo A 4, foi reproduzida a referida tabela, na forma completa, designada como “Matriz das Contradições” da TRIZ.

Cada célula da matriz representa uma contradição técnica específica e contém o número correspondente ao Princípio de invenção que tem sido bem sucedido na resolução dessa contradição.

A maior parte das células contém mais do que um princípio de invenção e outras estão vazias, significando, nesse caso, que não existe solução conhecida para a resolução da contradição correspondente a essas características.

O primeiro passo na resolução da contradição consiste na elaboração de um enunciado do problema com o objectivo de revelar a contradição contida no sistema. Em seguida, identificam-se os parâmetros que melhoram e os que prejudicam o desempenho do sistema. As linhas da tabela de contradições são então preenchidas com os parâmetros cujo ajuste melhora o comportamento do sistema, e que intersectam as colunas com os parâmetros cujo ajuste produz resultados indesejados. Na intersecção encontram-se os números dos princípios de invenção que são sugeridos como sendo capazes de resolver a contradição.

		CARACTERÍSTICAS QUE IRÃO PIORAR															
		1	2	3	4	5	6	...	34	35	36	37	38	39			
CARACTERÍSTICA QUE É MELHORADA	Peso dum objecto móvel	1		15, 8, 29, 34		29, 17, 38, 34		...	2, 27, 28, 11	29, 5, 15, 8	26, 30, 36, 34	28, 29, 26, 32	26, 35, 18, 19	35, 3, 24, 37			
	Peso dum objecto imóvel (estático)	2			10, 1, 29, 35		35, 30, 13, 2		...	2, 27, 28, 11	19, 15, 29	1, 10, 25, 28	2, 26, 1, 28	1, 28			
	Comprimento dum objecto móvel	3	8, 15, 29, 34				15, 17, 4		...	1, 28, 10	14, 15, 1, 16	1, 19, 26, 24	35, 1, 17, 24	14, 4, 28, 29			
	Comprimento dum objecto imóvel (estático)	4		35, 28, 40, 29				17, 7, 10, 40	...	3	1, 35	1, 26	26	30, 14, 7, 26			
	Área dum objecto móvel	5	2, 17, 29, 4		14, 15, 18, 4				...	15, 13, 10, 1	15, 30	14, 1, 13	2, 36, 14, 30	10, 26, 34, 2			
	Área dum objecto imóvel (estático)	6		30, 2, 14, 18		26, 7, 9, 39			...	16	15, 16	1, 18, 30, 18	2, 35, 23	10, 15, 17, 7			
	Volume dum objecto móvel	7	2, 26, 29, 40		1, 7, 4, 35		1, 7, 4, 17		...	10	15, 29	26, 1	29, 26, 4, 16, 24	10, 6, 2, 10, 2			
	Volume dum objecto imóvel (estático)	8		35, 10, 19, 14		35, 8, 2, 14			...	1		1, 31	2, 17, 26	35, 37, 10, 2			
	Velocidade	9	2, 28, 13, 38		13, 14, 8		29, 30, 28, 10		...	34, 2, 28, 27	15, 10, 4, 34	10, 28, 3, 34	3, 34, 27, 16	10, 18			
	Força	10	8, 1, 37, 18	18, 13	17, 19, 1, 28, 9, 36	35, 1, 14, 16	19, 10, 15	1, 18, 36, 37	...	15, 1, 11	15, 17, 18, 20	26, 35, 10, 19	36, 37, 10, 19	2, 35, 3, 28, 35, 37			
	Tensão / Pressão	11	10, 36, 37, 40	13, 29, 10, 18	35, 10, 36	13, 14, 10, 7	10, 15, 36, 28	10, 15, 36, 37	...	2	35	19, 1, 35	2, 36, 37	35, 24	10, 14, 35, 37		
		
	Precisão na produção	29	28, 32, 13, 18	28, 35, 27, 9	10, 28, 29, 37	2, 32, 10	28, 33, 29, 32	2, 29, 18, 36	...	25, 10		26, 2, 18		26, 28, 18, 23	10, 18, 32, 39		
	Actuação de Factores Exteriores Prejudiciais	30	22, 21, 27, 39	2, 22, 13, 24	17, 1, 39, 4	1, 18	22, 1, 33, 28	27, 2, 39, 35	...	35, 10, 2	35, 11, 22, 31	22, 19, 29, 40	22, 19, 29, 40	33, 3, 34	22, 35, 13, 24		
	Factores prejudiciais desenvolvidos por um objecto	31	19, 22, 15, 39	35, 22, 1, 39	17, 15, 16, 22		17, 2, 18, 39	22, 1, 40	...			19, 1, 31	2, 21, 27, 1	2	22, 35, 18, 39		
	Facilidade de produção (manufaturabilidade)	32	28, 29, 15, 16	1, 27, 36, 13	1, 29, 13, 17	15, 17, 27	13, 1, 26, 12	16, 40	...	35, 1, 25, 11, 9	2, 13, 15	27, 26, 4, 34	6, 28, 11, 1	8, 28, 1	35, 1, 10, 28		
	Conveniência de utilização	33	25, 2, 13, 15	6, 13, 1, 25	1, 17, 13, 12		1, 17, 13, 16	18, 16, 15, 39	...	12, 26, 1, 32	15, 34, 1, 16	32, 26, 12, 17		1, 34, 12, 3	15, 1, 28		
	Reparabilidade	34	2, 27, 35, 11	2, 27, 35, 11	1, 28, 10, 25	3, 18, 31	15, 13, 32	16, 25	...		7, 1, 4, 16	25, 13, 11		34, 35, 7, 13	1, 32, 10		
	Adaptabilidade	35	1, 6, 15, 8	19, 15, 29, 16	35, 1, 29, 2	1, 35, 16	32, 30, 29, 7	15, 16	...	1, 16, 7, 4		15, 29, 27, 28	1	27, 34, 35	25, 28, 6, 37		
	Complexidade de um equipamento	36	26, 30, 34, 36	2, 26, 35, 39	1, 19, 26, 24	26	14, 1, 13, 16	6, 36	...	1, 13	29, 15, 28, 37		15, 10, 37, 28	15, 1, 24	12, 17, 28		
Complexidade de controlo	37	27, 26, 28, 13	6, 13, 28, 1	16, 17, 26, 24	26	2, 13, 18, 17	2, 39, 30, 16	...	12, 26	1, 15	15, 10, 37, 28		34, 21	35, 18			
Nível de automação	38	28, 26, 18, 35	28, 26, 35, 10	14, 13, 17, 28	23	17, 14, 13		...	1, 35, 13	27, 4, 1, 35	15, 24, 10	34, 27, 25	5, 12, 35, 26				
Capacidade / Productividade	39	35, 26, 24, 37	28, 27, 15, 3	18, 4, 28, 38	30, 7, 14, 26	10, 26, 34, 31	10, 35, 17, 7	...	1, 32, 10, 35	1, 35, 28, 37	12, 17, 28, 24	35, 18, 27, 2	5, 12, 35, 26				

40 PRINCÍPIOS DE INVENÇÃO DA TRIZ	1. Segmentação	...	35. Transformação de Propriedades
	2. Extração	...	36. Fase de Transição
	3. Qualidade Local	...	37. Expansão Térmica
	4. Assimetria	...	38. Aceleração na Oxidação
	5. Consolidação	...	39. ambiente Inerte
	6. Universalidade	...	40. Materiais Compostos
	7. Encaixe (Matrioshka)	...	

Tabela 2.3 – Tabela de Contradições da TRIZ, para resolução de contradições, indicando o princípio de invenção (indicado nas células) que deverá ser utilizado para resolução de contradições entre os princípios de invenção, que se pretende melhorar (linhas) e que pioram (colunas) com a melhoria dos primeiros, adaptado de [Altshuller, 2005].

g) Princípios de Separação

As ferramentas utilizadas para resolver as contradições físicas são designadas por princípios de separação, os quais são identificados a seguir e cujo desenvolvimento poderá ser encontrado em [Altshuller, 1999]:

1. Separação no espaço de requisitos opostos;
2. Separação no tempo de requisitos opostos;

- 3. Transformação do sistema;
- 4. Transição de fase;
- 5. Transição Físico-Química.

h) Efeitos Científicos e Base de Dados de Conhecimento

Para problemas mais difíceis, a aplicação de efeitos físicos, químicos, geométricos e outros de diversas ciências, facilitam substancialmente a resolução dos problemas. Estes efeitos encontram-se listados em [Altshuller, 1999], onde são identificados cada um dos efeitos presentes em problemas de engenharia e dadas recomendações para obter aumento, diminuição ou controlo dos vários efeitos.

i) Análise Substância-Campo

Por volta de 1975, Altshuller desenvolveu uma ferramenta analítica que ajuda a construir modelos funcionais para resolução de problemas relacionados com sistemas técnicos, quer se trate de sistemas novos, quer se trate de sistemas técnicos já existentes, designada por “Análise Substância-Campo”.

A Análise Substância-Campo – ASC – sustenta que um sistema que desempenhe devidamente uma dada função para a qual foi criado, pode ser representado por um triângulo cujos vértices representam “substâncias” (objectos, componentes, etc.) e “campos” (acções ou energia que faz com que uma substância actue sobre a outra) como, por exemplo, o ilustrado na Figura 2.13 seguinte:

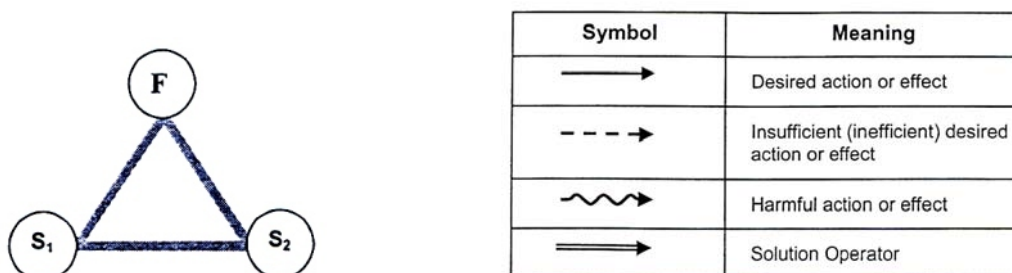


Figura 2.13 – Exemplos de representação de Triângulos Substância-Campo, retirado de [Altshuller, 1999].

Um sistema complexo é representado por vários triângulos “Substância-Campo”.

As “substâncias” S1 e S2 que participam numa interacção podem ser da seguinte natureza [Altshuller, 1999]:

- Material;
- Ferramenta;
- Componente;
- Pessoa;
- Ambiente.

Em geral, o “campo” C, que actua sobre as “substâncias” S, pode ser da seguinte natureza [Altshuller, 1999]:

- Mecânico (Me);
- Térmico (T);
- Químico (Q);
- Eléctrico (E);
- Magnético (Ma).

A representação “Substância-Campo” ajuda a centrar o estudo nos elementos mais importantes do sistema e a identificar o problema como pertencente a um determinado grupo [Altshuller, 1999]. Se o triângulo “Substância-Campo” não for completo, existe um problema, podendo ocorrer as situações genéricas seguintes:

Situação	Exemplo
Situação 1: O efeito desejado não ocorre	Não há arrefecimento num veio sobreaquecido de um redutor.
Situação 2: Ocorre um efeito prejudicial	Os veios do redutor estão sujeitos a um sobreaquecimento imprevisto.
Situação 3: Efeito desejado insuficiente (ineficiente)	O arrefecimento dos veios do redutor é pouco eficaz; é necessário melhorar o arrefecimento.

Tabela 2.4 – Situações Problemáticas e Exemplos, retirado de [Navas, 2007].

A TRIZ recomenda que a aplicação da Análise “Substância-Campo” seja efectuada seguindo as seguintes etapas [Altshuller, 1999]:

1. Identificação dos elementos disponíveis.
2. Construção do Modelo “Substância-Campo” e identificação da Situação Problemática.
3. Escolha de uma solução genérica (Solução-Padrão).
4. Desenvolvimento da solução.

Através da análise do modelo do problema é possível determinar a solução a aplicar, escolhida entre as 76 Soluções-Padrão.

j) 76 Soluções-Padrão;

As Soluções-Padrão consistem em regras para síntese ou reconstrução de sistemas técnicos, ajudando a melhorar sistemas existentes ou a sintetizar novos sistemas técnicos.

Originalmente as soluções-padrão começaram por ser combinações de Princípios de invenção com efeitos físicos, tendo sido incluídas posteriormente regras para transformação de um sistema técnico baseado nos modos de evolução.

Altshuller estabeleceu 76 Soluções-Padrão, cujo desenvolvimento pode ser encontrado em [Altshuller 1999], que as classificou nas 5 classes seguintes [Altshuller 2005]:

- Classe 1: Construir ou destruir um modelo substância-campo;
- Classe 2: Desenvolver um modelo substância-campo;
- Classe 3: Transição do sistema de base para um super-sistema ou para um sistema de nível micro;
- Classe 4: Medir ou detectar algo no sistema técnico;
- Classe 5: Descrever como introduzir substâncias ou campos no sistema técnico;

Tal como os Princípios de invenção, também as Soluções-Padrão são recomendações para modificar o sistema.

2.2.3 Semelhanças e Complementaridades entre a TAP e a TRIZ

Ambas as teorias, TAP e TRIZ, anteriormente descritas, aplicam-se (estudam) às fases iniciais do processo de projectar, especialmente destinadas à concepção de soluções, ao nível de abstracção mais elevado e, devido ao facto de serem teorias baseadas em princípios gerais, proporcionam bases científicas que suportam as decisões inerentes ao processo de projectar [Kim *et al.*, 2000]. Tal facto justifica a sua actual popularidade, dada a necessidade de estabelecer metodologias científicas aplicáveis à actividade de projecto.

Embora as duas teorias tenham sido desenvolvidas independentemente e segundo abordagens distintas, muitos dos conceitos principais dessas teorias são bastante semelhantes, tendo [Kim *et al.*, 2000] analisado alguns aspectos dessas semelhanças, nomeadamente o conceito de idealidade (*good design*), a análise substância-campo e a decomposição em zigue-zague, os princípios de invenção, as contradições e os axiomas, assim como a possibilidade de realizar as tarefas de projecto algoritmicamente,

proporcionando a construção de *softwares* (*Aclaro e Ariz*) para o efeito e permitir, assim, a realização de tarefas de projecto com a ajuda de computadores.

Tanto Altshuller como Suh estabeleceram um conjunto de princípios ou axiomas a partir dos quais puderam desenvolver uma variedade de métodos e algoritmos para resolução de problemas específicos de projecto. Ambos tentam, também, definir o que é uma boa solução ou um bom projecto e, interessantemente, chegam a definições semelhantes, independentemente um do outro [Nordlund, 1996].

Baseados nos seus princípios ou axiomas, Altshuller e Suh desenvolveram diferentes abordagens para alcançar um bom projecto. Altshuller desenvolveu um sistema de métodos para separar propriedades contraditórias, através de síntese inteligente e integração de parâmetros, enquanto Suh desenvolveu uma métrica e regras de análise que advertem o projectista caso esteja a criar más soluções.

A TAP auxilia o projectista na avaliação e na comparação de soluções, ao nível da estrutura do processo, porém, não possui nenhum instrumento de geração de soluções.

A TRIZ é um método muito útil para a resolução de problemas de criatividade, de modo individual, no entanto, requer que os problemas complexos, presentes no projecto de qualquer produto, com múltiplos requisitos, funcionalidades e contradições, sejam transformados em problemas simples [Gumus, 2005].

Enquanto a TRIZ tem a capacidade de gerar soluções inovadoras, a TAP tem a capacidade de definir e decompor sistematicamente o problema geral, assim como analisar a eficácia (*effectiveness*) da solução em termos de satisfazer os dois axiomas [Shirwaiker *et al.*, 2007].

Uma combinação da TAP com a TRIZ associará as vantagens de ambas as abordagens para gerir a complexidade, ao mesmo tempo que cria soluções inovadoras para resolução dos problemas complexos.

Isto porque a TAP tem um modelo do processo de projecto de âmbito de aplicação muito alargado (geral), abrangendo todo o processo de projecto, desde a definição do problema até ao projecto de pormenor do produto e do processo de produção do mesmo, enquanto a TRIZ é mais focada na resolução da parte criativa e inventiva do problema de projecto.

Tate e Nordlund [Tate *et al.*, 1995] apontam uma das propriedades complementares da TAP e da TRIZ, como sendo o facto de a TAP assinalar a existência de interdependências perigosas e tornar visíveis as interdependências entre as várias variáveis, ao passo que a TRIZ omite esta propriedade. No entanto, uma vez identificadas as interdependências conflituosas, a TRIZ oferece um conjunto de ferramentas para as resolver, o que não acontece na TAP.

Nordlund [Nordlund, 1996] sugere a hipótese de integração da TAP e da TRIZ, de modo a que a ferramenta de síntese facultada pela TRIZ complementaria a ferramenta de análise facultada pela TAP e tanto Tate [Tate, 1999] como Suh [Suh 2001] reconhecem que a TAP e a TRIZ se complementam mutuamente [Gumus, 2005].

Darrell Mann sugere que a TAP tem muito a oferecer à TRIZ em termos de melhor compreender tanto a natureza hierárquica do projecto como a necessidade de prestar atenção às inter-relações que existem entre os sucessivos níveis hierárquicos [Mann, 2002].

Ruihong, Runhua, e Guozhong [Ruihong *et al.*, 2004] utilizaram a combinação da TAP com a TRIZ, na resolução de um “case study” referente à velocidade de uma “Máquina de Produção de Papel”, cuja matriz de projecto era acoplada, tendo utilizado a TAP para a análise e decomposição do problema em “miniproblemas” (problemas elementares ou individuais) e utilizado a TRIZ para obter as soluções para os “miniproblemas”.

Mais recentemente, Shirwaiker e Okudan [Shirwaiker *et al.*, 2007], desenvolveram um modelo (*framework*) para o processo de projecto, a que chamaram “*Synergistic Problem Solving Approach*”, que consiste na integração da TRIZ na metodologia da TAP, tendo em vista a rentabilização (*capitalize*) dos pontos fortes de ambas as teorias.

Neste modelo, a TAP é usada para definir o problema sistematicamente e decompor (*breaking up*) os Requisitos Funcionais em elementos individuais de nível hierárquico mais baixo (básico). A TRIZ é usada para gerar soluções inovadoras para os problemas individuais e desenvolver os Parâmetros de Projecto que satisfazem os Requisitos Funcionais. No caso de a Matriz de Projecto ser acoplada, os Princípios de Separação da TRIZ podem ser aplicados para separar os Requisitos Funcionais que não sejam independentes.

Através da aplicação a um caso prático, comprovaram a compatibilidade de ambas as teorias e acreditam que a utilização do “*Synergistic Problem Solving Approach*” contribuirá para o aumento da eficiência e da qualidade da resolução de problemas.

O modelo “*Synergistic Problem Solving Approach*” visa a obtenção de sinergias originadas pela combinação das capacidades (*capability*) de análise detalhada da TAP com as capacidades (*prowess*) da TRIZ na geração de ideias inovadoras, ao longo de todo o processo hierárquico da TAP e de decomposição em zigue-zague entre os domínios funcional e físico.

A aplicação sistemática da metodologia (*approach*) é explicada através de um procedimento passo-a-passo (*stepwise*), composto por sete fases, começando com a definição do problema geral usando a TAP e terminando com a utilização da TRIZ para geração de conceitos e desacoplamento da matriz de projecto, e aplicação do segundo axioma para selecção da solução óptima, no caso de existir mais do que um conceito potencial.

Este modelo é apresentado com maior detalhe no ponto “4.2.24 - Modelo de Shirwaiker e Okudan” do Capítulo 4.

2.2.4 Integração de Ferramentas de Projecto na Teoria Axiomática de Projecto

Matthew Hu; Kai Yang e Shin Taguchi [Hu *et al.*, 2000] analisaram a possibilidade e as vantagens da utilização da TRIZ e da TAP para melhorarem os resultados da aplicação das técnicas de “*Robust Design*”.

Dos casos que estudaram, concluíram que a utilização dos Princípios da Teoria Axiomática de Projecto e da Análise Substância-Campo da TRIZ, permite a selecção da resposta do sistema adequada (*proper system output response*), de uma forma sistemática, sendo essa tarefa a mais importante para o sucesso da “robustez” de um projecto.

A utilização da metodologia da Teoria Axiomática de Projecto proporciona uma forma científica de identificar a resposta do sistema e permite colmatar a separação existente entre a concepção e as soluções de projecto.

A abordagem de projecto designada por Qualidade Axiomática (*Axiomatic Quality*) desenvolvida por Basem El-Haik resulta da combinação de três “ingredientes” principais: Teoria Axiomática de Projecto (*Axiomatic Design*); Projecto para Seis Sigma (*Design for Six-Sigma*) e Projecto Robusto (*Robust Design*). A abordagem da Qualidade Axiomática utiliza a Teoria Axiomática de Projecto como base para o método de projecto, devido à sua capacidade para integrar diversas ferramentas, de síntese e de análise, de projecto, beneficiando da complementaridade das mesmas [El-Haik, 2005].

Pedro Marques [Marques *et al.*, 2008] propõe um “Método de Decomposição centrado na Criação de Valor” (MDCV), que integra a Teoria Axiomática de Projecto, a Técnica de Análise Funcional de Sistemas (FAST) e a Matriz de Estrutura do Projecto (DSM). Segundo os autores do artigo, os benefícios inerentes à utilização do MDCV para efectuar a decomposição de sistemas técnicos, durante a sua concepção e desenvolvimento, especificamente numa abordagem de DFSS, são os seguintes:

- a) A robustez conceptual do sistema técnico proporcionada pelo Projecto Axiomático é complementada pela análise de valor fornecida pelo Modelo FAST, o que potencia um grau acrescido de inovação para o sistema técnico;
- b) Assegura uma melhor consistência da decomposição, ao longo dos vários níveis de detalhe;
- c) Auxilia na identificação dos níveis de decomposição ao nível do impacto;
- d) A incorporação do DSM aumenta a compreensão das relações existentes no domínio físico e facilita a tomada de decisões ao nível da arquitectura do sistema técnico;
- e) Proporciona uma melhor compreensão do espaço funcional, conduzindo a uma mais rápida identificação das funções críticas a otimizar posteriormente ao nível do desempenho.

Algumas das teorias e metodologias de projecto podem ter impacto não só nos aspectos técnicos da execução das tarefas, mas também nas vertentes filosóficas e organizacionais, integrando as questões da qualidade dimensional na gestão do controlo da qualidade em geral, no planeamento dos processos de produção, na gestão de operações, na gestão global do projecto, entre outros [El-Haik, 2005].

A tendência actual vai no sentido da aplicação simultânea de várias teorias e metodologias de projecto. Assim, as limitações e omissões de uma metodologia podem ser compensadas pelas potencialidades da outra.

2.2.5 Teoria Geral de Projecto – “*General Design Theory – GDT*”

A Teoria Geral de Projecto (*General Design Theory - GDT*) começou a ser desenvolvida por Hiroyuki Yoshikawa, na Universidade de Tóquio, em finais dos anos setenta e inícios dos anos oitenta do século passado, e está vocacionada para a descrição matemática do processo de projectar, baseada em topologias e dirigida para a construção de sistemas de projecto assistido por computador (*computer-aided design – CAD – systems*).

Segundo o seu autor [Yoshikawa, 1981], citado por [Hatchuel et al., 2003], o principal objectivo desta teoria consiste na clarificação da capacidade humana de projectar numa forma científica e, ao mesmo tempo, produzir conhecimento prático sobre metodologias de projecto. É também reclamada a utilidade desta teoria para a construção, de forma científica, de programas informáticos destinados à actividade de projecto.

A Teoria Geral de Projecto enquadra-se nas teorias descritivas cuja formulação matemática do processo do projecto tenta explicar como o projecto é realizado em termos conceptuais e em termos de manipulação de informação. Esta teoria é baseada num conjunto de axiomas, a partir dos quais são derivados, matematicamente, os teoremas que explicam o processo de projecto. [Yoshikawa et al., 1990].

Esta abordagem ao projecto tenta construir uma teoria de projecto universal e rigorosa, como “uma inter-relação entre o espaço funcional e o espaço dos atributos”. A modelação do processo de projecto está centrada na estruturação desses espaços, de modo a que, numa situação de “conhecimento ideal” (*ideal knowledge*), isto é, em situações onde existe “conhecimento completo acerca de todas as entidades de um domínio do produto”, seja sempre possível estabelecer uma boa inter-relação (“*good*” *mapping*). Nesta perspectiva, a *GDT* lida com conceitos que apenas existem numa forma mental, sendo neste sentido uma teoria abstracta sobre conhecimento.

Yoshikawa reconhece que esta situação não corresponde às situações reais do projecto e considera também as situações reais, em que é necessário considerar os aspectos seguintes:

- O projecto não é simplesmente um processo de inter-relações, mas sim um processo de refinamento, em que o projectista procura a solução que satisfaz os requisitos;
- O conceito de função é difícil de formalizar objectivamente, porque inclui um sentido de valor que pode variar de pessoa para pessoa, sendo utilizado o conceito de desempenho em vez do conceito de função;
- O “conhecimento ideal” não tem em consideração os constrangimentos físicos e isso poderia conduzir a soluções de projecto como “máquinas perpétuas”.

Estes casos são designados por “conhecimento real” (*real knowledge*), em que uma solução de projecto tem sempre funções inesperadas (*unexpected functions*), e nesses casos o projecto é um processo heurístico, baseado num modelo de refinamento (*refinement model*) [Reich, 1995]

Segundo [Eagan *et al.*, 2002], alguns dos artigos publicados por Yoshikawa, têm focado o modo como a abordagem da *GDT* pode ser aplicada para estender os sistemas de projecto assistido por computador (*Computer Aided Design - CAD - Systems*) e incluir informação de engenharia e de simulação.

Embora tenha sido esboçada uma base matemática para o desenvolvimento desta teoria, a abordagem ao projecto permanece largamente filosófica, com algumas observações gerais interessantes acerca da natureza do projecto. Desta teoria não resultou nenhum método novo para projecto ou para ferramenta de engenharia de projecto, nem (até ao momento) tem parecido acrescentar ferramentas novas às áreas de inteligência em sistemas de projecto assistido por computador [Eagan *et al.*, 2002].

2.2.6 Teoria C – K de Projecto - “C-K Design Theory”

A “Teoria C-K de Projecto” (“*C-K Design Theory*”) tem vindo a ser desenvolvida por Hatchuel e Weil, tendo sido apresentada inicialmente, em 2003, como “Uma Nova Abordagem ao Projecto Inovativo” [Hatchuel *et al.*, 2003] e [Hatchuel *et al.*, 2009].

A designação “C-K Design Theory” reflecte a presunção de que o projecto pode ser modelado como a interligação (*interplay*) entre dois espaços independentes, com estruturas e lógicas diferentes, que são designados como o espaço dos Conceitos (*C - concepts*) e o espaço do Conhecimento (*K - knowledge*).

Segundo os autores desta teoria a inter-relação dinâmica (*dynamic mapping*) entre as funções requeridas e as soluções seleccionadas, não é suficiente para descrever a geração de novos objectos e de novos conhecimentos que são características distintivas do projecto (*distinctive features of Design*).

2.3 Metodologias de Projecto – Descrição Sistemática e Generalista do Processo de Projectar

O processo de projecto é composto por diversos tipos de actividades que conduzem à obtenção de um conjunto de informação e aos respectivos meios de comunicação, os quais permitem a realização de um produto, desde a sua construção até à sua colocação em serviço, exploração, manutenção e desmantelamento do produto no final da sua vida útil.

A partir do início dos anos 60, têm sido desenvolvidos diversos modelos, tanto para representar o ciclo de vida do produto, como para representar o processo de projecto dos mesmos [Gumus, 2005]. Alguns dos modelos são muito sucintos, tendo em conta apenas os tipos de actividades, (análise-síntese-avaliação) realizadas ao longo do processo de projecto e outros são mais exaustivos, decompondo o processo de projecto nas várias subtarefas, fases e actividades que serão realizadas pelos projectistas ao longo do processo de projecto.

As diferenças entre os vários modelos podem ser observadas de acordo com a perspectiva usada, podendo ser baseados em actividades ou em fases, (*activity-based or phase-based*), ou em função do nível de detalhe ou de personalização (*e.g., the rational unified model is developed for software system development*), ou de acordo com a terminologia usada (*e.g., design process, or development lifecycle model*).

Para alguns autores, como é o caso de [Hubka, 1992] e [Pahl *et al.*, 1996], o objectivo consiste no desenvolvimento de uma base teórica das várias actividades que constituem o

processo de projectar e encorajar a utilização de uma forma de projectar mais consciente e sistemática [Maffin, 1998].

Do progressivo desenvolvimento destes modelos emergiu um consenso relativo a diversas características comuns aos vários modelos, nomeadamente a decomposição do processo em fases, e correspondentes actividades, conceptualmente distintas, em que cada uma delas produzindo resultados intermédios no processo (especificações, estrutura funcional, anteprojecto, projecto de pormenor, documentação técnica, etc.), a subdivisão do problema global em subproblemas, cuja interligação e interacção das subsoluções contribui para a solução do problema global.

Bulent Gumus [Gumus, 2005] classifica os vários modelos como sendo Modelos baseados em actividades (*Activity-based Models – Analysis; Synthesis; Evaluation*) ou Modelos baseados em fases (*Phase-based Models – Planning and clarifying the task; Conceptual design; Embodiment design; Detail design*).

David Maffin [Maffin, 1998] caracteriza as estratégias adoptadas para o desenvolvimento de projectos em dois grupos, focados no problema (*Problem-focused*), ou focados no produto – solução (*Product-focused*), em função da sequência em que as fases e as actividades são planeadas ou executadas.

De acordo com a estratégia focada no problema, o processo é iniciado por uma análise do problema, caracterizada por níveis de abstracção, seguida de um processo de concretização sistemática, durante o qual é gerada uma quantidade de possíveis soluções, que são progressivamente avaliadas e refinadas, no sentido de convergirem para a melhor solução.

Segundo a estratégia focada no produto, a ênfase é colocada na análise dos conceitos do produto (i.e. caracterizado pelo uso de conjecturas de soluções para gerar o conceito da solução e para ganhar “*further insights*” e uma melhor definição do problema) e na promoção da noção de solução e de especificação do problema, desenvolvidas em simultâneo.

A natureza do processo tem características heurísticas, complementadas pelo uso de conhecimento científico, desenhando sobre experiências anteriores, seguindo linhas de orientação generalistas e regras práticas, seguindo-se as fases de análise e de avaliação, para refinar e desenvolver a solução.

A partir desta distinção básica entre as duas abordagens acima descritas, podemos dizer que elas se encontram em extremos opostos do espectro das estratégias de projecto.

Na tentativa de melhorar o conhecimento e a prática da actividade de projecto, vários investigadores contemporâneos têm proposto modelos para descrever o processo de projecto. Para melhor compreensão dos modelos, os seus autores utilizam representações gráficas, do tipo diagramas de fluxos, nos quais a natureza iterativa do projecto é representada por ciclos de retroalimentação (*feedback link*).

Inicialmente, os modelos de projectos, embora tivessem origens filosóficas diferentes, eram classificados em duas grandes classes, designadas como Modelos Prescritivos e Modelos Descritivos [Evbuomwan *et al.*, 1996].

Os Modelos Prescritivos estavam mais associados à “escola de pensamento sintáxico” (*syntactics school of thought*) e tendem a olhar para o processo de projecto de uma perspectiva global, abarcando os procedimentos passo-a-passo, ou seja, sugerindo a melhor maneira de fazer o que tiver de ser feito.

Os Modelos Descritivos, por sua vez, têm em consideração as acções e as actividades desempenhadas durante o processo de projecto, ou seja, o que é envolvido na actividade de projectar e/ou como isso é feito.

Mais recentemente, começaram a surgir modelos mais vocacionados para o uso de técnicas computacionais numéricas e qualitativas, técnicas de inteligência artificial, combinados com as tecnologias informáticas modernas, tendo estes modelos sido classificados como Modelos Computacionais.

No Capítulo 4 deste trabalho são apresentados, sucintamente, os modelos de projecto mais conhecidos, desenvolvidos por autores reconhecidos na área do projecto.

2.4 Sequência das Actividades do Processo de Projecto

Os modelos de projecto consistem na representação das fases em que os processos se desenvolvem e das actividades que são realizadas em cada fase.

Em cada fase é necessário decompor o problema global em subproblemas, de níveis de abstracção sucessivamente menores, ficando definida uma estrutura hierárquica vertical.

Durante a concepção de produtos, as questões relacionadas com os custos de produção e com a simplicidade de fabrico e de montagem obrigam o projectista a prestar atenção especial às tecnologias de construção, percorrendo transversalmente cada um dos vários níveis hierárquicos do projecto, no sentido horizontal, desde o domínio funcional, passando pelo domínio físico e até ao domínio do processo.

Ao longo do processo de projecto, ao percorrer os níveis hierárquicos no sentido vertical, o projectista poderá seguir uma abordagem “de Cima para Baixo” ou uma abordagem “de Baixo para Cima”, sendo o percurso transversal designado por “Engenharia Simultânea” ou “Engenharia Concorrente”.

2.4.1 Engenharia Simultânea ou Engenharia Concorrente

Para além das evoluções verificadas no processo de projectar, verificou-se também uma mudança em termos de filosofia de base e do modo de pensar o projecto, passando a ser dada mais atenção à etapa de concepção. Todos os aspectos das diversas fases da vida do produto são analisados, desde a sua concepção até à reciclagem, após o final da sua vida útil, incluindo aspectos como a qualidade, os custos e os requisitos do cliente.

Esta abordagem sistemática, aplicada ao desenvolvimento integrado de um produto, ficou conhecida como “Engenharia Concorrente” (*Concurrent Engineering - CE*) ou “Engenharia Simultânea” e é caracterizada pelos seguintes aspectos principais:

- O desenvolvimento de um novo produto passou a ser realizado de modo a integrar os aspectos relevantes de todas as fases do ciclo de vida do produto, desde a sua concepção até ao seu desmantelamento ou requalificação, passando pelo processo de produção e pela satisfação das necessidades que originaram a sua existência;
- A metodologia que possibilita a concretização deste propósito recorre a uma abordagem sistemática dos vários problemas existentes em cada uma das fases do ciclo de vida do

produto e tem lugar na etapa embrionária do processo de projecto, durante a qual são definidas as linhas de orientação principais;

- A actividade de projecto, na sua fase de concepção, é alargada às várias áreas, tais como a produção, o *marketing*, etc., envolvendo a colaboração de especialistas em cada uma dessas áreas;
- Este modo de operar tira partido dos valores adicionados pela colaboração entre os vários membros da equipa de trabalho e beneficia das vantagens do trabalho em grupo;
- O objectivo principal, comum a todos os membros do grupo, consiste em conseguir as melhores soluções para satisfazer as expectativas dos clientes e utilizadores do produto que está a ser concebido;
- As tomadas de decisão surgem como fruto das várias etapas do trabalho e implicam a análise dos vários cenários que decorrem de cada uma das opções, sendo normalmente escolhida a solução que, entre várias alternativas, apresentou melhores vantagens globais;
- Todos os aspectos das várias fases do ciclo de vida do produto são consideradas simultaneamente e as várias soluções necessárias são concebidas, em paralelo, na fase inicial do projecto;
- Por vezes, é necessário proceder a pequenas alterações ao longo da elaboração do projecto, e outras vezes adoptar as chamadas soluções de compromisso, de modo a tentar agradar a todas as partes e obter o consenso necessário para a tomada de decisão;
- Esta metodologia requer muito maior investimento, em capital e em tempo, na fase de concepção sendo, em compensação, obtidos ganhos significativos nas fases posteriores.

A Engenharia Simultânea pressupõe o projecto integrado dos produtos e pode reduzir significativamente o ciclo de desenvolvimento, graças à sobreposição temporal das actividades funcionais.

A Engenharia Simultânea permite o desenvolvimento de produtos, em simultâneo com os respectivos processos de fabrico. Contrariamente à engenharia sequencial, a Engenharia Simultânea permite reduzir as modificações tardias ao projecto inicial, resolvendo diversos problemas de projecto simultaneamente, procurando soluções em paralelo e contando com a

integração plena de todas as etapas da vida do produto, assim como de diversas áreas funcionais da empresa.

Os benefícios que advêm deste tipo de actuação são de várias ordens, desde a redução dos custos e dos tempos de produção, até ao aumento da motivação daqueles que participam no processo produtivo, passando pela satisfação do cliente e pela preservação do ambiente e da natureza.

Quantitativamente, os benefícios decorrentes da adopção desta metodologia costumam compensar os seus custos, tanto no caso de produção por encomenda, em que as margens não comportam os custos relativos às correcções, como no caso de produção em série, em que os erros são multiplicados pelas quantidades produzidas.

Esta metodologia é cada vez mais adoptada pelas equipas de projecto, beneficiando das facilidades de comunicação através de redes de computadores e de tecnologias multimédia.

A aplicação conjunta da metodologia de Engenharia Simultânea e da Teoria Axiomática de Projecto (TAP) tem como objectivo a execução, em paralelo, das tarefas de projecto que sejam independentes. Na Figura 2.14 representam-se os diferentes modos de encadear o desenvolvimento das tarefas de projecto:

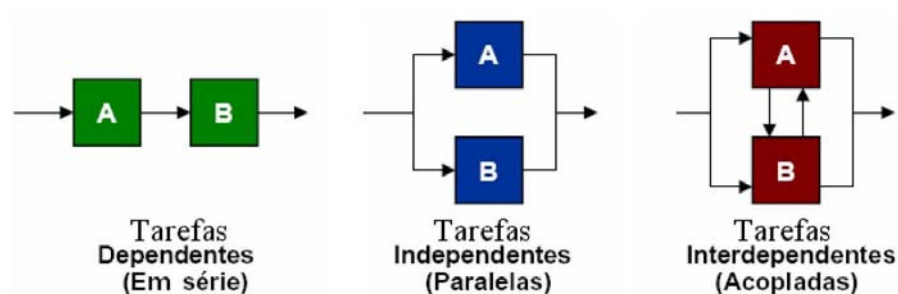


Figura 2.14 – Modos de encadear as tarefas de um projecto, retirado de [Navas, 2007].

Um ambiente de projecto axiomático, com os seus conceitos de domínios, das árvores hierárquicas e da decomposição em zigue-zague, pode servir como uma base sólida para a implementação das ideias da Engenharia Simultânea.

O desenvolvimento de produtos pode ganhar bastante com a aplicação do Primeiro Axioma da TAP, ou seja, com a busca da independência (desacoplamento) dos parâmetros em todos os níveis das árvores hierárquicas e em todos os domínios do projecto. A Engenharia Simultânea necessita desta independência para ser realmente simultânea. É possível dizer que o grau de “simultaneidade” depende do grau de independência.

A Figura 2.15 representa a comparação entre a decomposição em zigue-zague entre os domínios no caso da aplicação da Teoria Axiomática de Projecto num ambiente de engenharia tradicional (engenharia sequencial) com a decomposição em zigue-zague em caso da aplicação da TAP num ambiente de Engenharia Simultânea.

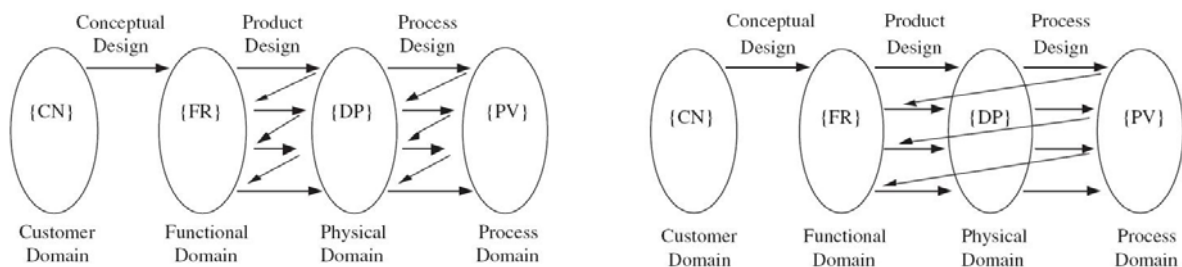


Figura 2.15 – A Decomposição em zigue-zague num ambiente de Engenharia Sequencial e num ambiente de Engenharia Simultânea, retirado de [Gonçalves-Coelho, *et al.*, 2007].

No caso de aplicação da Teoria Axiomática de Projecto num ambiente de engenharia sequencial, a decomposição em zigue-zague faz-se primeiro entre os domínios funcional e físico. O desenvolvimento das respectivas árvores é feito até definir em pormenor os aspectos do produto. Só depois é que se começa a fazer a decomposição em zigue-zague entre os domínios físico e de processo. Deste modo, o procedimento é sequencial.

Na decomposição em zigue-zague entre os domínios físico e de processo, podem ocorrer situações que obriguem a modificações, sendo necessário rever a decomposição em zigue-zague entre os domínios funcional e físico, refazendo as árvores hierárquicas. Esta situação pode levar a perdas significativas de tempo e de recursos [Gonçalves-Coelho *et al.*, 2005].

No caso de aplicação da TAP juntamente com a Engenharia Simultânea, a decomposição em zigue-zague abrange todos os domínios em simultâneo. Deste modo, reduz-se significativamente a necessidade de modificações tardias.

2.4.2 Abordagens “De Cima para Baixo” e “De Baixo para Cima”

Ao decompor o problema global em problemas mais simples e de nível hierárquico mais baixo, o projectista percorre os níveis hierárquicos do projecto no sentido vertical.

Relativamente ao percurso entre níveis hierárquicos, as metodologias podem ser classificadas em dois grupos: do tipo “De Cima para Baixo” (*Top-Down*) ou do tipo “De Baixo para Cima” (*Bottom-Up*) [Kim, 2002].

A abordagem (*approach*) “De Cima para Baixo” começa pelos requisitos gerais referentes ao desempenho do sistema (*system performance*), enquanto a abordagem “De Baixo para Cima” começa com um conjunto de elementos de projecto já conhecidos.

Na abordagem “De Cima para Baixo” é analisado o desempenho (*performance*) do sistema para identificar as suas características funcionais e os elementos funcionais que realizam os requisitos. O projecto é completado através da decomposição dos requisitos em níveis de abstracção mais baixos e do estabelecimento de elementos funcionais que satisfaçam os requisitos. No final é feita a síntese de todos os elementos funcionais para verificar a sua adequabilidade ao sistema.

Por outro lado, a abordagem “De baixo para Cima” utiliza a síntese para criar o sistema. No entanto, é pouco provável que a necessidade funcional seja obtida à primeira tentativa. Assim, depois de medir o desempenho do produto e o seu desvio relativamente aos requisitos, os elementos do sistema e as suas combinações são alteradas para outra solução. Daí que o Processo seja iterativo e o número de iterações de projecto dependa fortemente do conhecimento do projectista, da sua criatividade e da sua experiência, bem como da complexidade dos produtos. [Blanchard e Fabrycky citados por [Kim, 2002]].

Os benefícios da abordagem “De Cima para Baixo” são vários (*many-folds*). Primeiro, a aplicação da metodologia (*framework*) é possível, uma vez que o início desta abordagem envolve requisitos gerais do sistema. Segundo, todos os requisitos funcionais são satisfeitos pela inerente virtude/mérito/qualidade/valor (*virtue*) do processo de projecto.

Para além disso, um pequeno número de elementos funcionais pode representar uma série de implementações técnicas diferentes. No entanto, a possibilidade (*feasibility*) de realização física não está assegurada na abordagem “De Cima para Baixo”. Em contraste, a abordagem “De Baixo para Cima” assegura a realização física das soluções de projecto, mas a satisfação dos requisitos funcionais não é garantida.

Segundo o “Modelo em V” (*V-model*) de Suh [Suh, 2005], reproduzido na Figura 2.16, ao construir a hierarquia dos requisitos funcionais (RF) e dos parâmetros de projecto (PP), a partir das necessidades do cliente, estamos a realizar uma decomposição “de Cima para Baixo” e ao fazer a integração dos parâmetros de projecto, no sentido de interligar os vários componentes e construir o produto que satisfará as necessidades do cliente, estamos a realizar uma integração “de Baixo para Cima”. A representação em V para o projecto de produtos foi inicialmente proposta por Basem El-Haik em “*The Integration of Axiomatic Design in the Engineering Design Process*”, com o objectivo de melhorar a qualidade de sistemas mecânicos, baseados na teoria axiomática, tendo essa ideia sido posteriormente desenvolvida por Suh para representar o processo de projecto axiomático para sistemas de *software* orientados para o objecto [Suh, 2001].

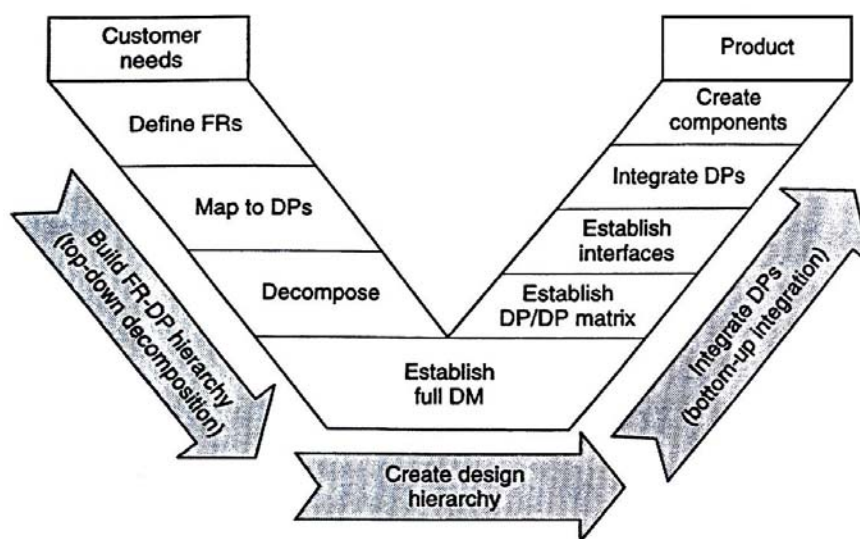


Figura 2.16 – Representação gráfica do “Modelo em V” para o projecto de produtos, retirado de [Suh, 2005].

2.5 Ferramentas de Projecto – Métodos e Operações Utilizadas no Processo de Projectar

Ao longo do processo de projecto são desenvolvidas várias actividades, com âmbitos e características distintas, de acordo com a fase do projecto em que estejam enquadradas.

Os âmbitos das actividades podem ter em vista os aspectos seguintes:

- Estabelecimento das Especificações do produto, ou sistema, objecto do projecto (identificação da necessidade, definição do problema e objectivos a alcançar);
- Estabelecimento da Estrutura Funcional do objecto do projecto (determinação das funcionalidades a realizar e das suas inter-relações);
- Estabelecimento de Princípios para Soluções e Concepção da Solução para o objecto do projecto (recolha de informação, geração de soluções alternativas, definição de critérios);

- Estabelecimento da Arquitectura do produto ou da sua Composição Modular (comparação das alternativas, escolha da solução a desenvolver, decomposição em subconjuntos);
- Estabelecimento do Anteprojecto do produto (modelos de análise e método a seguir, cálculos de dimensionamento, compatibilidade geométrica das subsoluções);
- Estabelecimento do Projecto Final do produto (memória descritiva e justificativa, desenhos de conjunto e de pormenor, listas de materiais, peças e componentes, procedimentos para fabrico e montagem);
- Elaboração da Documentação para o Cliente (manuais de instruções para montagem do produto, instalação, colocação em serviço, utilização e exploração, análise de riscos, conservação e manutenção, lista de peças de reserva, desmontagem, desmantelamento no final da vida útil, separação de materiais e reciclagem, etc.).

Nas últimas décadas têm sido desenvolvidas várias ferramentas e métodos para guiar os projectistas e estruturarem poderem estruturar, de forma sistemática, as operações por si desenvolvidas ao longo da execução dos processos de projecto.

Algumas das ferramentas têm aplicação em actividades específicas de uma das fases do processo de projecto, como é o caso, por exemplo, do Método dos Elementos Finitos, e outras podem ser aplicadas em várias fases do processo de projecto, como é o caso da *Quality Function Deployment – QFD* [Akao, 1990] [Akao, 1997], que é aplicável em todas as fases do processo de projecto, conforme mostrado por [Gonçalves-Coelho, *et al.*, 2005], cuja representação gráfica da aplicação da casa da qualidade nos vários domínios do universo de projecto é apresentada na Figura 2.17 seguinte:

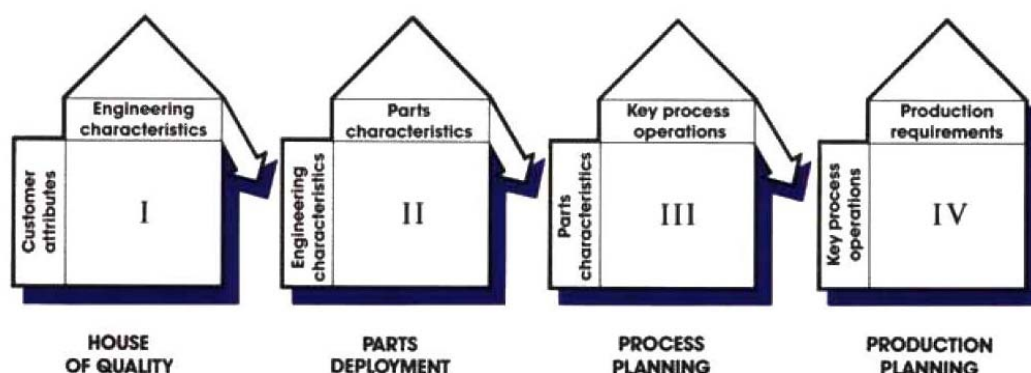


Figura 2.17 – Representação gráfica da aplicação da “Casa da Qualidade” nos vários domínios do universo de projecto, retirado de [Hauser *et al.*, 1988].

Os métodos e ferramentas existentes para a execução das várias actividades que são desenvolvidas durante o processo de projectar são explicadas em diversos livros que abordam o processo de projecto do ponto de vista prescritivo, como é o caso de [Dieter *et al.*, 2009]; [Ullman, 2010]; [Pahl *et al.*, 2007]; [Cross, 2008]; [Volland, 2004]; [Romeva, 2002]; [Marzal *et al.*, 2005]; [Rizo, 2001]; [Ulrich *et al.*, 2008], entre outros.

2.6 Tendências e Perspectivas Futuras na área de Projecto de Máquinas

A globalização da actividade económica e social coloca desafios à actividade de projecto, exigindo que o desenvolvimento de produtos tenha em consideração a necessidade de atrair e manter os seus clientes, de uma forma competitiva e lucrativa, para conseguirem manter-se num mercado cada vez mais difícil, onde é imperativo cumprir os requisitos legais, de saúde e ambiente, cada vez mais restritivos.

Da pesquisa efectuada, verifica-se que os trabalhos desenvolvidos nos últimos anos têm centrado a sua atenção em aspectos relacionados não só com a robustez e optimização do projecto, mas também com o aperfeiçoamento das ferramentas que são utilizadas para desenvolver as várias tarefas da actividade de projecto e o desenvolvimento de aplicações informáticas que possibilitem a utilização de computadores para a execução dessas tarefas.

Os trabalhos mais recentes mostram que o interesse dos investigadores está orientado para novos tópicos, que incluem “*eco-design, ergonomic design, cognitive design, requirements management, decision support, and integration support*” [Liu *et al.*, 2009].

O desenvolvimento da investigação nestas áreas mostra que a actividade de projecto está a expandir o seu âmbito, considerando um maior número de factores, como por exemplo as preocupações ambientais, com influência no processo de projecto e nos produtos a desenvolver.

Em termos das actividades de apoio (*Cross-cutting support for design*) às tarefas desenvolvidas pelos projectistas destacam-se os avanços nas áreas de apoio à tomada de decisão (*decision support*), nas ferramentas de prototipagem virtual (*Virtual Reality tool support*) e nos processos de integração (*Integration support*), para obtenção de sistemas globais.

Actualmente, a utilização de simulação por realidade virtual (*virtual reality –VR–simulation*), combinada com princípios de jogos e técnicas baseadas em cenários (*gaming principles, and scenario based techniques*), permite apresentar o projecto aos vários interessados (como sejam os utilizadores, os responsáveis pela produção, os gestores do produto, etc.) e envolvê-los, de uma forma pró-activa, no desenvolvimento do produto [Tideman *et al.*, 2008].

Ao possibilitar a interacção dos vários interessados que, de uma forma célere, podem ver implementadas e testadas as suas sugestões, potencia-se o paradigma da engenharia simultânea, permitindo ao projectista captar mais facilmente as necessidades e preferências para o produto, melhorando a eficiência e eficácia do processo de projecto, o que contribui para a obtenção de melhores projectos e produtos de melhor qualidade (no sentido de satisfazer os requisitos das várias partes interessadas).

Na perspectiva do aumento da competitividade do produto, os projectistas terão de adoptar tecnologias que os ajudem a produzir produtos com elevada qualidade e que sejam produzidos de uma forma eficiente, em termos de tempo e de custos de produção.

Nesse sentido, têm sido desenvolvidos diversos métodos, na área do Projecto Robusto, para garantir que os produtos realizarão as funções que satisfazem as necessidades e os requisitos dos utilizadores, de forma consistente, independentemente das variações que possam existir

ao longo do processo produtivo, no ambiente em que irão operar e nas variadas aplicações que lhes virão a ser dadas pelos os utilizadores.

Por outro lado, a qualidade do produto depende não só da realização dessas funcionalidades mas também da facilidade de utilização dos produtos, com garantia da preservação da segurança, da saúde e do conforto dos utilizadores enquanto usam os produtos [Norman, 2002].

Relativamente à competitividade em termos de tempo e de custos, têm sido desenvolvidos estudos na área do processo cognitivo para melhor orientar os projectistas na execução das suas tarefas. Por outro lado, a utilização de computadores na realização de um número de tarefas cada vez maior permite a redução do tempo necessário à sua realização.

Uma forma de fazer face às elevadas exigências competitivas do mercado global actual consiste na utilização de famílias de produtos, com arquitecturas modulares baseadas em plataformas comuns, de modo a aumentar a variedade de produtos que podem oferecer e a reduzir os custos e os prazos de entrega [Liu *et al.*, 2008]. Também nesta área têm sido desenvolvidos diversos trabalhos.

A consideração dos requisitos ambientais tem-se tornado um importante atributo de projecto, dado o aumentado da pressão e dos regulamentos governamentais no sentido da preservação do ambiente, tendo estes requisitos cada vez mais impacto no modo como os novos produtos são projectados e produzidos.

Assim, têm surgido novas abordagens ao projecto, que têm em consideração a prática sistemática de “projecto ecológico” (*eco-design*), que procura garantir que os produtos, para além das considerações de ordem técnica e económica, respeitam os requisitos ambientais, a saúde e a segurança dos utilizadores e da comunidade global.

Esta abordagem envolve procedimentos que visam a minimização da poluição que o produto possa causar ao longo do seu ciclo de vida, minimizando os materiais e a energia consumida, tanto na produção do produto, como na sua utilização e na facilidade de separação dos seus componentes de natureza distinta, no sentido de facilitar a reutilização e reciclagem dos mesmos, quando o produto atingir o fim da sua vida útil.

De acordo com [Pahl *et al.*, 2007], o impacto mais importante no processo de projecto nos últimos anos e nas actividades desenvolvidas pelos projectistas durante o processo de projecto foi devida à possibilidade de processamento de dados por computador. Os programas de projecto, de desenho e de produção assistidos por computador (CAE; CAD; CAM; CIM) têm influenciado os métodos de projecto, as estruturas organizacionais, a divisão do trabalho, etc.

No futuro, as tarefas de rotina serão realizadas por computador, deixando os projectistas libertos para se concentrarem em novos projectos e em produtos únicos, específicos para um determinado cliente.

Também estas tarefas serão apoiadas por ferramentas informáticas, que potenciarão a capacidade criativa, o conhecimento de engenharia e a experiência dos projectistas.

O desenvolvimento de sistemas baseados em conhecimento (*expert systems*) e catálogos electrónicos de componentes aumentarão a facilidade com que a informação pode ser adquirida, incluindo os dados de projectos específicos, pormenores de componentes padronizados, informação acerca de produtos existentes, assim como os seus processos de projecto e outros conhecimentos de projecto. Estes sistemas também ajudarão na análise, na optimização e na combinação de soluções, mas não substituirão os projectistas. Pelo contrário, as capacidades/talento (*abilities*) dos projectistas serão mesmo mais cruciais, não só pelo grande número de soluções que será possível gerar, mas também pela necessidade de coordenar os contributos de muitos especialistas agora necessários para desenvolvimento dos modernos projectos, cada vez mais multidisciplinares.

Existe uma forte tendência é para as empresas se concentrarem nos seus projectos e no desenvolvimento das actividades ditas competências nucleares (*core competences*) e assim actuarem como integradores de sistemas, comprando em subconjuntos (*assemblies*) e componentes a outras empresas (*outsourcing*). Os projectistas necessitarão de conhecer (*assess*) e avaliar estes componentes subcontratados mesmo sem terem sido criados por eles.

A produção assistida por computador (CIM) tem consequências para os projectistas em termos de organização da empresa e da troca de informação, estruturando de melhor forma o planeamento e o controlo do processo de projecto. O mesmo se passa em termos de engenharia simultânea, em que o tempo de desenvolvimento do produto é reduzido pela

focagem na flexibilidade e em actividades paralelas de (*focusing on the flexible and partially parallel activities*) optimização de produto, optimização da produção e optimização da qualidade. Esta tendência vai no sentido de trazer o planeamento da produção para o processo de projecto através da aplicação de computadores.

Independentemente dos desenvolvimentos assinalados, que influenciam os métodos de trabalho dos projectistas, estes devem, cada vez mais, ter em consideração o rápido desenvolvimento tecnológico (e.g. novos procedimentos de produção e montagem, micro-electrónica e *software*) e os novos materiais (e.g. compósitos, cerâmicos, colas, plásticos e materiais recicláveis). A integração da engenharia mecânica, electrónica e de *software* (mecatrónica) tem conduzido ao desenvolvimento de produtos muito interessantes. Os projectistas têm, agora, que atribuir igual atenção a estes três aspectos dos produtos modernos.

Em resumo, pode concluir-se que existe muita pressão sobre os projectistas e que esta pressão tenderá a aumentar. Isto requer a formação contínua dos projectistas, no entanto, a formação inicial dos projectistas deve ter em consideração as várias mudanças que estão a ocorrer.

É essencial que os futuros projectistas não só compreendam não só as ciências tradicionais e os fundamentos da engenharia (física, química, matemática, mecânica, termodinâmica, dinâmica dos fluidos, electrónica, electrotecnia, ciências dos materiais, órgãos de máquinas) mas que tenham também conhecimento de domínios específicos do conhecimento (instrumentação, controlo, tecnologia de transmissão, tecnologia de produção, accionamentos eléctricos, controlo electrónico, monitorização informática, etc.).

A formação dos futuros projectistas deverá incluir cursos onde actualmente aplicam os seus conhecimentos de projecto, no sentido de resolverem as tarefas de projecto. Como complemento para auxílio nas tarefas que podem ser efectuadas de modo automático, é de toda a conveniência terem cursos especializados em metodologias de projecto, incluindo Projecto Assistido por Computador (CAD) e Engenharia Assistida por Computador (CAE).

3 O PROJECTO DE PRODUTOS ÚNICOS EM PME

Neste capítulo serão analisadas as características específicas do projecto de produtos únicos, de baixo valor económico, assim como das equipas de projectos e da organização das empresas que os produzem, com vista a compreender melhor o processo, conhecer as práticas correntes neste tipo de indústria e os factos que as justificam.

Os casos práticos em que serão aplicadas as várias táticas (recomendações) incorporadas na estratégia (metodologia) de projecto desenvolvida para os produtos únicos, terão por base equipamentos, (peças, componentes, máquinas e sistemas) destinados à movimentação de materiais. Estes enquadram-se na categoria dos produtos únicos, dado serem muito personalizados para o cliente, serem produzidas poucas unidades de cada projecto e terem características específicas, diferentes de outros equipamentos similares existentes, para corresponderem exclusivamente à aplicação a que se destinam.

3.1 Enquadramento da Actividade de Projecto no Ciclo de Vida do Produto.

Embora o “processo de projecto de produtos únicos” apresente aspectos particulares que o distinguem do projecto de produtos de produção em série, de produção em massa e de produtos de grande consumo, o enquadramento da “actividade de projecto de produtos únicos” no ciclo de vida do produto é idêntico a todos os tipos de produtos.

Também neste tipo de produtos, o projecto é a actividade do ciclo de vida do produto que relaciona e condiciona todas as outras actividades do ciclo de vida do produto.

Na Figura 3.1, representa-se de uma forma esquemática o ciclo de vida genérico dos produtos, para localização da actividade de projecto no ciclo de vida do produto.

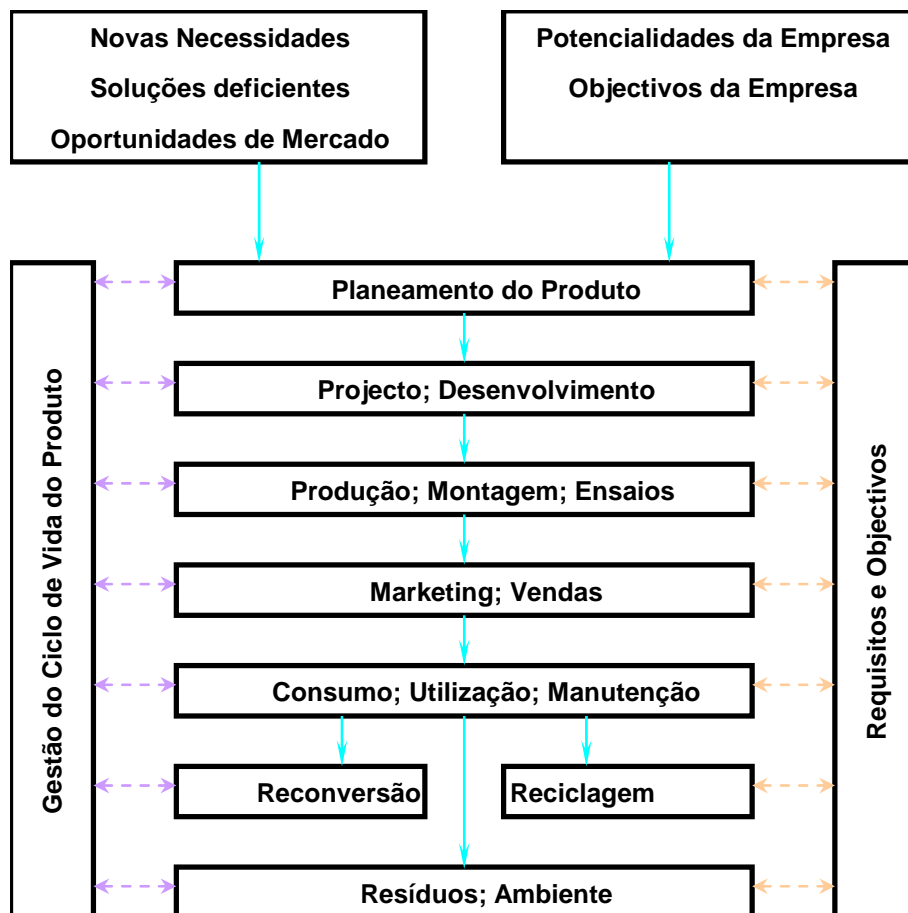


Figura 3.1 – Representação esquemática do ciclo de vida, genérico, de produtos.

No caso dos produtos únicos, que são produzidos por encomenda, não existe uma actividade de *marketing* específica para esses produtos, uma vez que a venda do produto ocorre no início do seu ciclo de vida.

Por outro lado, antes de haver a confirmação da venda do produto, é apenas realizado o projecto de concepção, sendo o projecto de pormenor e todas as actividades subsequentes do ciclo de vida do produto, realizados apenas no caso de se concretizar a venda do produto.

Assim, no caso dos produtos únicos, a actividade de *Marketing* e Venda aparecem no início do processo e o processo de projecto é dividido nas duas fases a seguir enunciadas, sendo o enquadramento do Projecto no ciclo de vida dos produtos únicos conforme se representa esquematicamente na Figura 3.2.

- “Fase de Projecto Conceptual” (ou “Anteprojecto”) — O desenvolvimento é apenas o suficiente para transmitir ao cliente a solução e para permitir o apuramento dos custos de produção e de colocação em serviço do produto;
- “Fase de Projecto de Pormenor e Preparação de Trabalho” (para fabrico) — São desenvolvidos todos os aspectos do projecto do produto e de todos os seus componentes, peças, processos de fabrico, especificações para o processo de produção, a qual apenas terá lugar para os produtos que o cliente decidir comprar. Caso não seja concretizada a compra, não será necessário o produto, nem o projecto para o mesmo.

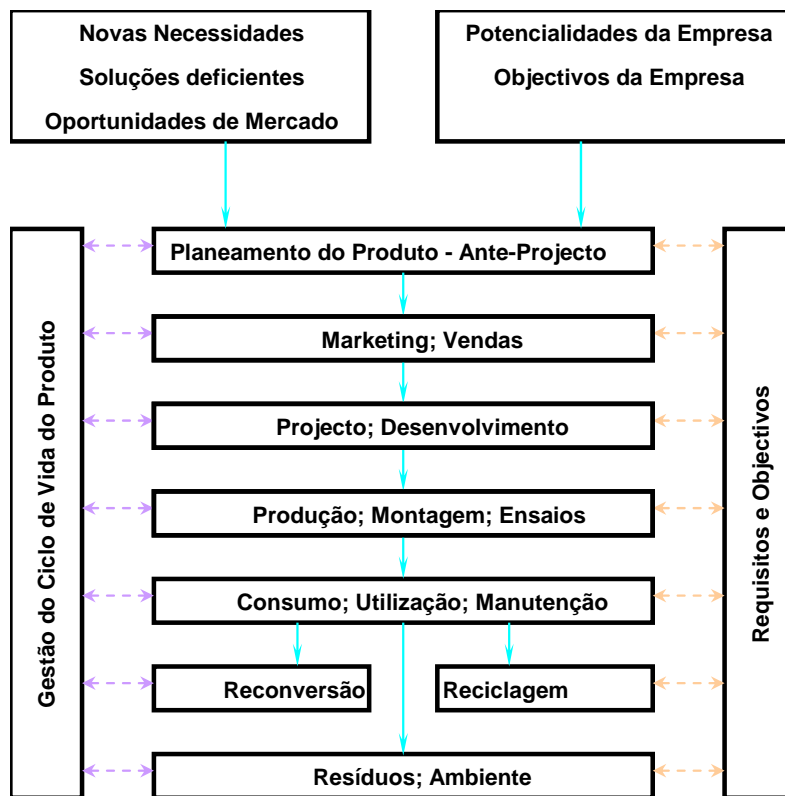


Figura 3.2 – Representação esquemática do ciclo de vida dos produtos únicos.

3.2 Características Particulares dos Produtos Únicos

Na classificação de produtos únicos (“*special purpose equipment*”, segundo a designação de Hubka), incluem-se ferramentas especiais para execução de tarefas específicas, equipamentos para postos de trabalho e *gabarits (jigs)* para produção, linhas de produção, desenvolvimento de *software* para aplicações específicas de um cliente em particular, equipamentos para aplicações especiais de robótica, maquinaria para transporte e embalagem, e também navios transoceânicos ou naves espaciais [Hubka *et al.*, 2001].

Os produtos deste tipo são, normalmente, produzidos mediante encomendas especiais, como artigos unitários (“*one-of-a-kind*”) ou em séries de muito pequena dimensão. O projecto e o desenvolvimento dos produtos têm lugar especificamente para um determinado cliente e, em muitos casos, esses produtos são projectados completamente de novo, desde o início.

Os prazos de entrega impostos pelo mercado (cliente, concorrência) não admitem a realização de ensaios nem a optimização do projecto, sendo os produtos integrados

(normalmente de forma célere) na utilização do cliente/utilizador e/ou nas suas instalações produtivas.

Nestes casos, é mais económico sobredimensionar os equipamentos, o que nalguns casos lhes confere um aspecto de resistência acrescida, do que o custo de mão-de-obra especializada para otimizar o dimensionamento.

Em muitos casos, o preço é imposto pela concorrência ou resulta de uma negociação com o cliente, ficando o preço muito próximo do preço de custo inerente à produção do produto. Por outro lado, os custos de projecto são suportados pela “peça única”, não existindo quantidade de produtos para que haja uma “diluição” dos custos de projecto por várias peças.

As componentes mecânicas, eléctricas, pneumáticas, hidráulicas, electrónicas, programação (*softwares*) e automação são utilizadas em iguais níveis de importância.

Os componentes normalizados existentes no mercado como produtos acabados são utilizados intensivamente para controlar os riscos. Por essa razão, as tarefas de configuração são mais frequentes do que o projecto personalizado (*custom design*) de componentes.

Os requisitos para este tipo de equipamentos incluem (*extreme demands*) exigências apertadas para os tempos de ciclo, confiabilidade (*reliability*) e facilidade de utilização (*availability*), a facilidade e flexibilidade de modificação para um processo de produção diferente ou um produto diferente e antecipar as possibilidades de reparações (*retro-fitting*) para melhorar o desempenho.

A fase de elaboração das propostas de anteprojectos para estimativa de custos e para consultas a fornecedores, com vista à obtenção da encomenda e à celebração de um contrato com o cliente, são extensivas, necessitando de tempo substancial e incorrendo em despesas financeiras.

As propostas a apresentar aos clientes têm que incluir, não só o fornecimento completo, desde a concepção do produto até à sua colocação em serviço, mas também têm que mencionar o prazo de entrega e o preço, os quais são estimados antes de todos os pormenores dos equipamentos a fornecer terem sido definidos.

Muitas das propostas não têm sucesso, não são aceites pelos clientes e não dão origem a encomenda, nem à celebração do contrato de fornecimento. É necessária uma análise particularmente cuidada dos requisitos, de modo a ajustar as especificações de projecto às necessidades específicas do cliente.

Mesmo assim, são frequentes as modificações solicitadas durante a elaboração do projecto e o desenvolvimento do produto, devido ao aumento progressivo da quantidade de conhecimento que vai sendo adquirida acerca da tarefa e dos desejos adicionais dos clientes.

A construção de programas (*software*) é, muitas vezes, desenvolvida e adaptada durante os ensaios de funcionamento, em condições reais, antes de o cliente aceitar os equipamentos.

Uma das tarefas mais importantes e mais exigente na actividade de produção de produtos únicos consiste na compatibilização dos vários componentes (equipamentos de diferentes fornecedores) que são integrados num dado projecto, incluindo a sua interligação, a conjugação dos seus desempenhos, as interfaces para interligação entre os vários componentes, a comunicação entre eles, etc.

O conhecimento que o cliente possui acerca da situação para a qual o produto se destina dever ser utilizado, para obter informação exhaustiva e o pessoal do cliente, que irá trabalhar com os equipamentos, deverão ser considerados como consultores para o desenvolvimento do projecto.

A formação e o treino do pessoal que irá operar com os equipamentos e que irá executar a sua manutenção deve ter lugar antes da realização de ensaios de funcionamento no local e durante a mesma. Estas acções contribuem, sobretudo, para motivar o pessoal, para facilitar a aceitação dos novos equipamentos ou sistemas e para conferir qualificações específicas para melhor desempenharem as suas funções.

Quanto a eventuais desenvolvimentos futuros e a tendências previsíveis para o produto a projectar, além de deverem ser pensadas antecipadamente, deverão também ser consideradas no Projecto.

Os engenheiros projectistas que elaboram este tipo de projectos necessitam de ter muita flexibilidade, já que o tipo de tarefas muda rapidamente de uma encomenda para outra, necessitando também de possuir boa capacidade de comunicação e de negociação.

É essencial uma colaboração muito próxima entre o projecto e a produção para este tipo de máquinas. As empresas envolvidas no desenvolvimento deste tipo de produtos são, normalmente, empresas de pequena ou média dimensão (ou são subsidiárias).

3.3 Empresas Industriais de Pequena e Média Dimensão

Segundo o exposto no Anexo do Decreto-Lei nº 372/2007 de 6 de Novembro de 2007, entende-se por empresa qualquer entidade que, independentemente da sua forma jurídica, exerce uma actividade económica. São, nomeadamente, consideradas como tal as entidades que exercem uma actividade artesanal ou outras actividades a título individual ou familiar, as sociedades de pessoas ou as associações que exercem regularmente uma actividade económica.

A categoria das micro, pequenas e médias empresas (PME) é constituída por empresas que empregam menos de 250 pessoas, cujo volume de negócios anual não excede os 50 milhões de euros, ou cujo balanço total anual não excede os 43 milhões de euros.

Na categoria das PME, uma pequena empresa é definida como uma empresa que emprega menos de 50 pessoas, e cujo volume de negócios anual ou o balanço total anual não excedem 10 milhões de euros.

Na categoria das PME, uma micro empresa é definida como uma empresa que emprega menos de 10 pessoas e cujo volume de negócios anual ou o balanço total anual não excedem 2 milhões de euros.

De acordo com os dados do IAPMEI, relativos a 2008, [IAPMEI, 2008], uma característica comum às economias europeias é o facto de as PME se assumirem como um pilar das suas estruturas empresariais e Portugal não constitui uma excepção a esta regra.

Efectivamente, as PME são perfeitamente dominantes na estrutura empresarial nacional, representando 99,6% das unidades empresariais – sociedades comerciais – do país, criando $\frac{3}{4}$ (75,2%) dos empregos – emprego no sector privado – e realizando mais de metade do volume de negócios (56,4%).

Isto significa que têm sede em Portugal perto de 297 mil PME, as quais geram cerca de 2,1 milhões de postos de trabalho e uma facturação superior a 170,3 mil milhões de euros.

3.4 O Projecto em Empresas Industriais de Pequena e Média Dimensão

Devido ao menor número de funcionários, a proximidade entre eles é maior e a abordagem ao projecto, que é normalmente seguida neste tipo de empresas, é mais informal, utilizando, sempre que possível, soluções bem-sucedidas desenvolvidas anteriormente pela empresa.

O trabalho realizado na área de projecto é caracterizado por um elevado grau de envolvimento pessoal e de controlo sobre o produto, não obstante o controlo em termos de procedimentos organizacionais ser mais reduzido. [Lauche, 2005].

Por vezes, as especificações que são definidas para o produto, assim como as características da solução e dos processos que serão utilizados para a sua produção, são decididas em função dos meios de produção disponíveis e das tecnologias conhecidas.

Grande parte da formação na área de projecto resulta da transmissão de conhecimentos e das boas práticas de projecto, adquiridos por funcionários mais antigos em trabalhos anteriores realizados na empresa, para formação de novos funcionários e para utilização em trabalhos futuros da empresa.

Muitas vezes, a equipa de projecto designada para a elaboração do projecto relativo a uma determinada encomenda, resume-se a um único projectista, o qual tem a seu cargo todos os aspectos relacionados com a concepção da solução e com a construção dessa solução.

Neste tipo de empresas, a prática de Engenharia Simultânea (*Concurrent Engineering*) é um hábito, sendo muito estreita, até mesmo fisicamente muito próxima, a relação entre o projecto e a produção.

No início da sua vida profissional, o autor do presente trabalho pedia, frequentemente, opinião aos chefes de produção, de quem sempre obteve a melhor colaboração, não só por ser filho do dono da empresa, mas também por ter trabalhado sob a direcção desses chefes de produção quando ia trabalhar na fábrica nos períodos de férias escolares.

Por outro lado, o facto de as várias competências (contacto com o cliente, concepção da solução, produção, ensaios, controlo de qualidade, entrega ao cliente) estarem todas a cargo do autor fazia com que, no seu pensamento, estivessem todas presentes, em todas as fases do desenvolvimento dos produtos, especialmente na fase de concepção. Quando lhe foi apresentado o conceito de Engenharia Simultânea, o autor não percebeu qual era a novidade do assunto, porque para ele projecto tinha sido sempre simultâneo.

Nas empresas que se dedicam ao desenvolvimento de produtos únicos, o sector relacionado com o projecto tem uma importância estratégica para o futuro da empresa.

3.5 A Actividade de Movimentação de Materiais

Os casos práticos onde será aplicada a metodologia apresentada neste trabalhos terão por base equipamentos (peças, componentes, máquinas e sistemas) para movimentação de materiais, que se enquadram na categoria dos produtos únicos, muito personalizados para o cliente e para a aplicação a que se destinam.

A movimentação de materiais é uma das primeiras actividades desenvolvidas pelo Homem, tendo por fim a satisfação das suas necessidades primárias, tais como a alimentação, o abrigo, o vestuário, etc.

A utilização de utensílios, dispositivos, máquinas e equipamentos capazes de auxiliar e facilitar as operações de movimentação de materiais e de realizar, completamente, diversas operações de movimentação de materiais proporcionam, entre outras, as vantagens seguintes:

- Redução do esforço físico humano;
- Aumento da produtividade;
- Aumento da capacidade produtiva;
- Redução do custo das operações de movimentação de materiais;
- Aumento da qualidade dos produtos, reduzindo a ocorrência de danos durante as operações de movimentação de materiais, nas suas diversas fases;

- Aumento da segurança com que são realizadas as operações de movimentação, reduzindo o número de acidentes;
- Preservação da integridade física e sanitária dos operadores, permitindo que as operações em ambientes perigosos ou agressivos para o homem possam ser realizadas por equipamentos, ficando o operador distante desses locais;
- Melhoria das condições ambientais e de trabalho, devido ao maior rigor e repetibilidade conseguidos quando a movimentação, o posicionamento e a arrumação de materiais são feitos de modo automático;
- Simplificação e racionalização de todo o processo produtivo, de armazenagem e de distribuição.

Desde sempre, o Homem desenvolveu formas de minimizar o seu esforço, recorrendo ao auxílio de animais com poder de tracção, a dispositivos mecânicos com capacidade para redução do seu esforço e a dispositivos que permitiam exercer o esforço de forma mais fácil ou mais segura.

A alavanca foi das primeiras ferramentas a ser utilizada pelo Homem, com vista a movimentar mais facilmente qualquer corpo, sobretudo os mais pesados e difíceis de pegar com o braço humano.

Também a roda, uma das primeiras e das maiores invenções do Homem, teve a sua primeira aplicação para facilitar a movimentação de materiais.

A actividade de movimentação de materiais proporciona um ambiente excelente para o desenvolvimento de produtos únicos.

3.6 Minimizar o Processo Iterativo

A característica iterativa do projecto resulta do facto de não existir uma única solução para um problema de projecto, mas existirem várias soluções que satisfazem os requisitos de um problema de projecto. A satisfação de vários requisitos conduz, normalmente, à existência de

efeitos contraditórios, o que dá lugar ao processo de optimização, condicionado pelos critérios adoptados para o objectivo óptimo.

No início, não é possível definir com rigor (exactidão) todos os parâmetros de projecto. As consequências decorrentes deste facto têm um impacto muito grande na estrutura de custos do projecto de produtos únicos do que na de outro tipo de projectos, podendo os custos das modificações ser superiores ao custo do próprio produto.

A Engenharia Simultânea contribui para esclarecer, na fase inicial do projecto, diversos parâmetros, evitando que eventuais erros só sejam detectados em fases posteriores, o que obrigaria a alterar decisões já tomadas na fase inicial.

Arthur Hall definia como medida da qualidade de um projecto o número de iterações efectuadas (no ciclo de retroalimentação) até se atingir um protótipo aprovado [Hall, 1962].

Com efeito, cada uma das iterações que seja efectuada requer tempo e aumenta os custos associados ao desenvolvimento do projecto.

No projecto de produtos únicos, os prazos de entrega exigidos pelos clientes e os orçamentos impostos pelo mercado obrigam à minimização do processo iterativo, não havendo lugar para a realização de protótipos, para esclarecimento de incertezas, nem para a optimização das soluções adoptadas.

4 ANÁLISE DO PROCESSO DE PROJECTAR

Neste capítulo, é apresentado um resumo de vários modelos que representam o processo de projectar, os quais foram estudados com o objectivo de avaliar a sua adequabilidade para o projecto de produtos únicos e recolher os elementos necessários para a construção da metodologia a utilizar no projecto de produtos únicos.

O Processo de Projecto pode ser definido como o conjunto de actividades através das quais os projectistas desenvolvem e seleccionam os meios necessários para alcançar determinados objectivos, sujeitos aos constrangimentos inerentes a cada caso [Tate *et al.*, 1996], tratando-se de um processo bastante complexo, que pode ser classificado e esquematizado de várias formas:

- Por tipo de actividade: Análise; Síntese; Avaliação [Jones, 1974];
- Por tipo de raciocínio: Dedução; Indução; Abdução [March, 1976];
- Por característica da actividade; Exploração Divergente; Estruturação; Convergência para a solução [Cross, 2008];

- Por sequência cronológica do tipo de objectivos que se pretendem alcançar em cada fase [VDI 2221 – BS 7000];
- Pelas interligações existentes entre os elementos presentes em cada domínio em que o projecto se desenvolve [Suh, 1990], [Suh, 2001];
- Pelos tipos de actividades que são realizadas durante o processo de projecto: Compreender; Gerar, Avaliar, Decidir [Ullman, 2010];
- Pelos factores que mais fortemente influenciam as decisões: “*Push-Pull*”; os processos são conduzidos pelas experiências passadas (“*push*”), ou são conduzidos pelas expectativas futuras do projectista (“*pull*”) ou por ambas [Gero *et al.*, 2000];
- Pelos tipo de actuação que é praticada durante o processo de projecto: tomada de decisão (*decision making*); avaliação do desempenho (*performance measures*); iterações (*iterations*); sequenciação de actividades (*sequence of activities*); interligação entre níveis hierárquicos e níveis de abstracção (*levels of scope and levels of abstraction*); gestão de informação (*information management*) [Tate *et al.*, 1996];
- Pela metodologia adoptada, como sejam o método “Tentativa e Erro”, “Intuitivo”, “Sistemático”, “Apoiado por computador” e “Automatizado” [Hubka *et al.*, 2001];
- Pela orientação seguida, como sejam os métodos “*Top-Down*”; “*Bottom-Up*”; Sequencial e Simultânea;
- Pela motivação e oportunidade, tais como a “*Technology Push*”, o “*Market Pull*” ou o “*Product Change*” [Ullman, 2010].

Por outro lado, os próprios produtos (em sentido lato: elementos físicos, serviços, processos, organizações, programas informáticos, etc.) que são objecto de projecto, são eles próprios elementos complexos, passíveis de serem decompostos em diversos subprojectos que, por sua vez, poderão ser novamente decompostos em subprojectos e assim sucessivamente. A cada subprojecto está associado um processo de projecto, mais ou menos extenso, mas envolvendo, porém, o mesmo tipo de actividades.

O processo de projecto é, essencialmente, um processo de resolução de problemas e, como tal, pode ser incluído na teoria geral de resolução de problemas [Pahl *et al.*, 2007], cujo processo pode ser esquematizado conforme se representa na Figura 4.1.

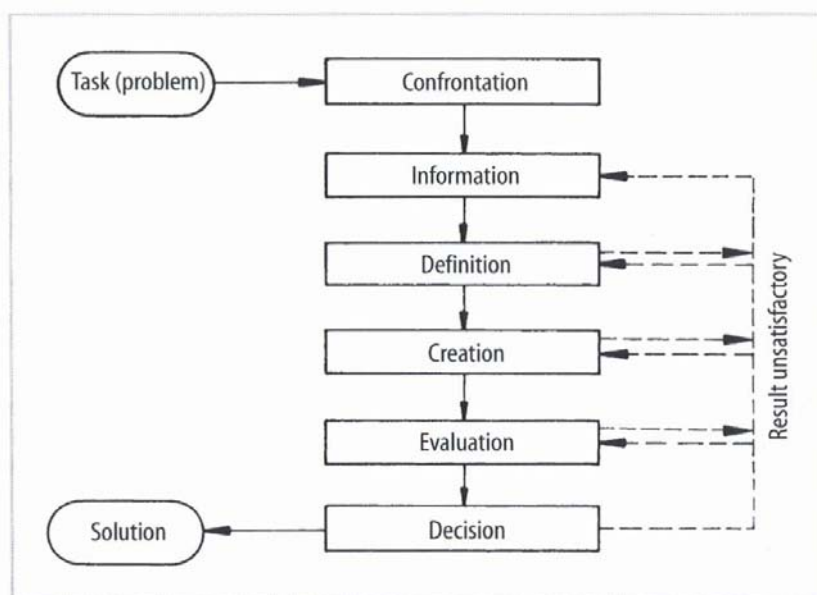


Figura 4.1 – Representação esquemática do Processo Geral de Resolução de Problemas, retirado de [Pahl *et al.*, 2007].

Segundo Dieter e Schmidt [Dieter *et al.*, 2009], o processo de resolução de problemas pode ser retirado à actividade de projecto, numa sequência “passo-a-passo” das actividades seguintes:

- Definição do problema;
- Recolha de informação;
- Geração de soluções alternativas;
- Avaliação e selecção da solução;
- Comunicação dos resultados.

O processo de resolução de problemas pode ser utilizado nas várias fases do processo de projecto, desde a concepção até à definição de pormenor dos componentes elementares.

O tema da Resolução de Problemas (*Problem Solving Theory*) tem sido tratado por várias especialidades: psicologia, lógica, matemáticos, economistas, etc.

Também a Teoria de Sistemas tem sido utilizada para descrever o funcionamento e a sequência das actividades inerentes ao processo de projecto, encontrando-se o ciclo de iteração representado por diversos autores [Asimow, Wilson, Tate, Nordlund, entre outros].

Wilson [Wilson, 1980] representa as iterações do processo de projecto como um ciclo iterativo, ou uma retroalimentação, segundo a Teoria de Sistemas, com se mostra na Figura 4.2.

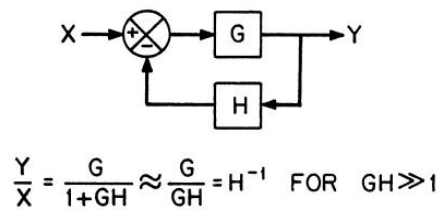


Figura 4.2 – Representação esquemática do Ciclo Iterativo, ou retroalimentado, do Processo de Projecto, retirado de [Wilson, 1980].

Também Mats Nordlund [Nordlund, 1996] e Derrick Tate [Tate *et al.*, 1996] apresentam este ciclo iterativo associado às actividades de Síntese e de Análise, conforme se reproduz na Figura 4.3, retirado de [Suh, 1990].

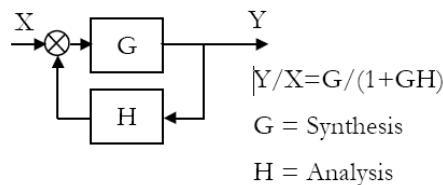


Figura 4.3 – Representação esquemática do Ciclo Iterativo, ou retroalimentado, do Processo de Projecto, retirado de [Suh, 1990].

Aleixou [Aleixou, 2007] e Zamenopoulos [Zamenopoulos, 2008], baseados no modelo FBS, proposto por Gero para o processo de projecto, consideram dois ciclos de controlo que se desenvolvem simultaneamente, proporcionando avaliações e objectivos (alvos) um ao outro.

Um dos ciclos corresponde a um caminho (percurso, trajeto, processo) de Síntese-Análise-Avaliação e outro corresponde ao caminho de Reformulação-Formulação-Avaliação.

A representação gráfica dos ciclos acima referidos encontra-se reproduzida na Figura 4.4.

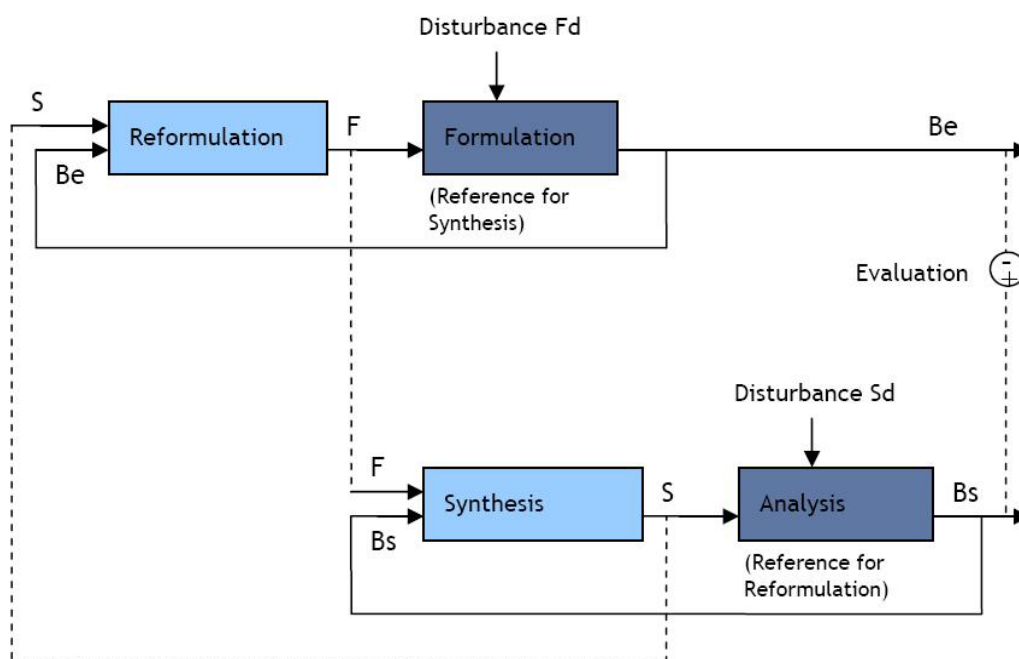


Figura 4.4 – Representação do Ciclo Iterativo, ou de controlo do Processo de Projecto, em que um dos percursos corresponde ao ciclo Síntese-Análise-Avaliação e o outro percurso corresponde ao ciclo Reformulação-Formulação-Avaliação, retirado de [Aleixou, 2007].

O Processo de Projecto é composto por uma sequência de decisões.

Para avaliação e selecção das potenciais soluções, têm sido utilizadas técnicas de Tomada de Decisão e de Análise de Valor, tendo estes temas sido desenvolvidos por especialistas nas áreas da psicologia, da matemática e da gestão.

Com a intenção de fazer um levantamento da investigação que é realizada na área do Projecto de Engenharia, Finger e Dixon [Finger *et al.* 1989], chegaram a um arranjo (plano) estrutural das várias abordagens. Baseados na perspectiva que obtiveram do seu estudo intensivo da literatura, separaram a investigação em Projecto de Engenharia Mecânica em seis áreas de atenção (interesse) distintas:

- 1) Modelos Descritivos do processo de projecto;
- 2) Modelos Prescritivos do processo de projecto;
- 3) Modelos de projecto baseados na utilização de Computadores;
- 4) Linguagens, Representações e Ambientes para Projecto;
- 5) Análise de apoio às decisões de Projecto;
- 6) Assuntos relacionados com o ciclo de vida do produto.

No âmbito deste trabalho, as áreas de atenção com interesse são as duas primeiras, sendo seguidamente apresentados, de forma sucinta, os modelos de projecto mais conhecidos, desenvolvidos por autores reconhecidos na área do projecto, essencialmente do projecto de engenharia e do projecto de arquitectura.

Ao longo do processo, são desenvolvidas diversas actividades, através das quais a percepção de um problema (por parte de um cliente/utilizador) é transformada numa solução satisfatória (o produto do projectos – *output – the design object*) para o problema.

O elemento que realiza essa transformação, no caso do projecto de engenharia, é normalmente designado como um sistema técnico [Hu, 2000], [Pahl *et al.*, 2007], ou um processo de produção (*manufacturing process*) [Wilson, 1980], que transforma pelo menos um dos três tipos de elementos seguintes:

Energia: mecânica, térmica, eléctrica, química, etc., que poderão ser veiculadas através de forças, correntes, calor, etc.;

Materiais: Sólidos, granulados, líquidos, gases, incorporados em matérias-primas, componentes, produtos acabados, etc.;

Sinais: Informação, dados, monitorização, “magnitude”, controlo, etc..

Na Figura 4.5, é apresentada a representação esquemática utilizada por [Pahl *et al.*, 2007], para ilustrar a transformação efectuada pelo processo de projecto de engenharia.

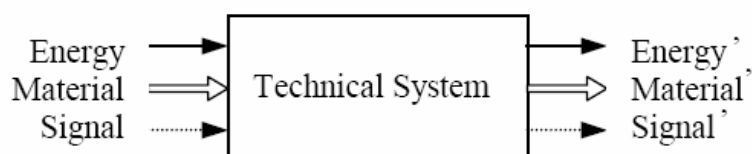
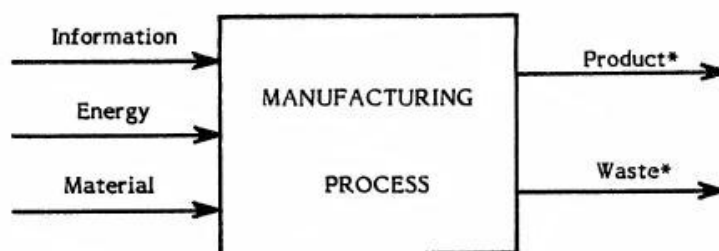


Figura 4.5 – Representação da conversão de energia, material e sinais, através de um sistema técnico, retirado de [Pahl *et al.*, 2007].

Wilson [Wilson, 1980] considera que no processo de produção, entram (*inputs*) Factores de Produção (Energia, Materiais, Sinais) e saem (*outputs*) Produtos e Desperdícios, sendo ambos compostos por Energia, Materiais e Sinais, num estágio (numa forma) diferente daqueles em que entraram, conforme se representa na Figura 4.6.



* Information, Energy, Material

Figura 4.6 – Representação da conversão de energia, material e sinais, através de um processo de manufactura, retirado de [Wilson, 1980].

As representações anteriores correspondem ao nível mais geral e abstracto do processo, no entanto, a tarefa principal pode ser decomposta em diversas subtarefas, ou seja, a realização da função principal é conseguida através da realização de diversas subfunções.

Assim, a solução principal resulta do conjunto das várias subsoluções, que realizam cada uma das subfunções.

A representação anterior, mostrada na Figura 4.6, adaptada de [Pahl *et al.*, 2007], pode ser expandida, mostrando os vários níveis de decomposição de um problema de projecto, conforme se representa na Figura 4.7.

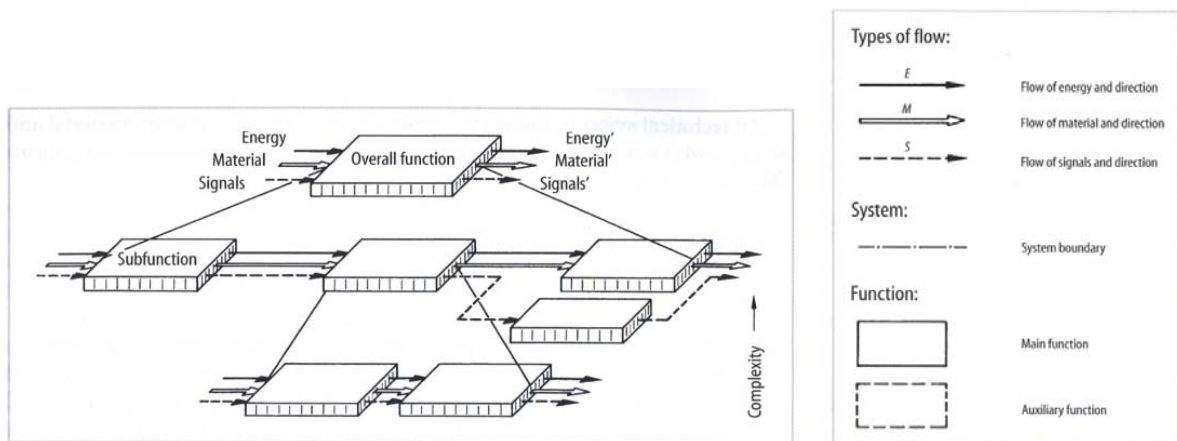


Figura 4.7 – Representação da decomposição do sistema global nos subsistemas que o compõem, retirado de [Pahl, *et al.*, 2007].

Também os modelos de projecto propostos pelas VDI [VDI 2221] e por Nigel Cross [Cross, 2008] têm em consideração a existência de subproblemas em que se decompõe o problema principal, bem como as subsoluções que contribuem para a solução global do problema principal.

Derrik Tate [Tate, 1999], na sua tese de doutoramento, propõe para complemento da Teoria Axiomática de Projecto, uma metodologia para decomposição de problemas de engenharia, cuja representação esquemática se reproduz na

Figura 4.8, tendo por base a Teoria Axiomática de Projecto.

Guenov e Barker [Guenov *et al.*, 2005] propõem um modelo para decomposição, que designaram por COPE (*decomposition-integration of Complex Product Environments*) no qual a matriz de projecto (DM) da Teoria Axiomática de Projecto relaciona os Requisitos Funcionais com os Paramentos de Projecto, enquanto a matriz da Matriz de Estrutura de Projecto (DSM) proporciona a representação estruturada do contexto de desenvolvimento do sistema.

A representação genérica deste modelo é mostrada na Figura 4.9.

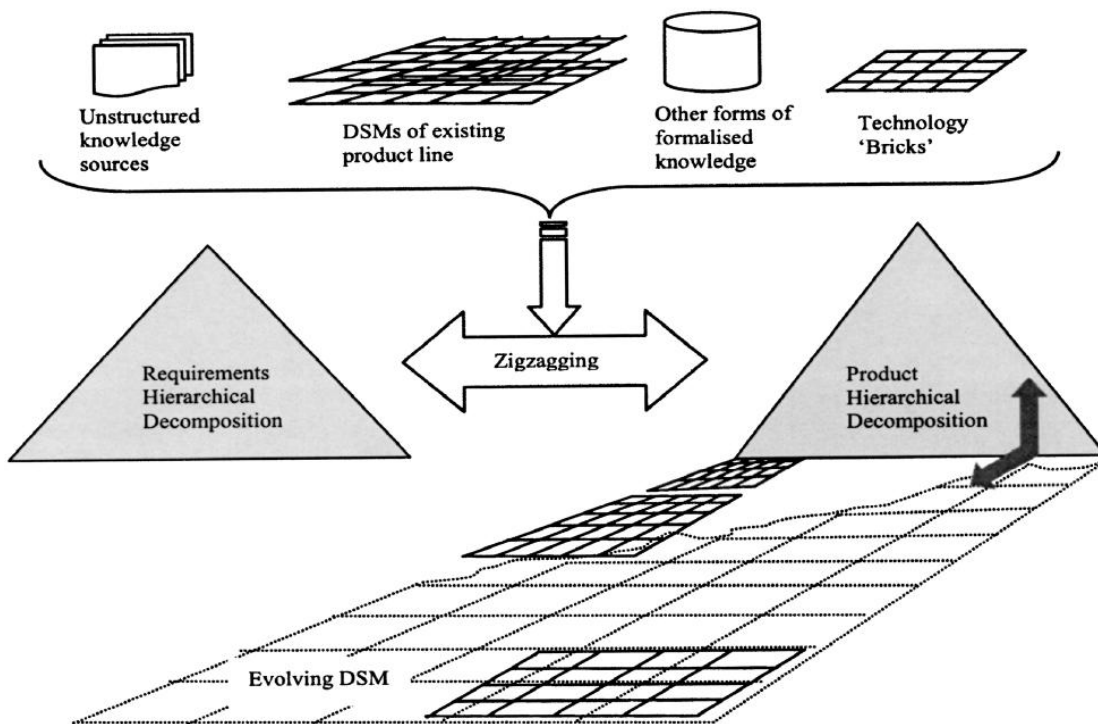


Figura 4.9 – Representação esquemática do processo Decomposição-Integração COPE, retirado de [Guenov *et al.*, 2005].

O procedimento para decomposição, no qual a Matriz de Projecto e a Matriz de Estrutura de Projecto co-evoluem, está representado na Figura 4.10.

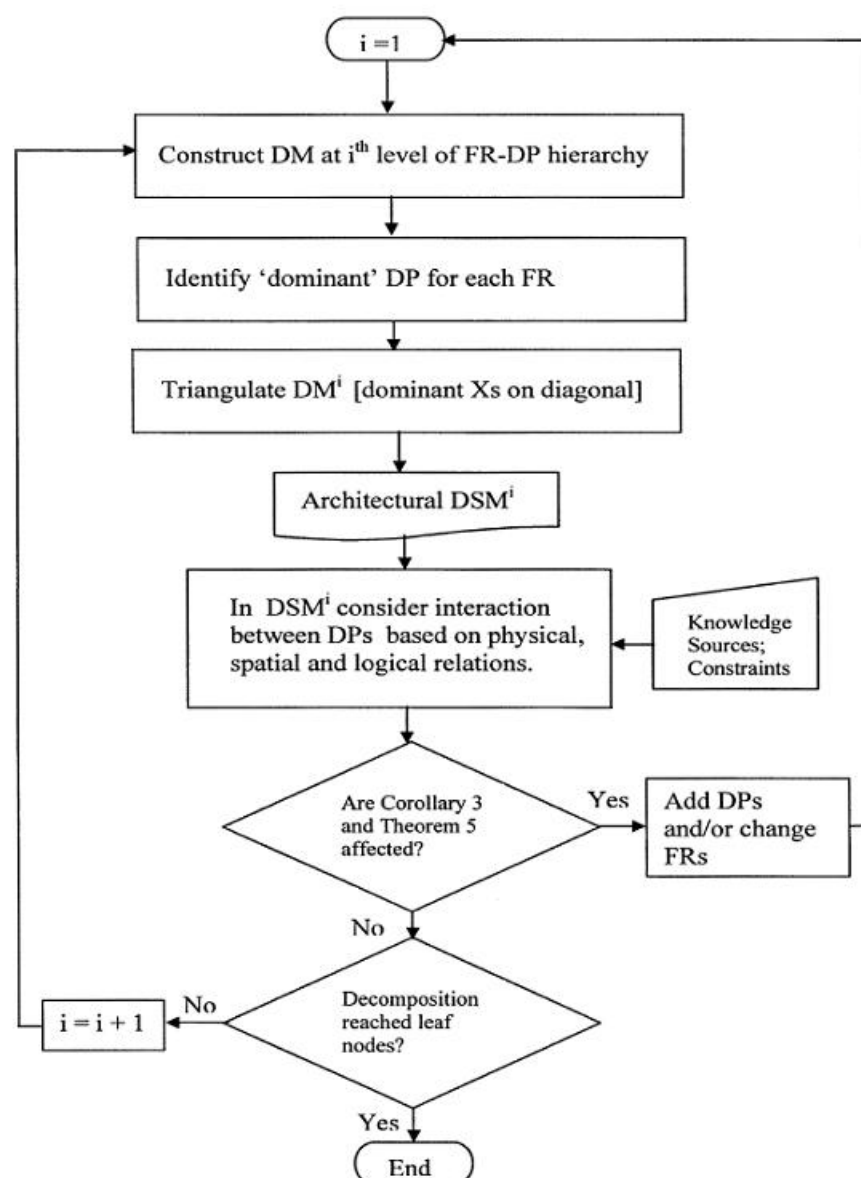


Figura 4.10 – Representação esquemática do procedimento para Decomposição-Integração COPE, retirado de [Guenov *et al.*, 2005].

4.1 Modelos do Processo de Projectar (*Design Models*)

Modelos de Projecto são representações das filosofias, ou das estratégias, propostas para mostrar como o projecto é, ou devia ser, feito. Normalmente são desenhados como diagramas de fluxos, mostrando a natureza iterativa do processo de projecto através de retroalimentações (*feedback links*).

No passado, os modelos de projecto provenientes de várias perspectivas filosóficas têm tido a pertencer a duas classes principais, nomeadamente prescritiva e descritiva.

Os modelos prescritivos estão associados à “escola de pensamento sintáctico” e tendem a olhar o processo de projecto de uma perspectiva global, cobrindo os passos procedimentais (*procedural steps*), isto é, sugerindo a melhor maneira como qualquer coisa deve ser feita.

Os modelos descritivos, por outro lado, preocupam-se com as acções dos projectistas e com as actividades realizadas durante o processo de projecto, isto é, com o que está envolvido no acto de projectar e/ou como isso é feito.

Mais recentemente, começou a aparecer um outro grupo de modelos, designado como modelos computacionais. Estes modelos colocam a ênfase no uso de técnicas computacionais numéricas e qualitativas, assim como técnicas de inteligência artificial, combinadas com tecnologias de computadores.

Qualquer modelo de projecto existente, embora tenha mais afinidades com uma determinada classe de modelos, acaba por partilhar também algumas das características de outras classes.

4.2 Modelos Prescritivos, Baseados no Modo de Projectar

Os modelos de projecto prescritivos têm tendência para prescrever como o processo de projecto deve ser desenvolvido (*ought to proceed*) e, em muitos casos, parecem sugerir a melhor forma para desenvolver o projecto.

De um modo geral, estes modelos tendem a encorajar os projectistas a adoptarem formas de trabalho melhoradas, facultam procedimentos algorítmicos e sistemáticos para serem seguidos e frequentemente apresentam metodologias particulares, baseadas num trabalho analítico, previamente à da geração dos conceitos para soluções. [Evbuomwan *et al.*, 1996].

4.2.1 Modelo de J. C. Jones

O Modelo de Projecto proposto por J. C. Jones e D. G. Thornely em 1962, citado por [Evbomwan *et al.*, 1996], é composto, essencialmente, por três fases (estágios, etapas – *stages*), que são Análise, Síntese e Avaliação, desenvolvidas de acordo com a sequência representada na Figura 4.11.

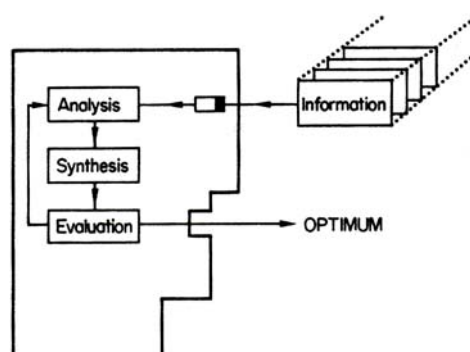


Figura 4.11 – Representação esquemática do processo de projecto, executado de forma racional, (Projectista como Computador) retirado de [Jones, 1970].

Este Modelo de Projecto procura racionalizar e sistematizar os procedimentos, como sendo uma evolução relativamente ao processo de projecto, realizado com base na intuição e sem bases científicas, cuja analogia apresentada por Jones está reproduzida na Figura 4.12.

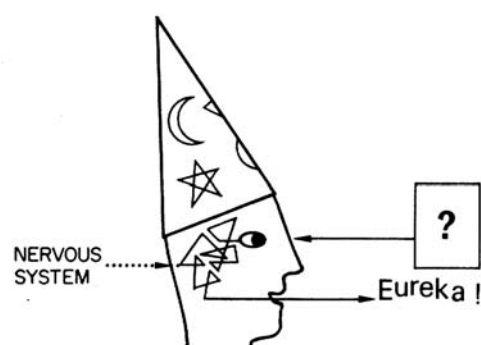


Figura 4.12 – Representação esquemática do processo de projecto, executado de forma intuitiva (Projectista como Mágico), retirado de [Jones, 1970].

Segundo o modelo de projecto de Jones, na fase (*stage*) de Análise, a primeira actividade envolve a produção de uma lista aleatória de factores relacionados com o problema a resolver e/ou com a sua solução. Estes factores são então classificados em categorias trabalháveis e subcategorias, após as quais são investigadas as interacções entre elas. O passo final envolve o reescrever de todos os requisitos de projecto em especificações de desempenho (*performance*) neutros relativamente à solução.

Na fase (*stage*) de Síntese, são utilizadas técnicas criativas como “*brainstorming*” para gerar ideias e soluções para as especificações de desempenho (*performance*). São então estabelecidos os limites para cada solução parcial, dentro de uma gama de dimensões, formas e variações nas propriedades dos materiais que satisfaçam as especificações de desempenho. O passo seguinte envolve a combinação de soluções parciais compatíveis em soluções combinadas.

A última fase (*stage*) deste modelo é a fase de Avaliação (*evaluation*), a qual envolve principalmente duas actividades: os métodos de avaliação e a avaliação para produção e vendas.

Como métodos de avaliação, Jones defende (*advocates*) a utilização de métodos de avaliação para detectar erros nas fases em que eles podem ser corrigidos de forma mais barata. Estes métodos incluem a avaliação das especificações de desempenho e a avaliação pelo uso de julgamento preciso (*precise judgements*).

Este modelo enfatiza a necessidade de estabelecer as especificações de forma neutra relativamente à solução, assim como a necessidade de investigar as interacções entre os factores de projecto. A fase de Síntese apresenta uma abordagem “*bottom-up*” no desenvolvimento do projecto global.

Neste modelo, a ideia de avaliação do projecto por equipas de pré-operação, pré-produção e pré-vendas ocorre numa fase tardia do processo. À luz das teorias actualmente aceites, estas equipas deverão ser envolvidas no processo na sua fase inicial, que neste modelo seria na fase de Análise [Evbomwan *et al.*, 1996].

Para auxiliar os projectistas a escolherem a ferramenta de projecto mais adequada à fase em que se encontrem e em função dos objectivos que pretendam alcançar, no seu livro “*Design Methods*” [Jones, 1970], Jones apresenta uma tabela, reproduzida na Figura 4.13, na qual as

linhas são as entradas (*inputs*) que correspondem às fases do processo em que o projectista se encontra, e nas colunas (*outputs*) encontram-se as classes de informação que se pretende obter. Nas células da tabela encontram-se indicados os métodos ou ferramentas de projecto adequados à situação correspondentes à intercepção da linha e da coluna correspondentes. Os métodos ou ferramentas de projecto são apresentados, explicados e ilustrados com exemplos nos restantes capítulos do seu livro [Jones, 1970].

OUTPUTS → INPUTS ↓	2 Design Situation Explored	3 Problem Structure Perceived or Transformed	4 Boundaries Located, Sub-solutions Described and Conflicts Identified	5 Sub-solutions Combined into Alternative Designs	6 Alternative Designs Evaluated and Final Design Selected
1 Brief issued	3-1 Stating Objectives 3-2 Literature Searching 3-3 Visual Inconsistency 3-4 Interviewing Users 4-1 Brainstorming	3-2 Literature Searching 3-3 Visual Inconsistency Search 3-4 Interviewing Users 4-1 Brainstorming 4-2 Synectics	3-3 Visual Inconsistency Search 4-1 Brainstorming 4-4 Morphological Charts	3-3 Visual Inconsistency Search 4-1 Brainstorming 4-2 Synectics	2-1 Strategy Switching 2-2 Matchett's FDM
2 Design Situation Explored		3-1 Stating Objectives 3-9 Data Reduction 5-1 Interaction Matrix 5-2 Interaction Net 5-8 Classification 6-4 Specification Writing		5-4 System Transformation 5-6 Functional Innovation 5-7 Alexander's Method	
3 Problem Structure Perceived or Transformed	3-2 Literature Searching 3-5 Questionnaires 3-6 Investigating User Behaviour 3-7 Systemic Testing 3-8 Selecting Measurement Scales 3-9 Data Logging		1-5 Boundary Searching 3-7 Systemic Testing 4-1 Brainstorming 4-4 Morphological Charts 6-2 Selecting Criteria 6-3 Ranking and Weighting 6-4 Specification Writing	4-1 Brainstorming 4-2 Synectics 5-4 System Transformation 5-5 Boundary Shifting	1-1 Systematic Search 1-2 Value Analysis 1-3 Systems Engineering 1-4 Man-machine System Designing 1-5 Boundary Searching 1-6 Page's Strategy 1-7 CASA
4 Boundaries Located, Sub-solutions Described and Conflicts Identified		4-2 Synectics 4-3 Removing Mental Blocks 5-3 AIDA 5-4 System Transformation 5-5 Boundary Shifting 5-6 Functional Innovation 5-7 Alexander's Method		4-1 Brainstorming 4-2 Synectics 4-3 Removing Mental Blocks 5-3 AIDA	5-3 AIDA
5 Sub-solutions Combined into Alternative Designs					1-2 Value Analysis 3-6 Questionnaires 3-6 Investigating User Behaviour 3-7 Systemic Testing 3-8 Selecting Measurement Scales 3-9 Data Logging and Reduction 6-1 Check lists 6-2 Selecting Criteria 6-3 Ranking and Weighting 6-4 Specification Writing 6-5 Quirk's Reliability Index
6 Alternative Designs Evaluated and Final Design Selected					

Figura 4.13 – Carta de Selecção de ferramentas de Projecto, retirado de [Jones, 1970].

4.2.2 Modelo de Arthur D. Hall

Arthur Hall, no seu livro “A Methodology for Systems Engineering”, de 1962”, [citado por Birmingham *et al.*, 1997] foi o primeiro a sugerir uma representação bidimensional para o processo de projecto, em que as dimensões eram representadas na forma de tabela, tal como se encontra reproduzida na Figura 4.14, sendo as linhas e colunas definidas como se segue:

Verticalmente – Indicação das fases no ciclo de vida do produto.

Horizontalmente – Indicação do processo para resolução do problema, que teria lugar em cada uma das dimensões verticais.

Phases of the coarse structure (time) \ Steps of the fine structure (logic)	1. Problem definition	2. Value system design (and develop objectives and criteria)	3. Systems synthesis (collect and invent alternatives)	4. Systems analysis (deduce consequences of alternatives)	5. Optimisation of alternatives (iteration of steps 1-4)	6. Decision making (application of value system)	7. Planning for action (to implement next phase)
1. Problem planning							
2. Project planning (and preliminary design)							
3. System development (implement project plan)							
4. Production (or construction)							
5. Distribution (and phase in)							
6. Operations (or consumption)							
7. Retirement (and phase out)							

Figura 4.14 – Representação bidimensional do processo de projecto de sistemas de engenharia, retirado de [Birmingham *et al.*, 1997].

Nesta representação em duas dimensões, ordenadas cronologicamente, a dimensão vertical corresponde aos estágios originados no ciclo de vida do produto, enquanto a dimensão horizontal relaciona as actividades de resolução do problema que têm lugar em cada estágio da estrutura vertical.

4.2.3 Modelo de Morris Asimow

Na representação do processo de projecto, Asimow [Asimow, 1962] (que, segundo Birmingham *et al.*, 1997, era um respeitável académico e professor na Universidade da Califórnia – Los Angeles), o processo de projecto é formado por duas partes. Uma parte primária, composta por três fases orientadas para a solução do problema de projecto, enquanto a outra parte, que lida (*deals*) com a solução de problemas subordinados, desde a produção ao consumo, é representada como a sequência cronológica de operações desenvolvidas em cada passo dos procedimentos do processo.

Na Figura 4.15, está reproduzida a representação esquemática apresentada por Asimow para o projecto completo, incluindo na fase primária (*primary design phases*) as três fases do processo de projecto que são designadas por:

- Estudo de Viabilidade (*feasibility study*);
- Anteprojecto (*preliminary design*);
- Projecto de Pormenor (*detailed design*).

E na fase relacionada com o ciclo de produção e consumo (*phases related to production-consumption cycle*) inclui as quatro fases do processo de projecto que são designadas por:

- Planeamento para produção (*planning for production*);
- Planeamento para distribuição (*planning for distribution*);
- Planeamento para consumo (*planning for consumption*);
- Planeamento para fim de vida útil (*planning for retirement*).

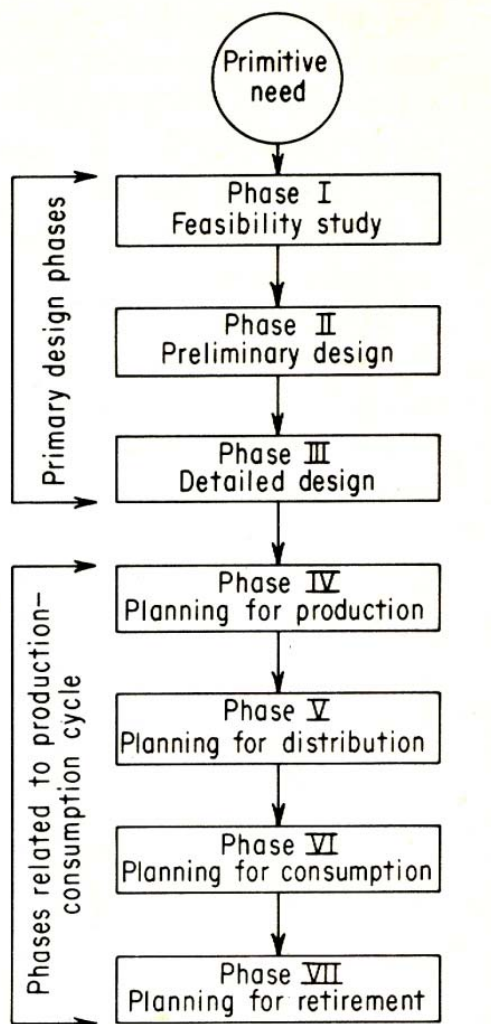


Figura 4.15 – Representação do Processo de Projecto de Engenharia, retirado de [Asimow, 1962].

Na fase de Estudo de Viabilidade, é estabelecida a necessidade subjacente ao projecto, sendo depois explorado o problema do projecto e identificados os parâmetros de projecto, os constrangimentos e os principais critérios a utilizar. São geradas as soluções plausíveis e analisada a viabilidade da sua realização física, económica e financeira.

Na fase de Anteprojecto, é seleccionada a melhor das soluções entre as várias soluções viáveis. São então preparados modelos matemáticos para cada uma das soluções; são realizadas análises de sensibilidade para estabelecer o grau de variação (*fineness of the range*) no qual os parâmetros de projecto devem ser controlados; são realizadas análises de compatibilidade para investigar as tolerâncias dos componentes principais e são realizadas análises de estabilidade para examinar a extensão na qual as perturbações da envolventes externa (*environmental*) ou forças internas afectam o projecto.

O conceito escolhido passa de seguida por um processo de optimização, um processo de avaliação, um processo de antevisão (*prediction process – Projection into future*) assim como um processo de projecto experimental (prototipagem). O terceiro, quarto e quinto passos desta fase são muito semelhantes ao que actualmente designamos por métodos de Taguchi (*Taguchi's system*), projecto paramétrico e tolerâncias de projecto (*parameter and tolerance design*). [Evbomwan *et al.*, 1996].

Na fase de Projecto de Pormenor, são preparados os orçamentos e os mapas cronológicos (cronogramas) do desenvolvimento do projecto, sendo os subsistemas, componentes e peças do produto completamente projectados, incluindo os desenhos de conjunto gerais que levarão à construção de protótipos para realização de testes. Em seguida, são analisados os resultados dos testes e do protótipo, para posterior revisão e correcção dos aspectos necessários, sendo então elaborado o projecto final (“*as built*” – telas finais).

Asimow designou os fluxogramas que representam a sequência de todas as actividades inerentes ao processo de projecto, e se encontram reproduzidos na Figura 4.16, como morfologia de projecto.

Alguns modelos do processo de projecto actuais são baseados na morfologia de projecto de Asimow, como é o caso do modelo de Dieter e Schmidt [Dieter *et al.*, 2009].

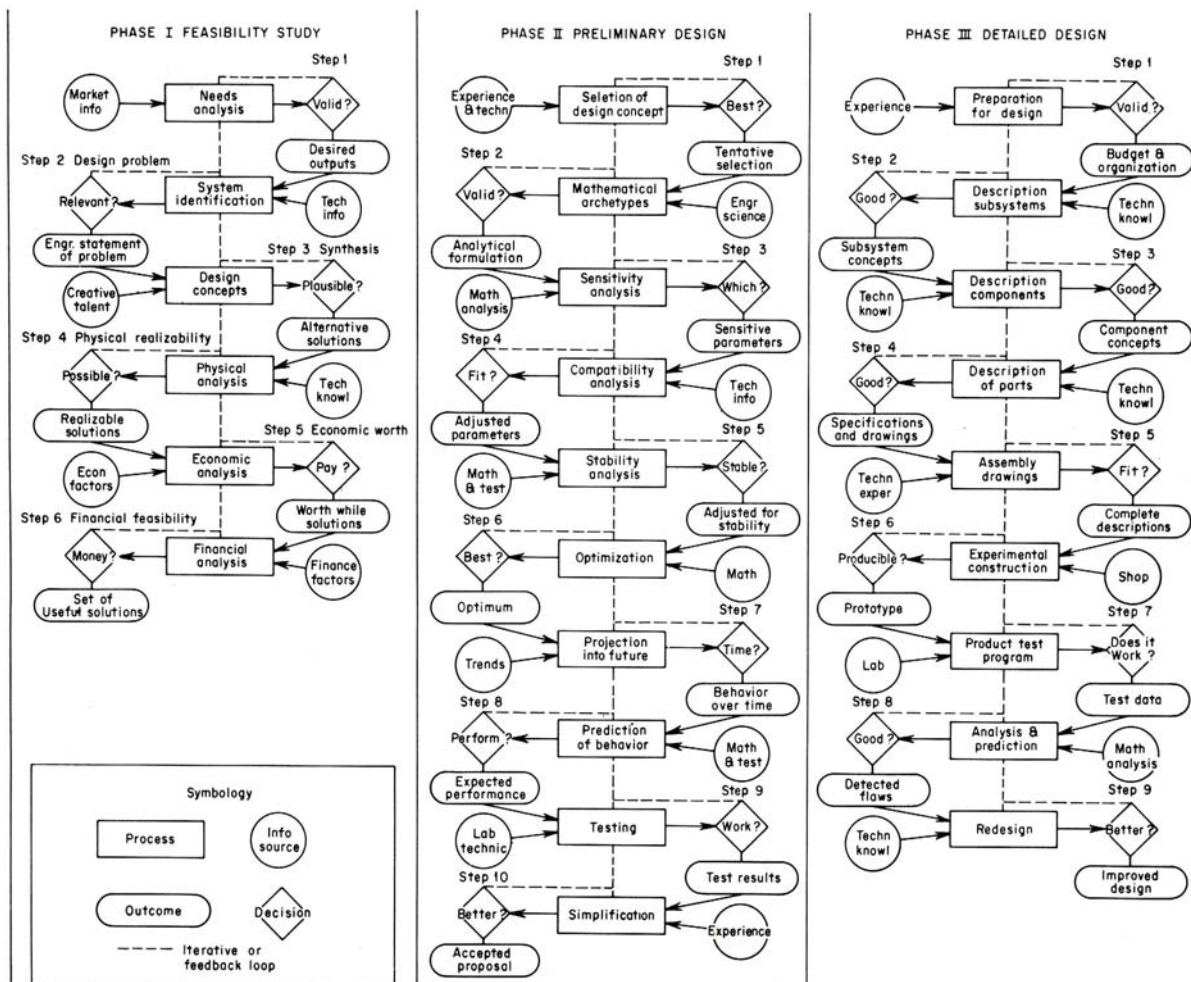


Figura 4.16 – Morfologia do Projecto, retirado de [Asimow, 1962].

4.2.4 Modelo de G. Pahl e W. Beitz

Tendo em vista a integração lógica e compreensível dos vários aspectos distintos, presentes na actividade de projecto, G. Pahl e W. Beitz [Pahl *et al.*, 2007] propõem a decomposição sistemática do processo de projectar em quatro fases, sendo que, por sua vez, cada uma delas é decomposta em passos sucessivos, que compreendem as várias actividades desenvolvidas em cada fase.

As quatro fases em que é decomposto o processo de projecto podem ser traduzidas como:

- Planeamento do Produto e Clarificação da Tarefa (*Product Planning and Clarifying the Task*), que consiste na recolha de informação para definição do enunciado do problema, ou seja, o estabelecimento das especificações, requisitos e constrangimentos, numa forma neutra relativamente à solução;
- Projecto Conceptual – Concepção (*Conceptual Design*), que consiste no estabelecimento da estrutura funcional e na definição dos princípios para as soluções que conseguem realizar as funcionalidades pretendidas;
- Projecto de Configuração (*Embodiment Design*), que consiste na definição dos objectos físicos que materializam as soluções adoptadas. A partir dos conceitos são definidas as formas e arquitecturas (*layouts* – configurações), e são desenvolvidos os produtos ou os sistemas de acordo com considerações técnicas e económicas;
- Projecto de Pormenor (*Detail Design*), que consiste no dimensionamento dos objectos, definindo as geometrias e os materiais, que permitem a construção dos objectos, de modo a terem capacidade para realizar as funções que lhes são solicitadas. Nesta fase, ficam definidas todas as características das peças, dos componentes e dos materiais, é verificada a viabilidade técnica e económica e são produzidos todos os desenhos e restantes documentos para produção.

As fases acima descritas envolvem a realização de actividades, que conduzem à obtenção de resultados, na sequência representada na Figura 4.17.

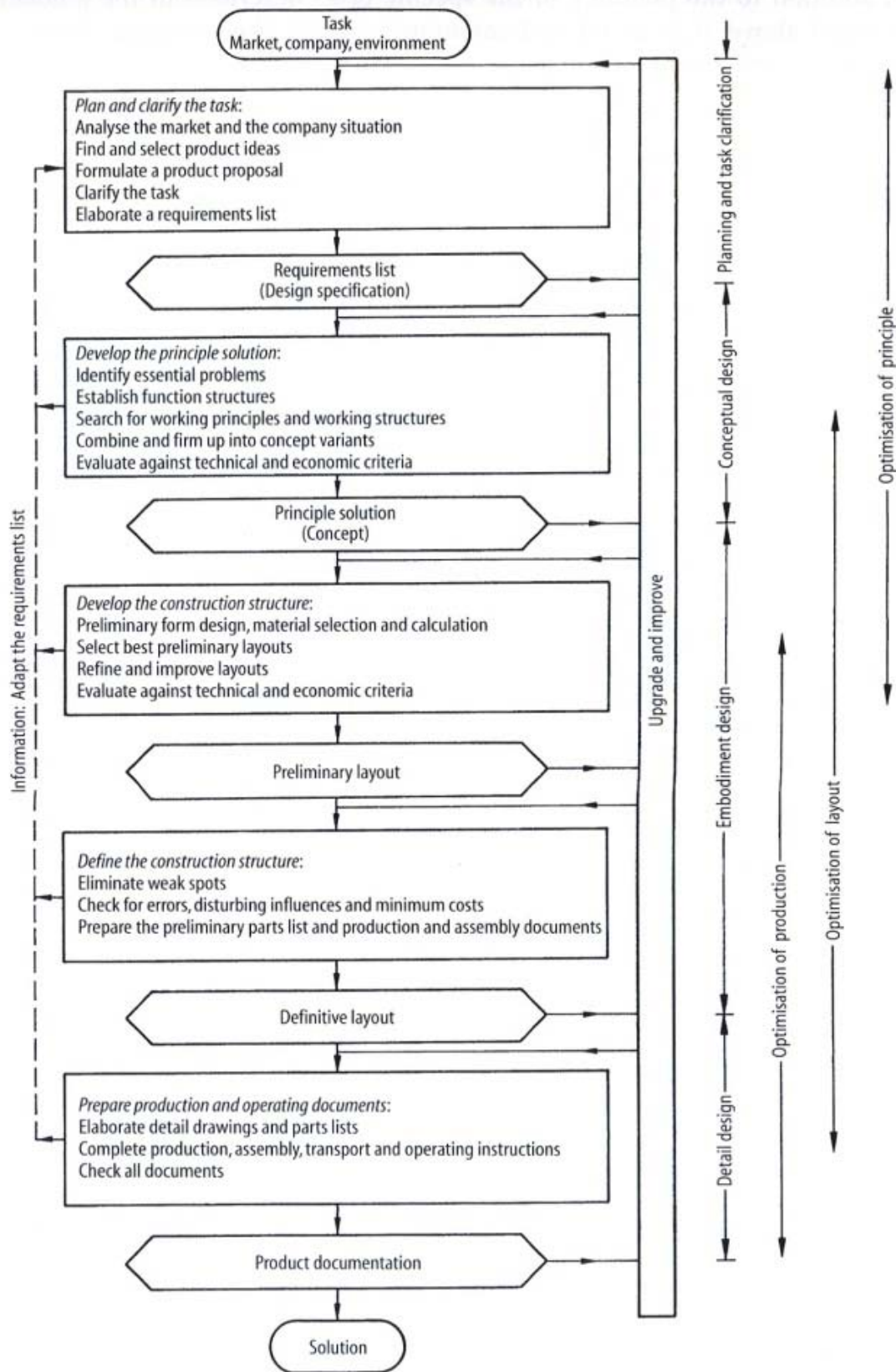


Figura 4.17 – Passos do planeamento do Processo de Projecto, retirado de [Pahl et al., 2007].

Tal como na maioria dos métodos de origem alemã, é colocada uma grande ênfase no estabelecimento de uma “Estrutura Funcional” e na combinação sistemática de subfunções. Para esse efeito, a função global (overall function) do sistema deve ser estabelecida e a fronteira do sistema, assim como os inputs e os outputs, devem ser identificados de forma muito clara. Na Figura 4.18 está reproduzido o esquema proposto por [Pahl *et al.*, 2007] para ilustrar a estrutura de um Sistema com fronteira S , Subsistemas de S S_1 - S_5 , Subsistemas de S_2 , ou elementos de S_2 ; Entradas (*Inputs*) I_1 - I_3 e Saídas (*Outputs*) O_1 e O_2 .

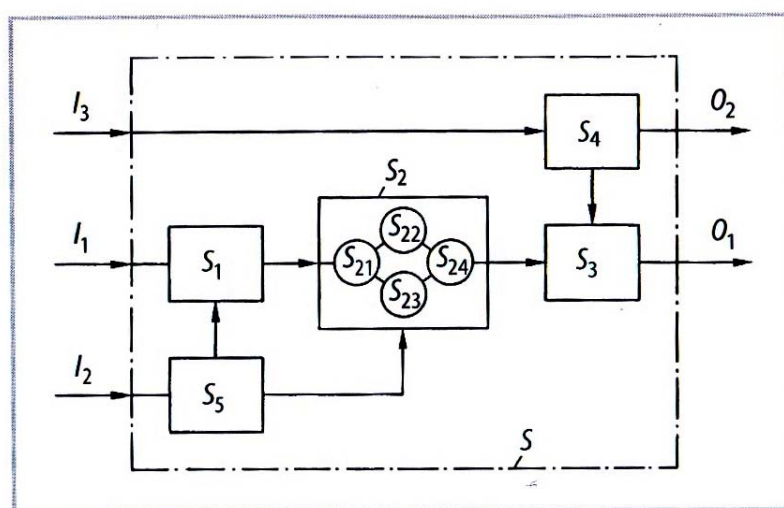


Figura 4.18 – Estrutura de um sistema, sendo: S – fronteira do sistema; S_1 - S_5 - subsistemas de S ; S_{21} - S_{24} – subsistemas ou elementos de S_2 ; I_1 - I_3 – entradas (*Inputs*); O_1 - O_2 - saídas (*Outputs*), retirado de [Pahl *et al.*, 2007].

Os fluxos e conversões que têm lugar no interior da fronteira de um sistema envolvem energia, materiais e informação (sinais).

A descrição do processo de projectar apresentada por Pahl e Beitz está muito vocacionada para as áreas onde desenvolveram as suas experiências pessoais, que são as áreas da maquinaria pesada e do ensino de projecto ao nível superior, no entanto, a apresentação das várias ferramentas de projectos numa sequência coerente e exequível em termos práticos, constitui uma base teórica que estrutura o processo de projectar, numa sequência cronológica, em que as actividades são desenvolvidas, fornecendo informação e *check lists* para apoio aos projectistas.

A metodologia de projecto desenvolvida por Pahl e Beitz, baseada em métodos fundamentais e de aplicação generalizada na resolução de problemas e na avaliação de soluções, descreve o processo de projectar passo a passo e na sequência (cronológica) em que os mesmos são aplicados ao longo de todo o processo de projectar.

Como complemento, adverte para a necessidade da utilização de diversas capacidades dos projectistas, como sejam:

Abstracção para identificação do essencial do problema e estabelecer a estrutura funcional, atribuir características e aplicar princípios e regras de projecto de configuração.

Pensamento Lógico e Sistemático para elaboração das estruturas funcionais, para classificação das características, para analisar sistemas e processos, para combinar elementos, para identificar falhas e para avaliar soluções.

Criatividade e Imaginação, combinadas com métodos intuitivos, para variar as estruturas funcionais, combinar elementos e aplicar as regras básicas, princípios e linhas de orientação (*guidelines*).

Conhecimento Profissional para identificar os elos mais fracos, avaliar e seleccionar soluções, verificar o trabalho desenvolvido, utilizando métodos de “*checklists*” e “*fault tracing*”.

No seu livro [Pahl *et al.*, 2007], para além da apresentação do processo de projecto são também indicadas e explicadas as várias ferramentas de projecto (*methods*) que poderão ser utilizadas na realização das actividades de projecto.

4.2.5 Modelo de Verein Deutscher Ingenieure – VDI 2221

A associação profissional de engenheiros da Alemanha, *Verein Deutscher Ingenieure* (VDI) tem produzido numerosos “Guias de Orientação” (*VDI-Guidelines*) na área de projecto [VDI, 1987], entre elas se encontra a “VDI 2221 – Abordagem Sistemática ao Projecto de Sistemas Técnicos e Produtos” [Cross, 2008].

Esta “Guia de Orientação/Directiva”, sugere uma aproximação sistemática, na qual o processo de projecto, como parte da criação do produto, é subdividido em estágios de trabalho gerais (*general working stages*), de forma racional, transparente e independente de ramos (*branch*) de indústria específicos.

A estrutura desta aproximação genérica (*general approach*) ao processo de projecto é constituída pelas sete fases (*stages*) a seguir nomeadas:

- a) Clarificação e Definição das tarefas de projecto;
- b) Determinação das funcionalidades requeridas;
- c) Busca de Princípios para Soluções para todas as subfunções e respectiva combinação em soluções Principais;
- d) Divisão da solução em módulos realizáveis (*realizable modules*);
- e) Desenvolvimento dos módulos-chave num conjunto de *layouts* preliminares;
- f) Desenvolvimento de *layouts* finais;
- g) Preparação das instruções para produção e operação.

Cada uma destas fases origina um resultado intermédio (particular), respectivamente:

- a) Especificação;
- b) Estrutura Funcional;
- c) Solução Principal;
- d) Estrutura Modular (Arquitectura);
- e) Anteprojecto;
- f) Projecto final;
- g) Documentação para Produção.

A estrutura desta aproximação genérica ao processo de projecto encontra-se representada na Figura 4.19 – Esquema genérico do Processo de Projecto, segundo VDI 2221, retirado de [Rozenburg *et al.*, 1995].:

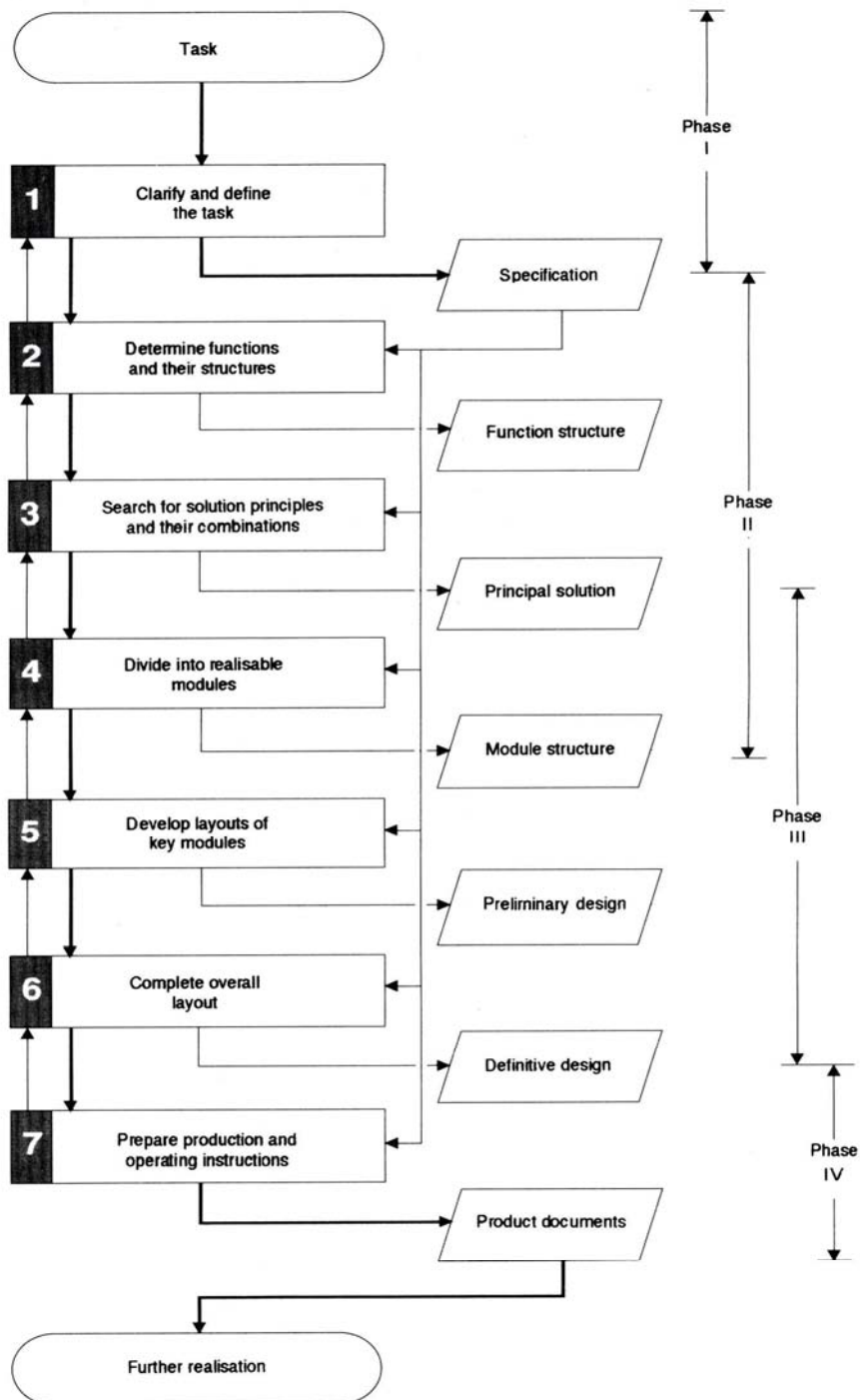


Figura 4.19 – Esquema genérico do Processo de Projecto, segundo VDI 2221, retirado de [Rozenburg *et al.*, 1995].

Nesta “*guideline*”, é enfatizada a existência de muito mais pormenor em cada uma das fases, comparativamente à representação no diagrama, assim como é enfatizada a recomendação para serem analisadas e avaliadas, em cada fase, várias soluções alternativas (*variants*), repetindo-se o “pensamento divergente-convergente” em cada uma das fases, conforme se representa na Figura 4.20.

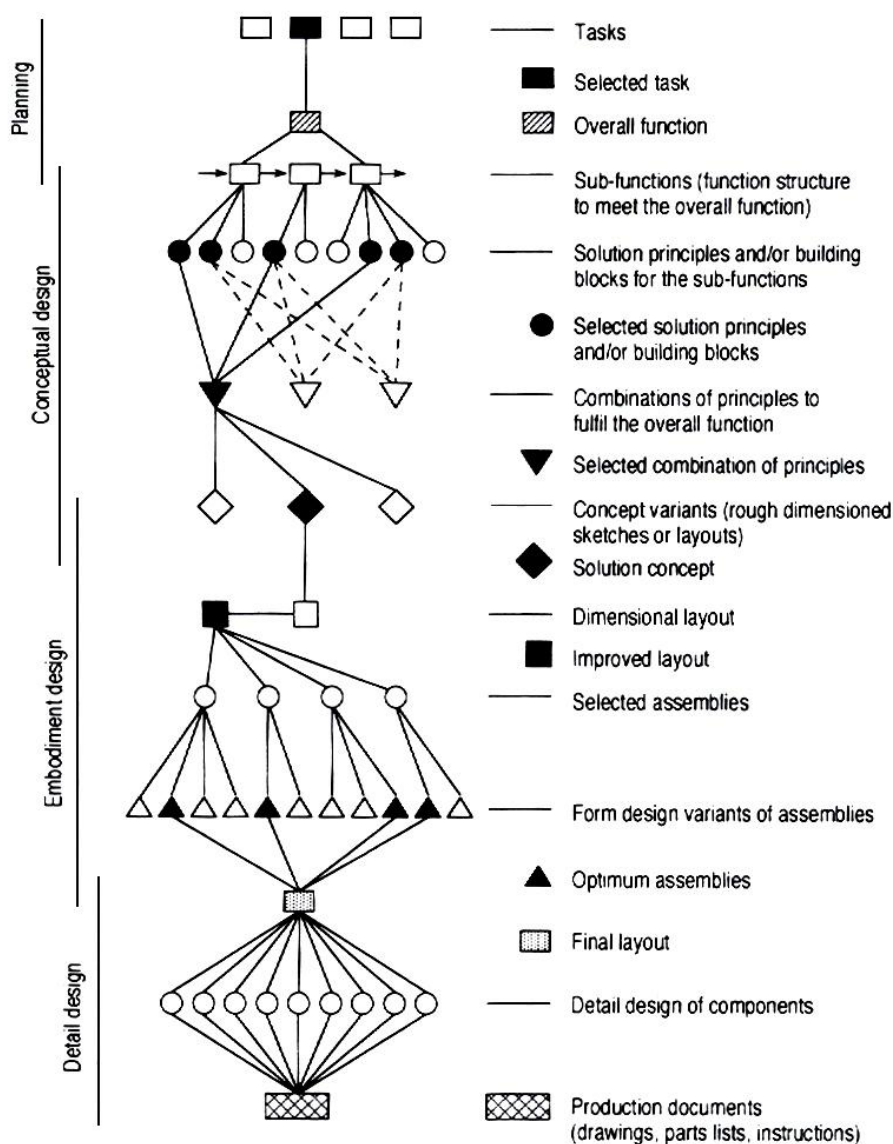


Figura 4.20 – Esquema da sequência de pensamento Divergente e Convergente no processo de projecto, segundo VDI 2221, retirado de [Rozenburg *et al.*, 1995].

A “*guideline*” adverte para o facto de as fases não terem de seguir rigidamente a sequência uma após outra. Muitas vezes, são desenvolvidas de forma iterativa, voltando às fases

precedentes, no sentido de executar uma optimização “passo-a-passo” (*achieving a step-by-step optimization*).

Esta “*guideline*” segue uma aproximação genérica e sistemática (*general systematic procedure*) desde a análise e compreensão do problema decompondo-o em subproblemas, obtendo as soluções para os subproblemas, que depois são combinadas para obter a solução global, para o problema inicial, conforme se representa na Figura 4.21:

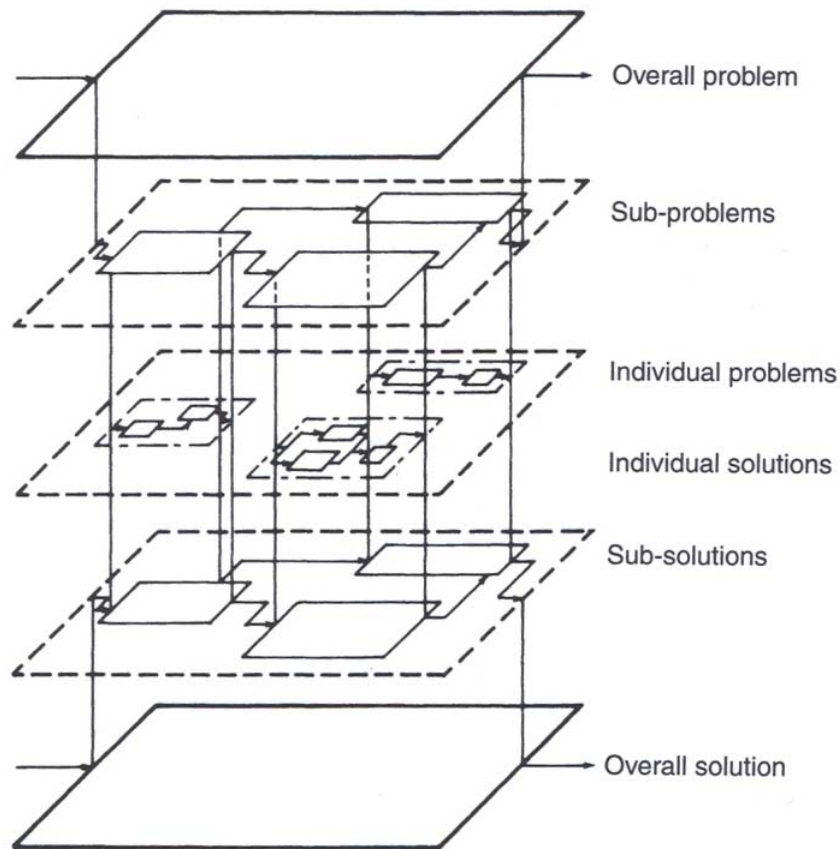


Figura 4.21 – Esquema de desenvolvimento do problema para a solução, segundo VDI 2221, retirado de [Cross, 2008].

4.2.6 Modelo de British Standards Institution – BS 7000

O modelo definido pela *British Standards Institution*, através da BS 7000 – *Management of Design*, começa (*commences*) a partir de com um estudo de exequibilidade (*feasibility*) e prossegue, através de fases de projecto conceptual (*conceptual design*), projecto de

configuração e dimensionamento (*embodiment design*), projecto de pormenor (*detail design*) e projecto para fabrico (*design for manufacture*), terminando com os resultados que servirão de base ao desenvolvimento das operações de produção, comercialização, utilização e terminação da vida útil.

Os resultados de cada estágio/fase são apresentados na forma de especificações de projecto (*design brief*), desenhos de conceitos (*concept drawings*), desenhos de anteprojecto (*layout drawing*), desenhos de pormenor (*detail product definition*) e instruções para fabrico (*manufacturing instructions*).

Este modelo está representado esquematicamente na Figura 4.22 e enquadra-se no processo de desenvolvimento de produto, constituindo uma parte da fase designada por criação (*creation*).

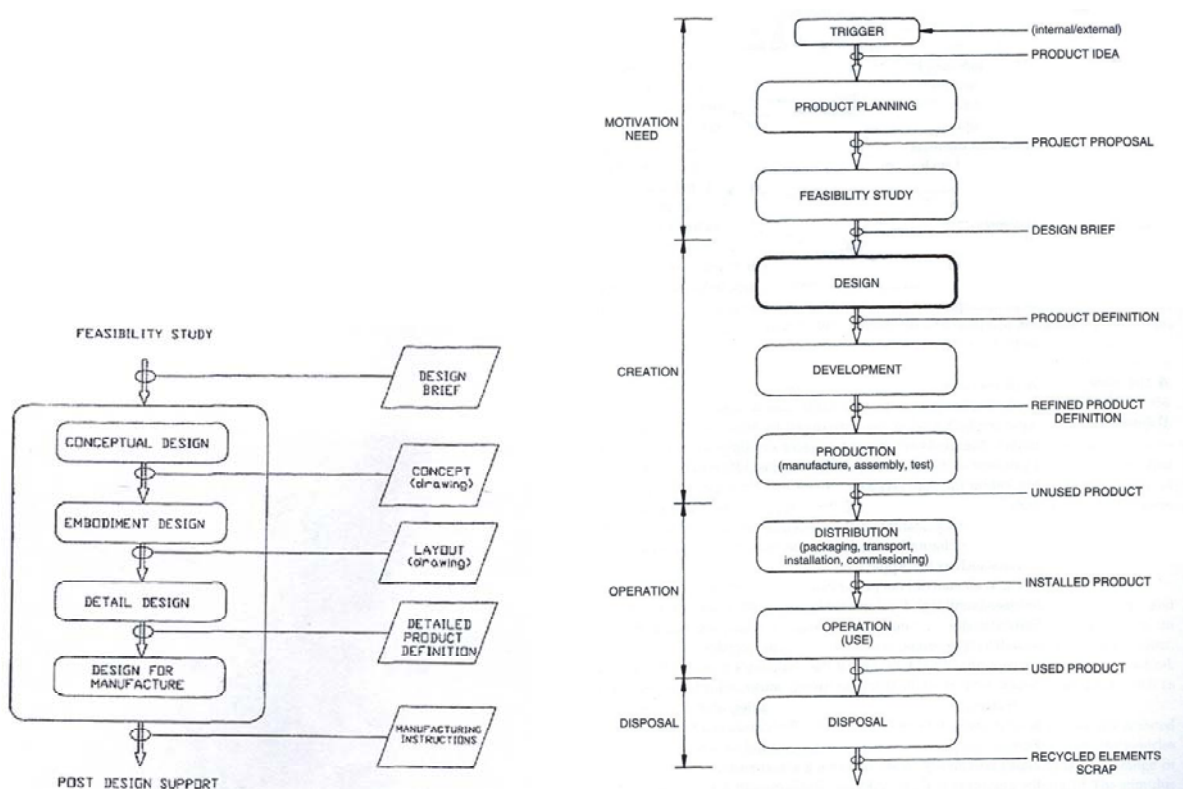


Figura 4.22 – O modelo do processo de projecto (à esquerda) e o modelo de desenvolvimento de produto (à direita), segundo BS 7000, retirados de [Evbuomwan *et al.*, 1996] e [Cross, 2008], respectivamente.

4.2.8 Modelo de D. L. Marples

Estes estudos foram usados para ilustrar o processo de projecto como uma sequência de decisões, liderando (*leading*) desde o enunciado original (*original statement*) dos requisitos até à especificação dos pormenores do produto físico (*hardware*) que vai ser manufacturado.

Neste Modelo, o ponto de partida consiste no enunciado do problema principal a ser resolvido, o qual é representado pelo nó de partida (*starting node*) na “Árvore de Marples”.

A partir deste nó, são derivados vários subproblemas que terão de ser resolvidos para chegar à solução do problema principal, o que envolve um processo cíclico de análise do problema, de teorização das soluções, de delineamento das soluções e de modificação das mesmas.

A Figura 4.24 mostra a representação geral de uma sequência típica de um processo de projecto. Nesta figura, a solução final é constituída pelo conjunto das soluções a(21211), a(22211), a(22221) e a(232).

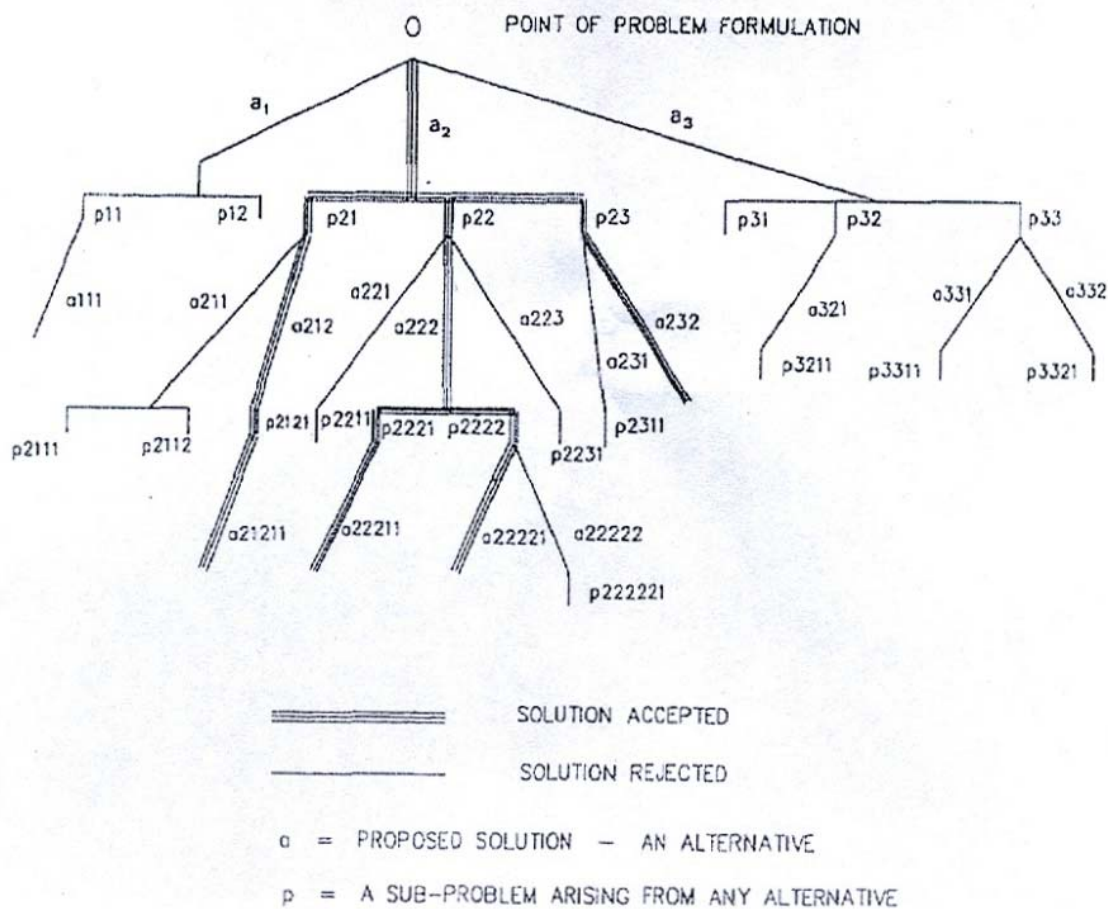


Figura 4.24 – O modelo do processo de projecto proposto por Marples, a “Árvore de Marples”, retirado de [Evbomwan *et al.*, 1996].

Se, por exemplo, a solução a(2) for preferida relativamente às Soluções a(1) e a(3), todos os subproblemas p(21), p(22) e p(23) terão que ser resolvidos.

Neste esquema uma linha vertical representa um problema e uma linha oblíqua representa uma solução. W. E. Eder, em “*Definitions and Methodologies*”, de 1966, citado por [Evbomwan *et al.*, 1996] viria a propor, como complemento, que fossem incluídas todas as soluções precedentes, analogamente ao que acontece na “Casa da Qualidade” relativamente aos modelos concorrentes, devendo tais soluções aparecer na “Árvore de Projecto”.

Este modelo de Marples envolve três fases principais: a Síntese, a Avaliação e a Decisão.

Na fase de síntese, estão envolvidas duas actividades que são: a busca (*search*) de possíveis soluções e a examinação das soluções propostas. Esta fase é seguida da avaliação da

viabilidade das soluções, segundo critérios pré-estabelecidos, antes de ser tomada uma decisão final relativamente à escolha da solução específica.

Este modelo apresenta a vantagem de enumerar as várias soluções propostas, representando as várias soluções alternativas possíveis. Este aspecto fica omissos em praticamente todos os modelos do processo de projecto que, não obstante considerarem a geração de soluções alternativas, não apresentam representações explícitas destas soluções alternativas.

A Árvore de Marples pode ser definida como um método de representação gráfica que regista a sequência das decisões tomadas ao longo do processo de projectos, na forma de uma série de problemas e soluções, que resultam de um objectivo de projecto (*radiate from a design objective*).

A Árvore de Marples pode ser utilizada indutivamente (*inductively*), para registar o passado da racionalidade do projecto (*record past design rationale*), ou especulativamente, para explorar modos de acção alternativos (*alternative courses of action*).

A Árvore de Marples pode, também, ser utilizada para visualizar a complexidade do projecto (a profundidade da árvore) e a complexidade do processo de projecto (a largura da árvore) [Kermod, 2000].

4.2.9 Modelo de L. B. Archer

Archer, em “*Systematic Method for designers*”, de 1984”, citado por [Cross, 2008], define a natureza da metodologia do processo de projecto no seu modelo de seis estágios, que são:

- 1) Programação (*programming*), que corresponde ao estabelecimento dos aspectos cruciais e à proposta para desenvolvimento de acções (*crucial issues and proposal of course of action*);
- 2) Recolha de Dados (*data collection*) que corresponde à recolha, classificação e armazenamento de informação e dados;

- 3) Análise (*analysis*) que corresponde à identificação de subproblemas, preparação das especificações de projecto, reapreciação (*reappraisal*) do planeamento proposto e estimativas efectuadas;
- 4) Síntese (*synthesis*) que corresponde à preparação da configuração geral das propostas de projecto;
- 5) Desenvolvimento (*development*) que corresponde ao desenvolvimento do projecto do protótipo, à preparação e execução da validação dos estudos;
- 6) Comunicação (*communication*) que corresponde à elaboração (*preparation*) dos documentos para manufactura.

Os seis estágios acima indicados foram posteriormente classificados e agrupados em três fases, denominadas (*namely*) como Analítica, Criativa e Executiva.

Ao descrever este modelo, Archer faz o seguinte comentário: “...*the special features of the process of designing is that the analytical phase with which it begins requires objective observation and inductive reasoning, while the creative phase at the heart of it requires involvement, subjective judgement, and deductive reasoning. Once the crucial decisions are made, the design process continues with the execution of working drawings, schedules, etc., again in an objective and descriptive mood. The design process is thus a creative sandwich. The bread of objective and systematic analysis may be thick or thin, but the creativity act is always there in the middle.*”

A Figura 4.25, mostra os estágios e as fases do processo de projecto, assim como as suas inter-relações.

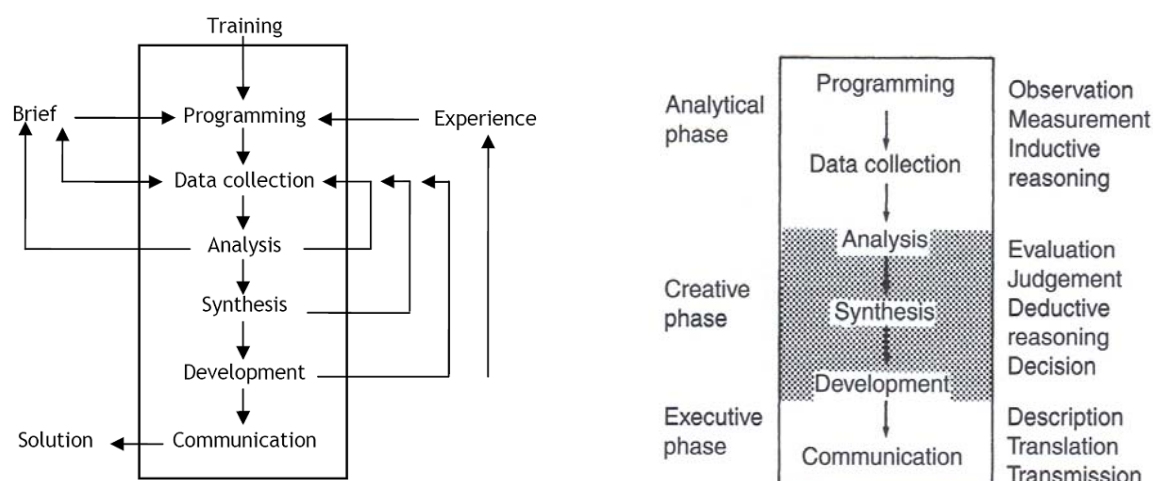


Figura 4.25 – O modelo do processo de projeto proposto por Archer, retirado de [Evbuomwan *et al.*, 1996].

4.2.10 Modelo de Krick

O modelo proposto por E. V. Krick em “*Engineering and Engineering Design*”, de 1969, citado por [Evbuomwan *et al.*, 1996], descreve o processo de projeto em cinco fases (*stages* – estágios) designadas por:

- a) Formulação do Problema;
- b) Análise do Problema;
- c) Busca de Princípios para Soluções;
- d) Tomada de Decisões;
- e) Especificações.

O primeiro passo de formulação do problema envolve a definição clara do problema a ser resolvido. O passo seguinte envolve a análise do problema de projeto e a forma de alcançar (*search*) uma definição pormenorizada das especificações, constrangimentos e critérios a utilizar para a tomada de decisão. No terceiro passo, a geração de soluções alternativas é realizada através de actividades de pesquisa, invenção e investigação (*inquiry, invention and research*). A fase de decisão, que corresponde ao quarto passo, envolve a avaliação, a

comparação e a filtragem (*screening*) das soluções alternativas até ser desenvolvida a melhor solução (*best solution evolves*). Finalmente, no quinto passo, que corresponde à fase de especificação, envolve a elaboração da documentação pormenorizada referente à solução escolhida, compreendendo o conjunto de desenhos, especificações, instruções para fabrico e para operação e recomendações para utilização.

4.2.11 Modelo de Nigel Cross

Na primeira edição do seu livro “*Engineering Design Methods – Strategies for Product Design*”, de 1984, Nigel Cross representava o processo de projecto num modelo composto por seis fases (*stages – estágios*) enquadradas numa abordagem simétrica relativamente ao modelo problema-solução (*symmetrical problem-solution model*), e que integra as seis actividades básicas do processo de projecto num ciclo que parte do problema global para os subproblemas, tendo em vista a obtenção das subsoluções que, combinadas, conduzem à solução global, conforme representado na Figura 4.26:

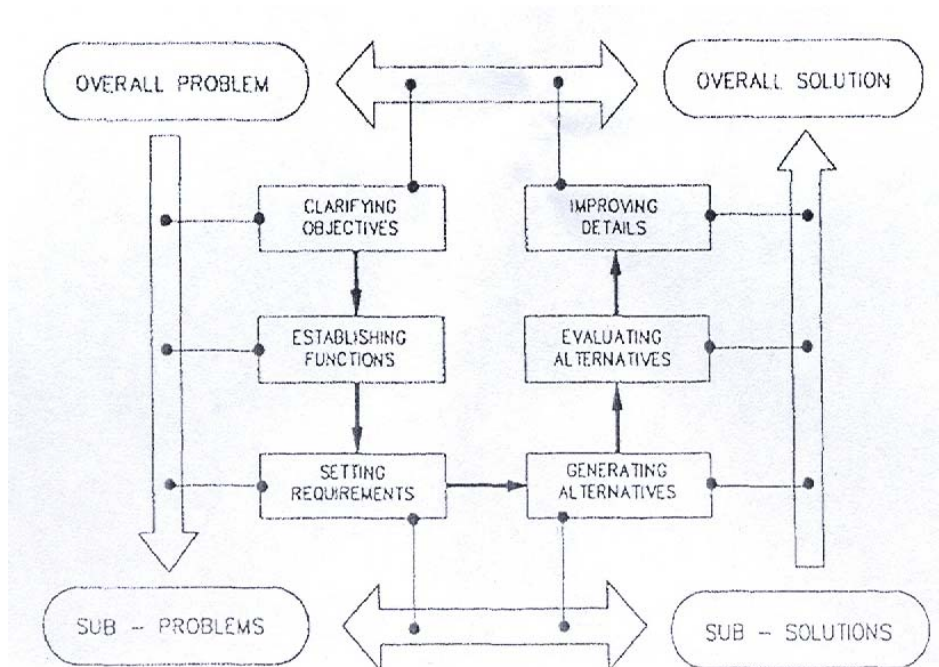


Figura 4.26 – O modelo do processo de projecto proposto por Nigel Cross, retirado de [Evbomwan *et al.*, 1996].

Actualmente, foram incorporadas mais duas fases, sendo o modelo apresentado na quarta edição do livro acima referido [Cross, 2008] composto por oito fases, representadas na Figura 4.27:

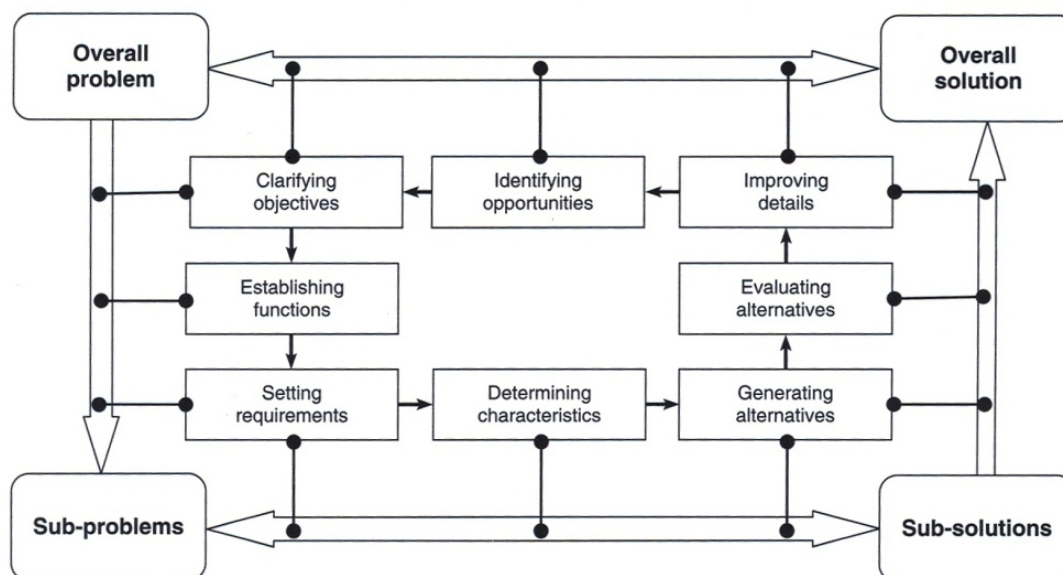


Figura 4.27 – O modelo do processo de projecto proposto por Nigel Cross, retirado de [Cross, 2008].

Tal como nos modelos antecessores, as oito actividades básicas do processo de projecto são integradas num ciclo, que parte do problema global para os subproblemas, relativamente aos quais se obtêm as respectivas subsoluções que, combinadas, conduzem à solução global.

Para cada uma destas actividades básicas, Nigel Cross recomenda a utilização do método (ou da ferramenta) de projecto que considera mais relevante para cada actividade [Cross, 2008].

- 1) **Identificação das Oportunidades** (*identifying opportunities*), procura (*aim*) identificar e definir uma oportunidade para um novo produto ou para a melhoria de um produto existente, utilizando o método de cenários (*scenarios*);
- 2) **Esclarecimento de Objectivos** (*clarifying objectives*), procura esclarecer os objectivos e sub-objectivos do projecto, assim como as suas inter-relações, utilizando o método das “Árvores de Objectivos” (*Objective Trees*);

- 3) **Estabelecimento de Funções** (*establishing functions*), procura estabelecer as funções pretendidas e as fronteiras dos sistemas para o novo projecto, utilizando o método de análise funcional.
- 4) **Definição de Requisitos** (*setting requirements*), procura definir uma especificação pormenorizada do desempenho pretendido para a solução (*make an accurate specification of the performance required of a design solution*), utilizando o método da especificação de desempenho (*performance specification*).
- 5) **Determinação de Características** (*determining characteristics*), procura estabelecer os objectivos a atingir pelas características técnicas do produto (*set targets to be achieved for the engineering characteristics of a product*) que satisfaçam os requisitos do cliente, utilizando o Desdobramento da Função Qualidade (*Quality Function Deployment*).
- 6) **Geração de Alternativas** (*generating alternatives*), procura gerar a gama completa de soluções de projecto alternativas para um produto, alargando, assim, a busca de potenciais soluções novas, utilizando o método das “Cartas Morfológicas” (*Morphological Chart*).
- 7) **Avaliação de Alternativas** (*evaluating alternatives*), procura comparar os valores de utilidade de cada proposta de projecto alternativa, com base no desempenho e em função dos diferentes pesos atribuídos a cada objectivo (*basis of performance against differentially weighted objectives*), utilizando o método dos “Objectivos Ponderados” (*Weighted Objectives*).
- 8) **Melhoramento de Pormenores** (*improving details*), procura aumentar ou manter o valor do produto para o seu utilizador, reduzindo os custos de produção, utilizando o método da “Análise de Valor” (*Value Engineering*).

Este modelo do processo de projecto integra os aspectos procedimentais do projecto, representados pela sequência dos oito métodos, em que os aspectos estruturais dos problemas de projecto são representados pelas setas que mostram a relação comutativa entre problemas e soluções, bem como a relação hierárquica entre problemas/subproblemas e entre subsoluções/soluções.

Como complemento, [Cross, 2008] indica algumas estratégias que podem ser utilizadas para desenvolver os processos de projecto, utilizando a combinação de Métodos Criativos -

Pensamento Divergente e Métodos Racionais - Pensamento Convergente, que seja mais adequada ao projectista e ao processo de projecto de cada produto.

O método coloca a ênfase na busca de soluções flexíveis para os problemas de projecto, como forma de garantir o sucesso dos resultados (*outcome*), em termos de um bom projecto de produtos.

4.2.12 Modelo de Vladimir Hubka

O “Modelo Geral de Procedimentos Metodológicos Durante o Projecto” (*General Model of Methodical Procedure During Design*) apresentado por Hubka, em 1980 [Hubka, 1982], pode ser visto como uma tentativa de síntese das várias opiniões publicadas até essa data, especialmente vocacionadas para o projecto de máquinas e de sistemas mecânicos.

Como introdução ao “Modelo Procedimental Geral” (*General Procedural Model*), Hubka começa por definir “Processos Técnicos” (*Technical Process*), “Sistemas Técnicos” (*Technical Systems*) e o respectivo “Processo de Projecto” (*Design Process*) [Hubka, 1982].

Uma definição mais exaustiva de “Processos Técnicos” (*Technical Process*) e de “Sistemas Técnicos” (*Technical Systems*) foi posteriormente apresentada por Hubka e Eder, em 1984 [Hubka, 1988].

O Processo de Projecto é definido [Hubka, 1982] de uma forma genérica, designado por “*General Model of the Design Process*” e é representado como se mostra na Figura 4.28:

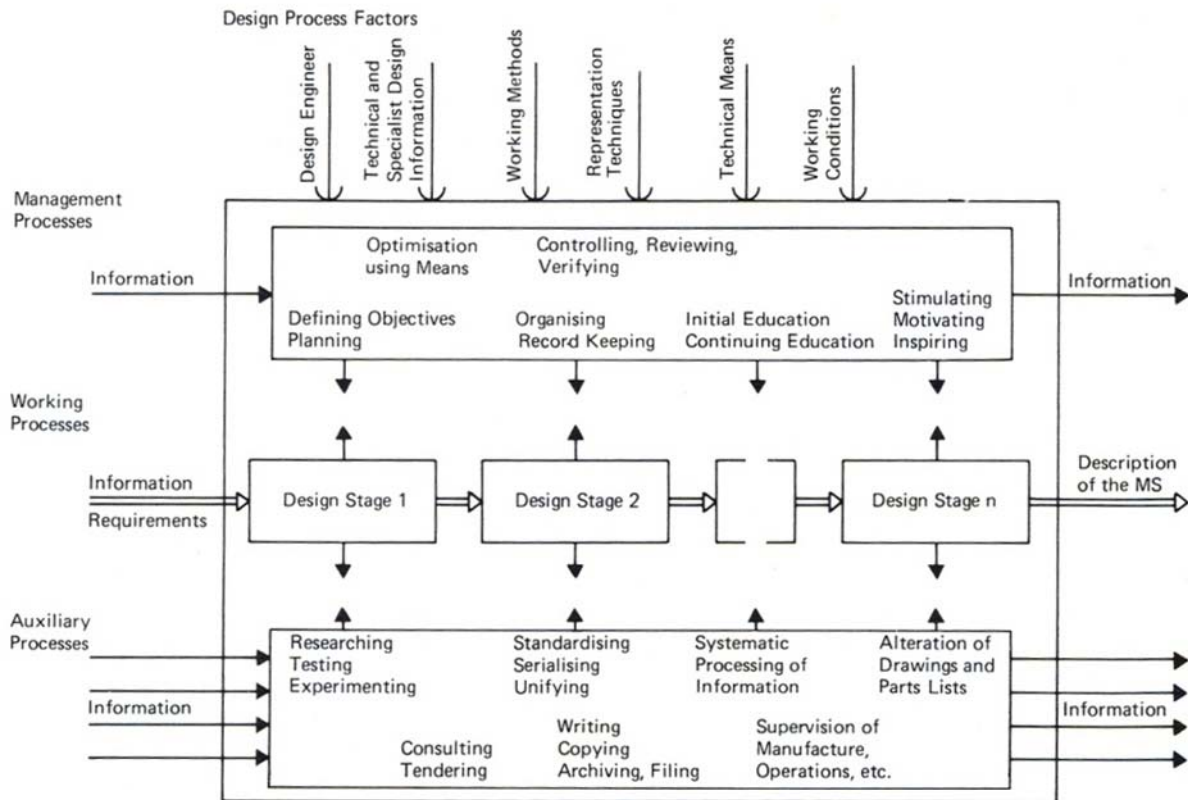


Figura 4.28 – O modelo do processo de projecto proposto por Vladimir Hubka, retirado de [Hubka, 1982].

Segundo Hubka, o processo de projecto pode ser estruturado dispondo as actividades do projectista, de uma forma hierárquica, que pode ser representada conforme mostrado na Figura 4.29:

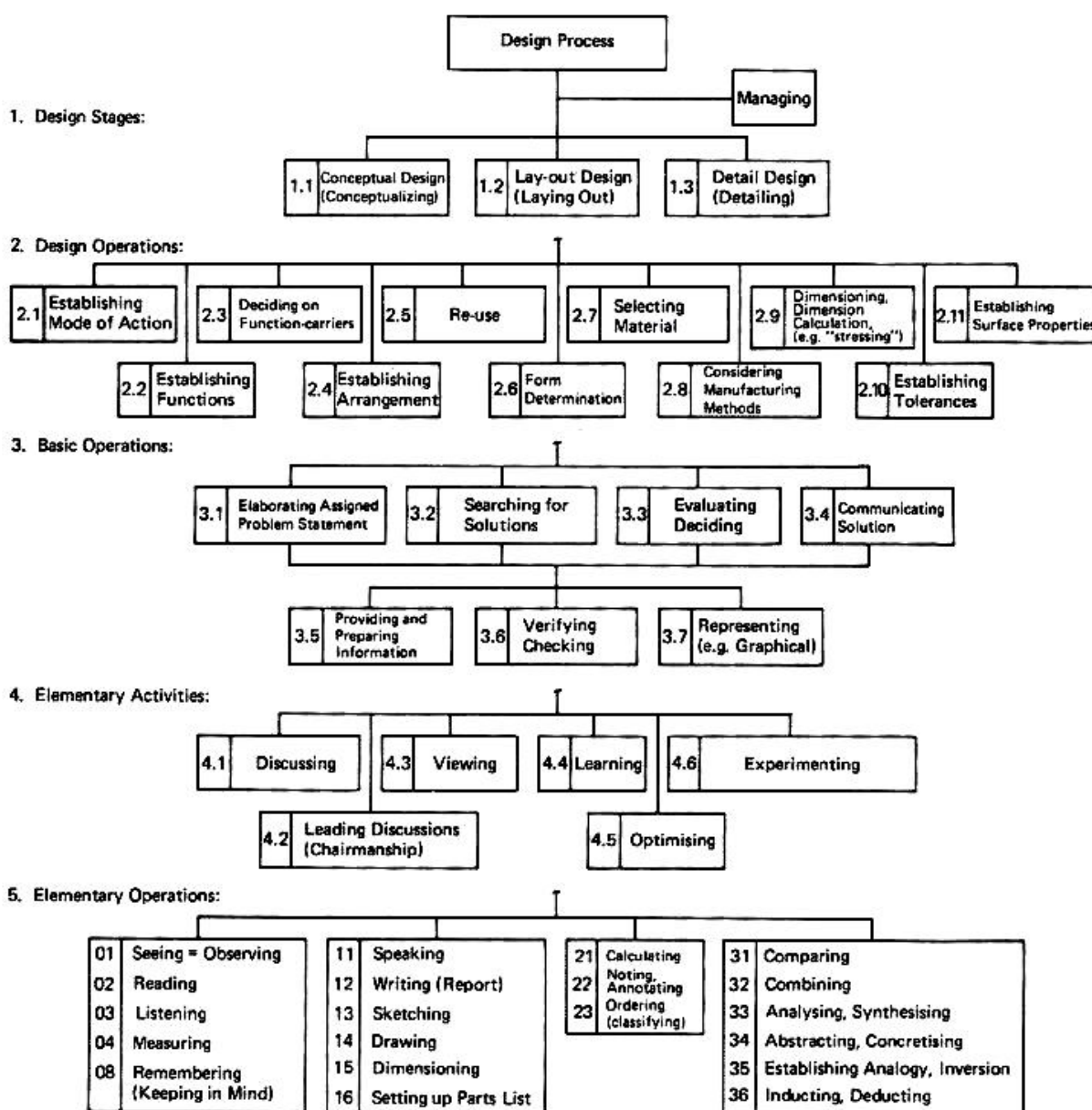


Figura 4.29 – Estrutura hierárquica das actividades do processo de projecto, segundo Vladimir Hubka, retirado de [Hubka, 1982].

A representação das fases que compõem o processo de projecto, numa sequência ao longo de um eixo vertical com o tipo de actividades desenvolvidas em cada fase, disposto radialmente a esse eixo vertical, confere ao processo de projecto uma representação helicoidal, conforme mostrado por Hubka na Figura 4.30:

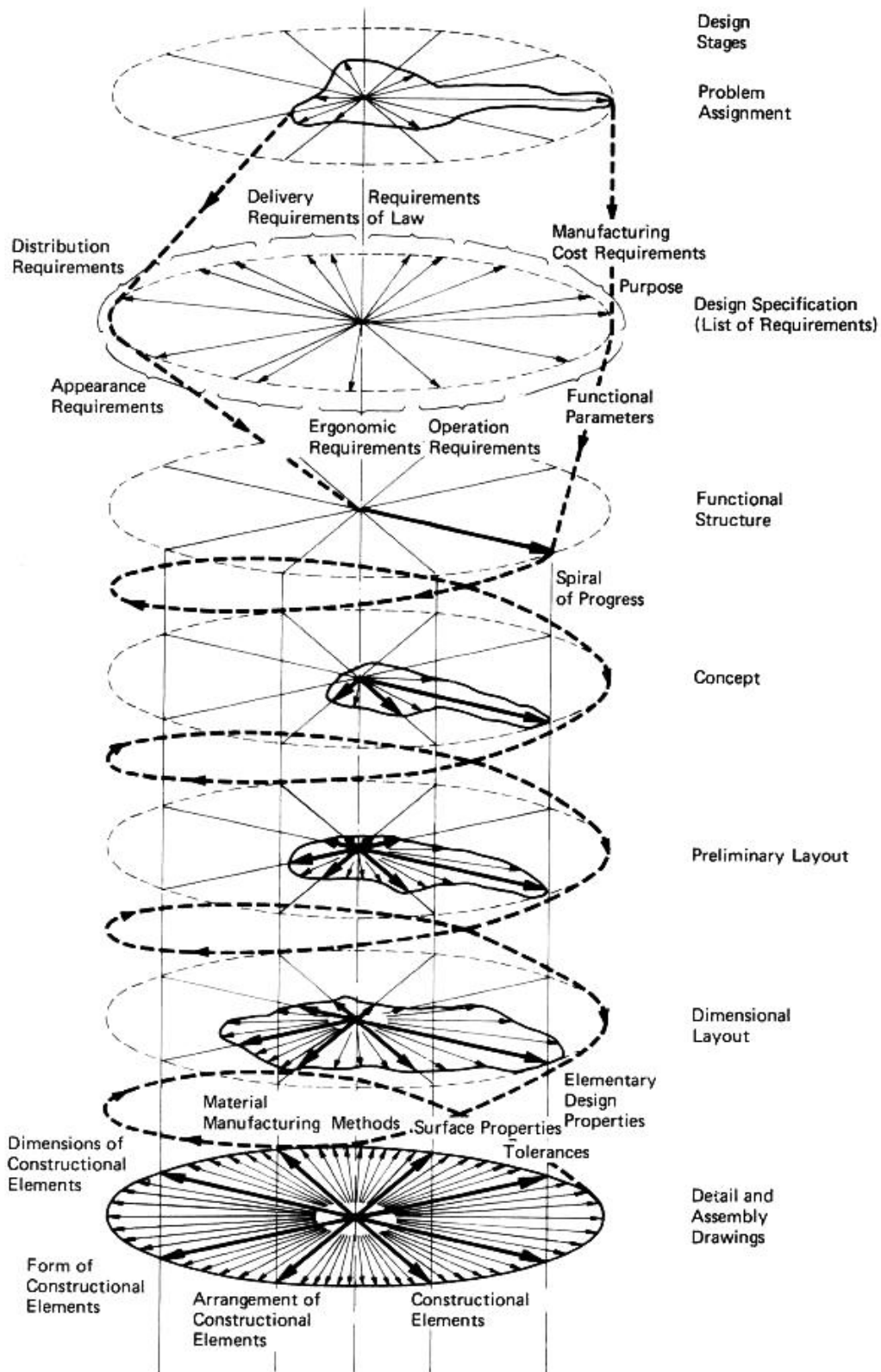


Figura 4.30 – Representação gráfica da seqüência cronológica das actividades do processo de projecto, segundo Vladimir Hubka, retirado de [Hubka, 1982].

Hubka apresenta em [Hubka, 1982] uma lista de diversas “táticas de projecto”, métodos e princípios de trabalho que serão utilizados durante o processo de projecto, cuja representação gráfica é mostrada na Figura 4.31:

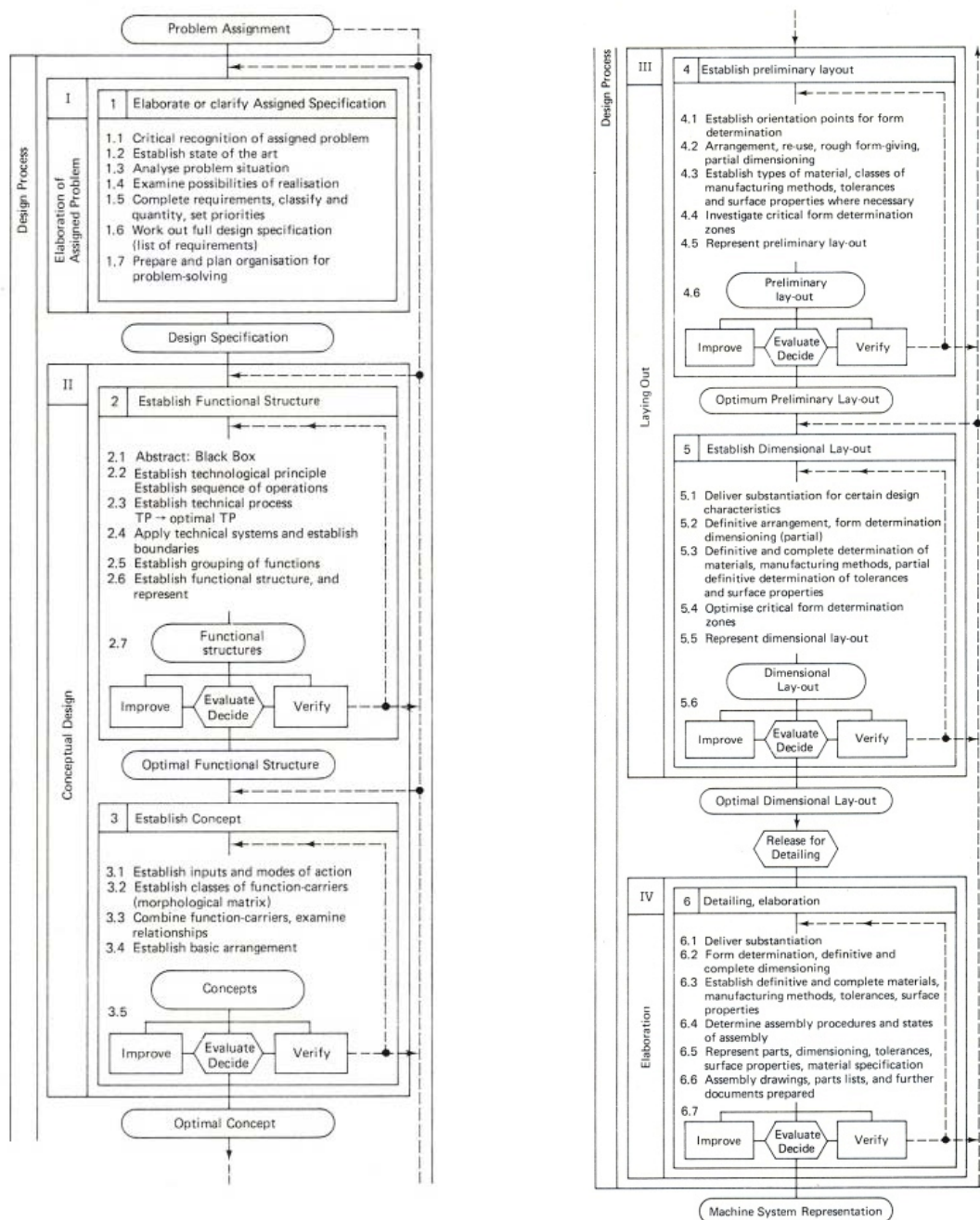


Figura 4.31 – Táticas (métodos e ferramentas) de Projecto recomendadas por Vladimir Hubka, para as fases do “Modelo Procedimental Geral do Processo de Projecto”, retirado de [Hubka, 1982].

Numa forma mais resumida, “O Processo de Projecto” pode ser representado graficamente, como mostrado na Figura 4.32, pelos Estados do Sistema Técnico durante o Trabalho de Projecto (*The Design Process: Graphical Representation of the States of Technical Systems during Design Work*).

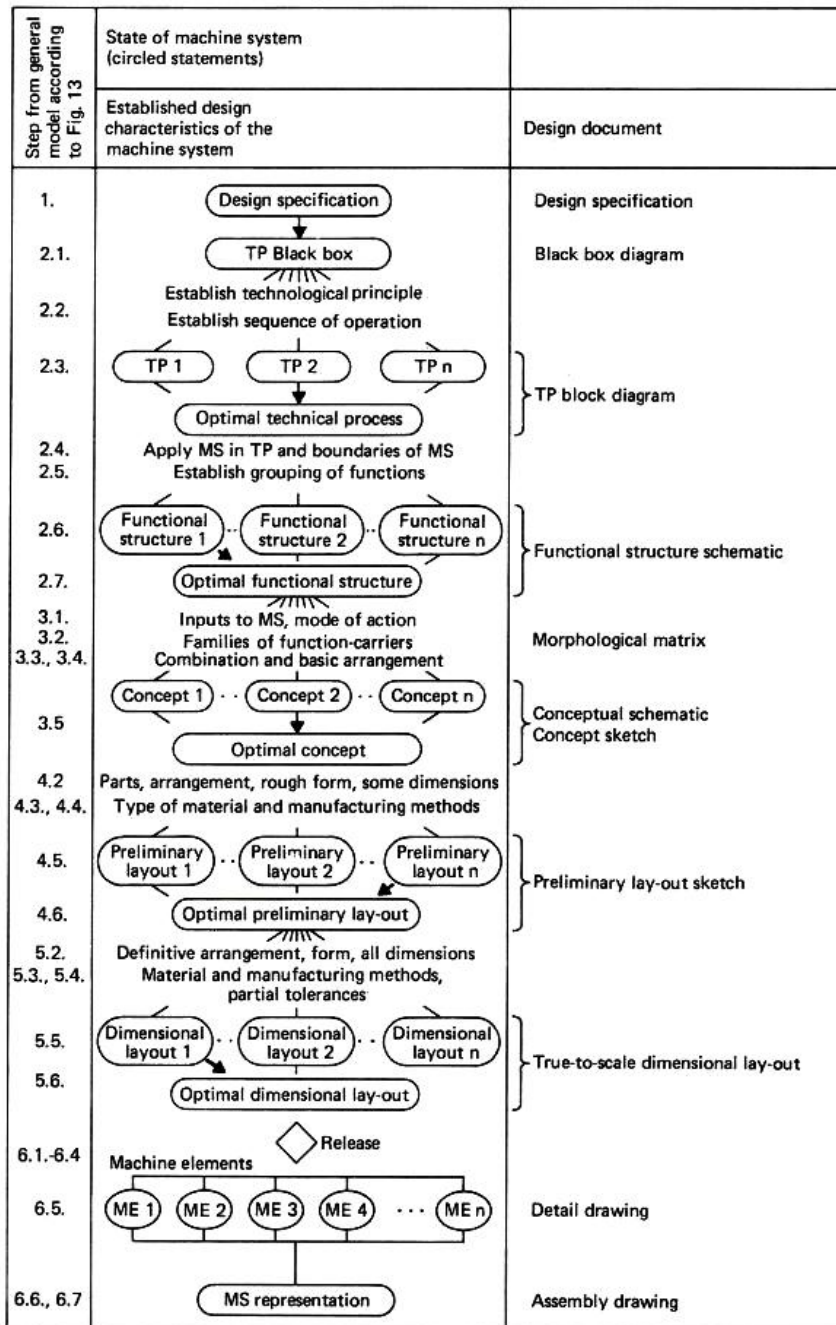


Figura 4.32 – Representação Gráfica dos Estados dos Sistemas Técnicos, durante o desenvolvimento do projecto, retirado de [Hubka, 1982].

Este modelo é composto por quatro fases e seis estágios ou passos (*stages or steps*) que são:

Fase 1: Elaboração do problema consignado (*elaboration of assigned problem*)

Passo 1: Elaboração ou esclarecimento de especificações consignadas (*elaborate or clarify assigned specification*)

Fase 2: Projecto Conceptual (*conceptual design*)

Passo 2: Estabelecimento da estrutura funcional;

Passo 3: Estabelecimento dos conceitos

Fase 3: Anteprojecto (*laying out*)

Passo 4: Estabelecimento da configuração preliminar (*preliminary layout*);

Passo 5: Estabelecimento de dimensões (*dimensional layout*)

Fase 4: Elaboração (*elaboration*)

Passo 6: Pormenorização e Elaboração (*detailing and elaboration*)

Hubka e Eder criaram uma “corrente de pensamento”, designada por “*Workshop Design Konstruktion (WDK) School*”, que considera que uma inspecção independente e sistemática dos métodos de projecto conduz ao melhoramento da eficiência dos projectistas, através da redução ou eliminação, de forma científica, do desperdício de mão-de-obra, de tempo e de materiais.

A abordagem seguida por Hubka e Eder no desenvolvimento da “*WDK School*” é baseada na observação e sistematização do que os projectistas já fazem, complementada com teoria para modelação de sistemas técnicos, que descreve o funcionamento dos ditos sistemas sem, contudo, indicar as razões fundamentais pelas quais os sistemas funcionarão ou não.

Para além disso, a “*WDK School*” de Hubka e Eder, não define directamente o que constitui um bom projecto, algo que é fulcral nas teorias de Altshuller, Suh e Yoshikawa, o que constitui uma lacuna da “*WDK School*”.

4.2.13 Modelo de David Wilson

A primeira versão do modelo para o processo de projecto proposto por David Wilson na sua tese de doutoramento [Wilson, 1980], encontra-se reproduzida na Figura 4.33 e tem como principal objectivo delinear a fronteira entre o sistema e o seu ambiente envolvente, o qual interage com o sistema através de entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) bem definidas.

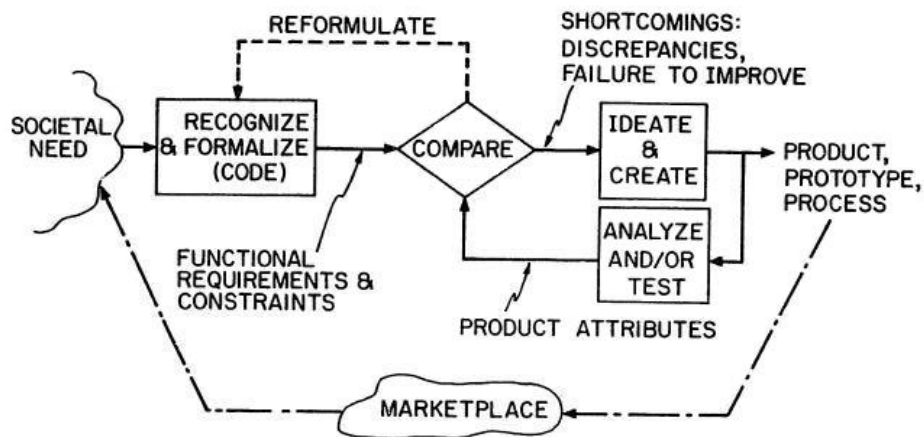


Figura 4.33 – O ciclo de Projecto segundo David Wilson, retirado de [Wilson, 1980].

Neste caso, o sistema é o processo de projectar, em que a percepção de uma necessidade da sociedade e dos factores económicos que lhe estão associados, constitui a única entrada (*input*) do processo. A saída (*output*) do processo é um produto, em sentido genérico, podendo ser a especificação mecânica de um pequeno componente ou a especificação funcional de um sistema complexo.

Neste modelo, existe ainda a resposta do mercado, que actua como uma retroalimentação externa ao sistema.

O processo de projecto desenvolve-se de uma forma hierárquica, desde as especificações do sistema até à descrição individual das peças, e o modelo tem em consideração o projecto do produto, assim como o processo de produção do mesmo.

O reconhecimento e a formalização da necessidade dão origem a uma definição abstracta da necessidade, que constitui o enunciado do problema (código).

Seguidamente, o enunciado do problema, os requisitos funcionais e os constrangimentos são comparados com os atributos de produtos existentes, constituindo tal actividade um ponto de decisão do processo, no qual pode ocorrer uma das três situações alternativas seguintes:

- 1) Os atributos do produto existente satisfazem a necessidade, e esse produto resolve o problema;
- 2) O problema, tal como foi enunciado, é inexequível e deve ser reformulado ou abandonado;
- 3) O problema parece ser exequível, mas todos os produtos existentes apresentam deficiências em satisfazer a necessidade, sendo necessárias novas soluções.

Quando se verifica a 3.^a alternativa, são possíveis duas abordagens:

- A lista completa dos requisitos funcionais e dos constrangimentos pode ser usada para conduzir o processo criativo até uma solução completamente nova;
- As discrepâncias entre o enunciado do problema e os atributos dos produtos existentes podem ser usados para conduzir o processo criativo para a realização de melhoramentos nos produtos existentes.

As ideias geradas no bloco “*ideate and create*” são, então, comparadas com as necessidades originais através de um ciclo de retroalimentação.

As propostas para novos produtos são analisadas e testadas cuidadosamente, sendo descritas de uma forma que possa ser comparada com os requisitos funcionais especificados e com os constrangimentos. Após esta fase, o projectista volta ao ponto de decisão, no qual poderá reformular as especificações, melhorar o projecto ou declarar que o projecto está terminado.

Numa representação alternativa do modelo de projecto, mostrada na Figura 4.34, Wilson incluiu um ciclo iterativo que representa o “projecto do processo de projectar”, para interligação entre a definição do problema e a solução, em que o ponto de decisão é comum a ambos os ciclos.

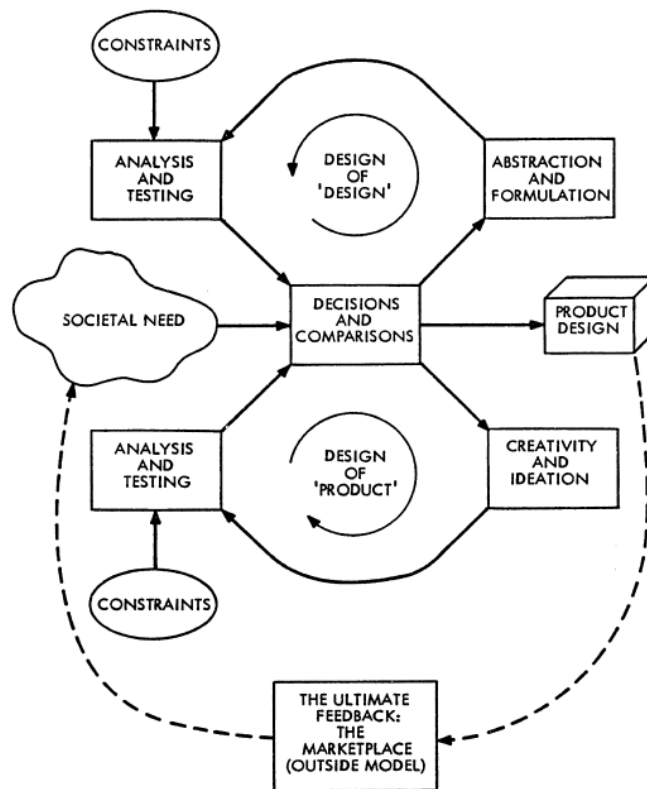


Figura 4.34 – Representação alternativa do ciclo de Projecto, enfatizando o ponto de decisão central, retirado de [Wilson, 1980].

4.2.14 Modelo de Michael French

Em 1971, Michael Joseph French [French, 1999] considerava o processo de projecto composto por quatro estágios (*stages*), representados por círculos, designados por: Necessidade (*Need*); Enunciado do Problema (*Statment of Problem*); Selecção de esquemas (*Selected Schemes*) e Desenhos para Produção (*Working Drawing*, etc.) e por quatro actividades designadas por: Análise do Problema (*Analyses of Problem*); Projecto Conceptual (*Conceptual Design*); Configuração de Esquemas (*Embodiment of Schemes*) e Pormenor (*Detailing*), cuja representação gráfica se reproduz na Figura 4.35:

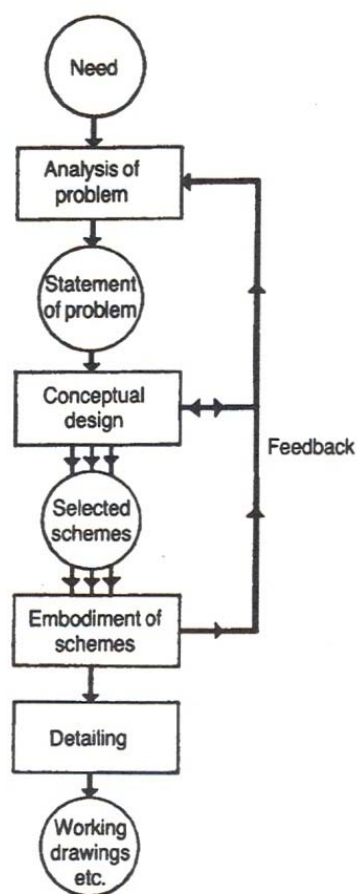


Figura 4.35 – Diagrama de Blocos referente ao processo de projecto segundo French, retirado de [French, 1999].

Michael French adverte para o facto de nesta representação não terem sido incluídas determinadas actividades, tais como a investigação e o desenvolvimento, as entradas de informação (*inputs of information*), entre outras, para não tornar o esquema muito complexo. Por outro lado, não foi indicada a actividade de avaliação, porque o autor acredita que isso deve ser efectuado continuamente em todos os rectângulos.

- 1) Análise do Problema (*Analyses of problem*) envolvendo a identificação da necessidade a ser satisfeita de uma forma tão precisa quanto possível, ou desejável;
- 2) Projecto Conceptual (*Conceptual design*) envolvendo a geração de soluções vagas (*broad solutions*) na forma de esquemas;
- 3) Configuração de Esquemas (*Embodiment of schemes*) envolvendo o desenvolvimento de dos esquemas gerados com mais pormenor;

- 4) Pormenor (*Detailing*), onde os esquemas seleccionados são trabalhados até aos mais pequenos pormenores (*fine details*).

Nas palavras de Michael French, acerca de representações gráficas de modelos de projecto: “*Constructing block diagrams is a fashionable pastime, especially in fields like design where boundaries are imprecise and interactions legion, so that any ten experts will produce ten (or a hundred). They will all be different, and all valid – There are nine and sixty ways of constructing tribal lays, and every single one of them is right.*” [French, 1999].

4.2.15 Modelo de Sir Alan Harris

O modelo proposto por Harris é baseado no ensino de projecto em disciplinas de engenharia civil [Evbuomwan *et al.*, 1996] e é composto pelos cinco estágios seguintes:

- 1) *Apreciação da Tarefa (Appreciation of the task)*. Consiste em descobrir (*ascertaining*) o que é pretendido, os recursos necessários e onde podem ser obtidos. Isto envolve descobrir o que o cliente pretende (*regarded as “total function”*);
- 2) *Concepção (Conception)*. Nesta fase, as ideias para soluções começam a surgir (*emanate*) tendo por base o processamento (*digestion*) dos factos recolhidos na fase anterior. Aqui o projectista junta o conhecimento da função do trabalho (*what is known of the function of the work*) com tentativas de ideias para configuração, para materiais e para métodos de construção;
- 3) *Avaliação de Conceitos (Appraisal of concepts)*. Neste estágio é onde a busca baseada na experiência se torna importante. Os esquemas propostos são examinados de forma crítica, a fim de verificar se satisfazem as necessidades, se podem ser construídos e se são economicamente viáveis, em termos de custos e da função que virão a desempenhar ao longo da sua vida útil. Nesta fase, é também executada uma análise da estrutura preliminar, para verificação dos esquemas iniciais;

- 4) Decisão (*Decision*). Após sucessivas operações de concepção e avaliação, é necessário decidir e optar por um esquema particular de projecto. Os critérios para decisão indicados por Harris incluem a simplicidade e a distinção do projecto (*simplicity and distinction of the design*) assim como a exequibilidade (*construtability*);
- 5) Verificação e Elaboração (*Checking and elaboration*). Este é o estágio em que o projectista se certifica de que o que é proposto se adequa às necessidades. São então aplicadas técnicas analíticas para determinar as acções às quais as estruturas virão a estar sujeitas, tais como carregamentos, temperatura, corrosão, etc., assim como são analisados os efeitos provocados por essas acções e são definidos critérios para aferir a adequabilidade das soluções. O resultado final do projecto é comunicado na forma de desenhos e de texto.

4.2.16 Modelo de Projecto de Atila Ertas e Jesse C. Jones

O modelo de projecto apresentado por Ertas e Jones [Ertas *et al.*, 1996] tem por base a definição de projecto de engenharia, a seguir transcrita, formulada pela “*ABET – Accreditation Board for Engineering and Technology*”, a qual, na opinião de Ertas e Jones, é a definição que melhor se adequa para ser transmitida aos estudantes de engenharia.

“Engineering design is the process of devising a system, component, or process to meet desired needs. It is a decision making process (often iterative), in which the basic sciences, mathematics, and engineering sciences are applied to convert resources optimally to meet a stated objective. Among the fundamental elements of the design process are the establishment of objectives and criteria, synthesis, analysis, construction, testing and evaluation. The engineering design component of a curriculum must include most the following features: development of student creativity, use of open ended problems, development and use of modern design theory and methodology, formulation of design problem statements and specification, consideration of alternative solutions, feasibility considerations, production process, concurrent engineering design, and detailed system descriptions. Further, it is essential to include a variety of realistic constraints such as economic factors, safety, reliability, aesthetics, ethics, and social impact.”

Os autores advertem que o modelo de projecto apresentado é um modelo de aplicação generalizada para projectos de magnitude significativa e salvaguardam a necessidade de adaptar o modelo a cada caso (*Project*), individualmente, incluindo algumas variações ou eliminando passos, nomeadamente no caso de pequenas organizações, onde o processo de projecto é menos formal.

O processo inicia-se com a identificação de uma necessidade e fica concluído com a qualificação satisfatória e a aceitação do teste de um protótipo, cujos passos típicos estão representados na Figura 4.36:

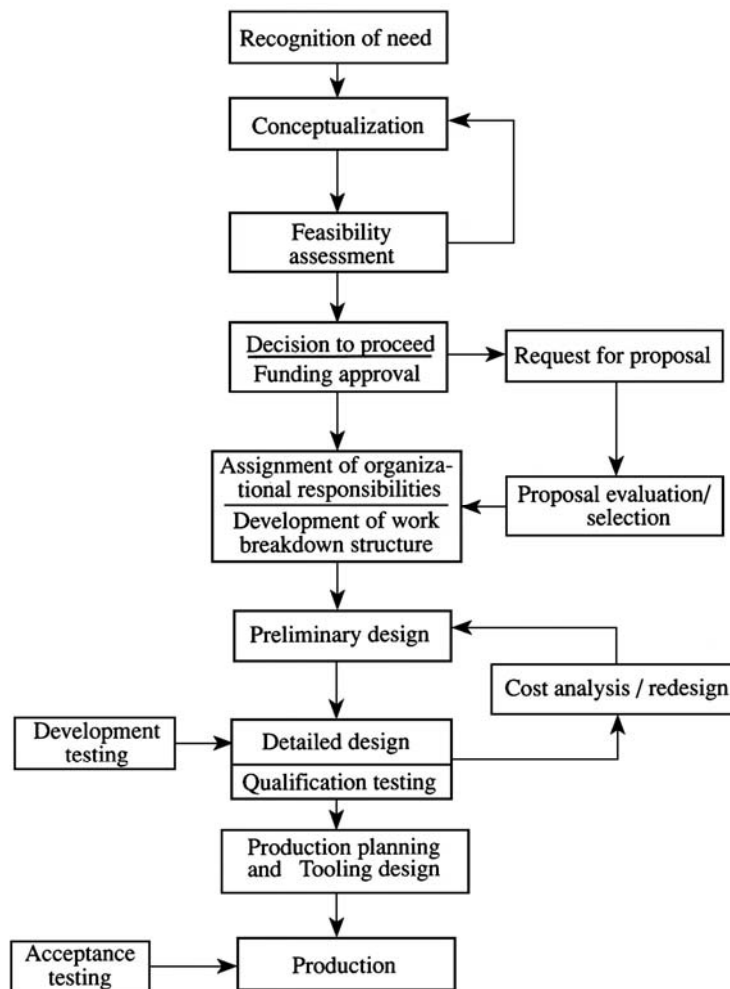


Figura 4.36 – Diagrama de Blocos referente ao processo de projecto de engenharia, segundo Ertas e Jones, retirado de [Ertas *et al.*, 1996].

Os aspectos de viabilidade, técnica e económica, são enfatizados neste modelo, estando incluídos os aspectos relacionados com a angariação de financiamento e a análise de custos.

Com a representação a seguir reproduzida, Ertas e Jones [Ertas *et al.*, 1996] pretendem transmitir a ideia de que o processo de projectar é composto por quatro actividades essenciais, que são: síntese, análise, ensaio e selecção de materiais.

O resultado desenvolvido pelo processo de projecto terá propriedades que determinam a disponibilidade – estar operacional quando for necessário (*availability*); a fiabilidade (*reliability*) – probabilidade de o componente desempenhar com sucesso a função para que foi concebido, durante a sua vida e nas condições operacionais e ambientais previstas; a “manutabilidade” (*maintainability*) – dificuldade e custo de manter as condições de operacionalidade do produto; a confiança (*dependability*) ou seja o resultado da combinação entre a fiabilidade (*reliability*) e a “manutabilidade” (*maintainability*); a exequibilidade “manufacturabilidade” (*manufacturability*) – que traduz a dificuldade e o custo de produzir o produto, e o rácio custo/benefício do produto, ou seja a relação entre o benefício que o produto proporcionará ao seu utilizador em comparação com o seu custo.

Todas estas características contribuem para a qualidade e para o valor que o produto terá para o utilizador final, estando interligadas como sugere a Figura 4.37.

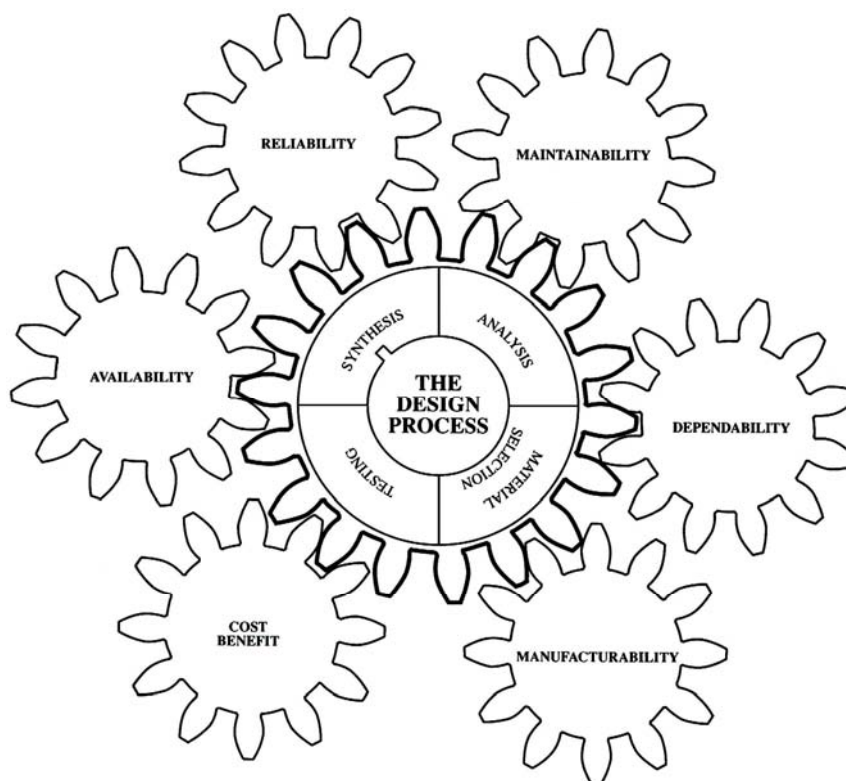


Figura 4.37 – Parâmetros de projecto importantes, retirado de [Ertas *et al.*, 1996].

4.2.17 Modelo de Gerard Voland

Gerard Voland começa por caracterizar o processo de projecto que, ao contrário das ciências exactas, não tem uma solução única, mas procura a melhor solução entre as várias soluções possíveis, ou seja, é necessário desenvolver várias soluções para então seleccionar aquela que melhor satisfaz os critérios de aceitação da solução [Voland, 2004].

Na concepção de Voland, o processo de projecto é um processo naturalmente iterativo, podendo cada solução ser sempre melhorada. O processo de projecto de engenharia não termina com uma solução óptima, uma vez que não existe a solução perfeita.

Devido às soluções de compromisso que, na maior parte dos casos, é necessário estabelecer para resolver os conflitos entre objectivos de projecto, a solução final fica dependente dos critérios utilizados para a selecção das subsoluções, sendo sempre possível ajustar os critérios em função das preferências de cada utilizador ou de grupos de utilizadores e de cada época ou moda.

Por outro lado, vão sendo sempre desenvolvidos novos materiais, novas tecnologias, novos processos de fabrico, que podem ser incorporados no projecto, não sendo possível estabelecer uma solução final.

Como exemplos, refere o caso do projecto do automóvel, que tem vindo a ser melhorado ao longo de anos, ou o caso da evolução da máquina de escrever para os computadores com processadores de texto e impressoras.

No caso do automóvel, o projecto tem beneficiado da incorporação de tecnologias que são desenvolvidas para a indústria aeroespacial e, posteriormente, adoptadas na indústria automóvel.

O modelo para o processo de projecto de engenharia proposto por Voland resulta da compilação das tarefas mais comuns presentes nos vários modelos do processo de projecto existentes, cujas designações podem variar consoante o autor, e que são:

- a Formulação do Problema (*problem formulation*), que corresponde ao estabelecimento dos objectivos que deverão ser alcançados pelas soluções definidas pelo projecto;

- a Síntese (*synthesis*), em que são compiladas as soluções capazes de realizar os objectivos estabelecidos;
- a Análise (*analysis*), em que são comparadas e avaliadas as várias soluções alternativas;
- a Implementação, onde as soluções finais são desenvolvidas e distribuídas pelo cliente.

Às tarefas acima indicadas, Voland acrescentou:

- a Identificação das Necessidades (*Needs Assessment*), sendo o processo iniciado com a necessidade de uma solução;
- a Abstracção (*Abstraction*), para desenvolvimento de conceitos genéricos para geração de soluções, tendo esta tarefa ficado associada à Síntese.

Neste processo, deverá ser incluído um sexto passo, a Reflexão, durante o qual o projectista deve contemplar as lições aprendidas nos passos precedentes e compartilhá-las com os restantes membros da equipa de projecto.

A representação gráfica adoptada por Voland para o modelo do processo encontra-se representada na Figura 4.38 que, segundo Voland, constitui um algoritmo de cinco estágios verdadeiramente eficaz para resolução de problemas (*five-stage process is a truly effective problem-solving algorithm*),

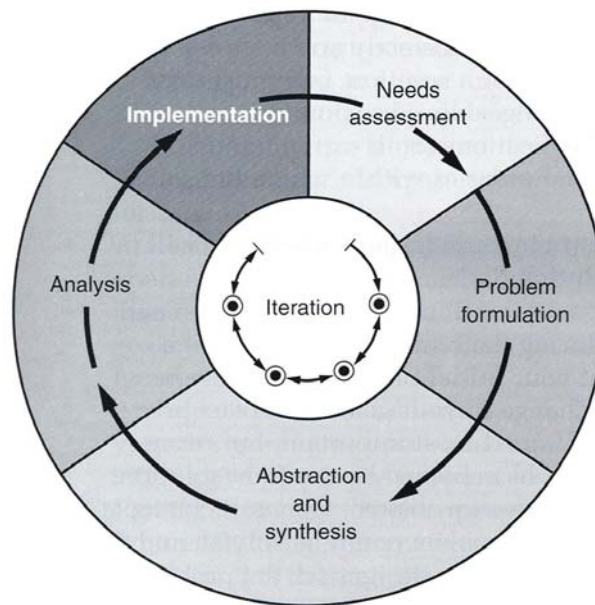


Figura 4.38 – Representação gráfica do processo de projecto de engenharia, retirado de [Voland, 2004].

4.2.18 Modelo de Roozenburg – Eekels

O modelo do processo de projecto proposto por Roozenburg e Eekels [Roozenburg *et al.*, 1995] surge integrado no livro, baseado nas notas das várias disciplinas que os autores têm leccionado na *Faculty of Industrial Design Engineering* da *Delft University of Technology – The Netherlands*, em que defendem que os projectistas, para serem bem sucedidos na actividade de projectar, devem adoptar uma atitude multidisciplinar e, acima de tudo, uma abordagem sistemática.

Segundo Roozenburg e Eekels [Roozenburg *et al.*, 1995], devido ao facto de haver mais do que uma solução para um problema de projecto e dada a incerteza inicial relativamente a qual das soluções será a mais efectiva, o projecto é, na sua essência, um processo de tentativa e erro, consistindo numa sequência de ciclos empíricos, nos quais o conhecimento do problema, assim como o da solução, evoluem espiralmente.

A representação gráfica adoptada para o ciclo básico do processo de projecto (que será repetido várias vezes) proposto por Roozenburg e Eekels [Roozenburg *et al.*, 1995]

encontra-se reproduzida na Figura 4.39, e apresenta semelhanças com o ciclo de resolução de problemas práticos de Hall.

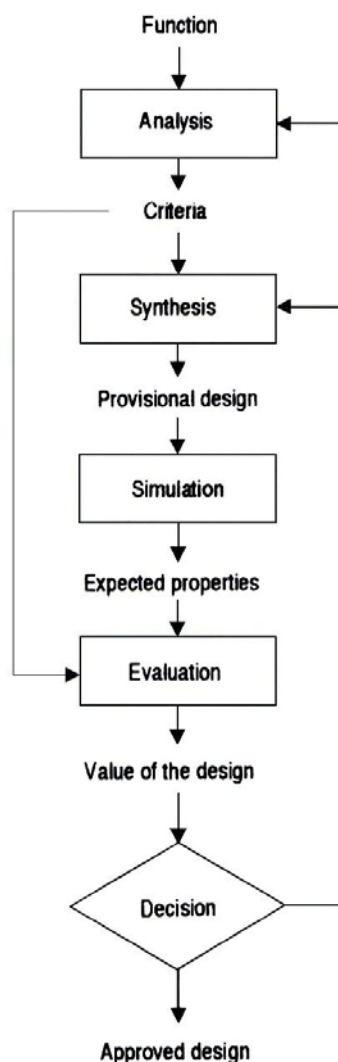


Figura 4.39 – Representação gráfica do ciclo básico do processo de projecto, retirado de [Roozenburg *et al.*, 1995].

Neste ciclo do processo de projecto, que conduz desde a função (que se pretende realizar) até à forma (meio que realizará essa função), são realizadas várias actividades, começando com a Análise, que é o ponto de partida para a especificação do problema e definição de Critérios de aceitação, seguindo-se a Síntese, que é a parte menos tangível do ciclo, onde é utilizado o “fenómeno enigmático” da criatividade humana, para combinação de elementos separados para a compilação da solução como um todo. Seguidamente, a Simulação do projecto provisório mostrará as propriedades proporcionadas pelo novo produto, as quais passam por um processo de Avaliação para obtenção do Valor do projecto, sendo a actividade de

Decisão que determinará se o produto desempenha as funções pretendidas de modo satisfatório, ou se será necessário iniciar um novo ciclo, dando origem ao processo iterativo em espiral, conforme representado na Figura 4.40:

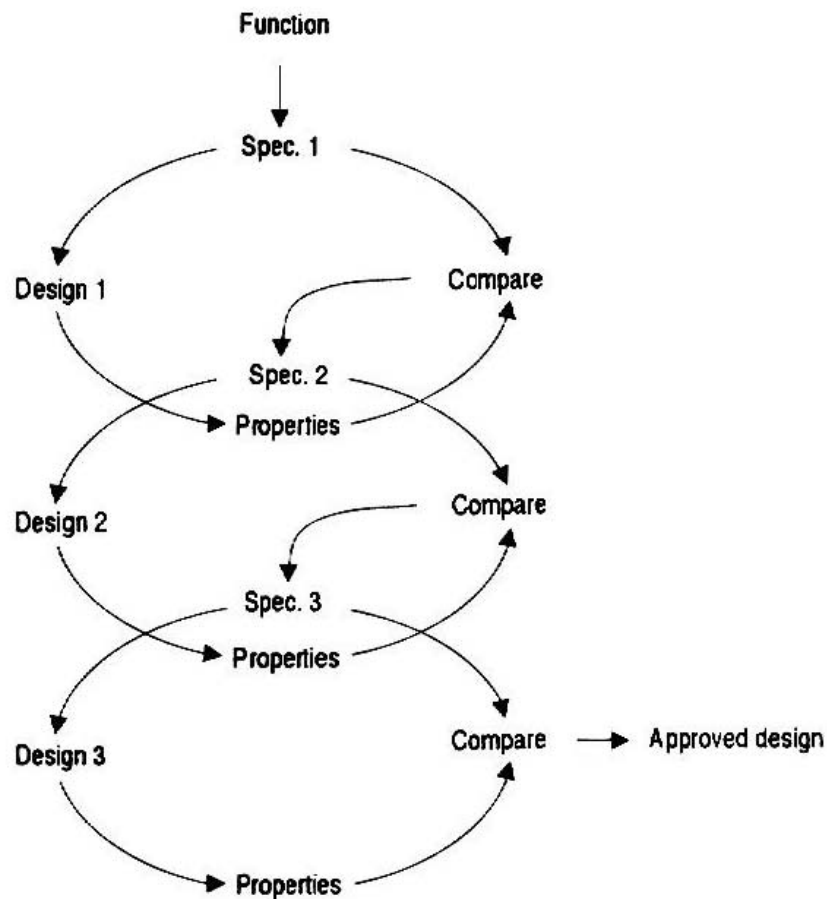


Figura 4.40 – Representação da Estrutura Iterativa do processo de projecto, retirado de [Roozenburg *et al.*, 1995].

Roozenburg e Eekels [Roozenburg *et al.*, 1995] reconhecem as semelhanças existentes entre o modelo do processo de projecto que propõem e o ciclo de pesquisa empírica científica (*empirical scientific inquiry*) conforme se representa na Figura 4.41:

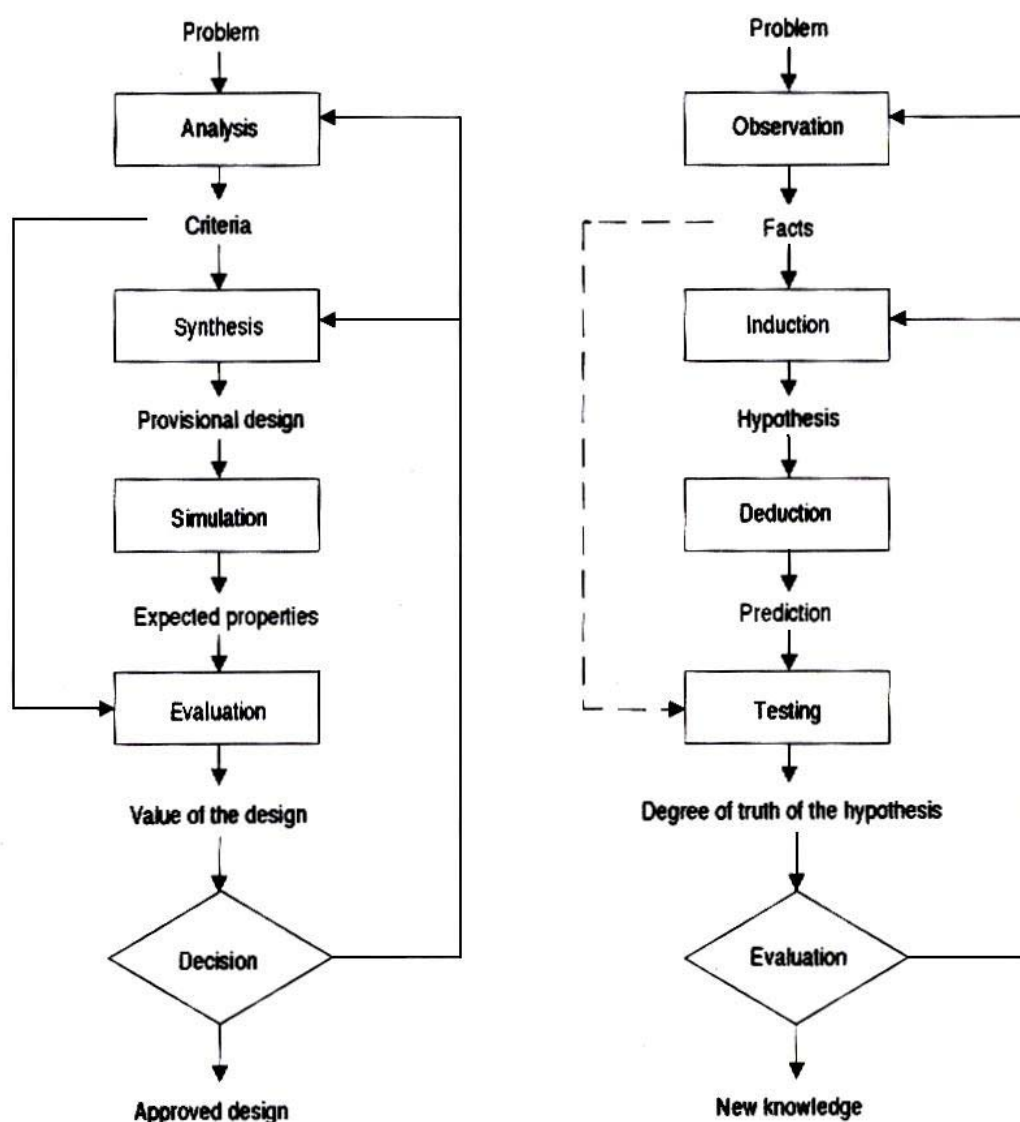


Figura 4.41 – Comparação dos ciclos básicos de projecto e de pesquisa científica empírica, retirado de [Roozenburg *et al.*, 1995].

4.2.19 Modelo de Actividade de Projecto Total de Pugh

Stuart Pugh define “Projecto Total” (*Total Design*) como a actividade sistemática necessária desde a identificação da necessidade do mercado/utilizador até à venda do produto que satisfaz com sucesso (*successful product*) a necessidade – tratando-se de uma actividade que envolve (*encompasses*) produtos, processos, pessoas e organizações [Pugh, 1998].

O “Modelo de Actividade de Projecto Total” consiste principalmente num núcleo central de projecto (*central core design*), o qual é composto por “Mercado”, ou necessidade do utilizador (*market – user need*), “Especificações de Projecto do Produto” (*product design specification*), “Projecto de Concepção” (*conceptual design*), “Projecto de Pormenor” (*detail design*), “Produção” (*manufacture*) e “Comercialização” (*sales*).

O processo de projecto, neste modelo, inicia-se pela identificação de uma necessidade, cujo elemento que a satisfaz se enquadra num mercado existente ou num novo mercado.

As especificações de projecto do produto (*product design specifications – PDS*) são formuladas a partir do enunciado da necessidade (*statement of the need*).

As especificações de projecto do produto, uma vez estabelecidas (*established PDS*), actuam como uma “manta” (*mantle*) que envolve todos os estágios subsequentes no “núcleo do projecto” (*design core*), actuando como o elemento de controlo da actividade de projecto total.

A representação gráfica deste modelo, tal como proposto por Pugh [Pugh, 1998], é apresentada na Figura 4.42:

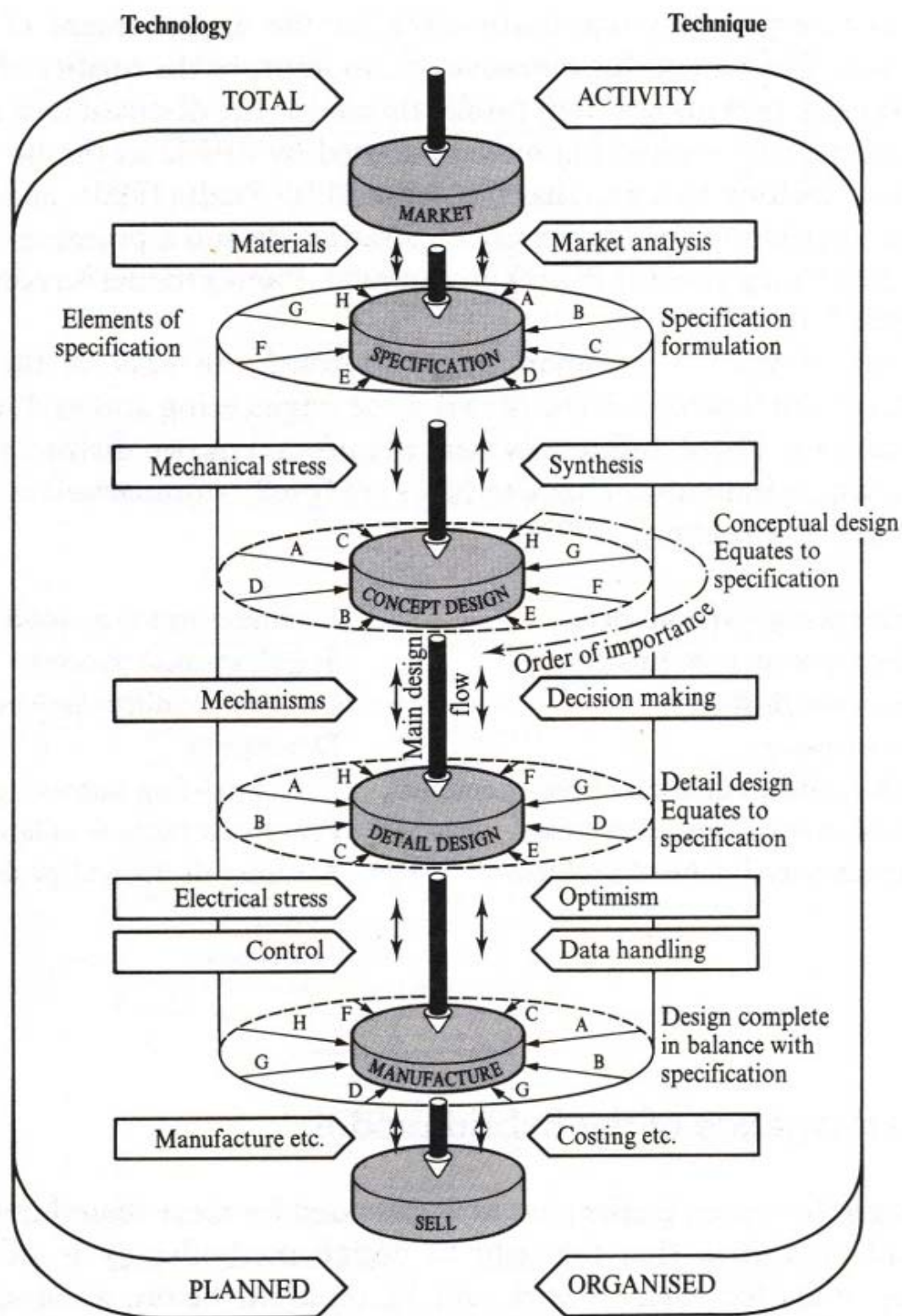


Figura 4.42 – Representação gráfica do Modelo de Actividades de Projecto Total, retirado de [Birmingham *et al.*, 1997] [Pugh, 1998].

Neste modelo, o processo de projecto flui desde a prospecção de mercado (*marketing*) até à comercialização (*sales*), numa forma iterativa que lhe permite voltar a qualquer dos estágios iniciais, à medida que vão surgindo novas ideias e informação, originando iterações entre todos os estágios do “núcleo do projecto” (*design core*).

Este modelo também reconhece o facto de que, para produzir projectos eficazes e eficientes (*effective and efficient design*), é necessário utilizar várias técnicas que permitam ao projectista/equipa de projecto desenvolver a actividade nuclear.

Essas técnicas de projecto ou métodos podem ser de dois tipos:

- a) Independentes de Disciplinas (*discipline-independent*) que estão directamente relacionadas com o “núcleo do projecto” e podem ser aplicadas a qualquer produto ou tecnologia, tais como ferramentas para realizar as actividades de análise, síntese, tomada de decisão, prototipagem (*modelling*), etc.
- b) Dependentes de Disciplinas Específicas (*specific discipline-dependent*), que são técnicas e conhecimentos específicos, tais como a análise de tensões, a hidráulica, a análise térmica, a análise termodinâmica, a electrónica, etc.

Este modelo tem em consideração a totalidade do processo de desenvolvimento do produto, a estrutura de planeamento e organização (*framework of planning and organization*), assim como enfatiza o desenvolvimento de produtos integrados numa estrutura de negócio.

Pugh estabelece ainda um conjunto de princípios fundamentais para a aplicação da “Actividade de Projecto Total” [Pugh, 1998] e sugere a utilização de técnicas e métodos (ferramentas) de projecto adequados ao desenvolvimento das actividades em cada estágio, cuja representação gráfica se reproduz na Figura 4.43:

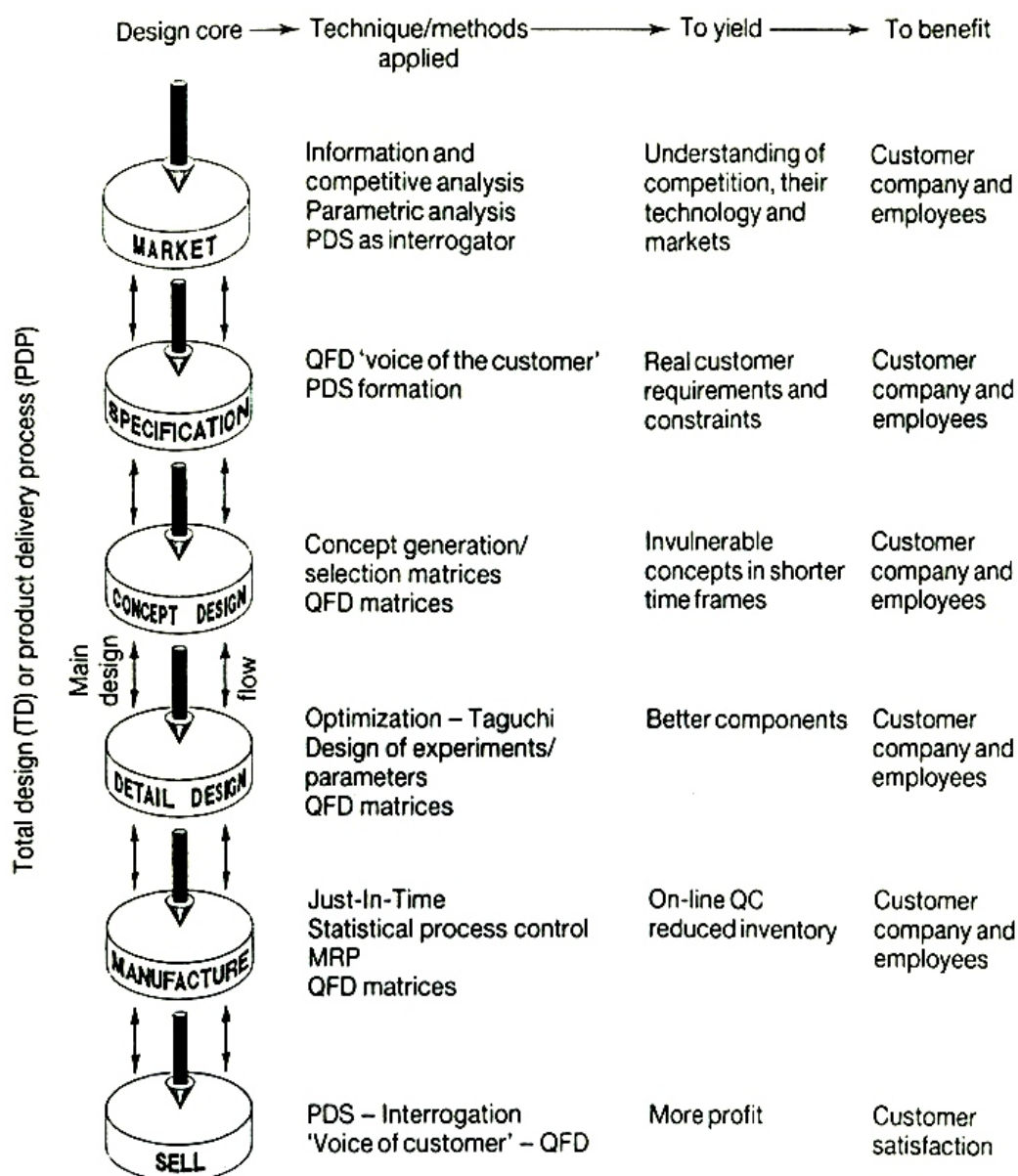


Figura 4.43 – Interligação entre as fases do processo de desenvolvimento de produto, ou Projecto Total, e os métodos e ferramentas de projecto adequadas a cada fase, retirado de [Pugh, 1998].

4.2.20 Modelo de Don P. Clausing

A força motivadora subjacente ao trabalho de Clausing consiste no melhoramento do desempenho da produção industrial, através do estudo dos factores que influenciam a execução óptima do desenvolvimento dos produtos e dos processos de produção.

Clausing incorpora, no seu modelo, os trabalhos de vários investigadores na área do melhoramento do processo de desenvolvimento de produtos, a que chamou “*Total Quality Development*” [Clausing, 1994], e que compreende três elementos principais:

- 1) Melhoramentos (*improvements*) básicos, em termos de clarificação de tarefas e unidade na colaboração entre os membros da equipa de projecto (engenharia concorrente básica);
- 2) Desdobramento da Função Qualidade Melhorada (*Enhanced Quality Function Deployment - EQFD*) [Hauser, 1988];
- 3) Engenharia da Qualidade, utilizando Projecto Robusto (*Quality engineering using robust design*).

Segundo as próprias palavras de Clausing [Clausing, 1994], “*Total Quality Development*” é o “*modern way of developing new products that will be competitive in the global economy. It combines the best engineering, the best management, the best strategy, and especially, the best teamwork. The resulting improvements are greatly reduced development time, a reduction in all costs, higher quality, and increased product variety. Combined, these improvements greatly increase customer satisfaction*”.

Clausing proporciona (*provides*) uma ligação importante entre a comunidade de investigação académica e a comunidade de utilizadores na indústria. A abordagem de Clausing é única, na medida em que aplica um método de selecção de conceitos, que combina características de diferentes métodos para criar um método holístico, utilizando técnicas de “*Benchmarking*” para garantir que o novo método se mantém superior aos restantes.

A forma de Clausing desenvolver a sua abordagem ao projecto requer um número de propriedades:

- uma rede de contactos que possa proporcionar informação aos novos desenvolvimentos;
- um maior enfoque (concentração) em valores pragmáticos do que em valores científicos;
- um espírito aberto (*open mind*), não direccionado para uma componente individual da abordagem, mas que estimula a substituição de certos componentes por outros novos, considerados melhores.

O modelo do processo de desenvolvimento de novos produtos, segundo a perspectiva da *Total Quality Development*, tem como primeira actividade a estratégia de determinação dos produtos e das tecnologias que deverão ser desenvolvidas, de modo a proporcionar os maiores melhoramentos para o conceito de cada novo produto.

Os produtos são, então, desenvolvidos através de três fases, designadas por Conceito, Projecto e Preparação para Produção (*concept, design, and production preparation*), e oito sub-fases que são:

- a Casa da Qualidade (*House of Quality*); o Sistema de Selecção de Conceito Total (*total system concept selection*) e o Desdobramento para as Especificações de Subsistemas (*deployment to subsystem specs*), inerentes à fase de Conceito;
- o Projecto de Subsistemas (*subsystem design*) e o Projecto de Peças (*piece-part design*) inerentes à fase de Projecto;
- o Sistema de Verificação (*system verification*); a Finalização (*getting ready*) e a Produção Piloto ou pré-série (*pilot production*) inerentes à fase de Preparação da Produção.

Todo o desenvolvimento das várias fases e respectivas subfases é suportado por novas tecnologias, seleccionadas da enxurrada de tecnologias, tendo Clausing adoptado a representação esquemática reproduzida na Figura 4.44:

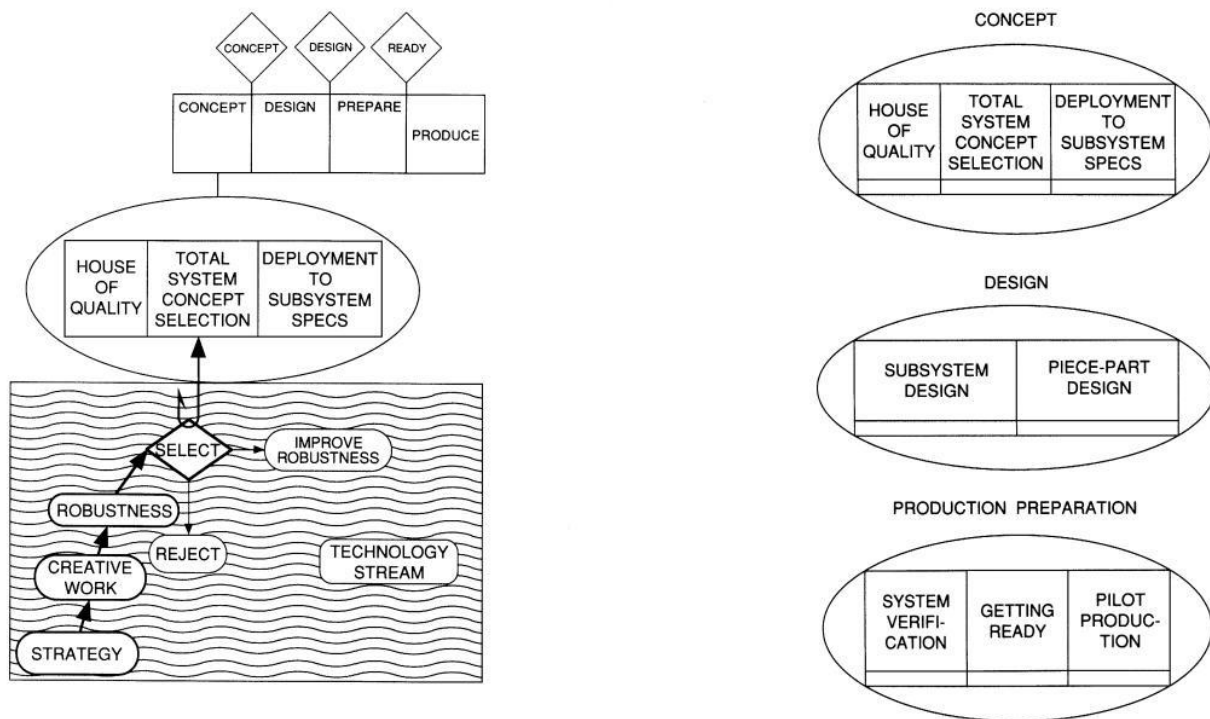


Figura 4.44 – Representação esquemática do processo de desenvolvimento de produto, retirado de [Clausing, 1994].

Cada novo produto específico é desenvolvido no contexto da estratégia total da empresa, a qual determina quando começa o desenvolvimento do novo produto e quando, depois de o produto ter sido produzido, o seu ciclo de vida será terminado.

Não obstante ser classificada, por alguns, como não científica, a abordagem de Clausing é eficiente [Nordlund, 1996].

4.2.21 Modelo de Ullman

David Ullman considera que uma característica fundamental das boas práticas de projecto consiste em considerar toda a vida do produto, uma vez que, segundo as suas próprias palavras, “*the design process not only gives birth to a product but is also responsible for its life and death*” [Ullman, 2010].

Para Ullman, a vida de um produto inclui, genericamente, vários tipos de actividades que podem ser agrupadas, de acordo com a sequência cronológica da sua realização, em quatro grupos, conforme representado na Figura 4.45:

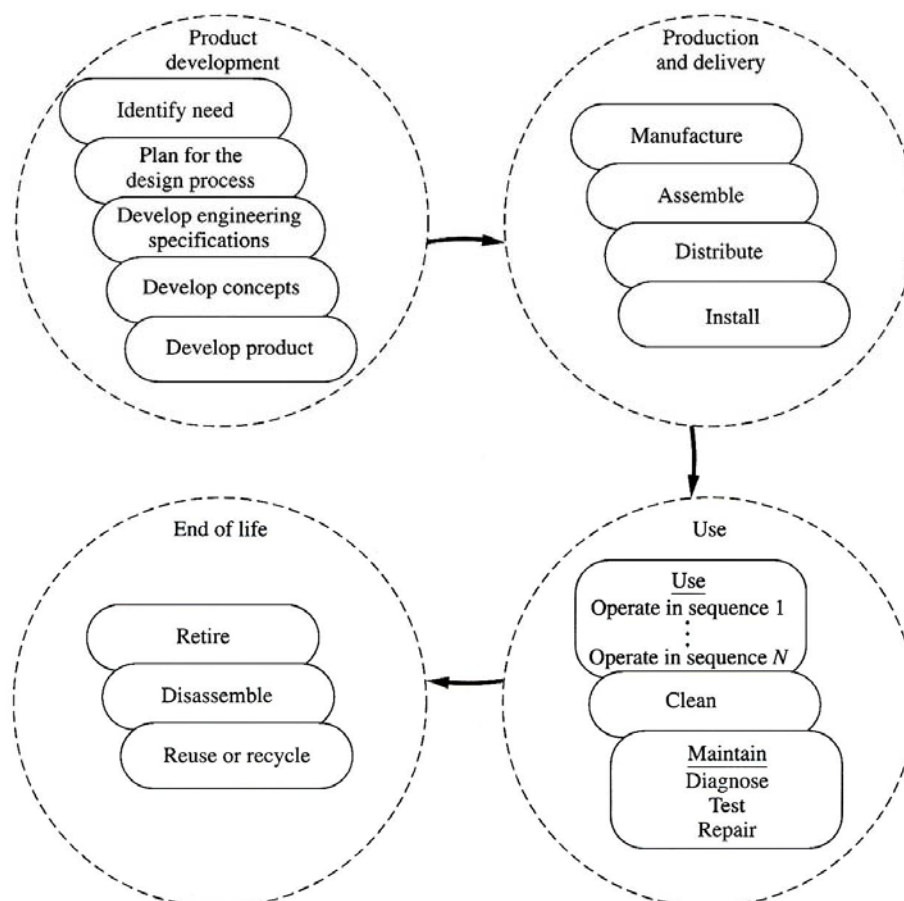


Figura 4.45 – Representação do Ciclo de Vida do Produto, retirado de [Ullman, 2010].

A abordagem seguida por Ullman tem em conta toda a vida do produto e dedica bastante atenção às questões de análise de mercado (*marketing*), aos aspectos de gestão do produto e ao impacto que o produto pode originar no utilizador, nas pessoas que o rodeiam e no ambiente em que esteja inserido.

Para Ullman, tomar boas decisões é provavelmente a competência (aptidão, talento, capacidade – *skill*) mais importante e a menos estudada em engenharia [Ullman, 2010].

O processo de projecto é composto por uma sequência de decisões, para as quais Ullman propõe o procedimento representado na Figura 4.46:

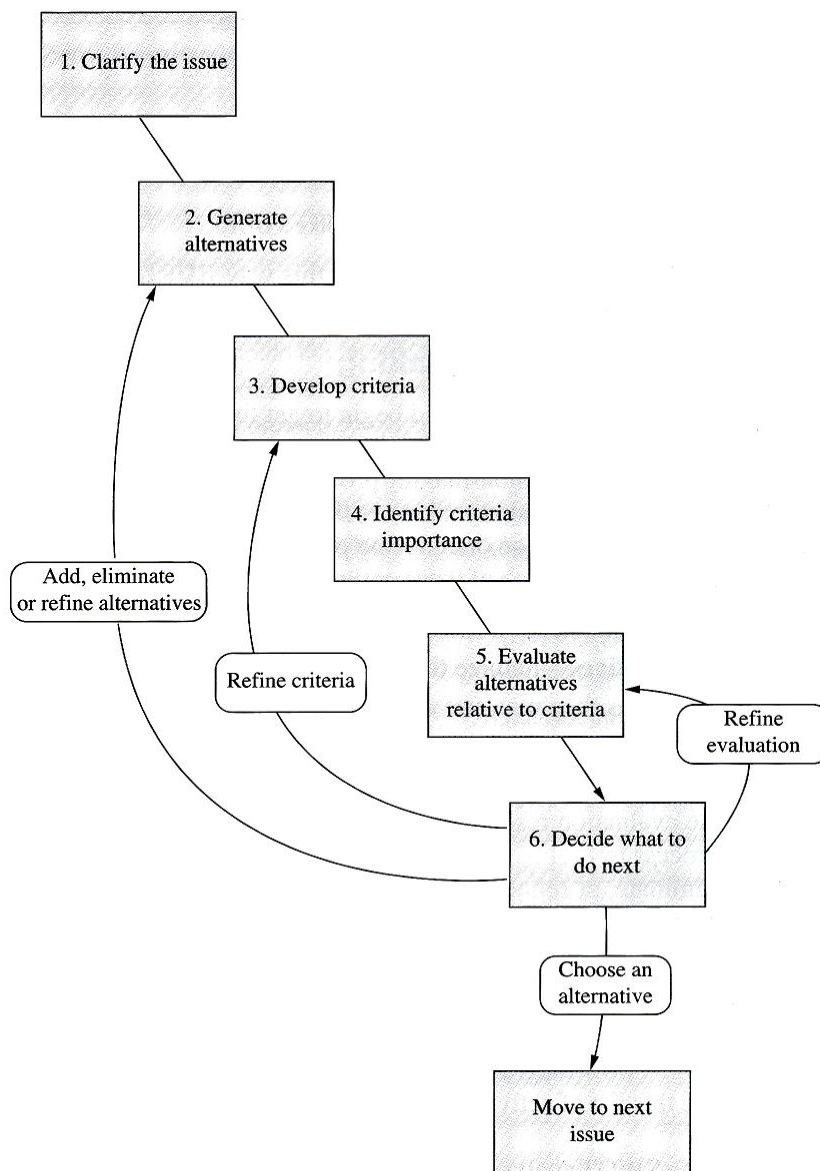


Figura 4.46 – Representação do Ciclo de Tomada de Decisão, retirado de [Ullman, 2010].

O modelo do processo de projecto proposto por Ullman está muito vocacionado para o projecto mecânico de produtos e é composto pelas seis fases, que se sucedem cronologicamente, conforme representado na Figura 4.47:

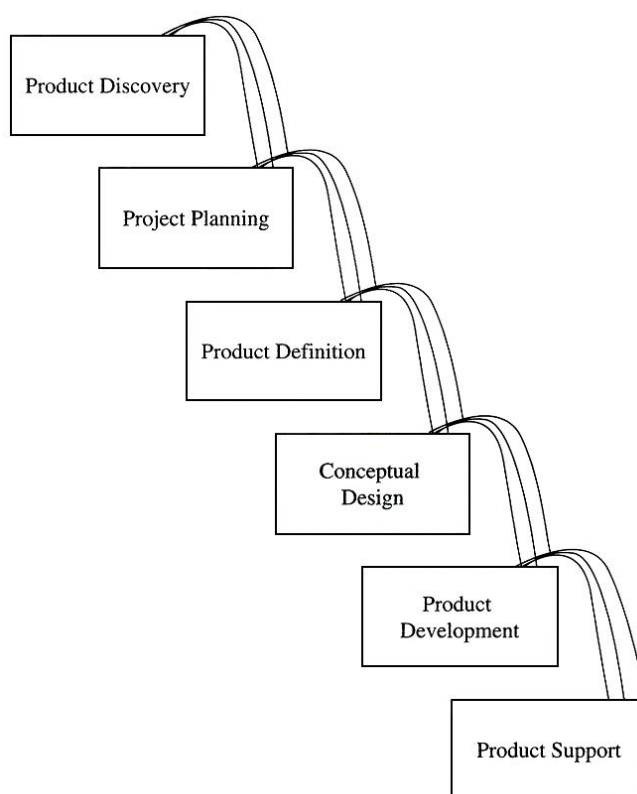


Figura 4.47 – Representação do modelo do processo de projeto, numa representação em cascata, retirado de [Ullman, 2010].

A representação gráfica adoptada por Ullman para o processo de projecto de engenharia mecânica segue a configuração em Cascata, tal como representado na Figura 4.47, que será repetida várias vezes, desde o produto global, até aos subconjuntos, componentes e peças. Outra possibilidade apresentada por Ullman é a configuração em Espiral, conforme reproduzido na Figura 4.48:

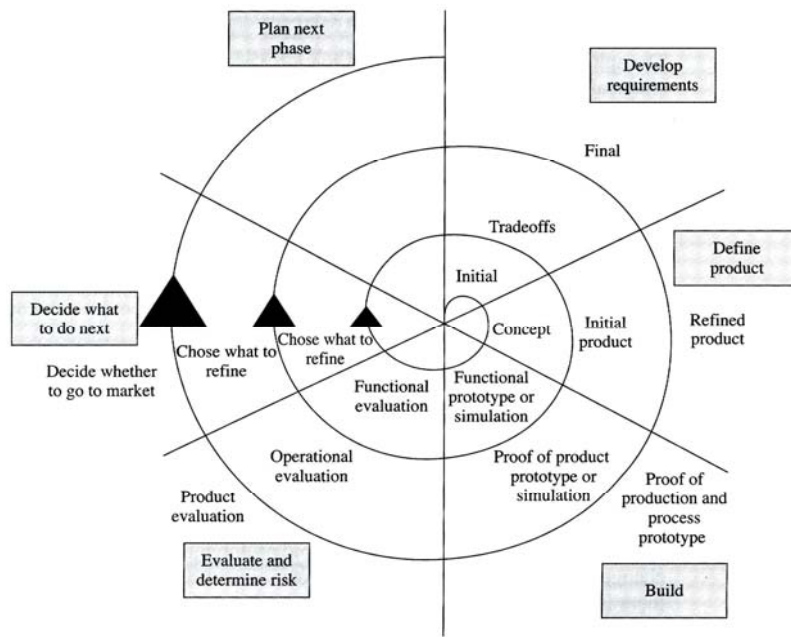


Figura 4.48 – Representação do modelo de projecto em engenharia mecânica, numa representação em espiral, retirado de [Ullman, 2010].

Cada uma das várias fases do processo de projecto é composta por vários tipos de actividades e tarefas, conforme se representa nas Figura 4.49 a Figura 4.53:

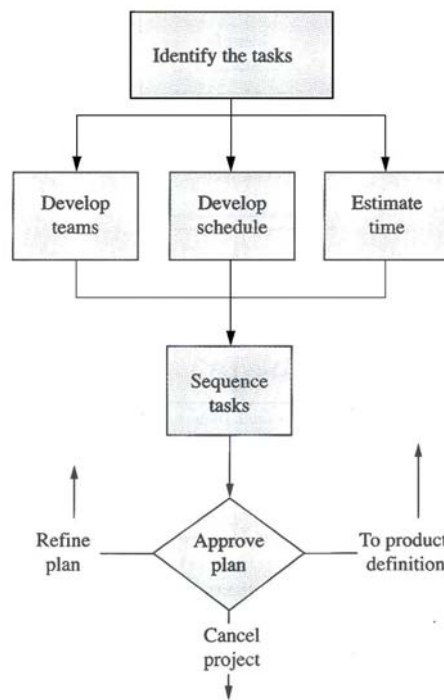


Figura 4.49 – Representação da fase de Planeamento do Projecto, retirado de [Ullman, 2010].

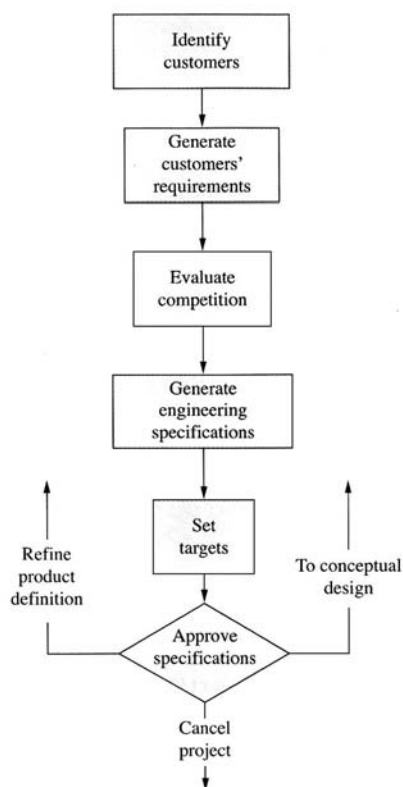


Figura 4.50 – Representação da fase de Definição do Produto, retirado de [Ullman, 2010].

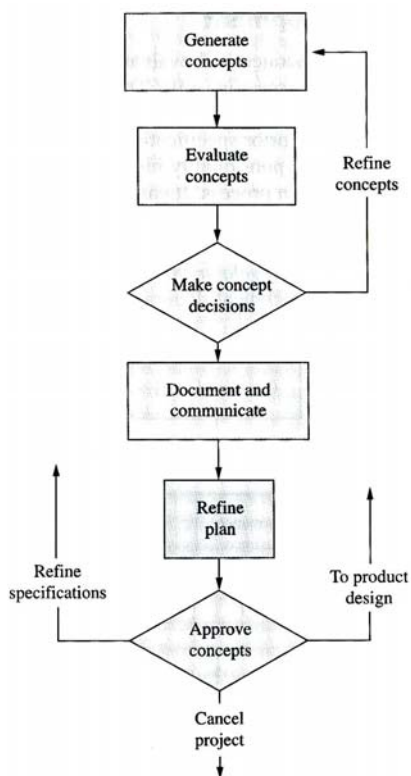


Figura 4.51 – Representação da fase de Projecto Conceptual, retirado de [Ullman, 2010].

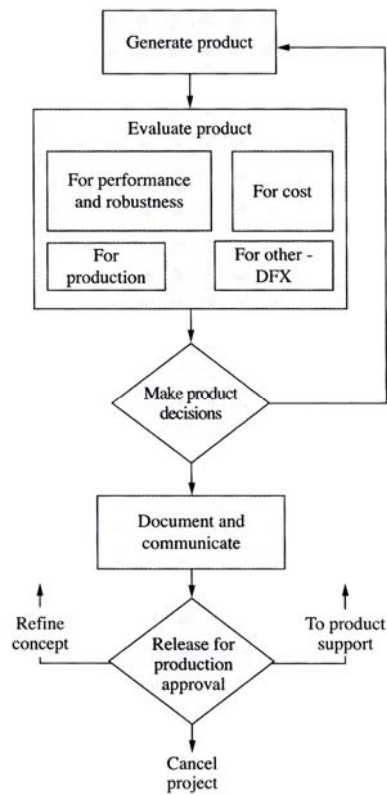


Figura 4.52 – Representação da fase de Desenvolvimento de Produto, retirado de [Ullman, 2010].

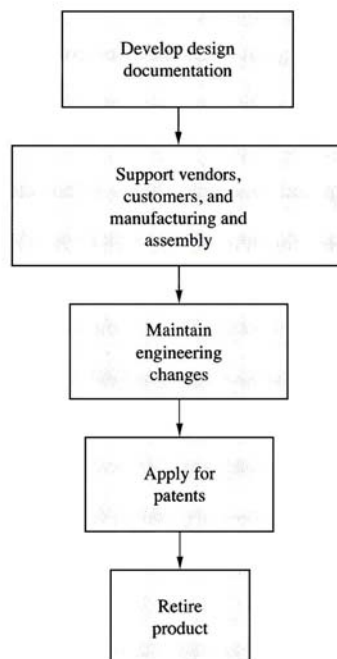


Figura 4.53 – Representação da fase de Apoio ao Produto, retirado de [Ullman, 2010].

Um problema de projecto tem muitas soluções satisfatórias, no entanto, não tem uma solução que seja claramente a melhor (*design problems have many satisfactory solutions but no clear best solution*) [Ullman, 2010]. Este facto conduz à existência de ciclos iterativos, transitando de uma solução que, em função da avaliação realizada, é refinada e melhorada sucessivamente, seguindo um processo conforme se representa esquematicamente na Figura 4.54:

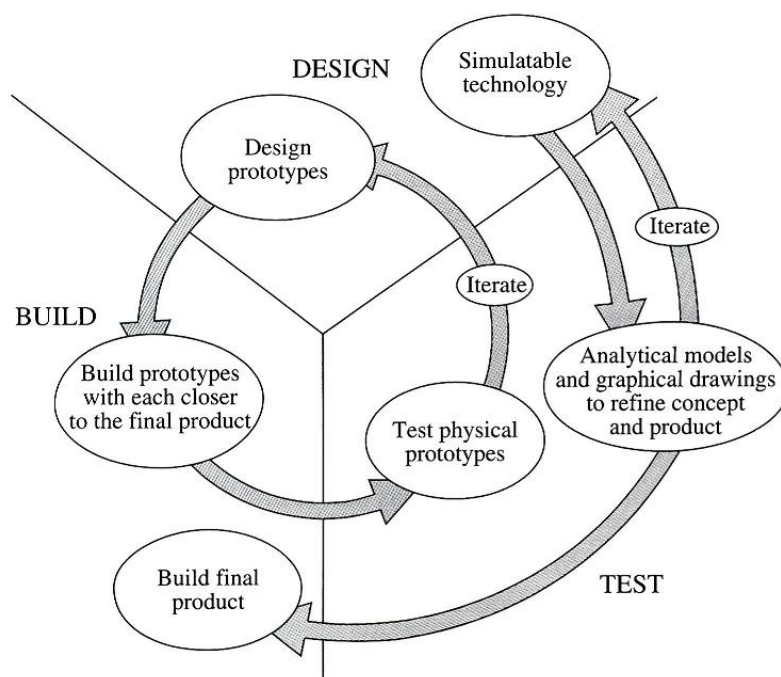


Figura 4.54 – Os Ciclos de Avaliação do Projecto, retirado de [Ullman, 2010].

4.2.22 Modelo de Ulrich - Eppinger

Karl Ulrich e Steven Eppinger [Ulrich *et al.*, 2008] consideram o processo de projecto integrado no processo de desenvolvimento do produto, o qual dividem nas seis fases a seguir enunciadas, que se desenvolvem sequencialmente, conforme representado na Figura 4.55:

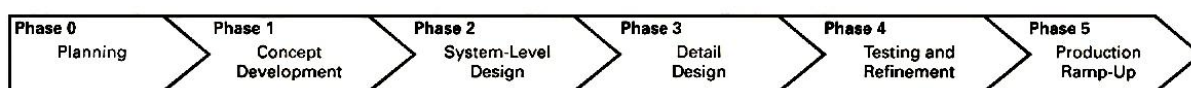


Figura 4.55 – As Fases do Processo de Projecto, retirado de [Ulrich *et al.*, 2008].

- Fase 0 – Planeamento:** Esta fase é designada por fase zero, porque precede a aprovação do projecto e o lançamento do processo de desenvolvimento do produto. Esta fase é iniciada pela estratégia da empresa e tem como objectivo estabelecer a Missão do projecto (mercado-alvo, objectivos de negócio, *key assumptions*, e constrangimentos).
- Fase 1 – Desenvolvimento de conceitos:** Nesta fase, são desenvolvidos os conceitos de forma, função e atributos (*features*), que são acompanhados pelo conjunto de especificações, da análise dos produtos concorrentes e da justificação económica do projecto.
- Fase 2 – Projecto ao Nível do Sistema:** Esta fase inclui a definição da arquitectura do produto e a decomposição do produto em subsistemas e componentes (composição modular), resultando uma geometria preliminar do produto e um anteprojecto com as descrições funcionais de cada subsistema.
- Fase 3 – Projecto de Pormenor:** Desta fase resulta a definição completa de cada peça que constituirá o produto, em termos de geometria, materiais, dimensões, tolerâncias e identificação de todos os componentes normalizados que serão adquiridos no mercado e que serão integrados no produto. Nesta fase existem dois aspectos críticos, aos quais deve ser dedicada atenção especial, que são os custos de produção e a robustez do desempenho do produto.
- Fase 4 – Ensaio e Refinamento:** O ensaio e o refinamento do produto envolvem a construção de protótipos que, numa fase inicial (*alfa*) reproduzem as peças e subsistemas do produto obtidos por processos que não virão a ser os mesmos que serão utilizados para a produção em massa e numa fase posterior (*beta*). Os protótipos já são obtidos pelos processos de produção que serão utilizados para produzir os produtos. O produto e os seus processos de produção são corrigidos e melhorados em função dos resultados obtidos com os ensaios dos produtos.
- Fase 5 – Lançamento da Produção:** O objectivo desta fase consiste na formação dos operadores da linha de produção do produto e na afinação dos procedimentos do processo de produção. Por vezes, os produtos produzidos nesta fase são distribuídos por clientes e utilizadores preferenciais para os utilizarem e testarem

cuidadosamente a fim de identificarem quaisquer problemas ou deficiências residuais ou pontuais.

Na Figura 4.56, encontra-se representada a sequência em que tais fases se desenvolvem, ilustradas com pictogramas alusivos às actividades desenvolvidas em cada fase e complementadas com a indicação, para cada fase, das actividades a desenvolver e das responsabilidades principais (fundamentais – *Key functions*) da organização.

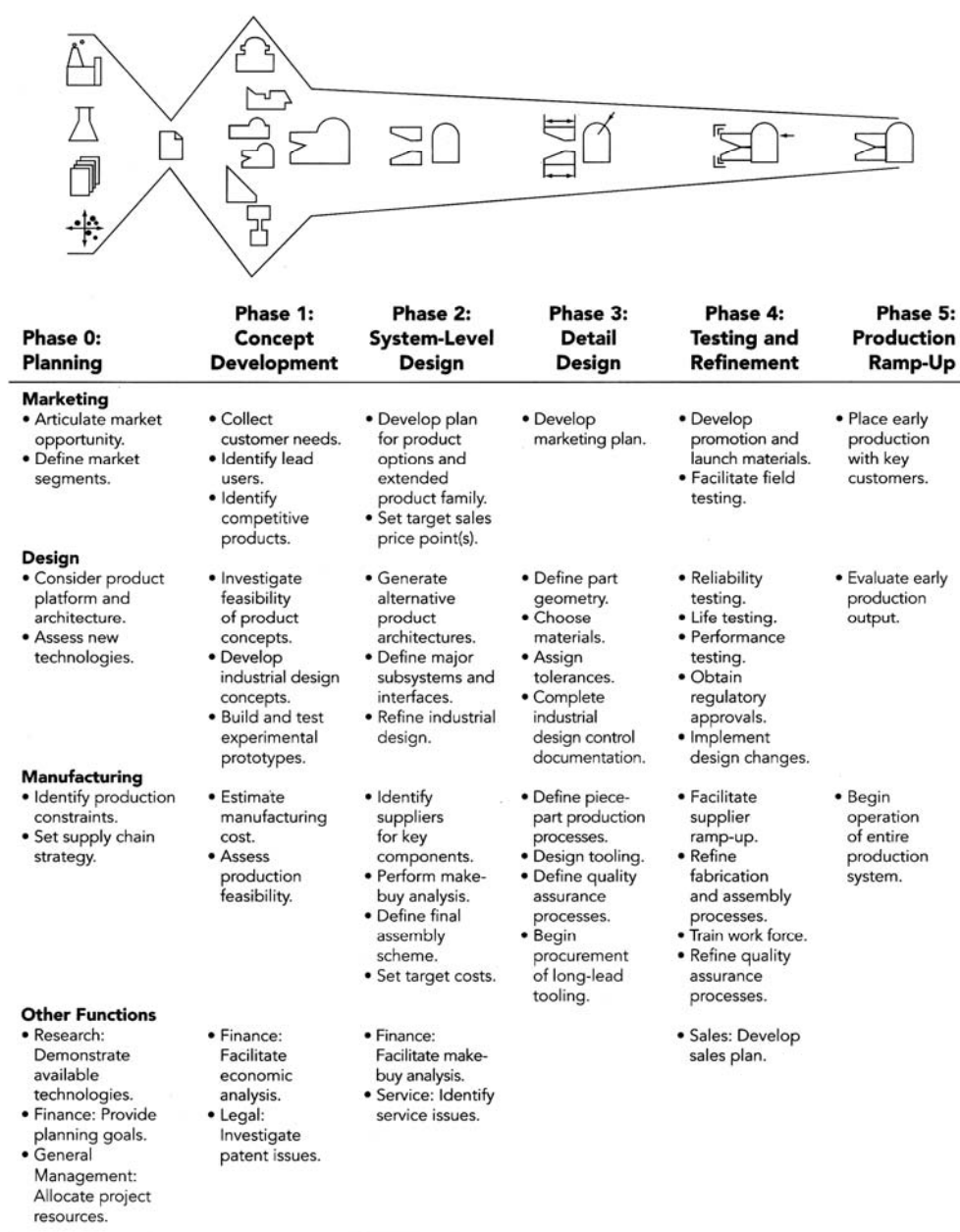


Figura 4.56 – Processo Genérico de Desenvolvimento de Produto, mostrando as seis fases e as responsabilidades das funções fundamentais da organização, retirado de [Ulrich *et al.*, 2008].

Embora o processo de desenvolvimento do produto inclua outras actividades, para além das actividades específicas de projecto, como sejam os aspectos relacionados com o mercado, com a organização, com a viabilidade técnica e económica do projecto, com a equipa de projecto, com a gestão do projecto, com o processo de produção e com o lançamento de produto, a abordagem de Ulrich e Eppinger está mais vocacionada para a relação do produto com o utilizador e para a concepção do produto, do que para a relação com as soluções e tecnologias que irão realizar as funcionalidades pretendidas e satisfazer os requisitos especificados, e do que para os processos de fabrico que serão utilizados para construir os objectos que constituem as soluções para os problemas de projecto.

Nesse sentido, a fase de desenvolvimento do conceito (para a qual estão mais vocacionados e que consideram mais importante, porque comprometem as decisões das fases subsequentes [Ulrich *et al.*, 2008]) foi expandida nas actividades principais, a seguir indicadas, e que se representam esquematicamente na Figura 4.57:

- Identificação das Necessidades do Cliente;
- Estabelecimento das Especificações pretendidas;
- Geração de Conceitos;
- Selecção de Conceitos;
- Teste de Conceitos;
- Estabelecimento de Especificações Finais;
- Planeamento do Projecto;
- Análise Económica;
- Comparação com Produtos Concorrentes (*Benchmarking*);
- Construção e Teste de Modelos e Protótipos;

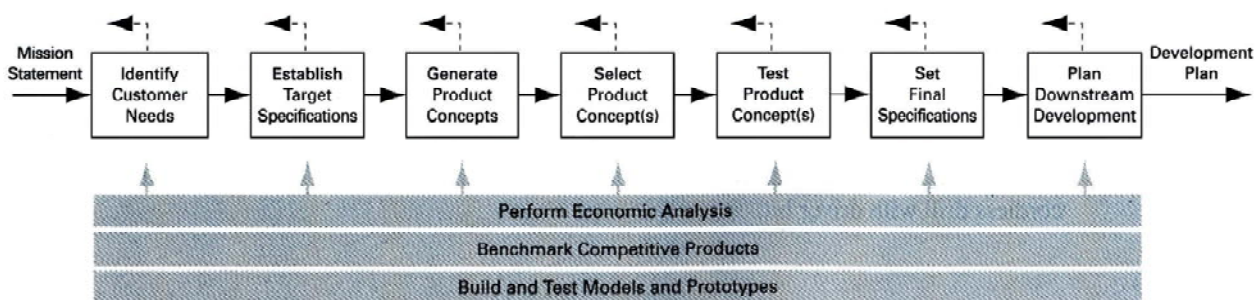


Figura 4.57 – Fase de desenvolvimento do conceito, expandida nas suas actividades principais, retirado de [Ulrich *et al.*, 2008].

4.2.23 Modelo de Dieter e Schmidt

O modelo apresentado por George E. Dieter e Linda C. Schmidt [Dieter *et al.*, 2009] para o processo de projecto tem por base o modelo de Morris Asimow, que foi um dos primeiros a descrever completamente e de forma pormenorizada o processo do projecto (que designou por morfologia de projecto), tendo a terminologia sido adaptada aos termos utilizados actualmente.

Segundo Dieter e Schmidt, a representação gráfica que adoptaram para o processo de projecto tem como objectivo relembrar a sequência lógica das actividades, que leva (*leads*) desde a Definição do Problema até ao Projecto de Pormenor. Essa representação gráfica encontra-se reproduzida na Figura 4.58, e inclui as 3 primeiras fases do processo de projecto, que são as fases de Projecto Conceptual (*Conceptual Design*), Projecto de Configuração (*Embodiment Design*) e Projecto de Pormenor (*Detail Design*), cuja correspondência no modelo de Morris Asimow é, respectivamente, a fase de Estudo de Viabilidade (*feasibility study phase*), a fase de Anteprojecto (*preliminary design*) e a fase de Projecto de Pormenor (*detailed design*).

Cada uma destas fases está dividida segundo o tipo de actividades que nela são desenvolvidas, e para cada tipo de actividade a desenvolver são indicados os métodos e ferramentas de projecto adequados para obter os respectivos resultados pretendidos.

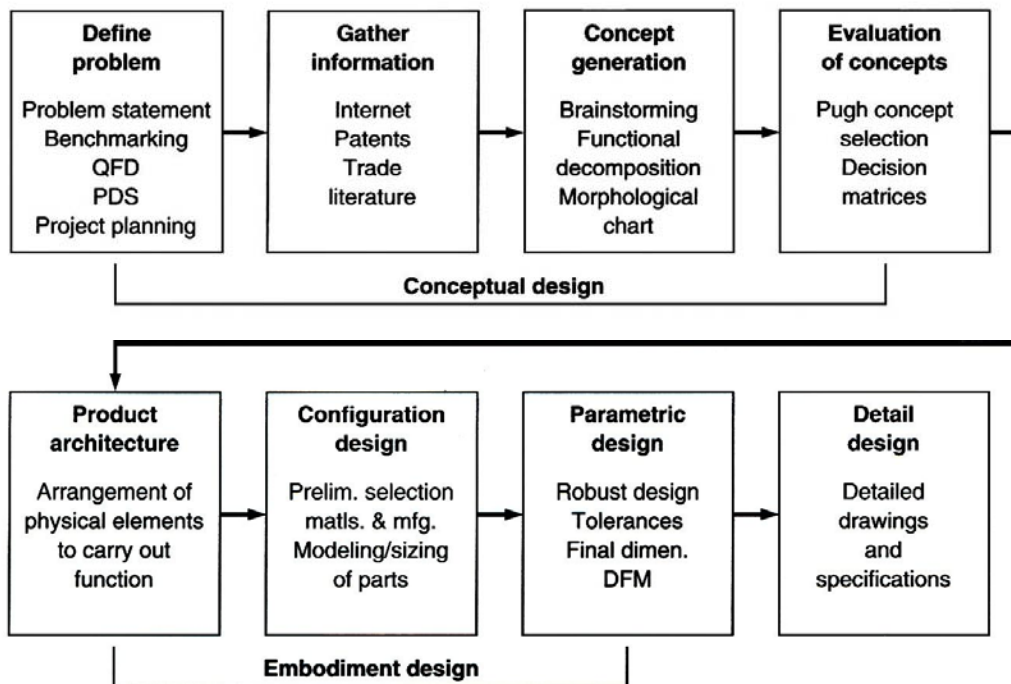


Figura 4.58 – As actividades de projecto que constituem as três primeiras fases do processo de projecto de engenharia, retirado de [Dieter *et al.*, 2009].

A **fase I**, que corresponde ao Projecto de Conceitos (*Conceptual Design*), inclui o desenvolvimento das actividades principais seguintes:

- Identificação das Necessidades do Cliente;
- Definição do Problema;
- Recolha de Informação;
- Conceptualização, Geração de Conceitos;
- Selecção de Conceitos;
- Refinamento das Especificações do Projecto do Produto (*Product Design Specifications PDS*);
- Revisão do Projecto.

A **fase II**, que corresponde ao Projecto de Configuração (*Embodiment Design*), inclui o desenvolvimento das actividades principais seguintes:

- Arquitectura do Produto;
- Projecto de Configuração das Peças e Componentes;
- Projecto Paramétrico das Peças.

A **fase III**, que corresponde ao Projecto de Pormenor (*Detail Design*), inclui o desenvolvimento das actividades principais seguintes:

- Desenho de Engenharia Pormenorizado;
- Teste de Verificação de Protótipos;
- Desenhos de Conjunto e Descrições de Montagem;
- Especificação de Produto Pormenorizada;
- Decisões relativamente a que partes do produto serão Produzidas internamente, quais serão Subcontratadas e quais serão Compradas no mercado;
- Estimativa de Custos Detalhada;
- Revisão ao Projecto Global.

Para além das fases acima indicadas, as quais são tratadas pormenorizadamente por Dieter e Schmidt, e que no modelo de Asimow correspondem às fases primárias do projecto, Dieter e Schmidt consideram que o Processo de Projecto inclui também as fases seguintes, que correspondem às fases relativas ao ciclo de produção e consumo no modelo de Asimow:

A **fase IV**, que corresponde ao Planeamento para Produção (*Planning for Manufacture*), a **fase V**, que corresponde ao Planeamento para Distribuição (*Planning for Distribution*), a

fase VI, que corresponde ao Planeamento para Utilização (*Planning for Use*) e a **fase VII**, que corresponde ao Planeamento para Retirada do Produto (*Planning for Retirement of the Product*).

Subjacente ao trabalho de Dieter e Schmidt está a ideia de que o projecto de engenharia é um processo complexo e um problema de projecto não é uma equação matemática para ser resolvida e otimizada (*engineering design is not a mathematical equation to be solved or optimized* [Dieter *et al.*, 2009]).

4.2.24 Modelo de Shirwaiker e Okudan

O modelo (*framework*) desenvolvido por Shirwaiker e Okudan [Shirwaiker *et al.*, 2007] para o processo de projecto, por eles denominado “*Synergistic Problem Solving Approach*”, consiste na integração da TRIZ na metodologia da TAP, com vista à rentabilização (*capitalize*) dos pontos fortes de ambas as teorias.

O modelo “*Synergistic Problem Solving Approach*” visa a obtenção de sinergias originadas pela combinação das capacidades (*capability*) de análise pormenorizada da TAP com as capacidades (*proWess*) da TRIZ na geração de ideias inovadoras, ao longo de todo o processo hierárquico da TAP e decomposição em zigue-zague entre os domínios funcional e físico.

Neste modelo, a TAP é usada para definir o problema sistematicamente e decompor (*breaking up*) os Requisitos Funcionais em elementos individuais de nível hierárquico mais baixo (básico); por sua vez, a TRIZ é usada para gerar soluções inovadoras para os problemas individuais e desenvolver os Parâmetros de Projecto que satisfazem os Requisitos Funcionais.

Este modelo encontra-se representado através do diagrama de fluxos, tal como mostrado na Figura 4.59:

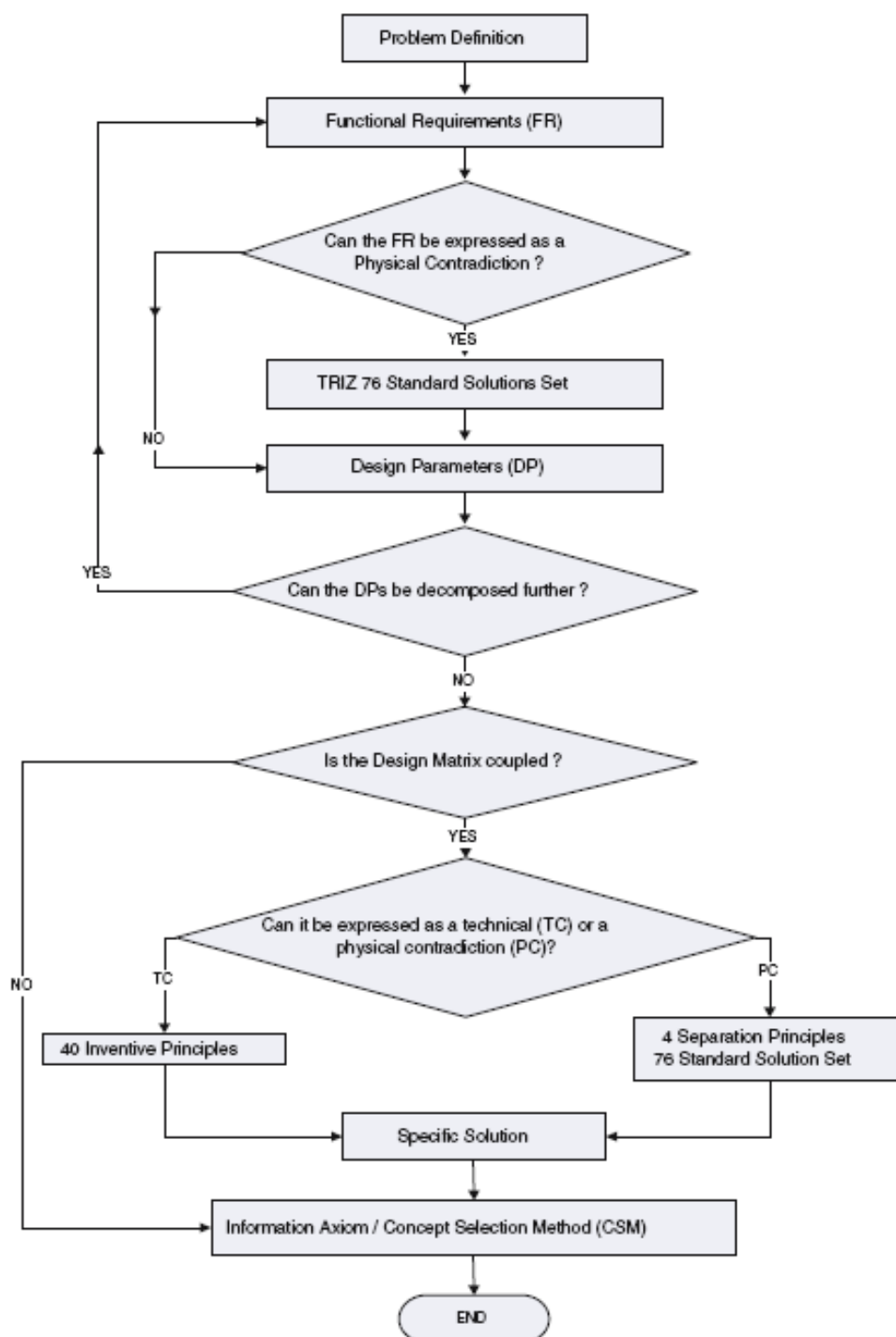


Figura 4.59 – Diagrama de fluxos para o modelo sinérgico de resolução de problemas, usando a TRIZ e a TAP, retirado de [Shirwaiker *et al.*, 2007].

A metodologia (*approach*) é aplicada através de um procedimento sistemático, passo-a-passo (*stepwise*), composto pelos sete passos seguidamente enunciados, começando com a definição do problema geral, usando a TAP, e terminando com a utilização da TRIZ, para geração de conceitos e desacoplamento da matriz de projecto, bem como para aplicação do

segundo axioma para selecção da solução óptima, no caso de existir mais do que um conceito potencial.

Passo 1: O problema básico é definido, utilizando a terminologia da TAP, ficando definidos os requisitos funcionais dos níveis mais altos da hierarquia.

Passo 2: Definem-se, no domínio físico, os parâmetros de projecto correspondentes a cada um dos requisitos funcionais, utilizando a TRIZ, segundo a qual pode ser utilizada a Matriz de Contradições para resolver contradições, técnicas ou físicas, dos requisitos funcionais ou, então, o problema poderá ser modelado através da metodologia substância-campo.

Passo 3: Neste passo, é feita a decomposição, em zigue-zague, dos requisitos funcionais e dos parâmetros de projecto correspondentes.

Passo 4: Criar uma hierarquia de requisitos funcionais e dos parâmetros de projecto, utilizando os passos 2 e 3, até já não ser possível decompor mais o problema.

Passo 5: Formular as equações de projecto, em cada nível da hierarquia, que relacionam cada requisito funcional com o parâmetro de projecto correspondente. As equações de projecto podem ser classificadas como sendo acopladas, desacopláveis ou desacopladas.

Passo 6: Aceitar os projectos cujas matrizes são desacopladas ou desacopláveis. Nos casos em que as matrizes são acopladas é possível utilizar os princípios de separação da TRIZ para obter matrizes desacopladas.

Passo 7: Aplicar o segundo axioma da TAP – Axioma da Informação – aos potenciais conceitos gerados pela TRIZ e seleccionar o projecto que tiver menor conteúdo de informação, ou menor complexidade.

4.2.25 Modelo de Derrick Tate

O modelo apresentado por Tate na sua tese de doutoramento resulta da abstracção e generalização do estudo de vários processos de projecto, em que foi utilizada a metodologia da Teoria Axiomática de Projecto [Tate, 1999].

Para Tate, o processo de projecto consiste numa colectânea de actividades distintas com pontos de início e final bem definidos (*clear starting and end points*). Cada uma das actividades consiste na transformação de entradas (*inputs*) em saídas (*outputs*). As actividades podem ser sequenciadas de diversas maneiras. Em cada processo de projecto específico (concreto), as actividades têm a sua sequência própria e única, dependendo do estado, do âmbito e dos objectivos do projecto em questão.

Na Figura 4.60, encontra-se reproduzida a representação gráfica adoptada por Tate para o seu modelo de projecto, onde se mostram as actividades e as ligações possíveis, formando o “*Design Process Roadmap*”.

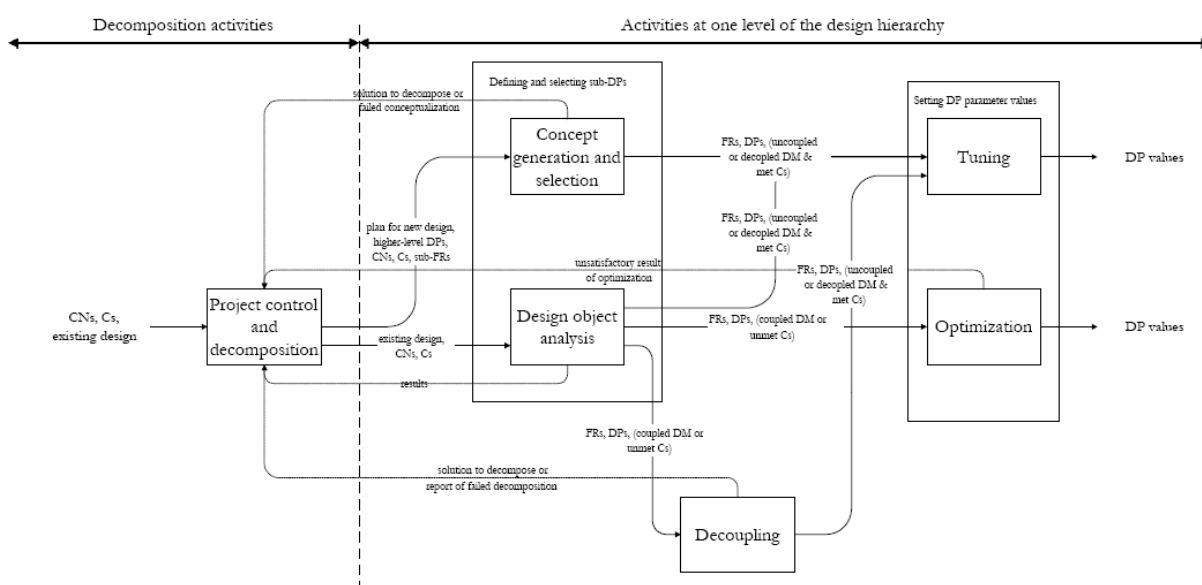


Figura 4.60 – O mapa do processo de projecto, retirado de [Tate, 1999].

O processo de projecto proposto por Tate é composto pelo conjunto de actividades seguinte:

- Controlo e Decomposição do Projecto (*project control and decomposition*);
- Análise do Objecto de Projecto (*design object analysis*);

- Geração de Conceitos e Análise (*concept generation and analysis*);
- Desacoplamento (*decoupling*);
- Optimização (*optimization*);
- Regulação (Afinação, Personalização, Sintonização) (*tuning*).

O processo de projecto inicia-se com o “Controlo de Actividades de Projecto”, representado no lado esquerdo da Figura 4.60, cujas entradas (*inputs*) são as necessidades do cliente, os constrangimentos impostos, tanto pelo cliente como pela envolvente externa (*environment*) e as eventuais soluções existentes.

No lado direito da Figura 4.60, encontra-se representado o final do processo, cujas últimas actividades são a “Optimização” ou a “Regulação”, consistindo as saídas nas especificações detalhadas da solução em termos de objecto de projecto e da sua implementação, através de desenhos, modelos e procedimentos para produção.

As actividades que constituem o processo de projecto proposto por Tate compreendem os aspectos seguintes:

- **Controlo e Decomposição do Projecto** (*project control and decomposition*):

Nesta actividade, é estabelecido o âmbito e o controlo do projecto, consistindo no planeamento do projecto, incluindo orçamentos e prazos.

As entradas desta actividade (*inputs*) são as necessidades do cliente, os constrangimentos e, caso exista, uma representação do objecto de projecto existente. Como saídas desta actividade, temos os objectivos do projecto, os constrangimentos e as instruções para conduzir a sequência de actividades que constituirão o projecto.

- **Análise do Objecto de Projecto** (*design object analysis*):

Esta actividade desempenha uma acção central no processo de projecto, na medida em que avalia as questões de funcionalidade e viabilidade do objecto de projecto. Nesta actividade, poderá ser seguida uma abordagem específica, tal como a Teoria Axiomática,

[Suh, 1990], a Análise Funcional (*functional analysis – value engineering*) [Miles, 1972], ou a TRIZ [Altshuller, 1995].

Esta actividade tem duas entradas (*inputs*), que são: a compreensão das necessidades do cliente e a compreensão do projecto existente a analisar. A saída desta actividade é uma descrição do projecto em termos das suas funções, constrangimentos, implementação física e independência (ou dependência) funcional.

- **Geração de Conceitos e Análise** (*concept generation and analysis*):

Esta actividade de conceptualização realiza as actividades de desenvolvimento de conceitos que satisfazem as especificações estabelecidas na fase de controlo e decomposição do projecto e decide quais desses conceitos serão implementados.

As entradas desta actividade (*inputs*) são o conjunto de Requisitos Funcionais (FRs) e Constrangimentos (Cs). As saídas desta actividade são o conjunto de Requisitos Funcionais (FRs), os Constrangimentos (Cs), os parâmetros de projecto (DPs) e as Matrizes de Projecto (DMs), que mostram as dependências funcionais do objecto de projecto.

- **Desacoplamento** (*decoupling*):

O desacoplamento é uma das actividades passíveis de serem utilizadas para resolução de conflitos (contradições), nos casos em que o objecto de projecto existente não satisfaz o axioma da independência da Teoria Axiomática. A outra possibilidade será através da optimização, conforme se descreve a seguir.

A entrada desta actividade é uma descrição, que pode ser de um conceito de projecto que é acoplado, não realizando as suas funções satisfatoriamente, ou pode ser de um objecto de projecto, que não satisfaz os seus constrangimentos, sendo uma solução não aceitável.

A saída preferível desta actividade seria uma descrição de um objecto de projecto, ou de um conceito, que seja funcionalmente desacoplado e que cumpra todos os seus constrangimentos. A partir daqui, o projectista decomporá o projecto em subprojectos.

- **Optimização** (*optimization*):

O objectivo da actividade de optimização consiste em obter o melhor desempenho possível de um projecto que não satisfaz o Axioma da Independência. A actividade de optimização torna-se necessária quando são detectadas deficiências num projecto existente, mas em que é apenas possível realizar pequenas modificações nalguns valores dos parâmetros de projecto (DPs).

A entrada desta actividade é um projecto não aceitável (que não seja funcionalmente independente ou que não cumpra os seus constrangimentos).

As saídas desta actividade são constituídas pelo conjunto de Requisitos Funcionais (FRs), os Constrangimentos (Cs), os Parâmetros de Projecto (DPs) e as Matrizes de Projecto (DMs), que estão definidos nos seus valores optimizados.

- **Regulação** (Afinação, Personalização, Sintonização) (*tuning*)

O processo de regulação (*tuning*) é realizado quando no final do processo de projecto se verifica que todos os Requisitos Funcionais (FRs) são realizados, podendo no entanto ser melhorado o seu funcionamento através da regulação dos parâmetros de funcionamento.

As entradas da actividade de regulação são o conjunto dos Requisitos Funcionais (FRs), os Constrangimentos (Cs), os Parâmetros de Projecto (DPs) e as Matrizes de Projecto (DMs), desacopladas ou desacopláveis.

As saídas da actividade de regulação são o conjunto de Requisitos Funcionais (FRs), os Constrangimentos (Cs) e os Parâmetros de Projecto (DPs), regulados (ajustados) para proporcionarem o funcionamento óptimo do objecto de projecto.

O percurso que liga o início ao final do processo de projecto é da responsabilidade da equipa de projectistas, cujo objectivo é atingir o final da actividade de regulação o mais rapidamente possível.

A escolha de realizar uma actividade em detrimento de outra, se realizada com sucesso, permitirá alcançar os objectivos em menos tempo e com melhores resultados. Por exemplo, a escolha de desacoplar um projecto, em vez de realizar uma optimização, se tal for possível,

proporcionará a implementação de um projecto que satisfaz o Axioma da Independência, enquanto a optimização envolve processos de iteração, normalmente, mais demorados.

4.2.26 Modelo de Bulent Gumus

O modelo do processo de projecto desenvolvido por Bulent Gumus foi apresentado, inicialmente, na sua tese de doutoramento, com a designação de “*Axiomatic Product Development Lifecycle - APDL*” [Gumus, 2005] e, posteriormente, num artigo (*paper*) onde é feito um resumo da sua tese, passando o modelo a ser designado por “*Transdisciplinary Product Development Lifecycle - TPDL*” [Gumus *et al.*, 2008].

Este modelo tem por base a Teoria Axiomática, utilizando a mesma lógica e pensamento científico, para capturar, analisar e gerir o conhecimento (informação) envolvido e gerado durante o processo de desenvolvimento do produto, tendo em consideração todo o seu ciclo de vida, podendo o produto ser um objecto físico, um sistema, um serviço, um processo ou uma organização.

Segundo Bulent Gumus, a Teoria Axiomática oferece uma estrutura robusta e um pensamento sistemático para apoiar as actividades de projecto, no entanto, não contempla a totalidade do ciclo de vida do produto, nem reflecte o carácter iterativo do projecto.

Assim, no desenvolvimento do seu modelo, Gumus acrescentou mais um domínio à teoria axiomática de projecto, que seria o Domínio de Teste, correspondente à realização de testes com protótipos e à incorporação dos resultados na elaboração do projecto, e quatro novos vectores de características, correspondendo à Entrada de Constrangimentos (IC) (*input constraint*), aos Componentes do Sistema (SC) (*system component*), à Envolve do Componente de Teste (CTC) (*component test case*) e à Envolve do Teste Funcional (FTC) (*functional test case*) para gerir melhor a Entrada de Constrangimentos (*input constraints*) e os Componentes do Sistema (*system components*) (SCs), ficando o ambiente de projecto com a configuração representada na Figura 4.61:

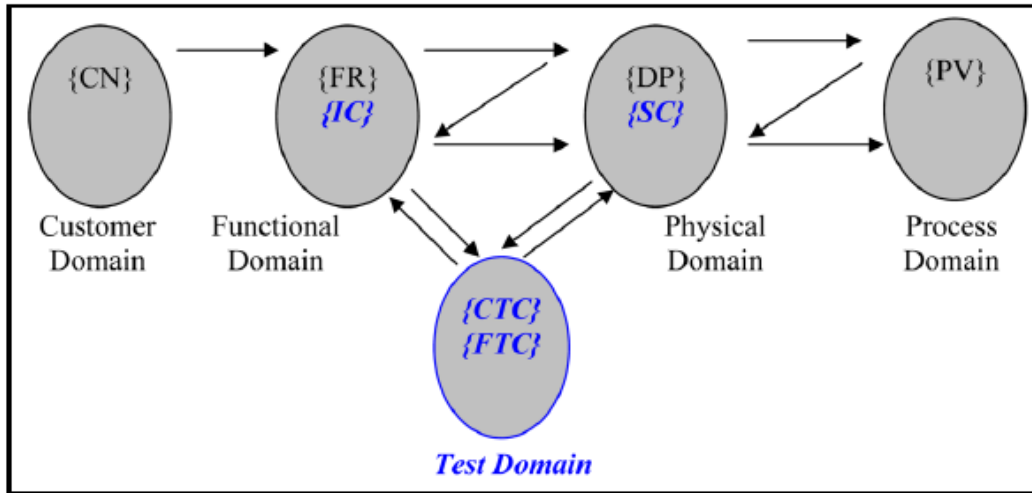


Figura 4.61 – Domínios e Vectores de características do Desenvolvimento Transdisciplinar do Ciclo de Vida do Projecto, retirado de [Gumus, 2008].

Juntamente com essa representação do universo (ambiente) de projecto, Gumus apresenta também um modelo para guiar os projectistas na execução das actividades de projecto, ao longo do processo de desenvolvimento de produto, com uma configuração em “V”, conforme se representa na Figura 4.62, à semelhança do modelo apresentado por Suh, como o Modelo em “V”. Este modelo havia sido inicialmente proposto por Basem El-Haik, com o objectivo de melhorar a qualidade de sistemas mecânicos, baseados na Teoria Axiomática [Suh, 2001].

A concepção do produto é elaborada numa sequência “*top-down*”, durante a qual são definidos os requisitos funcionais, as soluções de projecto e os componentes do sistema, assim como as suas inter-relações e hierarquias.

O dimensionamento e os procedimentos para o processo de produção são desenvolvidos numa sequência “*bottom-up*”, durante a qual são definidas as variáveis de processo e os casos de testes (envolvente), assim como as suas inter-relações e hierarquias.

O modelo de Gumus ajuda a capturar e apresentar o conhecimento envolvido no processo de projecto, tanto numa visão global como numa perspectiva pormenorizada, incluindo as relações existentes entre os quatro domínios do processo de projecto e os oito vectores de características.

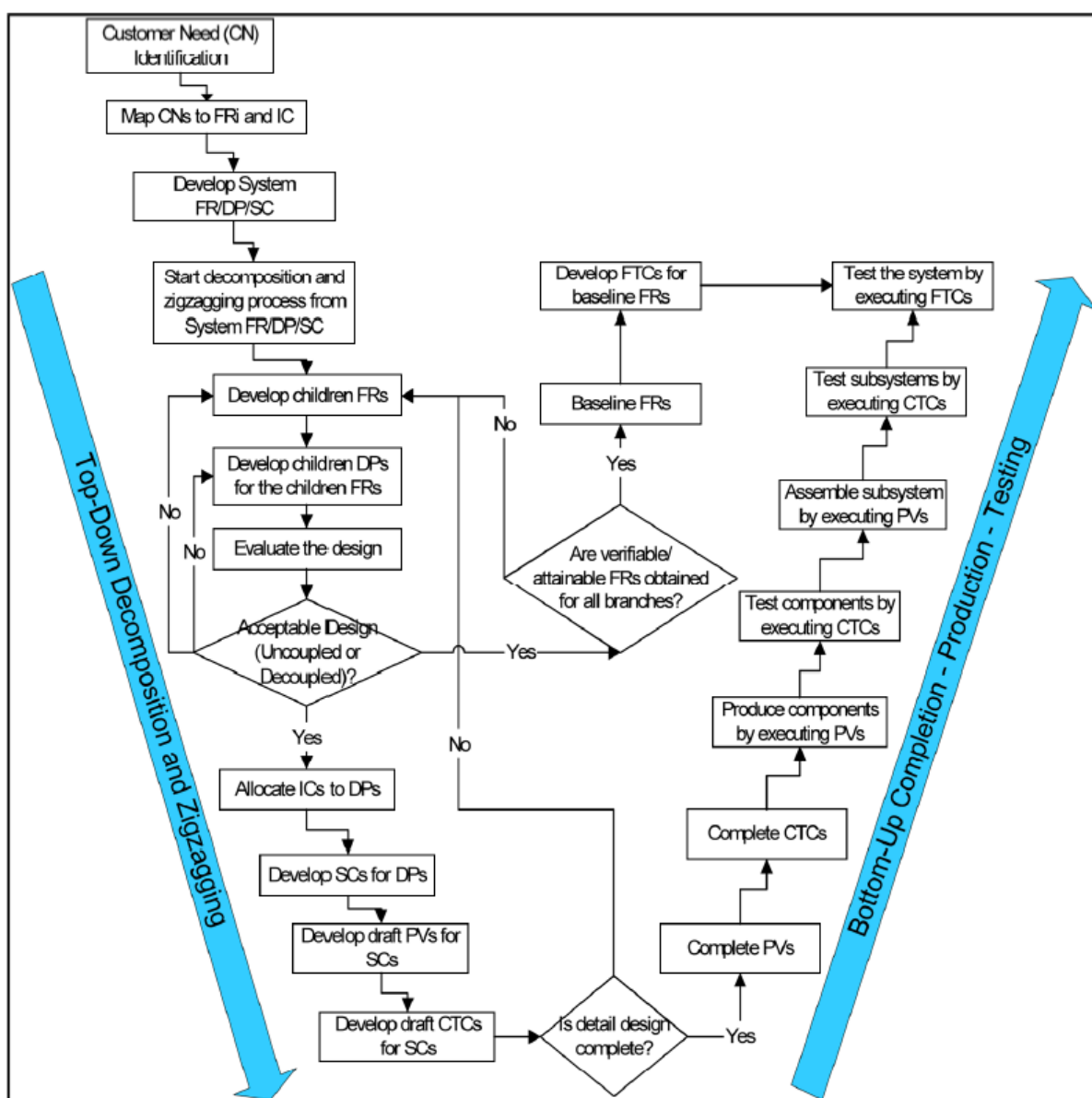


Figura 4.62 – Sequência de Actividades que constituem o processo de Desenvolvimento Transdisciplinar do Ciclo de Vida do Projecto, retirado de [Gumus, 2008].

Tal como a Teoria Axiomática de Projecto, em vez de delegar as decisões de projecto na intuição do projectista e registá-las em documentação não estruturada, também o modelo de Gumus, o TPDL, conduz a uma consideração cuidada das interações funcionais, capturando o conhecimento e as relações existentes entre as entidades dos diferentes domínios, numa forma bastante estruturada.

Este aspecto facilita a necessária comunicação de informação entre os vários elementos da equipa de projecto, facilitando igualmente a utilização de outras ferramentas de projecto, tais como as ferramentas da TRIZ, o Projecto Robusto (*Robust Design*), a Matriz da Estrutura de Projecto (DSM), a Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA), e outras (*and so forth*).

O TPDL procura, assim, melhorar a qualidade do projecto, facilitar a gestão de requisitos, de modificações e da execução do projecto (realização da obra) (*project*), auxiliar a comunicação entre os vários interessados (*stakeholders*), assim como reduzir o tempo de desenvolvimento e os custos de todo o projecto.

4.3 Modelos Descritivos

Os Modelos de Projecto classificados como Descritivos provêm (*emanated*) da experiência de cada projectista individual e de estudos efectuados (*carried out on*) sobre “como os projectos foram criados”, ou seja, qual o processo, as estratégias e os métodos de resolução de problemas de projecto que foram utilizados.

Estes modelos enfatizam, normalmente, a importância de gerar um conceito para a solução numa fase inicial do processo, reflectindo, assim, a natureza focada na solução do pensamento de projecto (*solution focused nature of design thinking*) [Cross, 2008].

A solução original passa por um processo de análise, avaliação, aperfeiçoamento (*refinement*), correcção e reparação (*patching and repair*) e desenvolvimento. Trata-se de um processo heurístico, no qual são utilizadas experiências passadas, linhas de orientação (*general guidelines*) e regras de boas práticas (*rules of thumb*), que levam o projectista a acreditar (*hopes*) que está na direcção certa, mas que não garantem o sucesso absoluto.

Segundo Finger e Dixon, em “*A review of research in mechanical engineering design*” [Finger *et al.*, 1989], a investigação na área deste tipo de modelos tem sido desenvolvida segundo duas vertentes principais. Numa delas, a investigação baseia-se em técnicas de inteligência artificial, envolvendo análises de protocolos e recolha de dados acerca do modo como os projectistas projectam.

Na outra vertente, a investigação é baseada em modelos do processo cognitivo e tem como objectivo a construção de modelos cognitivos com base em computadores (*built computer-based cognitive models*), que descrevem, estimulam e emulam o processo mental e as competências (*skills*) utilizadas pelos projectistas enquanto criam um projecto.

4.3.1 Modelo de March

O modelo proposto por L. March, apresentado por [Evbuomwan *et al.*, 1996], [Cross, 2008] e [Birmingham, 1997], reconhece a natureza focada na solução do pensamento de projecto (*recognizes the solution-focused nature of the design thinking*) e tem por base os três modos de racionalidade (*reasoning*), que são a dedução (*deduction*), a indução (*induction*) e a abdução (*abduction production*), aos quais correspondem, no modelo de March, as seguintes tarefas:

- 1) A criação de uma composição nova (*novel composition*) associada à racionalidade produtiva (*accomplished by productive reasoning*);
- 2) O prognóstico das características de desempenho (*the prediction of performance characteristics*) associado à racionalidade dedutiva (*accomplished by deductive reasoning*);
- 3) A acumulação de noções habituais e de valores estabelecidos, bem como a tipologia evolvente (*the accumulation of habitual notions and established values, and evolving typology*), associados à racionalidade indutiva (*accomplished by inductive reasoning*);

Resumidamente, a produção (abdução) cria, a dedução prediz e a indução avalia.

Neste modelo, o processo de projecto inicia-se com a primeira fase de racionalidade produtiva, a qual desenha uma declaração preliminar (*preliminary statement*) das características pretendidas e algumas pressuposições acerca da solução, para produzir a primeira proposta de projecto.

A partir das suposições e da teoria estabelecidas, a primeira proposta de projecto é então analisada dedutivamente para predizer as características de desempenho expectáveis.

A partir da predição das características de desempenho, é então possível avaliar indutivamente as possibilidades de projecto ou suposições seguintes.

Este ciclo é repetido, começando por uma declaração de características revista, dando origem a um refinamento seguinte e/ou modificações no Projecto proposto.

Na Figura 4.63, encontra-se representado o modelo acima descrito, conhecido como modelo PDI (produção/dedução/indução).

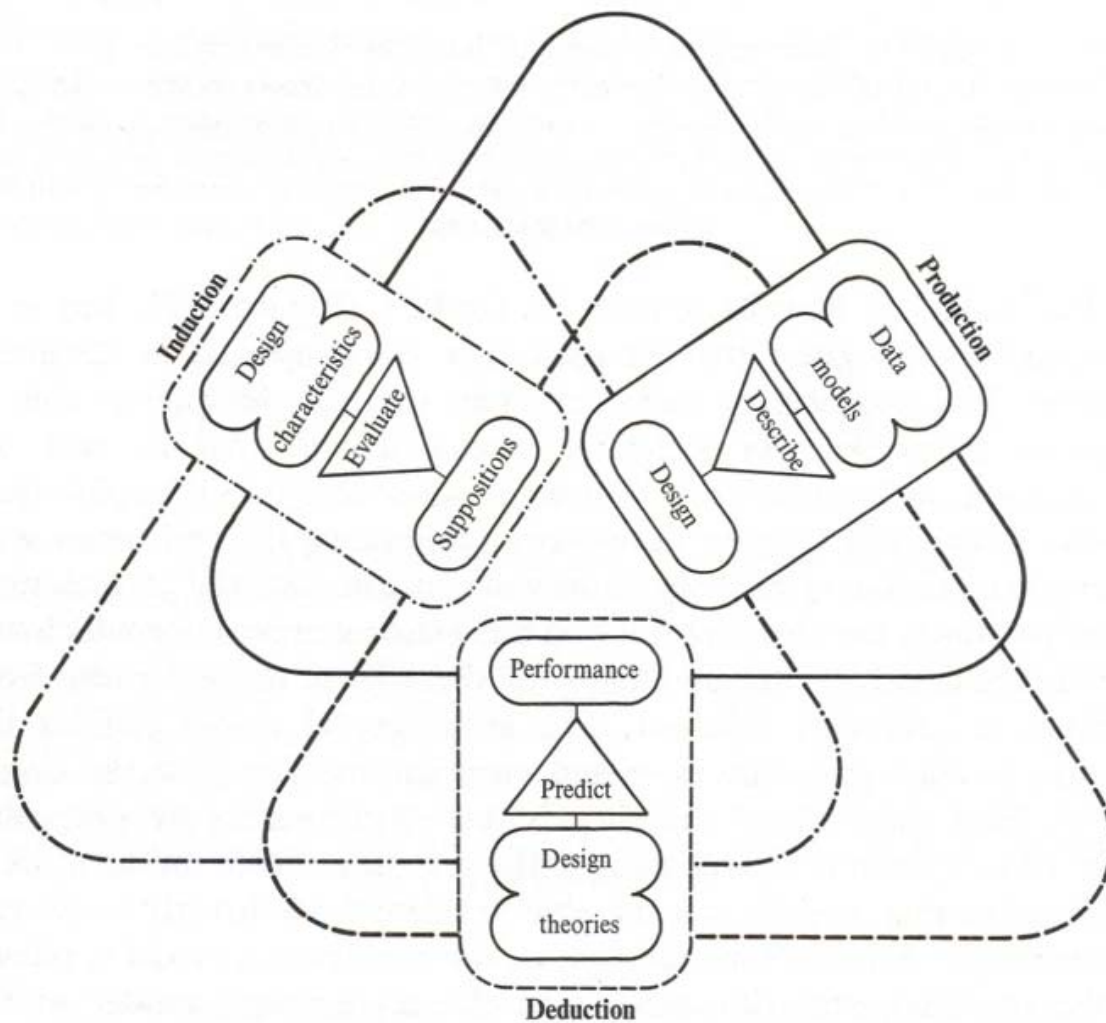


Figura 4.63 – Diagrama do modelo PDI (produção/dedução/indução), apresentado por March para o processo de projecto, retirado de [Birmingham, 1997].

4.3.2 Modelo de J. Darke

O modelo proposto por Jane Darke [Darke, 1979] surge como uma extensão do conceito apresentado por Hillier, que apresentou a ideia de um “Modelo Conjectura-Análise”, que reflecte o facto de o projectista dever usar conhecimentos e experiências passadas para influenciar a natureza da solução, utilizando resultados de investigações na área da psicologia e introduzindo o “gerador-primário” (*primary-generator*) [Lawson, 2006].

Darke designou o modelo como “*Generator-Conjecture-Analysis*”, cuja representação simbólica se encontra na Figura 4.64:

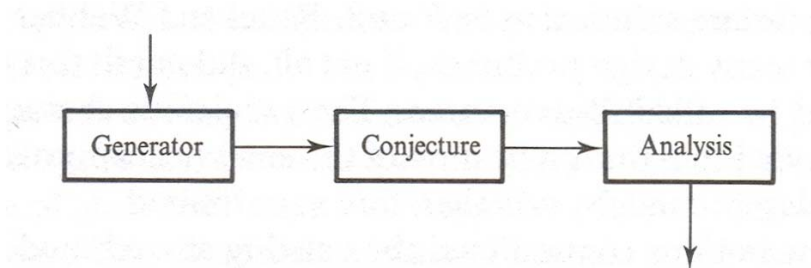


Figura 4.64 – Diagrama do modelo para o processo de projecto, apresentado por Darke, retirado de [Birmingham, 1997].

O termo “*Primary-Generator*” descreve uma definição simplificada do problema, por ela encontrada, correspondendo à prática utilizada por projectistas nas fases iniciais do projecto para estimular a conjectura de possíveis soluções.

A base deste modelo é a suposição de que o projectista, quando enfrenta um problema complexo, não começa com uma lista exaustiva, completa e explícita dos factores a considerar. Pelo contrário, (*instead*) a variedade de potenciais soluções é reduzida à menor classe que é cognitivamente controlável (*manageable*). Para isso, o projectista fixa-se num objectivo particular, ou num pequeno grupo de objectivos, regra geral, fortemente valorizados e auto-impostos (*usually strongly valued and self-imposed*), por razões que assentam na avaliação subjectiva (*subjective judgement*), em vez de ser alcançado por processos de lógica [Birmingham *et al.*, 1997].

Estes aspectos principais (*major aims*) são conhecidos como “Geradores Primários” (*primary generators*) e são o que faz crescer (*give rise*) uma solução, ou uma conjectura, para apresentar como proposta inicial.

Isto faz com que seja possível esclarecer os requisitos pormenorizadamente (clarificar e detalhar requisitos (*clarify the detailed requirements*)), à medida que cada conjectura é testada através de um processo de análise, para ver em que medida os objectivos são atingidos (as aspirações são cumpridas (*how well the aims are met*)).

A abordagem (*view*) seguida por este modelo reflecte a prática seguida no projecto de arquitectura, na qual o projectista utiliza potenciais soluções, nos estágios iniciais do projecto, para obter do cliente mais dados do problema e mais informação acerca das suas preferências.

4.3.3 Modelo de Bryan Lawson

Para Bryan Lawson, o projecto pode ser visto como sendo uma “transformação entre áreas de conhecimento”, com necessidades e requisitos do problema, por um lado, e possíveis soluções, por outro, conforme representado na Figura 4.65:

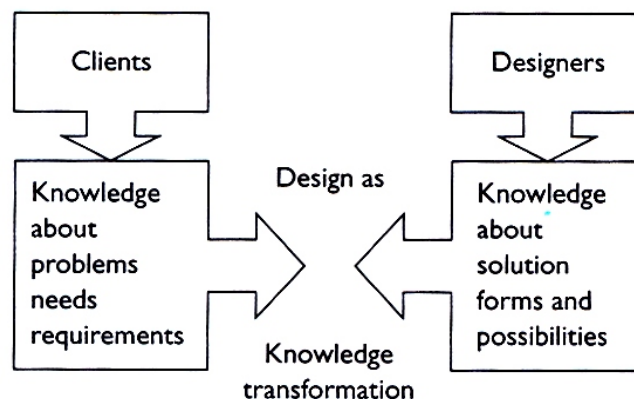


Figura 4.65 – O projecto como uma transformação entre áreas de conhecimento, retirado de [Lawson, 2007].

Relativamente ao processo de projecto, Lawson considera que pode ser decomposto nas quatro fases expressas no “*Architectural Practice and Management Handbook*” do RIBA (*Royal Institute of British Architects*), a seguir descritas e representadas na Figura 4.66. No entanto, entende que essas fases não têm de ser desenvolvidas obrigatoriamente na sequência representada, uma vez que, no caso do projecto de arquitectura, muitas vezes, os clientes expressam as suas solicitações através de exemplos de soluções existentes [Lawson, 2008].

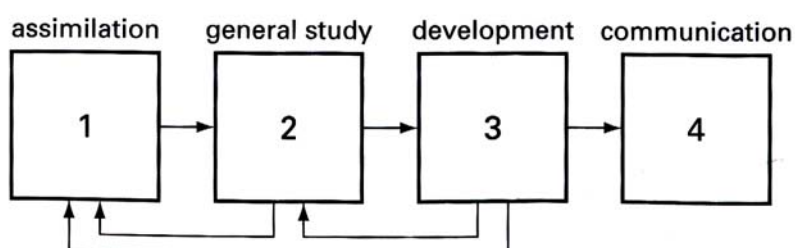


Figura 4.66 – Fases do processo de projecto, segundo RIBA, retirado de [Lawson, 2008].

Fase 1 – Assimilação – corresponde à acumulação e ordenação da informação, geral e específica, relativa ao problema em questão;

Fase 2 – Estudo Geral – corresponde à investigação da natureza do problema e à investigação de possíveis soluções ou meios de solução;

Fase 3 – Desenvolvimento – corresponde ao desenvolvimento e refinamento de uma ou mais tentativas de solução seleccionadas durante a fase 2;

Fase 4 – Comunicação – corresponde à comunicação de uma ou mais soluções às pessoas que pertencem à equipa de projecto e às pessoas exteriores à equipa de projecto.

Bryan Lawson refere-se ao trabalho de Tom Markus e Tom Maver para introduzir as actividades que têm lugar ao longo das várias fases do processo de projecto, neste caso com diferentes designações, conforme representado na Figura 4.67.

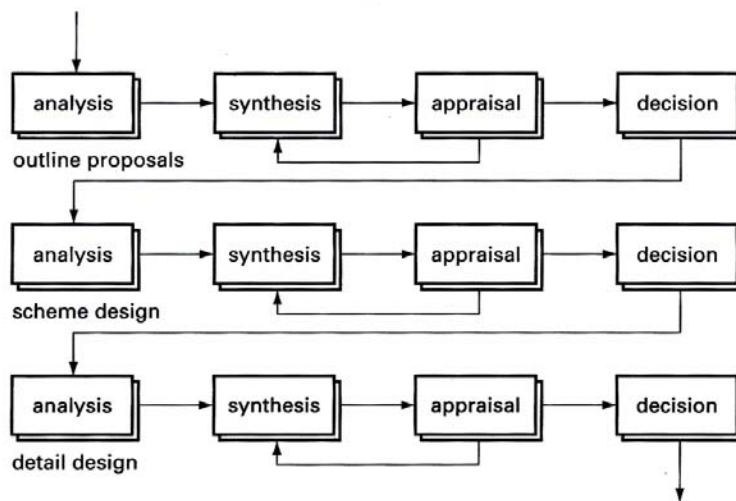


Figura 4.67 – Actividades desenvolvidas ao longo das fases do processo de projecto, segundo Tom Markus e Tom Maver, retirado de [Lawson, 2008].

Para Lawson, as actividades de Análise, Síntese e Avaliação estão interligadas no ciclo iterativo do processo de projecto, representado na Figura 4.68, sem contudo existir uma sequência rígida.

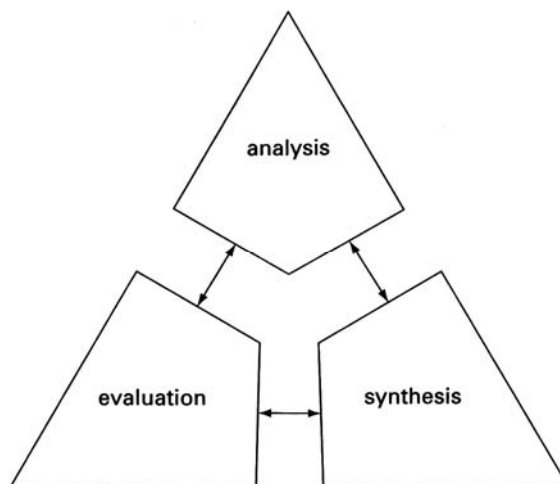


Figura 4.68 – Ciclo iterativo do processo de projecto, retirado de [Lawson, 2008].

Como conclusão final, Lawson propõe que o processo de projecto seja visto como uma negociação entre o problema e a solução através das três actividades de análise, síntese e avaliação, tal como se encontra representado na Figura 4.69, onde, deliberadamente, não foram indicados pontos de início ou de final, nem fluxos de sequência de actividades.

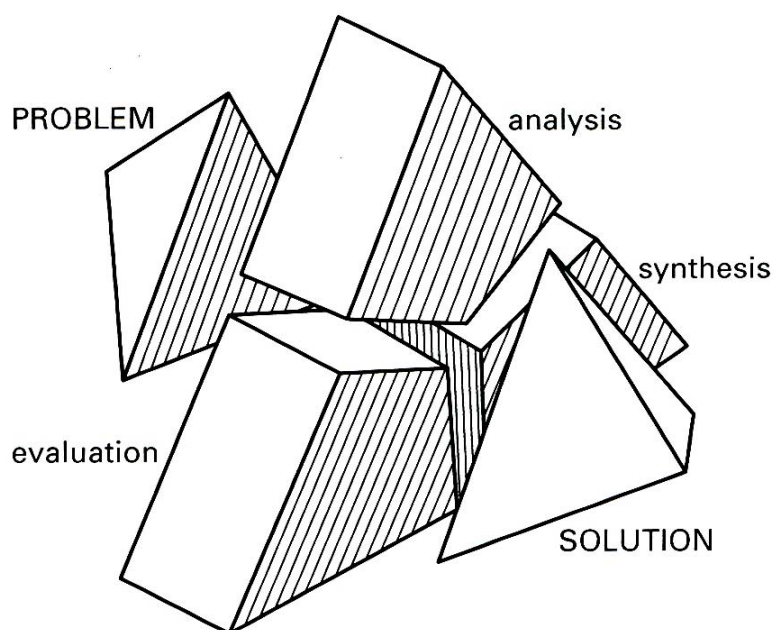


Figura 4.69 – O processo negociado inerente ao processo de projecto, retirado de [Lawson, 2008].

4.3.4 Modelo de Vinod Goel

Vocacionado para a análise dos processos cognitivos, Goel considera a actividade de projecto como o ambiente ideal para estudar a actividade simbólica humana, dada a sua riqueza e diversidade de utilização de sistemas simbólicos associados aos processos cognitivos [Goel, 1995].

A sua representação do processo de projecto, conforme ilustrado na Figura 4.70, é utilizada para fazer a correlação entre os sistemas de comunicação – simbologias – (Symbol Systems) e os processos cognitivos, ao longo das fases do projecto.

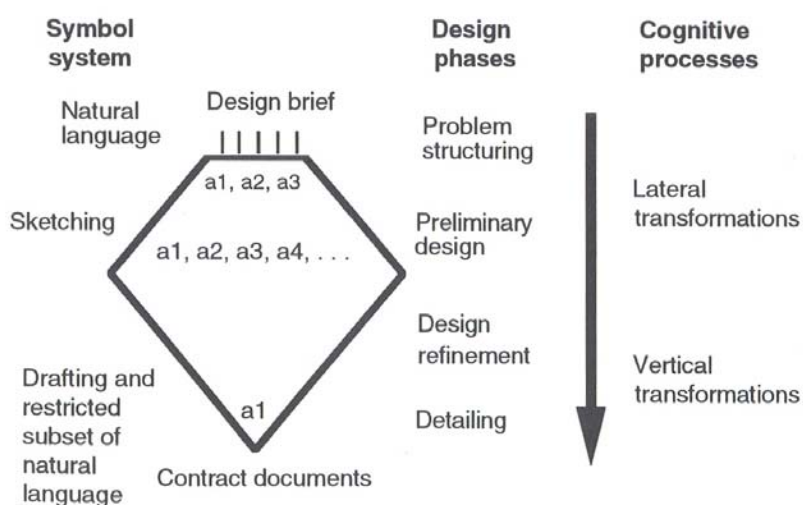


Figura 4.70 – Representação do processo de projecto e correlação entre os sistemas de simbologias e os correspondentes processos cognitivos, aplicáveis em cada uma das fases do processo de projecto, retirado de [Goel, 1995].

Neste contexto, Goel define a fase de “Estruturação do Problema” como sendo o processo de recolha de informação da memória de longo prazo e da memória externa, para utilizar na construção do espaço do problema, isto é, na definição das especificações do problema, considerando a informação num nível de abstracção elevado e tomando poucas decisões que possam comprometer o desenvolvimento futuro do projecto.

Na fase de “Anteprojecto” (*preliminary design*), são geradas e exploradas soluções alternativas, que emergem de escassas ideias essenciais e sendo, normalmente, soluções que o projectista já tinha encontrado para outros problemas anteriores. Este procedimento envolve transformações laterais ao nível cognitivo, alargando o espaço do problema.

As fases de “Refinamento” e “Pormenor” (*Design Refinement; Detailing*) são mais estruturadas e controladas, sendo nestas fases fixadas as soluções seleccionadas e propagadas para todo o espaço de projecto. Estas fases caracterizam-se pela natureza concreta da informação, com um elevado grau de comprometimento, envolvendo transformações verticais ao nível cognitivo, que tendem a estreitar o espaço do problema.

Na fase de estruturação do problema, o sistema de simbologia mais proeminente é a linguagem natural, ao passo que na fase de projecto preliminar, ou anteprojecto, são os

esboços (*sketching*) que dominam. Nesta fase, o espaço do problema expande-se através geração de várias soluções alternativas (a1, a2, a3, ...) que depois convergem para a escolha da solução final.

À medida que o projecto se vai tornando mais definido e mais pormenorizado, as formas de esboços vão-se tornando desenhos mais rigorosos e mais concretos, até atingirem a definição completa dos objectos.

As simbologias (*symbol systems*) utilizadas pelos projectistas, não só denotam propriedades espaciais e não espaciais mas, também, exemplificam e expressam propriedades tais como o tamanho relativo, a forma, a localização, a elegância, a rigidez e a confiança [Goel, 1995].

A reprodução destas propriedades na representação da realidade (*world*) permite que o processo cognitivo as trate directamente, em vez de ter que construir um novo modelo mental e ter que descodificar esse novo sistema simbólico, o que alivia o sistema cognitivo, permitindo-lhe processar, directamente, essas propriedades.

4.3.5 Modelo de E. Matchett

O modelo proposto por Matchett, apresentado por [Jones, 1970] e [Evbuomwan *et al.*, 1996], também conhecido como o Método Fundamental de Projecto (*fundamental design method – FDM*), tem como objectivo “permitir ao projectista reconhecer e gerir os modelos dos seus pensamentos e relacioná-los mais directamente com todos os aspectos de uma situação de projecto” (*to enable a designer to perceive and control the pattern of his/her thoughts and to relate this pattern more closely to all aspects of a design situation*).

A abordagem adoptada por Matchett é construída com base nos cinco modelos de pensamento seguintes:

- 1) Pensar com Estratégias definidas como princípios (*outline strategies*), cuja ideia é:
 - a) Ser capaz de decidir previamente qual a estratégia que será adoptada no processo de projecto;
 - b) Ser capaz de comparar o que foi alcançado no projecto e o que estava planeado;

c) Ser capaz de produzir estratégias para as estratégias de produção.

2) Pensar em Planos Paralelos.

Consiste na observação dos próprios pensamentos e das próprias acções, assim como na observação dos pensamentos e acções de colegas de projecto durante o processo de projectar, focando a atenção no padrão de pensamento aquando da execução do projecto.

3) Pensar em Diversas Perspectivas

Aqui o esforço é direccionado para a solução do problema de projecto, em vez de ser direccionado para o processo de encontrar essa solução.

4) Pensar com Conceitos

Consiste em imaginar ou desenhar modelos geométricos para permitir ao projectista reajustar as *checklists* do *Fundamental Design Method (FDM)* aos padrões das suas memórias e pensamentos. O propósito principal deste procedimento consiste em proporcionar ao projectista um modelo memorável da relação entre o problema de projecto, o processo de projecto e a solução.

5) Pensar com Elementos Básicos

Este modo de pensamento é o mais racional destes cinco modos de pensamento. A utilização de elementos básicos permite ao projectista conhecer o grande número de acções alternativas de que dispõe em cada ponto de decisão. Estes elementos básicos são considerados nos sete grupos seguintes:

a) Opções de Projecto;

b) Opções de Avaliação e Decisão;

- c) Opções Estratégicas;
- d) Opções Táticas;
- e) Opções de Inter-relações;
- f) Opções de Obstáculos (Constrangimentos);
- g) Opções de Conceitos.

A primeira ronda do processo de projectar é destinada a gerar várias alternativas de projecto (soluções). As acções aqui envolvidas pretendem estabelecer como cada uma das partes do projecto pode ser eliminada, combinada, normalizada, transferida, modificada, ou simplificada.

A segunda ronda destina-se a garantir que todas as modificações introduzidas são compatíveis umas com as outras e com todas as necessidades.

Na utilização do *Fundamental Design Method (FDM)* é recomendado o procedimento seguinte:

- 1) Estudar a situação do projecto;
- 2) Identificar provisoriamente as necessidades de projecto a satisfazer;
- 3) Identificar as necessidades funcionais primárias (ou seja, as necessidades que, caso não sejam devidamente satisfeitas, implicam que o completo cumprimento das restantes necessidades deixe de fazer sentido);
- 4) Explorar os princípios alternativos, até ao ponto de poder ser estabelecido um meio de satisfazer as necessidades primárias;
- 5) Completar os contornos de um projecto capaz de satisfazer ambas as necessidades, primárias e secundárias;
- 6) Rever a eficiência funcional do projecto (*functional effectiveness of this design*);
- 7) Rever os materiais e o trabalho contidos nos elementos produzidos, assim como a qualidade dos componentes.

A representação gráfica proposta por Matchett encontra-se reproduzida a na Figura 4.71:

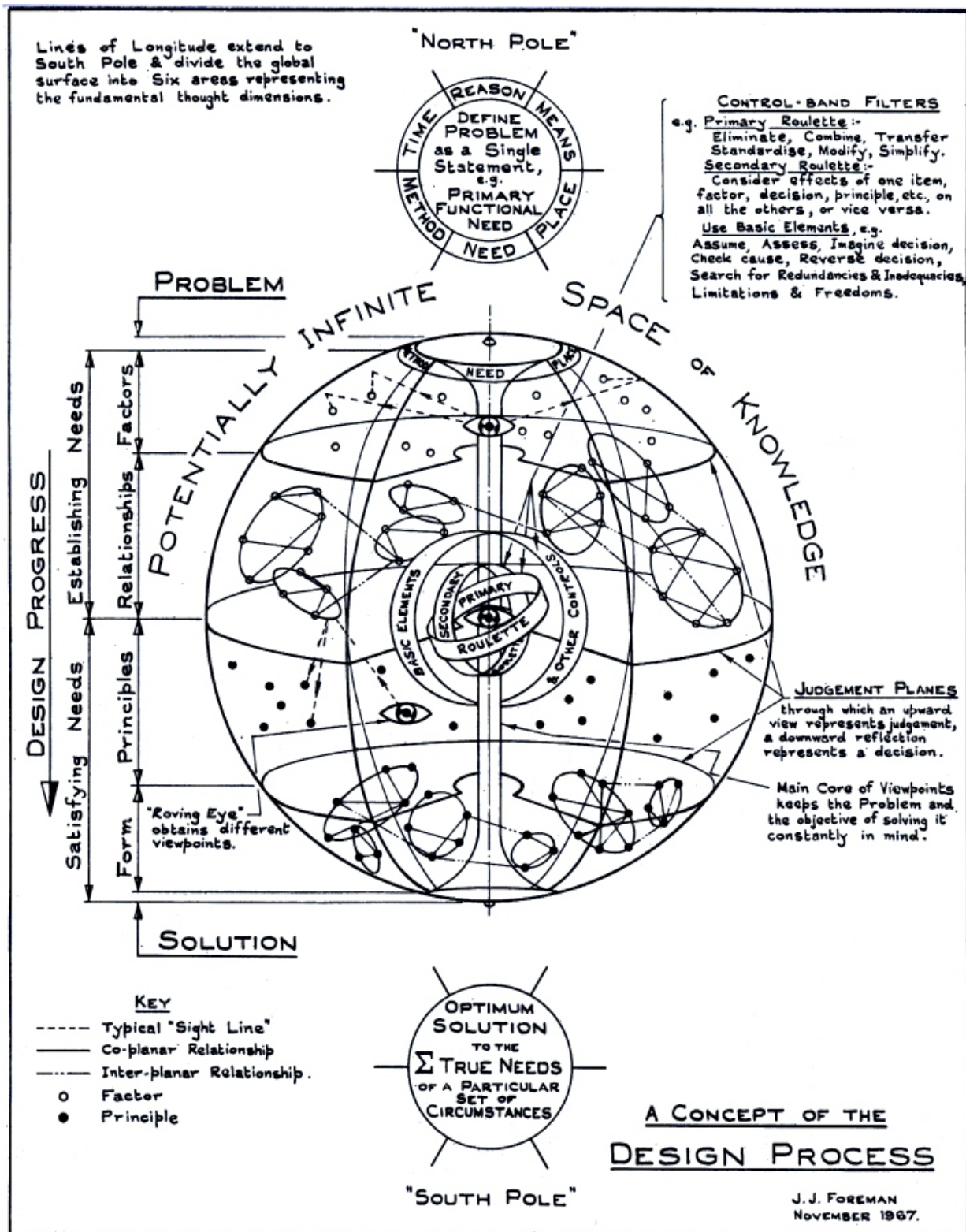


Figura 4.71 – Representação esquemática do processo de projecto segundo Matchett, retirado de [Jones, 1970].

4.3.6 Modelo de Gero

A primeira versão apresentada por John S. Gero, em 1990, [Vermaas *et al.*, 2007] considera o processo de projecto como uma série de transformações de um estado de projecto para outro estado, transformando, por exemplo, a função (F – *function*), a estrutura (S – *structure*) e o comportamento (B – *behavior*) numa descrição de projecto (D – *design*).

Este modelo, inicialmente conhecido como modelo evolucionário e, actualmente, como modelo FBS (*Function-Behaviour-Structure*) inclui não só a interacção com o ambiente, ao qual o resultado do projecto estará exposto, como também determina o objectivo do projectista.

A representação gráfica inicial deste modelo encontra-se reproduzida na

Figura 4.72:

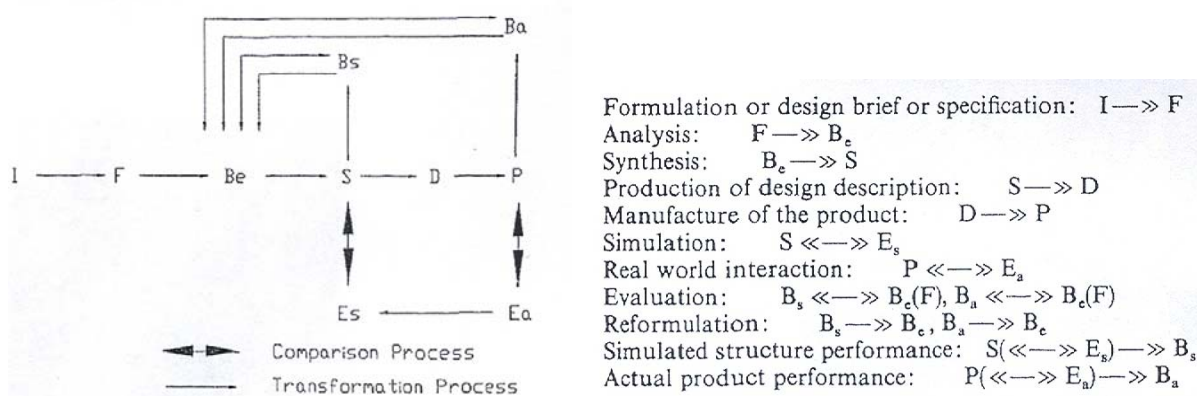


Figura 4.72 – Representação Esquemática Inicial do modelo evolucionário de projecto segundo Gero, retirado de [Evbomwan *et al.*, 1996].

Desde então, Gero e os seus colaboradores desenvolveram o modelo segundo diversas vertentes, apresentadas em várias publicações, em que mostram a versatilidade do modelo, e que têm levado ao seu aperfeiçoamento.

Nos *papers* mais recentes de Gero, o modelo é designado como “Ontologia FBS” [Kan *et al.*, 2009], [Kannengiesser *et al.*, 2004] (existindo ainda muitos outros *papers* que também tratam este modelo, mas que são pouco relacionados com o tema desta tese) que, à semelhança do modelo inicial, considera o processo de projecto baseado nas três classes de variáveis seguintes, descrevendo cada uma delas um aspecto diferente do projecto de um objecto [Gero *et al.*, 2004]:

- Variáveis de Função (F – *Function*), que descrevem a teleologia do objecto, isto é, “para o que é que ele é”;
- Variáveis de Comportamento (B – *Behaviour*), que descrevem os atributos que são realizados, ou que é expectado ser realizado pelas variáveis de Estrutura (S – *Structure*) do objecto, isto é, “o que é que ele faz”;
- Variáveis de Estrutura (S – *Structure*), que descrevem os componentes do objecto e as suas interrelações, isto é, “o que é”.

Segundo Kan e Gero [Kan *et al.*, 2009], o objectivo do projecto (*goal of designing*) é transformar um conjunto de funções (F) num conjunto de descrições de projecto (D).

A Função (F – *Function*) de um objecto (resultado do projecto) é realizar a acção para a qual foi concebido.

O Comportamento (B – *Behavior*) de um objecto (resultado do projecto) é o modo como ele realiza as suas funções, podendo esse modo ser (Bs), derivado da (produzido pela) estrutura (S – *Structure*), ou o expectado da estrutura (Be).

A Descrição do projecto (D) nunca é transformada directamente da função (F), mas é resultado de uma série de processos entre as variáveis de Função, Comportamento e Estrutura – FBS.

O papel do projectista consiste em construir ligações entre Função, Comportamento e Estrutura de um objecto, através da experiência. Especificamente, o projectista atribui funções a comportamentos e deriva (obtem) comportamentos das estruturas, sem estabelecer uma ligação directa entre a Função (F) e a Estrutura (S) [Gero *et al.*, 2004].

O modelo FBS representa o processo de projecto através de um conjunto de interacções entre Função (F), Comportamento (B) e Estrutura (S), as quais podem ser vistas como os diferentes estágios do desenvolvimento de um projecto, cuja representação gráfica é apresentada na Figura 4.73:

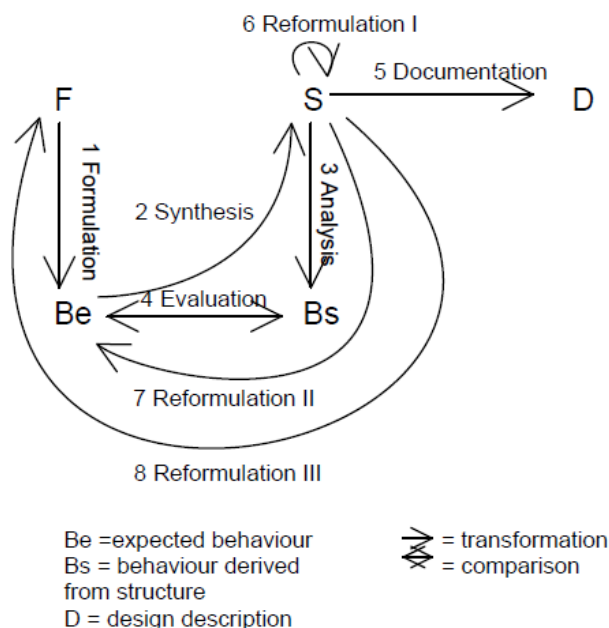


Figura 4.73 – Representação da Ontologia FBS de projecto segundo Gero, retirado de [Gero et al., 2004].

Dos oito processos indicados no modelo FBS, que são tidos como fundamentais para todos os projectos, cinco deles correspondem às acções sequenciais necessárias para transformar as funções desejadas nas descrições de projecto e os restantes três constituem iterações, como sejam reformulações ou melhoramentos do projecto.

Estes processos podem ser descritos, sucintamente, como se segue e resumidos nas Tabelas 4.1 e 4.2:

- Formulação (processo 1): Transforma os requisitos de projecto, expressos na Função (F), em Comportamento (Be) que é expectado, para conseguir essa função;

- Síntese (processo 2): Transforma os Comportamentos Expectados (B_e) numa Estrutura (S) ou solução, que se presume exibir o comportamento desejado;
- Análise (processo 3): Deduz (*derives*) o Comportamento (B_s) apresentado pela Estrutura (S) sintetizada (construída);
- Avaliação (processo 4): Compara o Comportamento (B_s) apresentado (*derived*) pela Estrutura com o Comportamento Expectado (B_e) para preparar a decisão de aceitação ou não da solução projectada.
- Documentação (processo 5): Produz a Descrição do projecto (D) para construção ou produção do produto;
- Reformulação do tipo I (processo 6): Corresponde a modificações no estado do espaço do projecto (*changes in the design state space*), em termos de variáveis de Estrutura (S), ou das suas gamas de valores, se o comportamento actual for avaliado como insatisfatório.
- Reformulação do tipo II (processo 7): Corresponde a modificações no estado do espaço do projecto (*changes in the design state space*), em termos de variáveis de Comportamento (B_e), ou das suas gamas de valores, se o comportamento actual for avaliado como insatisfatório.
- Reformulação do tipo III (processo 8): Corresponde a modificações no estado do espaço do projecto (*changes in the design state space*), em termos de variáveis de Função (F), ou das suas gamas de valores, se o comportamento actual for avaliado como insatisfatório.

<i>Step 1: formulation</i>	$F \rightarrow B_e$	Transformation of the posited functions into behaviour that is expected to enable these functions
<i>Step 2: synthesis</i>	$B_e \rightarrow S$	Transformation of the expected behaviour into a structure that is intended to exhibit this behaviour
<i>Step 3: analysis</i>	$S \rightarrow B_s$	Derivation of the actual behaviour of the structure
<i>Step 4: evaluation</i>	$B_s \leftrightarrow B_e$	Comparison of the actual and expected behaviour
<i>Step 5: documentation</i>	$S \rightarrow D$	Production of the design description

Tabela 4.1 – Os cinco passos sequenciais do modelo FBS, retirado de [Vermaas et al., 2007].

<i>Step 6: reformulation 1</i>	$S \rightarrow S'$	Choice of a new structure
<i>Step 7: reformulation 2</i>	$S \rightarrow B'_e$	Choice of new expected behaviour
<i>Step 8: reformulation 3</i>	$S \rightarrow F'$	Choice of new functions

Tabela 4.2 – Os três passos iterativos (*loop back*) do modelo FBS, retirado de [Vermaas et al., 2007].

Um aspecto diferenciador deste modelo e que lhe confere uma “perspectiva não-estática” do mundo do projecto, consiste na distinção que é feita entre vários tipos de reformulação, o que não acontece nos outros modelos de projecto.

O processo mais utilizado é a reformulação do tipo I, ao nível da estrutura, e as reformulações do tipo II são relativamente raras, uma vez que mudam ou redefinem o problema de projecto.

Estudos empíricos de projecto confirmam que a reformulação da estrutura é o tipo de reformulação predominante e que a reformulação do problema, em termos de comportamento esperado, ou mesmo de função, desvanece-se durante o processo de projecto, mas nunca desaparece por completo.

Com vista a conseguir uma melhor compreensão das funcionalidades essenciais dos programas (*softwares*) de projecto assistido por computador, entendidos como as ferramentas informáticas para apoio às actividades humanas de Desenho (CAD), Engenharia (CAE) e Produção (CAM), Kannengiesser e Gero [Kannengiesser *et al.*, 2009] propõem associar duas perspectivas complementares do processo de projecto, aumentando, desse modo, o nível de detalhe e definir melhor o conjunto de actividades de projecto.

Uma delas, a “Ontologia FBS”, está centrada no objecto a projectar e a outra, a “Ontologia dos Três Mundos do Projecto”, está centrada no processo de projectar e é conduzida pelas interacções entre os três mundos.

Os projectistas realizam acções que interagem com a envolvente (ambiente) que os rodeia. A observação e interpretação dos resultados das suas acções influencia a decisão das novas acções a desenvolver. Esta interacção entre o projectista e o meio envolvente determina fortemente o curso do projecto. Gero e Kannengiesser [Kannengiesser, *et al.*, 2004]

modelaram esta situação, que designaram por “*Situatedness*”, especificando três mundos em interacção, tal como reproduzido na Figura 4.74.

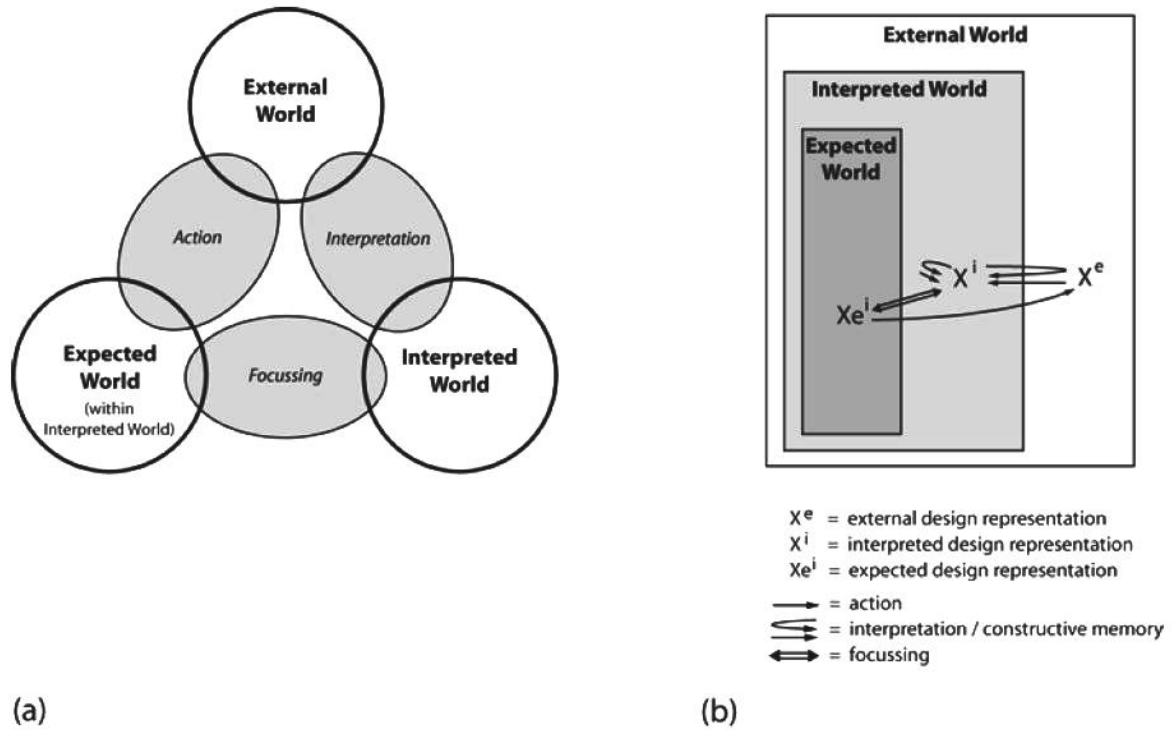


Figura 4.74 – Interação entre o projectista e os três mundos: a) modelo geral; b) modelo especializado para representações de projecto, retirado de [Gero, *et al.*, 2009].

O Mundo Exterior é o mundo que é composto por representações exteriores ao projectista, mais em sentido conceptual do que em sentido físico.

O Mundo Interpretado é o mundo que é construído no interior (pensamento) do projectista, em termos de experiências sensoriais, de percepções e de conceitos, sendo aqui que são desenvolvidas as actividades analíticas e inventivas realizadas durante o processo de projectar.

O Mundo Expectado é o mundo em que virão a ser produzidas as acções imaginadas pelo projectista, sendo neste ambiente que são previstos os efeitos das acções, de acordo com os objectivos correntes e as interpretações do estado do mundo.

Estes três mundos relacionam-se através de três classes de interacção, seguintes:

A classe de Interpretação, que transforma as variáveis que são sentidas no mundo exterior em experiências sensoriais, percepções e conceitos que compõem o mundo interpretado.

A classe de Focagem, que adopta certos aspectos do mundo interpretado e utiliza-os como objectivos para o mundo expectado.

A classe de Acção, que consiste no efeito que provoca uma mudança no mundo exterior, de acordo com os objectivos no mundo expectado.

A variável X, representada de forma genérica na representação b) da Figura 4.74, é substituída pelas variáveis F, B e S, que assumirão o carácter externo, interpretado e expectado, consoante o mundo em que estejam a ser consideradas, constituindo as bases do novo modelo designado por “*Situated FBS Framework*”, como reproduzido na Figura 4.75:

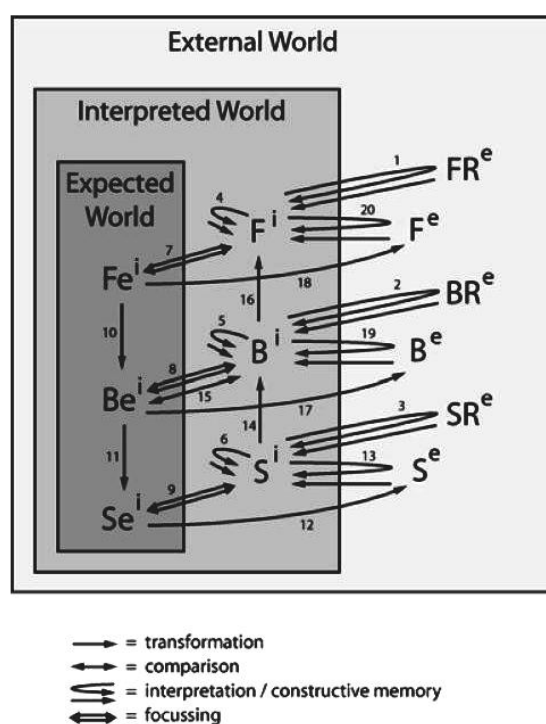


Figura 4.75 – O modelo *Situated FBS*, retirado de [Gero, *et al.*, 2009].

Vermaas e Dorst [Vermaas *et al.*, 2007] apontam dois problemas ao modelo de Gero. O primeiro diz respeito à estrutura conceptual do modelo e consiste na ausência de uma definição estável do conceito de função. O segundo problema tem a ver com o duplo estatuto do modelo: como modelo descritivo enquanto descreve o processo de projecto e como um modelo prescritivo enquanto otimizador de projecto.

Para resolver estes problemas, sugerem um trabalho filosófico realizado na teoria da função e mostram que é possível fixar uma definição de função, apresentando uma descrição

filosófica de projecto, que mostra como o seu estatuto de reconstrução racional de projecto permite distinguir e associar a modelação descritiva e a modelação prescritiva na metodologia de projecto.

4.4 Processo de Projecto de Engenharia, de Arquitectura e Assistido por Computador

Os modelos do processo de projecto existentes são muito marcados pela experiência dos seus autores, podendo os modelos apresentados neste trabalho ser classificados nos três grupos seguintes:

- Modelos vocacionados para o Projecto de Engenharia;
- Modelos vocacionados para o Projecto de Arquitectura;
- Modelos vocacionados para o Projecto de Programas para Computadores, destinados a apoiar as actividades de projecto (*CAE, CAD, CAM, AI, etc.*).

A actividade de projecto foi, desde o início (utensílios pré-históricos, ninhos de aves, etc.), executada com base na experimentação, sendo os projectistas guiados pela sua intuição e utilizando as suas aptidões naturais.

As actividades inerentes ao desenvolvimento de produtos e elaboração dos seus projectos eram executadas heurísticamente ou empiricamente, com base em procedimentos fortemente experimentais e métodos de “Tentativa e Erro”.

A procura contínua de novos produtos, com elevada qualidade, prazos de entrega curtos e custos baixos, complementada pela ocorrência de acidentes com consequências graves, devido a falhas de projecto, conduziram à necessidade de prestar mais atenção ao modo como o projecto é desenvolvido.

Uma das formas encontradas para melhorar a qualidade do projecto consiste na utilização de procedimentos estruturados e baseados em princípios científicos, que possam ser aplicados,

de modo sistemático, no desenvolvimento de produtos e na elaboração dos seus projectos, assim como na definição dos respectivos processos de produção para a realização desses produtos.

Durante as décadas de 60 e início dos anos 70, do século passado, houve uma certa rejeição do conceito de ciência de projecto (*science of design*), dada a falta de sucesso na aplicação de métodos sistemáticos à prática de projecto, em particular Christopher Alexander, em “*The State of the Art in Design Methods*” ([Alexander, 1971] citado por [Birmingham *et al.*, 1997]) foi muito crítico até mesmo em relação ao nome que tinha sido atribuído à investigação nesta área:

“ I never even read the literature any more... I would say forget it, forget the whole thing... If you call it ‘It’s a good idea to do’, I like it very much; if you call it ‘A method’, I like it but I’m beginning to get turned off; if you call it ‘A methodology’ I just do not want to talk about it.”

A prática de projecto de engenharia envolve, não só ciências puras e aplicadas, mas também as ciências sociais e de comportamento, as ciências económicas, de gestão e administração, assim como de direito e legislação.

De facto, o projectista deve trabalhar com uma equipa composta por membros de diferentes disciplinas e tomar dezenas ou centenas de decisões em produtos simples e milhares de decisões em produtos complexos.

As ferramentas para ajudar os projectistas estendem-se desde os guias de projecto até às regras práticas com origem na experiência acumulada e que permitem ao projectista navegar em modelos virtuais.

Os vários aspectos da actividade de projecto requerem a utilização de ambos os hemisférios do nosso cérebro.

As ferramentas para a tomada de decisão podem ser muito úteis, quando utilizadas adequadamente. No entanto, dado o conhecimento de que o projectista e a equipa de Projecto dispõem para sintetizar e criar ser uma actividade exclusivamente humana, a actividade de projecto não pode ser totalmente automatizada [Eagan *et al.*, 2002].

A qualidade das decisões pode ser melhorada mediante o auxílio de ferramentas com base em computadores (*computer-based tools*), que poderão ser de três tipos: baseadas em conhecimentos de engenharia; processos e planeamento de trabalho e colaboração (*knowledge-based engineering, workflow, and collaboration*).

A utilização destas ferramentas permite ao projectista executar as tarefas de engenharia, modelação, análise, optimização, simulação, planeamento e sequência de actividades, comunicação de informação, etc., de uma forma mais rápida, libertando-o das tarefas de rotina, deixando-lhe mais tempo para gerar e avaliar as opções de projecto, a fim de tomar as melhores decisões.

Os modelos de engenharia [Birmingham *et al.*, 1997] assumem que o projectista é capaz de construir uma especificação numa forma neutra relativamente à solução (*solution neutral*), isto é, a especificação pode ser suficientemente abstracta para permitir ao projectista explorar, completamente, o seu talento criativo sem ter, forçosamente, de prejudicar o resultado final com o conhecimento existente relativo a possíveis soluções.

Em contraste, os modelos de arquitectura promovem (*architectural model promotes*) a ideia de que é o conhecimento existente que desencadeia a criatividade (*creative spark*) e permite ao projectista fazer a transição (*leap*) do problema para a solução candidata. Os modelos arquitectónicos permitem (*enable*) ao projectista angariar (*elicit*) gradualmente mais e mais informação do cliente relativamente às suas preferências e, deste modo, aprender mais acerca dos requisitos através da proposta de conjecturadas soluções (*conjectured solutions*) e de escutar as respostas dos clientes.

Estas duas vertentes são relacionadas no modelo de Asimow, no qual a dimensão morfológica é relacionada com o modelo de engenharia e a dimensão “*problem solving*” é relacionada com o modelo de arquitectura.

No processo de projectar, existe uma dualidade Arte / Ciência, verificando-se que os modelos de projecto relacionados com a arquitectura defendem uma perspectiva do projecto mais artística e mais intuitiva. Por outro lado, os modelos do processo de projecto relacionados com a engenharia defendem uma perspectiva do projecto mais ordenada e mais científica.

Nos últimos anos, a questão relacionada com o facto de o projecto ser uma arte ou ser uma ciência tem sido tratada em muitas publicações (livros, *papers*, artigos em revistas, etc.) havendo muitos autores que reconhecem a importância da intuição no desenvolvimento de soluções criativas para os problemas de projecto.

A intuição de um engenheiro qualificado é uma característica desenvolvida durante o período em que o projectista exerce a actividade de projecto. A experiência acumulada de projecto é armazenada no cérebro e é acedida de uma forma milagrosa (*some miraculous way*) quando o projectista desenvolve soluções para novos problemas de projecto [Ertas *et al.*, 1996].

Assim, idealmente, os elementos apropriados de cada experiência armazenada são sintetizados para formular novos conceitos.

Esta explicação é frequentemente utilizada para justificar as afirmações de que o projecto só pode ser ensinado através da prática de projectar (*doing design*) e que o projecto é mais uma arte do que uma ciência.

Aprende-se a projectar, projectando [Cross, 2008].

No entanto, as ferramentas de análise, formulação, avaliação, síntese e validação, utilizadas no processo de projectar, estabelecem uma analogia entre o processo de projectar e o método científico, conferindo-lhe o aspecto científico [Dieter *et al.*, 2009].

Alguns engenheiros, apesar de terem formação avançada na área do projecto de máquinas e serem, tecnicamente, muito bons nas ciências puras e aplicadas, não conseguem conceber boas soluções de projecto, ainda que conhecendo minimamente as várias teorias, metodologias e ferramentas de projecto. Este aspecto está fortemente relacionado com a sua experiência passada e com as aptidões naturais de cada projectista, que lhe conferem maior ou menor facilidade em gerar soluções e desenvolver as actividades inerentes ao processo de projectar.

Alguns projectistas, com uma formação correspondente aos antigos cursos técnicos e outros apenas com a formação que lhes era dada pelas próprias empresas onde trabalhavam (como era o caso da “Sorefame”, da “Mague”, da “Cimentos de Leiria”, e muitas outras que já

cessaram a sua actividade), conseguem apresentar boas soluções de projecto, sem nunca terem tido conhecimento de Teorias de Projecto ou de Resistência de Materiais.

Na opinião do autor, o processo de projecto deverá ser desenvolvido com base em métodos sistemáticos, utilizando ferramentas com carácter científico, no entanto, a concepção e a avaliação das soluções está muito dependente da intuição e da experiência acumulada do projectista.

5 ASPECTOS PRINCIPAIS DA METODOLOGIA

Do estudo realizado, conclui-se que a maior parte dos modelos do processo de projecto de engenharia adoptam uma abordagem focada no problema, como acontece com [Hubka *et al.*, 1982] e [Pahl *et al.*, 2007], entre outros.

Tal como mencionado no Capítulo 2, segundo a estratégia focada no problema, o processo de projecto inicia-se por uma análise do problema, caracterizada por níveis de abstracção e decomposição hierárquica, seguida de um processo de concretização sistemática, durante o qual é gerada uma quantidade de possíveis soluções que são progressivamente avaliadas e refinadas, no sentido de serem combinadas e convergirem para a melhor solução global.

No caso do projecto de produtos únicos, que requerem a resolução de problemas de projecto originais, a maior parte da literatura de projecto de engenharia recomenda a adopção da abordagem focada no problema para o projecto de produtos únicos [Maffin, 1998].

Entre os projectistas no exercício da profissão, existe um grande desconhecimento das teorias de projecto, métodos de processo de projecto e ferramentas para as actividades de projectar. Além disso, vários outros factores (designadamente, o tempo e os recursos que consomem, as competências especializadas necessárias, etc.) fazem com que muitas delas

não tenham aplicabilidade em equipas de projecto de pequena dimensão [Maffin, 1998]. No entanto, verifica-se que as práticas seguidas na indústria para o projecto de produtos únicos seguem a tendência de adopção de estratégias focadas no problema, tal como anteriormente mencionado.

Assim, a metodologia proposta neste trabalho tem como objectivo conjugar as recomendações teóricas com as práticas bem sucedidas, que são seguidas na indústria pelos projectistas de produtos únicos. Segundo David Maffin, este é o grande desafio para os investigadores de projecto de engenharia [Maffin, 1998].

A supracitada metodologia proporciona uma base lógica para a estratégia de projecto de engenharia, tendo sido estruturada de acordo com os modelos do processo de projecto mais adequados para o projecto de produtos únicos e na qual foram integradas as práticas (tácticas) de projecto seguidas na indústria para este tipo de produtos fazendo-se assim o enquadramento das práticas seguidas pela indústria na teoria de projecto de engenharia.

Como aspectos principais da metodologia proposta para o processo de projectar produtos únicos podemos indicar:

- A estratégia adoptada para a realização do processo de projectar é focada no problema e consiste na sequenciação cronológica das várias actividades ou fases, conceptualmente distintas, agrupadas de acordo com o resultado que se pretende obter no final de cada uma delas;
- Subjacente a este processo, está a natureza hierárquica do processo de projectar, sendo o problema global do projecto dividido em subproblemas, até se atingir o nível dos problemas elementares. São então encontradas as soluções elementares e as subsoluções para estes problemas, as quais, compiladas, resultam na solução global que resolve o problema de projecto global inicial;
- Na busca dos melhores resultados, são geradas várias soluções, subsoluções e soluções elementares, sendo as mesmas avaliadas para se seleccionar aquelas que, em conjunto, constituirão a melhor solução global;

- É recomendada a utilização de novas ferramentas de projecto, como tácticas de projecto, para tornar o produto robusto/insensível às incertezas, uma vez que, no projecto de produtos únicos (protótipos) estas têm um papel muito importante

Para além das ferramentas de projecto tradicionais, recomendadas para desenvolver as várias actividades que constituem o processo de projectar e que se encontram abundantemente descritas na literatura, foi incluída na metodologia a utilização das ferramentas específicas a seguir descritas como novas tácticas de projecto. Pretende-se assim tornar o desempenho dos produtos insensível às variações dos dados do problema, inerentes às incertezas que não é viável esclarecer, o que, no caso do projecto de produtos únicos, tem uma importância decisiva no sucesso do projecto.

5.1 Enunciado do Problema e Concepção da Solução

Na concepção das soluções para produtos únicos de pequeno valor económico, a criatividade desempenha um papel fundamental. Com efeito, dado tratar-se de problemas originais, e uma vez que não existe a oportunidade de realizar ensaios antes da colocação do produto em serviço, é necessário criar soluções inéditas e com garantia de sucesso.

Tal como em qualquer tipo de problema de projecto, o processo inicia-se com a compreensão de uma necessidade e com a sua tradução no enunciado do problema, cuja resolução satisfará a necessidade que lhe deu origem.

Para a concepção de uma solução que satisfaça, de forma eficaz e eficiente, a necessidade existem duas recomendações principais:

- Estabelecer correctamente as funcionalidades que se pretendem obter, ou seja, definir os requisitos funcionais do problema.
- Pensar a realização das funcionalidades de modo independente da solução que as irá realizar, ou seja, “imaterializar” a solução para evidenciar as funcionalidades pretendidas.

O estabelecimento das funcionalidades corresponde à definição do enunciado do problema, ao qual deverá ser dada a maior atenção, para que não se corra o risco de desenvolver uma solução perfeita para o enunciado estabelecido, mas que não satisfaça a necessidade existente, por esta não se encontrar reflectida no enunciado estabelecido.

Para o estabelecimento do enunciado, deverão ser utilizadas as várias ferramentas de projecto existentes para o efeito, tais como: “*Customer Interviews & Customer Questionnaires*”; “*Quality Function Deployment – QFD*”; “*Objective Trees*”; “*Voice of the Customer*”; “*Engineering Requirements*”; “*Competition Benchmarking*” “*Engineering Targets*”; “*Performance Specification Method*”; “*Specification Checklists & Questionnaires*”, etc., para as quais existe abundante literatura.

Imaginar as funções pretendidas a serem “realizadas no espaço”, sem intervenção do produto/objecto/solução que as realizará, corresponde, segundo a Teoria Axiomática de Projecto, ao estabelecimento dos requisitos funcionais que, nas palavras de Suh, “A primeira coisa a fazer é listar os requisitos funcionais”. Na Teoria da Resolução dos Problemas de Invenção – TRIZ, este conceito corresponde ao “projecto ideal”, o qual, não existindo fisicamente, realiza as funções pretendidas.

Uma forma de explicar o processo de geração de soluções num ambiente de engenharia é por intermédio da denominada “*Ideation Framework*”, ilustrada na Figura 5.1, que compreende três subsistemas: Inspiração, Desmaterialização e Recombinação [Marques *et al.*, 2008].

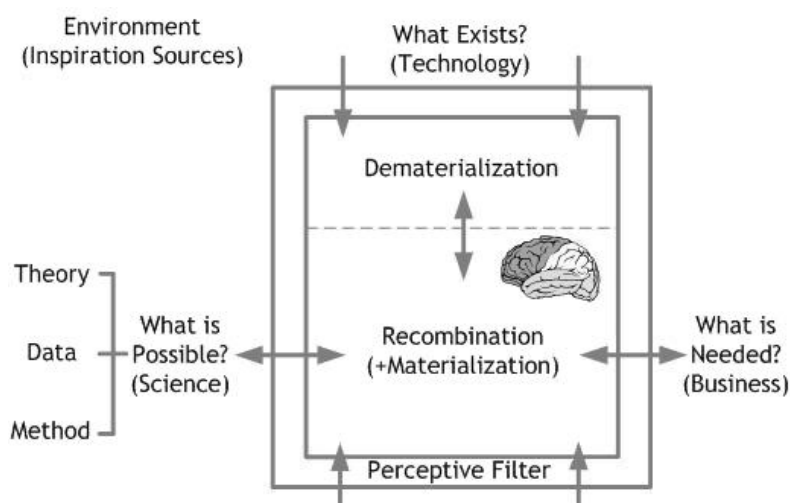


Figura 5.1 – Representação do modelo simplificado idealização (*The simplified ideation framework*), retirado de [Marques *et al.*, 2008].

A envolvente exterior (*environment*) constitui a fonte de inspiração necessária para conceber novas soluções e é orientada/alimentada (*driven*) por descobertas científicas, avanços tecnológicos e oportunidades de negócio.

A desmaterialização, neste contexto, deve ser entendida como uma forma de pensar a solução, sem lhe associar qualquer elemento material. A desmaterialização dissocia, por abstracção, o domínio do conhecimento ou a função envolvida num produto existente em campos de conhecimento elementares ou funções, com os quais alimenta o subsistema de recombinação, para materialização num novo perfil, num novo produto.

A recombinação é o processo através do qual o projectista gera, aplica ou modifica o conteúdo do domínio do conhecimento ou funções de soluções existentes para conceber as novas soluções. Na Figura 5.2, representa-se de modo esquemático o processo de recombinação.

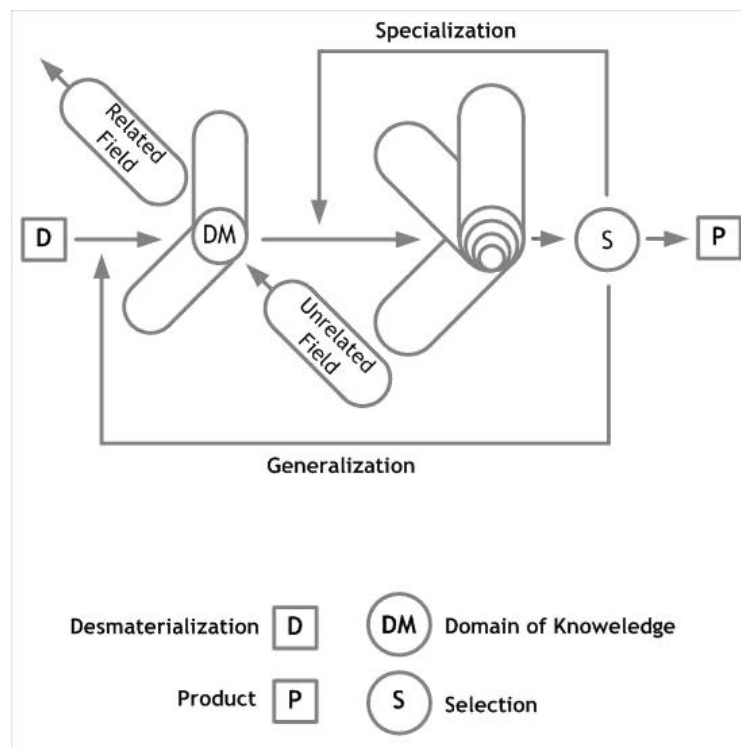


Figura 5.2 – Representação do Subsistema de Recombinação no modelo de idealização (*The recombination subsystem of the ideation framework*), retirado de [Marques *et al.*, 2008].

Estas práticas e o restante processo de criatividade, foram aplicados, com sucesso, ao projecto de um sistema para alimentação automática de caixas de cartão, espalmadas, a uma impressora/aplicadora de etiquetas, no qual se verificou a sua adequabilidade para o projecto de produtos únicos [Marques *et al.*, 2009].

5.2 Modelos Teóricos Simplificados

O desenvolvimento das soluções é efectuado com base em modelos teóricos, nos quais é representada a situação real que se pretende resolver e os princípios que serão utilizados para a construção da solução que satisfará as necessidades.

Existem diversos tipos de modelos, desde simples esboços, feitos à mão livre, até modelos matemáticos e protótipos virtuais, cujo objectivo é a simulação da realidade futura [Dieter *et al.*, 2009].

A configuração das soluções e o dimensionamento dos elementos que as constituem são efectuados com base no enunciado estabelecido para o problema, no qual estão também incluídos os constrangimentos impostos pela envolvente em que o produto desempenhará as suas funções.

Os modelos a construir deverão ser o mais simplificados possível, sem contudo desprezar elementos ou dados que possam influenciar de forma significativa o comportamento da solução e o desempenho das suas funcionalidades [Kamm, 1991]. Um modelo que contivesse todos os elementos presentes na realidade, caso fosse possível construí-lo, seria de tal forma complexo que seria impossível resolvê-lo.

Entre as simplificações mais comuns utilizadas em engenharia para a realização de modelos simplificados e a execução de cálculos de dimensionamento, podemos exemplificar as seguintes:

- Em muitos casos, os materiais podem ser considerados homogéneos e isotrópicos;
- Os elementos constituintes de uma solução assumem, no modelo, geometrias perfeitas (rectilíneas, circulares, ortogonais, etc.), sendo desprezadas as variações introduzidas pelos processos produtivos, como é o caso dos empenos introduzidos pela soldadura, as folgas dos equipamentos de produção, as incorrecções na localização rigorosa de furos e outros tipos de elementos de ligação, etc.;
- O efeito do peso próprio dos componentes na sua geometria, como é o caso da flexão de vigas, etc., pode, em muitos casos, ser desprezado, sendo a viga estudada como uma viga rectilínea em vez de uma viga curva;
- Ao admitir que a deformação dos corpos segue a Lei de Hooke, o problema torna-se linear e permite a aplicação do Princípio da Sobreposição, que é a base para a decomposição de um problema complexo, em termos de acções exteriores, em vários problemas elementares;
- As interfaces entre elementos são consideradas perfeitas, ou seja, as duas partes a ligar cumprem rigorosamente a geometria definida para a ligação, independentemente do processo de obtenção das mesmas (as ligações ao exterior são pontuais, os eixos de articulação são convergentes para um ponto, etc.). Neste caso, deve ter-se em

consideração as diferenças nas tolerâncias inerentes aos processos de obtenção das soluções, tal como acontece, por exemplo, na instalação de máquinas, obtidas por construção mecânica em maciços obtidos por construção civil, cabendo à interface a responsabilidade de compensar esses efeitos;

- A aplicação das cargas nunca é pontual. Por pequena que fosse a força ao actuar numa área pontual (tendencialmente zero) produziria tensões infinitas, o que por sua vez produziria deformações, aumentando a área de contacto e reduzindo as tensões, até se atingir o equilíbrio;
- A localização dos carregamentos e reacções nem sempre ocorre nos locais exactamente especificados;
- Por questões de ordem económica, nem sempre são utilizados os materiais que respeitam as propriedades especificadas, nem os processos de fabrico têm o rigor especificado;
- Etc.

A selecção dos factores a considerar e das simplificações a admitir, no modelo de cada situação em particular, passa por uma avaliação criteriosa dos mesmos e pela sua selecção, com base no grau de influência que exercem sobre os resultados (*output*) da solução.

Os factores de menor importância, ou seja, aqueles cuja variação expectável menos influenciará os resultados e o desempenho das soluções, não devem ser incluídos no modelo. No entanto, a influência que os factores que são desprezados exerceriam deverá ser incluída no coeficiente de segurança.

A escolha do coeficiente de segurança é uma das decisões mais importantes em engenharia, pois nele estão incorporadas as incertezas inerentes a todos os factores que influenciarão os resultados e, conseqüentemente, o sucesso do projecto. Embora o número de factores que influenciam cada projecto seja potencialmente infinito, as suas origens podem ser agrupadas nos três domínios seguintes:

- As acções a que a solução estará sujeita no futuro;
- As características e propriedades dos materiais que incorporarão a solução;
- As aproximações e hipóteses subjacentes aos métodos de cálculo utilizados para o dimensionamento da solução.

No caso de componentes, subconjuntos (subsistemas) e produtos, cuja rigidez é elevada e não é possível obter um levantamento geométrico rigoroso da envolvente em que estes serão implantados, haverá incerteza quanto ao tipo de ajustamento que existirá nas ligações ao exterior, ficando os esforços que irão actuar nos corpos dependentes das folgas ou das interferências (apertos) que poderão existir nas ligações de cada elemento à sua envolvente.

Uma forma de ultrapassar as incertezas que possam existir nas ligações de corpos à sua envolvente é utilizar soluções com o número mínimo de constrangimentos geométricos, ou seja, aplicar o princípio do “*Minimum Constraint Design*” [Kamm, 1990].

Este princípio, inicialmente enunciado por Gauss, em 1892 [Dugas, 1988], consiste, essencialmente, em apoiar os corpos apenas por pontos e apenas pelo menor número de pontos possível, para permitir a funcionalidade pretendida sem graus de liberdade desnecessários.

A aplicação deste princípio está de acordo com a Teoria Axiomática, nomeadamente com o primeiro axioma, tendo este aspecto sido mostrado através de exemplos de soluções para apoio de um veio rotativo e para apoio de um transportador pivotante [Santos *et al.*, 2009], nos quais a aplicação do princípio de “*Minimum Constraint Design*” verifica o primeiro axioma da Teoria Axiomática, permitindo obter soluções desacopladas e sendo, portanto, uma boa prática de projecto.

5.3 Soluções Ajustáveis

Outra forma de fazer com que o desempenho das soluções não seja influenciado pelas variações dos dados do enunciado, devido à incerteza inerente à sua determinação, consiste na implementação de soluções ajustáveis, com elementos flexíveis, de modo a conferir “tolerâncias” aos parâmetros de projecto.

Esta flexibilidade poderá ter lugar ao nível geométrico – quer seja tirando partido da elasticidade dos materiais, quer seja através de componentes de geometria variável (rolamentos autocompensadores, dispositivos telescópicos, dispositivos excêntricos, parafusos tensores, etc.), quer seja através de folgas em ajustamentos – ou poderá ter lugar relativamente a outros tipos de parâmetros de projecto que se pretenda que tenham desempenho variável – como é o caso da velocidade, da temperatura, da pressão, de fluxos, etc.

No caso do projecto de engenharia, as incertezas dependem do rigor com que o problema seja tratado, sendo sempre possível estabelecer limites para além dos quais deixa de existir incerteza, ou deixa de fazer sentido que seja o projecto a ter que “absorver”, ou compensar, tais variações cuja probabilidade de ocorrência é ínfima. Se a solução for suficientemente “robusta” para fazer faces às variações razoáveis, deixa de haver incerteza.

No caso de peças com baixa rigidez, tal como acontece com peças de dimensões suficientemente grandes e cuja geometria é facilmente deformável, é preferível utilizar mais ligações ao exterior do que dimensionar a peça para ficar com a rigidez necessária para poder ser apoiado pelo número mínimo de ligações ao exterior.

Este tipo de actuação configura os princípios do “*Redundant Constraint Design – RedCD*”, que também é conhecido como “*Elastic Design*”. French definia o princípio do “*Elastic Design*” da seguinte forma: “*if there is going to be a fight, let it be a very uneven one to ensure that the loser is not hurt*” [French, 1994].

Do ponto de vista geométrico, corresponde a dizer que, na interligação entre dois corpos, um deles deverá ser suficientemente elástico para se adaptar à geometria do outro, evitando assim ficar sujeito a esforços mais intensos.

O princípio do “*Elastic Design*” pode ser também aplicado a outras situações, para além das geométricas, como é o caso da compatibilização de “fluxos” de transporte, em que um dos “fluxos” tem velocidade variável, ou no caso dos moinhos, em que o caudal de produtos a moer, com que se alimenta o moinho, está interligado com o consumo de energia eléctrica do motor do moinho, para evitar que este excesso de produto a moer bloqueie o moinho, ou ainda no caso das embraiagens de automóveis para sincronizar a velocidade do veio do motor com o veio de transmissão às rodas, etc. No contexto deste trabalho, consideramos

que a designação de “fluxo” corresponde a “Um conjunto de coisas em deslocação numa dada direcção” [Dicionário *On-Line* da “Porto Editora”].

5.4 Soluções Alternativas

Ao contrário da maior parte dos problemas de matemática ou de outras ciências exactas, os problemas de projecto normalmente não têm uma resposta única, admitindo mais do que uma solução para satisfazer as necessidades identificadas num dado momento.

Pelo desenvolvimento do conhecimento durante um dado período de tempo, ou devido a outras mudanças estruturais ou sociais, uma boa solução num determinado momento poderá no futuro deixar de o ser.

Uma prática recomendável para a busca das melhores soluções consiste em conceber várias soluções alternativas, para depois as avaliar de acordo com os critérios que sejam adequados para cada situação de projecto em particular e de acordo com os dois axiomas da Teoria Axiomática em geral, sendo então desenvolvida a solução que apresente maior probabilidade de sucesso.

Durante a fase de desenvolvimento de uma solução, podem surgir factores que não era possível prever antes de serem definidos pormenorizadamente os vários constituintes da solução, podendo acontecer que a solução escolhida se torne inviável — seja por questões geométricas, por questões funcionais, por questões económicas, etc. —, levando a que seja necessário desenvolver uma das soluções ou subsoluções que não tinha sido escolhida inicialmente.

Cada solução alternativa corresponde a um projecto. No entanto, no caso das alternativas existentes para as subsoluções (ou seja, para as soluções de níveis hierárquicos mais baixos), os vários projectos, correspondentes a cada uma das subsoluções seleccionadas, têm partes comuns.

Uma forma de estruturar o problema e identificar/visualizar as várias soluções (parâmetros de projecto) para uma dada funcionalidade (requisito de projecto) consiste na sobreposição

da representação dos vários projectos, ficando as partes comuns num mesmo plano (camada – *layer*) e ficando as várias soluções alternativas em planos (camadas – *layers*) paralelos.

Tendo por base o ambiente/universo de projecto definido pela Teoria Axiomática, a representação de um projecto com várias soluções alternativas é conforme se ilustra na Figura 5.3.

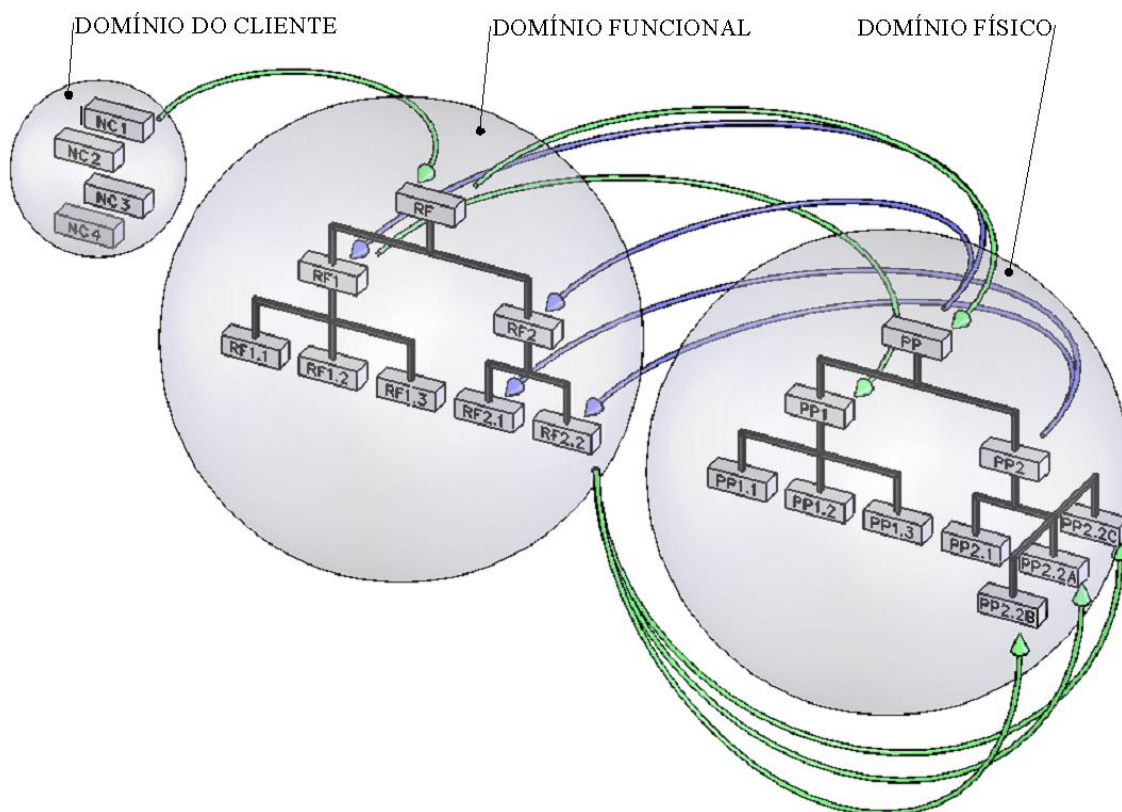


Figura 5.3 – Representação do projecto com as várias soluções alternativas dispostas em planos paralelos.

Na representação do projecto foi introduzida uma terceira dimensão, segundo a qual se representam os vários parâmetros de projecto alternativos para cada requisito funcional.

Nesta representação do projecto, que tem por base o ambiente/universo de projecto definido pela Teoria Axiomática, estão reflectidas as práticas seguidas na indústria pelos projectistas, e particularmente pelos desenhadores-projectistas, em que as várias subsoluções alternativas para um mesmo projecto são elaboradas de acordo com um dos procedimentos que a seguir se indica, dependendo dos métodos de trabalho de base de cada projectista:

- Na elaboração de desenhos manualmente, em estirador, era prática comum a colocação de uma folha de papel branco sobre a parte do desenho que iria ter uma solução alternativa. De seguida, cobriam-se ambos (o desenho de base e a folha branca que cobria a parte do desenho onde seria implantada a solução alternativa) com uma folha de papel vegetal, na qual era desenhada a subsolução alternativa. O papel vegetal permitia a visualização da parte do desenho que não seria alterada (parte comum a ambas as subsoluções) e permitia desenhar sobre ele a subsolução alternativa. Para se voltar a visualizar a subsolução inicial, a folha de papel vegetal era levantada e era retirada a folha branca que cobria a subsolução inicial.
- Outro procedimento também muito utilizado para a representação de soluções alternativas consistia em tirar uma cópia do desenho de base, em filme reprodutível, para cada alternativa, apagar (raspar) a zona onde estava desenhada a subsolução que iria ter uma alternativa e desenhar, directamente no filme reprodutível, a subsolução alternativa. Cada um dos projectos, correspondentes às várias soluções alternativas, ficava completamente representado em cada uma das cópias, que continha a parte do desenho que era comum a todas as alternativas e continha uma das subsoluções alternativas.

Devido às vantagens proporcionadas pela utilização de computadores na elaboração, na modificação, na transmissão, na comunicação e na reprodução de desenhos, as práticas acima indicadas tendem a cair em desuso, sendo já só utilizadas pelos projectistas de idade mais avançada. A utilização de computadores para a elaboração de desenhos também facilita a execução das várias subsoluções alternativas, seguindo-se com a forma digital um procedimento análogo aos acima descritos.

- Os programas de desenho assistido por computador possibilitam a representação de cada uma das subsoluções alternativas em “*layers*” próprios e dedicados a este efeito. Para além disso, cada uma das subsoluções pode ser constituída como um “bloco”, permitindo-se a sua deslocação e movimentação como uma única entidade. Assim, é possível desenhar cada uma das soluções alternativas num “*layer*” específico, de modo a obter-se, num único desenho de base, as várias subsoluções alternativas, podendo-se alternar entre elas, mediante a activação do “*layer*” correspondente à subsolução que queremos visualizar.

Utilizando o mesmo princípio de representação, também podemos esquematizar os vários processos de produção alternativos para a construção de uma dada solução. Ou seja, podemos representar em planos paralelos (ou segundo a terceira dimensão) os vários processos (variáveis de processo) alternativos para realização de cada subsolução (parâmetro de projecto), conforme se mostra na Figura 5.4.

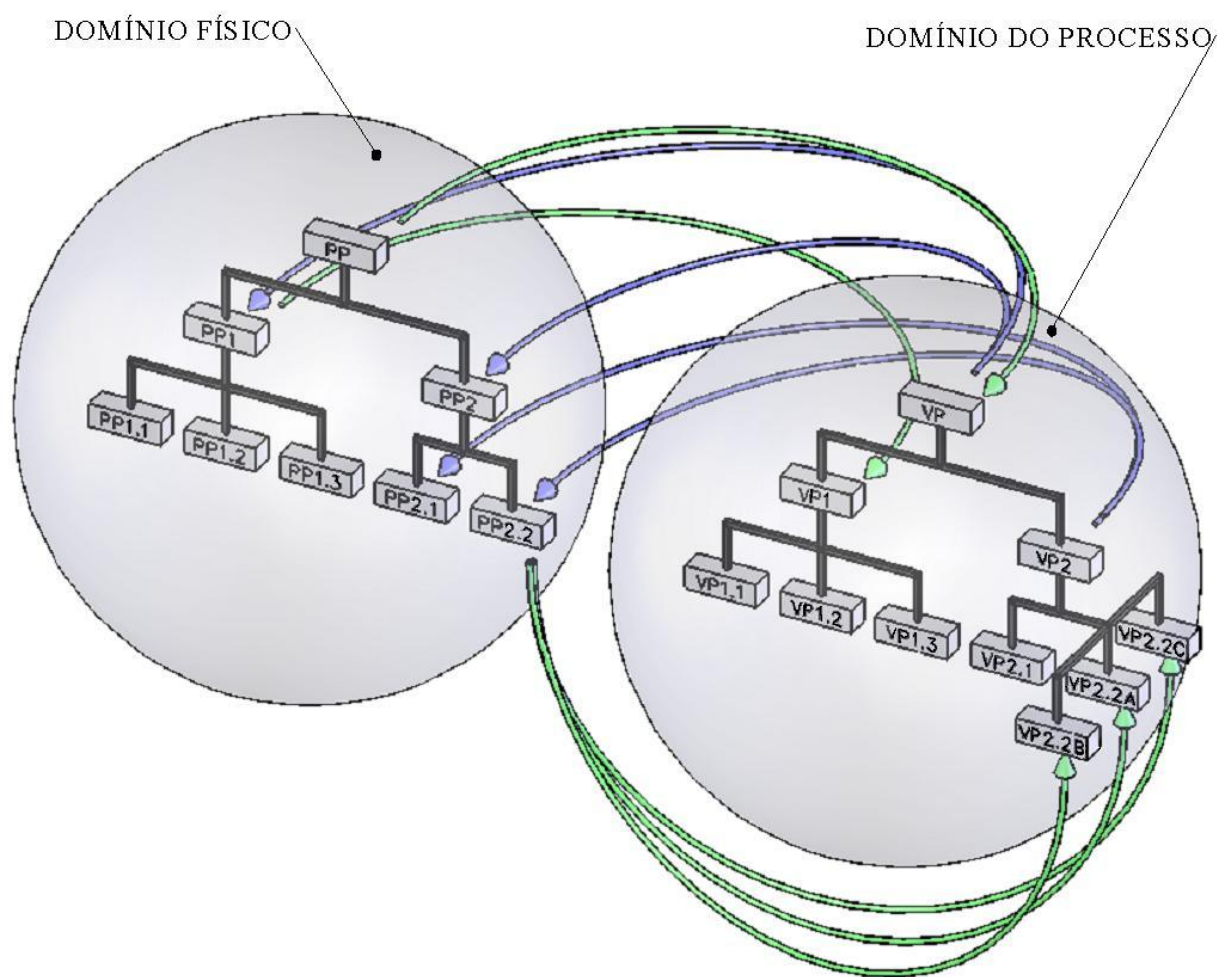


Figura 5.4 – Representação do projecto com os vários processos alternativos dispostos em planos paralelos.

Tendo em consideração a abordagem de engenharia concorrente ou simultânea, a representação do projecto é conforme se expõe na Figura 5.5.

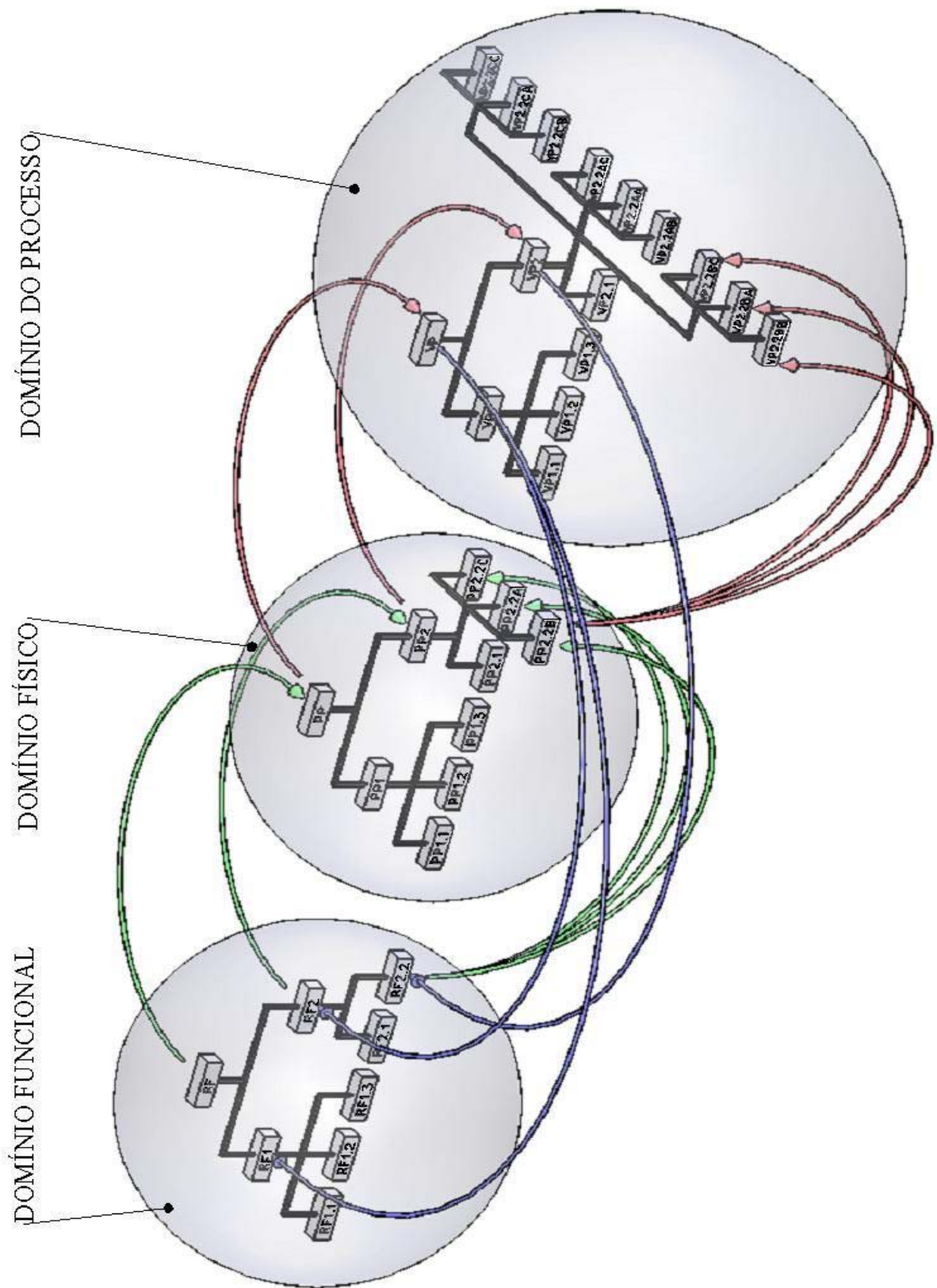


Figura 5.5 – Representação do projecto na perspectiva da engenharia simultânea, com as várias soluções alternativas e os vários processos alternativos dispostos em planos paralelos.

A mudança entre alternativas terá tanto menos implicações no restante projecto quanto mais baixo for o nível hierárquico da solução que for substituída.

5.5 Arquitectura Modular

O tipo de arquitectura de produto mais adequado à implementação das estratégias de projecto com diversas soluções alternativas é o tipo modular, em que as partes comuns do projecto constituem uma “plataforma”, que serve de base a qualquer das soluções alternativas. Cada uma das subsoluções alternativas constituirá um módulo que será intermutável com os módulos correspondentes às outras subsoluções de que é alternativa.

Este tipo de construção foi desenvolvido para os produtos produzidos em série, sendo vantajoso quando se pretende dispor de uma gama de produtos para aplicações distintas, com o objectivo de reduzir o número total de componentes diferentes, com vista à redução dos prazos de entrega e ao aumento do número de componentes a produzir [Ulrich *et al.*, 2008].

Este tipo de construção, que no caso dos produtos de grande consumo permite fazer face às incertezas de mercado, no caso dos produtos únicos permite fazer face às incertezas de exequibilidade ou de desempenho da solução global, possibilitando a utilização das soluções alternativas que apresentem melhor desempenho nas condições que lhes forem impostas.

Tal como as subsoluções alternativas, também os módulos intermutáveis deverão ser desacoplados, de modo a que a mudança de um módulo não tenha interferência no desempenho de outros módulos, mas apenas nos seus “descendentes” (isto é, não influencia os restantes módulos nesse nível hierárquico nem influencia os módulos nos níveis hierárquicos superiores).

5.6 Planos de Contingência e Opções

Devido ao facto de não ser viável, quer em termos financeiros quer em termos de prazos, o esclarecimento de muitas dúvidas, tanto referentes aos dados do problema como referentes ao desempenho das soluções, é conveniente que as soluções fiquem preparadas para que, em caso de necessidade, seja facilmente substituível um módulo por outro módulo alternativo.

Uma boa prática consiste em fazer, de modo sistemático, a “Análise de Modos de Falha e suas Consequências” (*Failure Modes and Effects Analysis – FMEA*), de modo a deixar as soluções preparadas para serem substituídas, se necessário, por outras soluções alternativas, ou seja, sempre que possível e a probabilidade de terem que ser substituídas o justifique, as soluções devem ser concebidas como módulos intermutáveis.

Esta análise deve ser efectuada a cada solução, subsolução e solução elementar, ao longo dos vários níveis hierárquicos do projecto, seguindo a decomposição em zigue-zague, e tendo sempre em consideração que as utilizações futuras do produto podem não ser as especificadas inicialmente, podendo mesmo vir a ser utilizações consideradas pouco razoáveis, como é o caso daquelas a que as motorizadas da Figura 5.6 se encontram sujeitas.

A utilização de componentes normalizados, existentes no mercado como produtos acabados, promove a intermutabilidade dos componentes, o que facilita bastante não só a consideração de soluções alternativas — tanto em termos de modificações (as interfaces desses produtos são normalizadas e comuns a vários fabricantes) como em termos de prazos de entrega (que em muitas situações são imediatos) — como também facilita a aquisição de peças para os processos de manutenção que possam requerer a substituição dessas peças.

Por outro lado, a aplicação generalizada destes componentes vem aumentar o número de unidades produzidas, o número de fabricantes e a concorrência entre eles, o que reduz os preços desses componentes, sendo uma opção preferível até em termos económicos.



Figura 5.6 – Utilizações diferentes das especificações de projecto de uma motorizada.

Esta facilidade de modificação da solução é particularmente vantajosa nos aspectos que se relacionam com actividades de montagem e instalação *in situ*, melhorando significativamente a eficiência dessas operações, em que aparecem sempre imprevistos de várias ordens e com diferentes origens.

Acima de tudo, as soluções seleccionadas para desenvolvimento e realização não devem excluir, ou dificultar, a implementação de outras soluções alternativas que, de acordo com os dados iniciais, aparentem ser menos vantajosas.

6 COMPILAÇÃO DA METODOLOGIA

O objectivo principal desta tese é a obtenção de uma metodologia adequada ao processo de projectar produtos únicos, de baixo valor económico e com complexidade reduzida, a qual consiste numa sequência de procedimentos destinados a orientar os projectistas e a sistematizar as suas actividades ao longo do desenvolvimento de projectos desse tipo de produtos

A abordagem, ou estratégia, de projecto adoptada para esta metodologia é focada no problema, o que está de acordo com as recomendações da literatura [Maffin, 1998], sendo também esta abordagem a mais comumente utilizada na indústria para o projecto de produtos únicos que, por natureza, envolvem um elevado nível de originalidade.

A metodologia apresentada a seguir é o resultado de vários contributos:

- Selecção dos aspectos relacionados com o projecto de produtos únicos, existentes nos vários modelos do processo de projecto analisados;
- Integração das práticas bem sucedidas seguidas na indústria pelos projectistas de produtos únicos, numa sequência de actividades que constituem o processo de projectar;

- Compilação dos aspectos acima referidos numa metodologia, para o processo de projecto de produtos únicos, que conjuga as recomendações teóricas com as práticas bem sucedidas seguidas na indústria.

O resultado final ficou com uma configuração muito semelhante à das VDI 2221 [VDI, 1987], tanto em termos de estágios (ou etapas) principais, como em termos de resultados obtidos em cada etapa. Em cada uma das etapas que compõem a metodologia, foram integradas actividades particulares, específicas de cada uma delas, à semelhança do que é efectuado por Pahl e Beitz [Pahl *et al.*, 2007].

Embora o âmbito deste trabalho se restrinja à apresentação da metodologia e não à exposição das ferramentas de projecto aplicáveis a cada uma das fases da metodologia, serão indicadas — para além das actividades e ferramentas de projecto existentes, de aplicação genérica em vários modelos do processo de projecto — algumas ferramentas para aplicação em etapas concretas do processo de projecto, com aplicação específica na fase de concepção e síntese da solução. Estas ferramentas constituem “táticas de projecto” destinadas a evitar as dificuldades inerentes à incerteza presente (e que não seja viável esclarecer) no projecto de produtos únicos, de baixa complexidade, executados por equipas de projecto compostas por poucos elementos, em organizações de pequena dimensão (PME).

Resumidamente, pode dizer-se que esta metodologia consiste na decomposição do processo de projecto em etapas (ou estágios) conceptualmente distintos. Cada uma das etapas é composta por um conjunto de actividades que conduzem à obtenção de um resultado intermédio (“Especificações”; “Estrutura Funcional”, “Princípios para Soluções”; “Composição Modular”; “Anteprojecto”; “Projecto Final” e “Documentação do Produto”) correspondente a cada uma das etapas do processo de projectar.

Associada à decomposição do processo de projectar está a subdivisão do problema global em subproblemas, de níveis de abstracção/complexidade sucessivamente menores, até chegar a problemas elementares, ficando assim definida uma estrutura hierárquica vertical.

Para cada problema elementar serão concebidas várias soluções (elementares) alternativas, através da prática de “pensamento divergente”. A selecção das soluções mais adequadas e mais viáveis, para cada problema elementar, é realizada pela avaliação das várias soluções

consideradas, com base em critérios previamente definidos para o efeito, seguindo-se uma prática de “pensamento convergente”.

O dimensionamento das soluções elementares (peças e componentes básicos) é efectuado à medida que estas vão sendo definidas, sendo os cálculos verificados após a compilação de cada subsolução (subconjunto).

Mediante a compilação das subsoluções seleccionadas, formando subconjuntos e estes num conjunto geral, obtém-se a síntese da solução global que satisfaz o problema global inicial. Pode acontecer que a melhor solução global não seja a compilação das subsoluções que foram consideradas melhores quando analisadas individualmente, mas seja a compilação das subsoluções que, em conjunto, apresentam o melhor resultado global. Fica assim definida a composição modular (ou a arquitectura) do produto.

Idealmente, esta metodologia deveria ser desenvolvida numa sequência unidireccional, desde as actividades iniciais até à conclusão do processo, no entanto, devido à interdependência das soluções alternativas que satisfazem os requisitos de um problema de projecto, poderão gerar-se efeitos contraditórios. Este facto dá lugar à necessidade de optimização, e o processo torna-se iterativo, sendo necessário comparar e melhorar os resultados de cada etapa em função dos resultados obtidos em etapas que lhe são subsequentes.

Durante a concepção de produtos, as questões relacionadas com os custos de produção e com a simplicidade de fabrico e de montagem obrigam o projectista a dar atenção especial às tecnologias de construção, percorrendo transversalmente cada um dos vários níveis hierárquicos do projecto, no sentido horizontal, desde o domínio funcional, passando pelo domínio físico e terminando no domínio do processo.

A metodologia desenvolvida abrange todo o processo de projectar, desde o estabelecimento das “Especificações”, passando pela construção da “Estrutura Funcional”, pela definição dos “Princípios a Utilizar nas Soluções” e da “Composição Modular”, até à elaboração do “Anteprojecto”, do “Projecto Final” e da “Documentação do Produto”. No entanto, é ao nível das actividades relacionadas com a concepção e arquitectura do produto, nas soluções construtivas adoptadas e nos processos de fabrico, que serão utilizados para a sua realização, que a metodologia apresenta as suas principais vantagens.

A representação esquemática adoptada para a metodologia é apresentada na Figura 6.1.

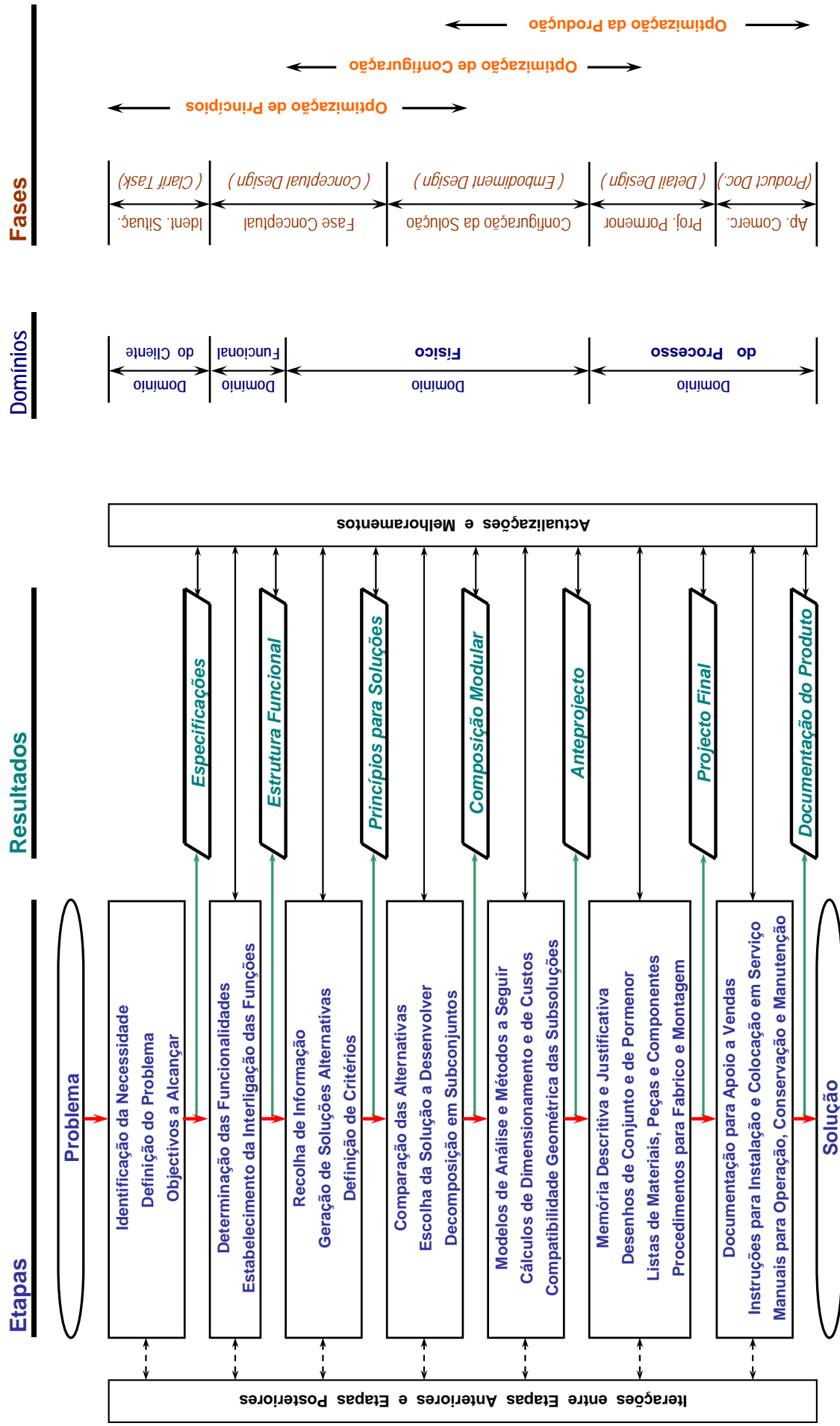


Figura 6.1 – Modelo de Base proposto para aplicação no Projecto de Produtos Únicos.

6.1 Especificações

O processo de projecto inicia-se aquando da descoberta de uma necessidade que se pretende ver satisfeita. Muitas vezes, a própria pessoa que detecta a necessidade, motivada pela vontade de satisfazer as suas aspirações, começa a idealizar soluções, mais ou menos viáveis, dependendo da complexidade da situação, da sua base de conhecimento e da sua apetência natural para criar e projectar.

A satisfação de uma necessidade corresponde à resolução de um problema, cuja solução que vier a ser encontrada é fortemente influenciada pelo enunciado que se estabelece para o problema.

O enunciado do problema deverá traduzir os aspectos fundamentais da necessidade, num ambiente neutro relativamente às soluções que possam ser encontradas, de modo a permitir o desenvolvimento de qualquer solução, por mais diversas que sejam, uma vez que para cada problema há sempre mais do que uma solução, não existindo uma solução que apresente as maiores vantagens em relação a todos os aspectos. Cada solução apresentará vantagens em determinados aspectos e haverá sempre outra solução que, relativamente a um ou mais aspectos específicos, apresentará maiores vantagens.

Para além do objectivo de base de um projecto, existe sempre um conjunto de outros objectivos relacionados com a segurança para os utilizadores, a melhoria das condições de trabalho e a facilidade de conservação e manutenção dos equipamentos. Por exemplo, as soluções adoptadas devem:

- Apresentar elevado grau de segurança relativamente a qualquer pessoa que se encontre nas suas imediações ou que tenha com elas interacção;
- Ser desenvolvidas no sentido de facilitar a utilização, não requerendo cuidados especiais;
- Proporcionar boas condições de trabalho, facilitando tanto quanto possível as tarefas dos seus utilizadores;
- Preservar o ambiente onde irão funcionar, não o degradando, especialmente quando se trate de máquinas que irão funcionar em ambientes fechados;

- Produzir um nível de ruído reduzido;
- Não serem susceptíveis de poluir o ambiente ou de sujar os locais onde forem instaladas;
- Permitir a interligação com outras soluções — como máquinas, equipamentos e acessórios — possibilitando não só a construção de sistemas complexos, mas permitindo também a modificação e a expansão desses sistemas.

As especificações para o projecto compreendem o conjunto de atributos que o resultado (solução) do processo de projecto deverá apresentar para a satisfação das necessidades que conduziram ao desenvolvimento da solução e das restrições, ou constrangimentos, a que a solução e o seu processo de desenvolvimento virão a estar sujeitos.

A definição das especificações resulta da recolha de informação relativa ao levantamento da situação, à identificação das necessidades que se pretende satisfazer, às restrições existentes e aos objectivos a alcançar. O problema fica assim definido e esse enunciado constitui o “Caderno de Encargos” para o processo a desenvolver.

Para o estabelecimento do enunciado do problema, ou seja, para transformar as necessidades e restrições, normalmente expressas em linguagem comum, em especificações de projecto, articuladas em linguagem técnica, precisa e quantificável, o “Desdobramento da Função Qualidade” (*Quality Function Deployment – QFD*) e a sua adaptação para a “Casa da Qualidade”, constituem os métodos recomendados para o desenvolvimento desta actividade, havendo outros métodos, (mencionados no Capítulo 5) que também poderão ser utilizados e para os quais existe abundante literatura.

6.2 Estrutura Funcional

A estrutura funcional é composta pelas várias funcionalidades que será necessário desempenhar para satisfazer as necessidades que deram origem ao processo e pelas inter-relações existentes entre as funcionalidades.

As várias funcionalidades e a sua relação hierárquica resultam, tal como se disse antes, da subdivisão do problema global em subproblemas, numa sequência “*Top-Down*”, em que os níveis de abstracção/complexidade vão sendo sucessivamente menores, até se chegar a problemas elementares.

O estabelecimento correcto das funcionalidades que se pretendem realizar, ou seja a definição dos requisitos funcionais do problema, deve ser efectuado de modo independente da solução que as irá realizar, ou seja deve “imaterializar-se” a solução, para se evidenciar as funcionalidades pretendidas. Assim, as funções pretendidas deverão ser imaginadas a serem “realizadas no espaço”, sem intervenção do produto/objecto/solução que as realizará, correspondendo ao estabelecimento dos requisitos funcionais, segundo a Teoria Axiomática.

A estrutura funcional está na base da arquitectura que posteriormente será adoptada para a solução a desenvolver.

6.3 Princípios para Soluções

Uma vez definido o problema que se pretende resolver, estabelecidas as funcionalidades e os objectivos que se pretendem atingir, as soluções que vão sendo idealizadas dependem fortemente da base de conhecimento e da capacidade criativa de cada projectista. No entanto, nem sempre a base de conhecimento é suficientemente vasta nem a criatividade suficientemente forte para se encontrarem boas soluções.

Para reduzir a subjectividade inerente a esta fase do projecto e enriquecer as soluções que vão sendo geradas, é necessário fazer uma pesquisa da informação existente relacionada com o assunto em estudo.

O problema global a que corresponde o projecto global, por mais complexo que seja, pode sempre ser desdobrado em vários subproblemas que correspondem a projectos mais simples e com menos requisitos, havendo a necessidade de recolher informação ao longo de todas as fases do projecto, dependendo do tipo de problema que se pretende solucionar.

Na Figura 6.2, representa-se a decomposição de um problema global de projecto nos subproblemas que o constituem e, por sua vez, a decomposição destes nos problemas

elementares que compõem cada um dos subproblemas. Nesta figura, está também representada a compilação da solução global, efectuada a partir das subsoluções que a geram, e das soluções elementares que geram estas subsoluções.

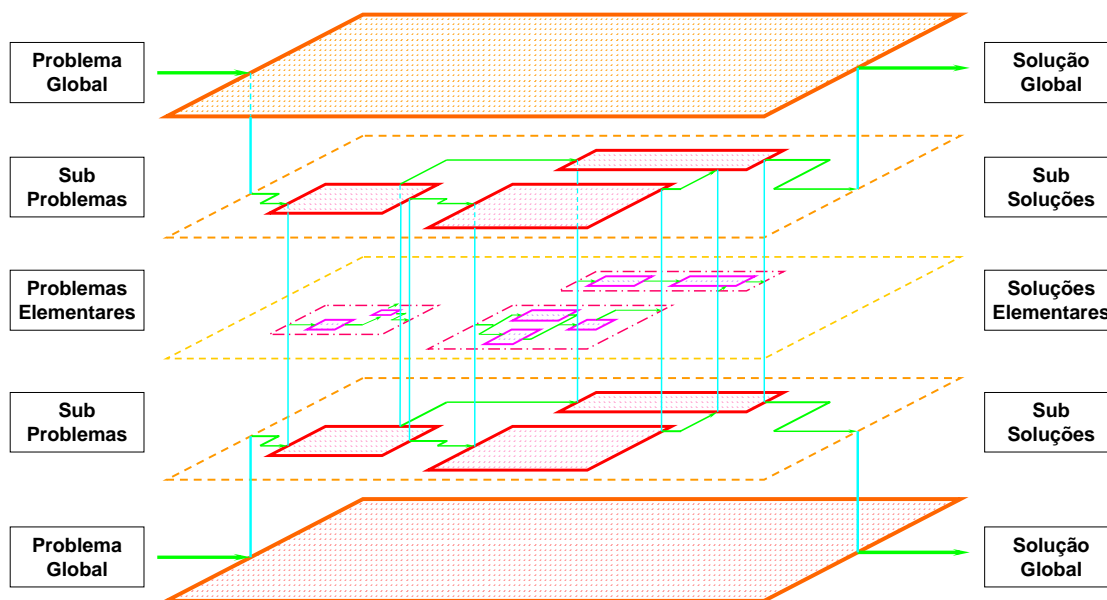


Figura 6.2 – Representação da decomposição de um problema global de projecto e da composição da solução global.

Ao nível dos Sistemas Elementares, cada sistema corresponde a um Requisito Funcional (problema elementar), sendo a este nível que, para cada Requisito Funcional, é encontrado o Parâmetro de Projecto (solução elementar) que melhor satisfaz esse Requisito Funcional específico. É também a este nível que é adoptada a Variável de Processo (processo construtivo) que melhor conseguirá realizar a solução elementar.

A solução global resulta da combinação das “soluções elementares” em “subsoluções” e, por sua vez, da combinação destas em soluções, numa sequência “*Bottom-Up*”.

De um modo geral, é conveniente que seja feita uma pesquisa e recolha de informações relevantes relativamente aos aspectos principais seguintes:

- Identificação das soluções habitualmente utilizadas para a resolução de situações semelhantes, reconhecendo os seus pontos fortes e pontos fracos;

- Identificação das soluções existentes no mercado destinadas às situações em causa;
- Recolha de legislação, directivas e normas internacionais aplicáveis;
- Identificação de materiais e componentes existentes à venda no mercado;
- Recolha de catálogos de fabricantes de peças, acessórios e componentes que possam ser integrados no projecto;
- Quais os custos das soluções actuais;
- Valor que o cliente estará disposto a pagar por uma solução mais vantajosa.

A melhor maneira de poder encontrar boas soluções — idealmente, encontrar a melhor solução — é através da análise de um grande número de soluções possíveis.

Nesta fase, a criatividade de cada projectista desempenha um papel importantíssimo, havendo um grande número de técnicas e métodos para a geração de ideias e soluções, como sejam, analogias, cartas morfológicas, *brainstormings*, etc. Neste contexto, é recomendada a utilização dos três subsistemas: “Inspiração”, “Desmaterialização” e “Recombinação” que constituem a “*Ideation Framework*” [Marques *et al.*, 2008].

A valia de cada solução gerada não é, nesta fase, um aspecto relevante, devendo a sua avaliação ser deixada para depois de ter sido obtido um número considerável de soluções.

A informação recolhida deverá ser guardada, de modo a poder ser fácil e rapidamente encontrada, devendo ser guardada numa forma clara e fácil de perceber. É bastante útil o recurso a esboços e outras representações gráficas, uma vez que certos pormenores, muitas vezes difíceis de descrever por palavras, podem ser facilmente expostos graficamente [Cross, 2007], [Ullman, 1990].

Para o estabelecimento das estruturas funcionais e dos princípios (ou conceitos) para as soluções, é recomendada a decomposição hierárquica em ziguezague entre os domínios — tal como preconiza a Teoria Axiomática de Projecto — começando-se pelo domínio “o Quê” (*What*), indo-se até ao domínio “Como” (*How*), regressando-se ao nível hierárquico imediatamente inferior do domínio “o Quê”, e assim sucessivamente, desde o nível mais

elevado da hierarquia, o do sistema global, até ao nível mais inferior da hierarquia, o mais elementar e de maior pormenor [Suh, 1990].

Tal como se disse anteriormente, deve utilizar-se uma forma de “pensamento divergente” para conceber várias soluções alternativas para cada problema elementar e deve adoptar-se, em seguida, uma forma de “pensamento convergente” para seleccionar as soluções que se apresentem mais adequadas e mais viáveis para cada problema elementar.

A avaliação e a selecção das soluções alternativas podem ser efectuadas mediante a utilização de critérios previamente definidos para o efeito. Como critérios para avaliação das soluções devem ser considerados os dois axiomas da Teoria Axiomática de Projecto e as condições particulares que existam para o problema específico que se pretende resolver.

6.4 Composição Modular

Os princípios construtivos e as linhas de orientação para o projecto serão escolhidos de modo a seguirem os requisitos funcionais e a respeitarem os constrangimentos estabelecidos inicialmente, em função da necessidade que se pretende satisfazer.

Qualquer solução apresenta diversos atributos, mais ou menos benéficos para a resolução do problema. Dificilmente uma solução só terá aspectos positivos, assim como muito dificilmente só terá aspectos negativos, a menos que não seja sequer solução.

Muitos dos atributos não são facilmente quantificáveis, especialmente nesta fase embrionária do projecto, em que nem sequer os aspectos geométricos estão completamente definidos. Assim, a sua avaliação é bastante subjectiva e é feita normalmente em termos qualitativos.

Para se avaliarem as soluções alternativas que sejam geradas ao longo das várias fases do projecto, podem ser considerados os seguintes critérios:

- Cumprimento dos objectivos estabelecidos para o projecto;
- Resistência e fiabilidade;
- Custos de implementação, de operação e de conservação;

- Respeito pelas normas de segurança;
- Facilidade de construção e de montagem;
- Não degradação das condições ambientais;
- Nível sonoro reduzido;
- Facilidade de operação e de manutenção;
- Possibilidades de expansão e de modificação da solução seleccionada;
- Utilização de componentes normalizados, disponíveis no mercado;
- Aspecto estético;
- Durabilidade, estabilidade da solução e resistência ao desgaste e a ataques ambientais;
- Boas taxas de conversão de energia;
- Utilização de materiais reutilizáveis, recicláveis e biodegradáveis.

Em qualquer caso, as soluções escolhidas devem respeitar critérios de simplicidade e, naturalmente, satisfazer todos os requisitos do projecto.

A comparação das soluções poderá ser feita com recurso à análise exaustiva de cada solução, elaborando-se, para o efeito, tabelas com os resultados obtidos. Como critérios de avaliação e aceitação das soluções, para além dos dois axiomas da Teoria Axiomática e dos critérios particulares aplicáveis especificamente a cada projecto que esteja a ser desenvolvido, poderão ser utilizadas outras ferramentas de projecto, como é o caso da “Análise dos Modos de Falha e dos Efeitos” (*Failure Modes and Effects Analysis – FMEA*), ferramenta que se usa para se avaliar a robustez e a fiabilidade da solução.

Quando se está a decidir sobre soluções físicas em que, tanto estas como o processo construtivo que as virá a realizar, têm custos diferentes, um critério que deve estar sempre presente é o custo inerente a cada solução.

A análise das várias soluções é uma tarefa relativamente fácil, quando comparada com a “Tomada de Decisão”, uma vez que esta tem associada a responsabilidade sobre aquilo que irá acontecer no futuro.

Devido ao facto de, como se aludiu antes, não existirem soluções só com aspectos positivos e não existirem soluções só com aspectos negativos, quando se escolhe uma determinada alternativa, fica-se sempre com a sensação de estar a menosprezar os aspectos positivos das soluções que se rejeitam.

Por outro lado, as várias características de uma solução estão muitas vezes relacionadas, de uma forma mais ou menos complexa, existindo quase sempre as chamadas “contrapartidas”, o que prejudica a optimização simultânea de todos os atributos: sempre que se tenta optimizar uma determinada característica do projecto, poderão existir outras características que se vão afastando dos seus valores óptimos.

Em última análise, a optimização, por si só, consome tempo de projecto, dilata os prazos de entrega e aumenta os custos do projecto. O grau de optimização ideal está condicionado pelo tempo disponível e pelo número de unidades iguais que virão a ser construídas no futuro, uma vez que os custos da optimização terão que ser pagos pelo acréscimo de retorno, conseguido pela optimização realizada.

Desta forma, a decisão tem que ser frequentemente uma solução de compromisso, tentando que os parâmetros que se definem para o projecto consigam estabelecer o melhor equilíbrio entre as várias características e respectivos atributos do projecto.

A solução adoptada para desenvolvimento não deverá inviabilizar as soluções que apresentaram “boas classificações”, para que, caso surjam factores que inviabilizem a solução inicialmente seleccionada, possa modificar-se facilmente o produto, implementando-se aquelas soluções alternativas que, de acordo com os dados iniciais, pareciam ser menos vantajosas.

6.5 Anteprojecto

No início desta fase, estão apenas definidos os conceitos, sendo então necessário começar a dar forma às peças que irão constituir a solução que está a ser projectada, assim como é necessário definir as interligações que virão a existir entre as várias partes que constituirão essa solução.

Nesta fase, é necessário decompor o projecto em vários subprojectos mais simples, estabelecendo também as interligações entre eles.

No caso do projecto de objectos físicos, como é o caso do projecto de máquinas, uma parte da configuração da máquina está dependente das condições geométricas e de desempenho estabelecidas para o projecto, de modo a serem respeitados os requisitos estabelecidos.

A configuração da máquina terá também de ser definida em função dos carregamentos que lhe serão aplicados, ou seja, é necessário estabelecer dimensões para as peças de modo a que estas consigam suportar os esforços internos provocados pelos carregamentos, sem serem excedidas as tensões e as deformações admissíveis estabelecidas para cada peça, em função do material em que serão construídas e das condições de serviço a que serão submetidas.

Os carregamentos a que cada peça ficará submetida são originados por forças que podem pertencer a um dos seguintes grupos:

- Forças externas originadas pelos carregamentos exteriores, pelos esforços dinâmicos e ainda pelas forças aplicadas pelas ligações ao exterior, ou apoios, para manter o equilíbrio de forças e de momentos na máquina;
- Forças internas verificadas no contacto entre as várias peças e componentes da máquina, mantendo a sua integridade, como um todo.

Para além destes aspectos, a geometria que venha a ser definida para cada peça deve ter em atenção o processo produtivo que será utilizado para a sua construção e a facilidade com que será realizada a montagem das várias peças e componentes, seguindo as orientações e princípios estabelecidos na perspectiva da engenharia concorrente.

Por outro lado, deve possibilitar a incorporação de outros componentes, necessários para a realização de outras funcionalidades que possam vir a ser requeridas no futuro, sendo o tipo

de construção com características modulares aquele que mais facilita a interligação entre os diversos componentes e subconjuntos da solução, tornando assim as soluções bastante flexíveis.

A utilização de arquitecturas de produto do tipo modular, baseadas em estruturas do tipo “plataforma” (que constituem uma base comum aos vários módulos), permite a modificação das características do produto e das suas funcionalidades, consoante os módulos que sejam aplicados na plataforma. Este tipo de arquitectura também permite a modificação das características construtivas do produto, mantendo-se as mesmas funcionalidades e as mesmas características. Permite ainda futuras expansões dos sistemas, quer em termos físicos, quer em termos de sofisticação e do grau de automatização do sistema, por adição de novos módulos ou de novos equipamentos.

Relativamente às dimensões, estas serão determinadas para que cada peça por si, e o produto no seu todo, consigam suportar os carregamentos a que serão submetidos. É, pois, necessário conhecer as tensões e as deformações que os carregamentos lhes poderão provocar.

Como as tensões e as deformações sofridas pelos corpos dependem não só dos esforços internos (originados, por seu turno, pelas solicitações a que cada peça virá a ser submetida), mas também das características geométricas e das propriedades mecânicas dos materiais em que são construídas, recomenda-se para o dimensionamento de cada peça a adopção da sequência descrita nos subcapítulos seguintes. À semelhança de todo o processo de projectar, também a actividade de dimensionamento está sujeita a eventuais ciclos iterativos.

Para esta actividade, existem numerosas ferramentas de projecto como, por exemplo, o “Método dos Elementos Finitos”, com base no qual foram desenvolvidos diversos programas (*softwares*) destinados ao cálculo automático de tensões e deformações, com simulação virtual, que constituem uma preciosa ajuda para os projectistas compreenderem as consequências das escolhas e das decisões que tomam no processo de dimensionamento.

6.5.1 Escolha dos Materiais

A escolha do material em que cada peça será construída é feita em função das características ambientais do local onde a peça irá desempenhar as suas funções e em função dos custos de

aquisição e de transformação dos materiais, começando-se por considerar primeiro os materiais mais facilmente disponíveis e mais fáceis de maquinar e transformar. De um modo geral, os materiais analisados nesta primeira aproximação são aqueles que apresentam propriedades mecânicas mais fracas, sendo normalmente os que têm menores custos e que são disponibilizados mais facilmente.

Após a realização dos cálculos de dimensionamento, poderá ser necessário mudar para um material com melhores propriedades mecânicas ou com diferentes propriedades físicas, eventualmente, mudar para um material mais leve, etc., no caso de não ser conveniente modificar a geometria das peças ou aumentar as suas dimensões.

6.5.2 Determinação dos Esforços Internos - Construção de Modelos

A determinação dos esforços internos, que serão verificados em cada peça, é feita com recurso a modelos simplificados, que traduzam com boa aproximação a situação que está a ser estudada, uma vez que a realidade é demasiado complexa para que o seu estudo seja viável.

Assim, nestes modelos, uma grande parte dos factores, cuja influência nos efeitos que se está a estudar é diminuta, não é considerada de modo explícito, sendo a sua influência salvaguardada quando da selecção do coeficiente de segurança que será utilizado para a definição dos valores das tensões e deformações admissíveis.

No entanto, relativamente aos factores que serão incluídos no modelo, haverá sempre a preocupação de que a situação em estudo seja uma situação mais desfavorável ou, quando muito, equivalente à situação real. Desta forma, os valores que se vier a obter, estando de acordo com o modelo simplificado, estarão no lado da segurança relativamente à realidade, ou seja, os valores dos esforços internos que vierem a verificar-se na realidade serão equivalentes, ou menores, do que os valores obtidos através do nosso modelo de cálculo.

Os esforços internos que ocorrem numa peça — o Esforço Normal, os Esforços Transversos, o Momento de Torção e os Momentos de Flexão — resultam das forças que cada uma das partículas de uma secção da peça exerce sobre a partícula homóloga da secção vizinha, e vice-versa, segundo a Lei da Acção-Reacção.

Como resultantes destas forças, cada secção exercerá sobre a secção vizinha, uma força e um momento, calculados em relação ao centróide da secção.

Como é sabido, a decomposição dessa força segundo as direcções ortogonais — perpendicular e tangenciais ao plano da secção — dá origem, respectivamente, ao esforço normal e aos esforços transversos, nessa secção. Por sua vez, a decomposição do momento, segundo as direcções acima referidas, dará origem, respectivamente, ao momento de torção e aos momentos flectores.

Aplicando as equações do equilíbrio estático ao longo do comprimento de cada peça é possível conhecer os valores dos esforços internos em cada secção do corpo e traçar os diagramas de esforços internos, que facilitam bastante a identificação das secções mais solicitadas.

6.5.3 Estabelecimento das Dimensões de Cada Peça

Uma vez conhecidos os esforços internos em cada peça, existem numerosas configurações geométricas possíveis que garantem que as tensões e as deformações não excedem os valores admissíveis.

Para isso, é sempre possível estabelecer dimensões para a secção transversal de cada peça, assim como jogar com a distância dos vários pontos da secção relativamente ao seu centróide, de modo a aumentar a área resistente e os momentos da área em relação aos eixos ortogonais, perpendicular e tangenciais ao plano da secção.

Assim, a configuração que se procura será aquela que dará origem a peças com menor quantidade de material, com geometrias que facilitem os processos de produção e montagem, e cujas dimensões das secções transversais garantam que as tensões e as deformações de serviço são inferiores aos valores máximos admissíveis.

No estabelecimento da geometria de cada peça é também necessário garantir que, no caso de corpos esbeltos sujeitos a esforços de compressão e no caso de perfis de paredes finas, não haja o risco de se tornarem globalmente instáveis ou de vir a existir instabilidade local.

O estabelecimento da geometria de cada peça está ainda sujeito à compatibilidade com as restantes peças e componentes com que irá ligar-se e é condicionado pela configuração final da máquina, de modo a facilitar a montagem das peças e a contribuir positivamente para a aparência de todo o conjunto, quando avaliado do ponto de vista estético.

6.5.4 Cálculos de Dimensionamento

Na grande maioria dos casos, o projecto é um problema em que o número de variáveis é muito superior ao número de equações linearmente independentes que é possível estabelecer, pelo que muitos dos parâmetros têm que ser arbitrados e definidos com base em estimativas ou em factores exógenos ao cálculo, muitos deles impostos por condições de fabrico, por questões de disponibilidade de componentes no mercado, etc., sendo nestes casos, o “bom senso” a regra a utilizar para a estimação, ou mesmo definição, de alguns parâmetros de projecto.

Sempre que se recorre à estimação de valores para determinados parâmetros, para se poder calcular outros parâmetros, é necessário verificar se os valores estimados são coerentes com os valores que se calculou. Caso se verifique um desvio significativo dos valores estimados, será necessário refazer os cálculos, utilizando-se valores para as estimativas mais próximos dos valores que seriam coerentes com os valores obtidos pelo cálculo.

Um bom exemplo desta situação é o caso do dimensionamento de uma viga, da qual não se conhece, à partida, o seu peso próprio e não é possível estabelecer uma correlação directa entre a sua resistência e o seu peso próprio, uma vez que a geometria das vigas disponíveis no mercado varia de modo descontínuo.

A fixação de parâmetros de cálculo, nos casos em que as matrizes de projecto têm o número de linhas e o número de colunas iguais (matrizes quadradas), constitui uma forma de tornar problemas acoplados em problemas desacoplados, ou desacopláveis.

A escolha da sequência que o processo de dimensionamento deverá seguir, no caso de problemas desacopláveis, é extremamente importante, uma vez que os resultados que vão sendo obtidos servem de base à determinação de outras dimensões e de outros parâmetros.

Para o desenvolvimento do processo de dimensionamento é recomendável a utilização do “Método das Linhas de Forças”, o qual deverá ser aplicado numa sequência “*Bottom-Up*”.

6.5.5 Compatibilidade Geométrica das Soluções

Após terem sido dimensionadas as várias partes que constituem a solução global, como se se tratasse de subprojectos independentes, e depois de terem sido escolhidos os vários componentes que irão integrar a solução global – sendo geralmente elementos padronizados existentes à venda no mercado como sistemas independentes – é então necessário juntar todas as peças, localizando-as nos pontos onde irão ser instaladas, formando assim o “*puzzle*” com que cada solução global pode ser comparada.

Desenha-se, assim, o conjunto da máquina, que será constituído pelas várias peças e componentes, nas posições em que cada um deles será instalado, de modo a verificar a existência de interferências geométricas ou de incompatibilidades nas suas ligações.

Nos casos em que as máquinas fiquem expostas ao contacto com pessoas, é conveniente que as peças móveis fiquem resguardadas, em conformidade com o estabelecido pela “Directiva Máquinas”, em vigor na União Europeia [Directiva 2006/42/CE]; [Directiva 2009/127/CE]; [Decreto-Lei N.º 103/2008].

Ao atribuir as dimensões às peças, é necessário ter em consideração as dimensões normalizadas dos materiais que serão utilizados, de modo a conseguir um bom aproveitamento dos mesmos e reduzir os desperdícios de materiais.

6.6 Projecto Final - Comunicação e Apresentação do Projecto

O projecto final é o meio que reúne todos os resultados do processo de projecto que foi desenvolvido e que servirá para comunicar esses resultados aos vários intervenientes no processo de projecto e no processo de construção/produção das soluções a realizar.

A transmissão de informação poderá ser realizada de várias formas, devendo o projectista dominar várias linguagens, desde a comunicação oral, escrita em texto, desenhada, em papel ou em computador, até à construção de modelos, de maquetas e à simulação virtual.

De uma forma resumida, pode dizer-se que os projectos de engenharia são compostos pelas seguintes peças principais:

- Memória Descritiva e Justificativa;
- Desenhos de Conjunto e de Pormenor;
- Listas de Materiais, Listas de Peças e Listas de Componentes;
- Procedimentos e Instruções para Fabrico e Montagem.

6.6.1 Elaboração e Realização do Projecto

Depois de concluído o projecto, este será comunicado a outras pessoas, sendo utilizados diversos meios para conseguir transmitir, ou justificar, todas as ideias que lhe estão subjacentes.

Para além de outros elementos que facilitem a compreensão de aspectos particulares de cada situação, normalmente o projecto de uma máquina é constituído pelos elementos principais seguidamente enunciados:

- Memória descritiva e justificativa, da qual fazem parte a especificação dos materiais e dos componentes de compra no mercado que serão utilizados na construção da máquina, a descrição das funções a realizar, as dimensões gerais da máquina e dos seus componentes, as suas características técnicas e construtivas (velocidades, capacidades de carga e de realização, ciclos de funcionamento, processos de fabrico, etc.);
- Cálculos de dimensionamento;
- Desenho de conjunto geral;

- Desenhos de cada subconjunto;
- Desenho de fabrico de cada peça;
- Listas de peças e componentes;
- Listas de materiais;
- Listas de corte;
- Croquis de planificação para traçagem de peças em chapa quinada ou calandrada;
- Cópias de catálogos dos componentes incorporados na máquina;
- Procedimentos e sequências de montagem;
- Diagramas e esquemas dos circuitos hidráulicos e pneumáticos.

Nas situações em que uma máquina vá funcionar integrada num sistema composto por várias máquinas, é também conveniente a apresentação dos seguintes elementos:

- Desenho de implantação da máquina e das suas interligações com os restantes elementos do sistema;
- Diagrama de sequência de operações e funções a realizar pela máquina;
- Desenhos esquemáticos que ilustrem o funcionamento de cada um dos equipamentos incluídos no sistema.

6.7 Documentação do Produto

Após a conclusão da definição da solução e do processo para a realizar, é necessário dar a conhecer aos potenciais clientes as possibilidades e características do novo produto, assim como é necessários dar a conhecer aos utilizadores o modo como deverão interagir com a solução e quais as precauções que deverão tomar.

6.7.1 Documentação para Apoio Comercial

Com o objectivo de promover a venda de novos produtos semelhantes (ou, se possível, iguais) ao produto projectado, numa missão de apoio à actividade comercial, cabe também ao projectista a tarefa de elaborar documentos que cubram os aspectos a seguir indicados:

- Identificar a máquina e as suas características principais;
- Definir as principais funções e aplicações da máquina, evidenciando as vantagens que a utilização dessa máquina pode proporcionar;
- Permitir, de uma forma célere e expedita, a definição dos parâmetros adequados a cada situação;
- Determinar os custos inerentes à máquina especificada ou aos vários módulos, acessórios e peças de reserva recomendados.

No caso de se tratar de uma nova linha de produtos, da qual a máquina projectada fará parte, será também necessário elaborar os manuais do produto, os quais servirão de base às actividades comerciais relativas a este tipo de equipamentos.

Destes manuais fazem parte a apresentação das características do produto, das suas aplicações, do modo de selecção dos parâmetros principais dos tipos de máquinas mais adequados a cada situação em concreto, dos acessórios que podem ser integrados no sistema global com vista à realização de funcionalidades adicionais, assim como da determinação dos custos e, conseqüentemente, dos preços de cada componente, de cada máquina, ou de cada sistema global.

Depois de definidos os materiais a utilizar na construção de cada peça, assim como a sua configuração geométrica, o método e o respectivo processo de produção e, uma vez escolhidos os componentes que serão integrados na máquina, é então possível fazer a estimativa do custo das matérias-primas e da mão-de-obra necessárias para a construção de uma máquina.

É com base neste trabalho de orçamentação e custeio que são estabelecidos os preços de venda de cada máquina e que se constroem as tabelas de preços para os produtos, atendendo

não só aos custos directos de produção, mas também aos custos indirectos inerentes à empresa que irá produzir as máquinas.

A margem de comercialização, existente entre os custos e os preços de cada produto, é estabelecida em função da estratégia de colocação no mercado que, em cada momento, é mais vantajosa para a empresa.

6.7.2 Colocação em Serviço, Exploração e Operação

Para além do projecto dos equipamentos propriamente dito, cabe também ao projectista a tarefa de elaborar os correspondentes manuais de instruções para montagem e instalação dos equipamentos no seu local de funcionamento, assim como os manuais de instruções para operação e exploração dos equipamentos.

Estes manuais devem dar destaque ao modo como os equipamentos devem ser utilizados e quais os cuidados e precauções que devem ser tomados para a sua operação de forma correcta e segura.

No caso de sistemas constituídos por diversas máquinas, após a sua instalação e depois de realizados ensaios de funcionamento é necessário actualizar todos os elementos de projecto, em função das modificações ao projecto inicial que se verificarem necessárias.

Além disso, deverá ser preparada a documentação (“Telas Finais” ou “*As Built*”) que será entregue ao dono da obra, a qual deve incluir, entre outros, os seguintes elementos:

- Memória descritiva do sistema e dos seus componentes;
- Desenhos de conjunto geral do sistema e de cada um dos seus equipamentos;
- Diagramas de circuitos hidráulicos e de circuitos pneumáticos;
- Recomendações de segurança;
- Manuais de instruções de funcionamento e de operação do sistema e de cada um dos seus equipamentos;

- Manuais de manutenção e conservação para cada um dos equipamentos;
- Certificados e garantias dos materiais e componentes utilizados na fabricação dos equipamentos;
- Catálogos dos componentes incorporados nos equipamentos, indicação dos respectivos fabricantes e de possíveis fornecedores, no caso de produtos à venda no mercado;
- Lista de peças de reserva recomendadas, no sentido de minimizar os tempos de paragem dos equipamentos, durante as intervenções de manutenção preventiva ou correctiva.

6.7.3 Conservação, Manutenção e Fim de Vida Útil

Para que os equipamentos desempenhem as funções para as quais foram concebidos durante o maior intervalo de tempo possível, é necessário elaborar os denominados manuais de conservação e manutenção dos equipamentos, os quais indicam os cuidados e acções necessários para a conservação e manutenção dos equipamentos, para além dos elementos de projecto anteriormente referidos.

Como exemplo de manuais de instruções, conservação e manutenção para uma máquina podem ser tomados os que são realizados para os veículos automóveis, sendo um bom modelo para a elaboração deste tipo de elementos técnicos.

7 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E ANÁLISE DE CASOS PRÁTICOS

A aplicação da metodologia teve em consideração as particularidades do projecto de produtos realizados por encomenda, o qual é orientado para a satisfação do cliente, pretendendo-se que as características físicas e o desempenho das funcionalidades do produto traduzam os requisitos definidos pelo cliente.

Devido ao facto de se tratar de um processo desenvolvido em pequenas e médias empresas, é fortemente influenciado pelas características económicas do mercado, quer em termos do tipo de equipamentos que deverá ser projectado, quer em termos do modo como os mesmos deverão ser construídos.

Para validação da metodologia, foram utilizados exemplos de máquinas destinadas a movimentação de materiais que, por natureza, se destinam a interligar outros equipamentos existentes, estabelecendo requisitos e constrangimentos imperativos, relativamente ao tipo de produtos, às localizações de partida e de chegada, às cadências e sequências de

funcionamento, etc., sendo, portanto, concebidas em função das necessidades concretas e específicas do contexto em que irão operar.

Para simplificar a apresentação dos casos e não tornar este documento excessivamente longo, foi escolhido um projecto, ao qual foi aplicada a metodologia compilada neste trabalho. Assim, cada um dos Subcapítulos 7.1 a 7.5, seguintes, corresponde a um caso de aplicação prática de um dos aspectos principais da metodologia apresentados no Capítulo 5.

Os casos de aplicação prática que são apresentados evidenciam as vantagens da utilização dos procedimentos enunciados a seguir.

7.1 Enunciado do Problema e Concepção da Solução

Como exemplo de aplicação dos princípios enunciados no Subcapítulo 5.1, é apresentado a seguir um caso em que era necessário controlar o conteúdo de todas as caixas saídas da zona de embalagem de uma “Linha de Produção de Equipamentos Electrónicos”, para garantir que o conteúdo de cada caixa que seguia para a zona de paletização e expedição estava correcto, isto é, que continha todos os elementos especificados e não tinha elementos repetidos, nem elementos não pertencentes à caixa inspeccionada.

A concepção da solução começou pela definição do princípio/critério de validação do conteúdo de cada caixa, com a restrição de que não é permitido abrir a caixa para verificação.

De entre as várias soluções possíveis, devido a questões de ordem financeira, foi decidido utilizar como critério de aceitação ou rejeição das caixas a comparação do peso total de cada caixa, medido numa balança electrónica de precisão, com o peso total esperado para uma caixa com o conteúdo correcto.

Na definição da solução, foi ponderada a possibilidade de existirem caixas cujo conteúdo, não sendo o correcto, mas em que a soma do peso dos vários componentes presentes na caixa totalizasse um peso igual a este. No entanto, dada a reduzida probabilidade de ocorrência deste acontecimento, foi aceite que a solução a implementar não detectasse estes casos.

O sistema deveria prever a possibilidade de ajustamento do peso esperado, devido às diferentes combinações de conteúdos, as quais dependem do cliente final a que se destine.

Por outro lado, o sistema deveria ser suficientemente sensível para conseguir detectar a falta ou a repetição do componente mais leve que, neste caso, seriam os folhetos publicitários ou os invólucros em plástico.

Houve a preocupação de estabelecer o enunciado do problema em conjunto com o cliente (fabricante dos equipamentos electrónicos), de modo a que o enunciado traduzisse, o mais fielmente possível, as suas necessidades.

Dada a capacidade de ajustamento da solução (em termos de definição do peso esperado e de ajustamento da tolerância admissível), foi possível efectuar a regulação da solução para compensação da humidade presente nas cartonagens. Este aspecto não tinha sido pensado inicialmente, só tendo sido verificado quando, num dia de muita humidade, começaram a aparecer muitas caixas que, embora tivessem o conteúdo correcto, apresentavam peso superior ao esperado.

Partindo de um “fluxo” de caixas, irregularmente espaçadas, transportadas por gravidade sobre um transportador de rolos livres, era necessário controlar as caixas uma a uma.

O processo de concepção da solução passou então pela decomposição do problema global nos vários subproblemas que seria necessário resolver, ou seja, realizar as funcionalidades (requisitos funcionais) a seguir indicadas, para satisfazer a necessidade do cliente.

- Separação das caixas que, eventualmente, possam vir juntas;
- Interrupção do “fluxo” de caixas a montante, enquanto uma caixa estivesse a ser controlada;
- Medição do peso de cada caixa e comparação com o peso esperado;
- Decisão de deixar a caixa correcta seguir o circuito principal para paletização e expedição;
- Remoção das caixas incorrectas do circuito principal para a zona de expedição;
- Reenvio das caixas rejeitadas para a zona de embalagem;

- Acumulação das caixas rejeitadas junto à zona de embalagem, onde ficam em espera até serem recolhidas pelos operadores que as irão verificar;

Para além destas funcionalidades pretendidas, havia ainda constrangimentos inerentes à linha de produção existente, ao facto de as caixas terem que ser transportadas ao alto e em recipientes condutores (para evitar acumulação de electricidade estática), à fragilidade inerente aos produtos acabados (cujas caixas não podem ser danificadas), etc.

As funcionalidades acima descritas foram idealizadas como se estivessem a ser realizadas no espaço, sem qualquer intervenção de objectos materiais, com excepção das próprias caixas, sobre as quais seriam realizadas as funcionalidades pretendidas.

Simultaneamente, foram concebidas várias soluções alternativas para a realização de cada uma das funcionalidades acima descritas, num processo de “decomposição em zigue-zague”, a partir do qual nasceram a estrutura funcional e a estrutura modular do produto, e que consistia, essencialmente, no seguinte:

- A concepção começou pela “imaterialização”, no nível de abstracção mais elevado, ficando apenas os requisitos funcionais, para os quais foram criadas soluções físicas, seguindo as orientações da “*Ideation Framework*”, capazes de realizar as funcionalidades correspondentes aos requisitos funcionais pretendidos;
- Após esta fase, foi necessário “decompor” a solução nos elementos que a constituem, definindo-se “sub-requisitos funcionais”, num nível de abstracção menor e, novamente, criar “subsoluções” capazes de realizar as funcionalidades dos “sub-requisitos”, e assim sucessivamente;
- Deste processo nasceu a “estrutura funcional” do produto e foram definidas as interligações entre os vários módulos que compõem o produto (neste caso, uma estrutura modular);
- A criação de soluções, utilizando o processo de “recombinação”, foi repetida várias vezes ao longo de todo o processo de concepção do produto, desde o nível de abstracção mais elevado até ao nível mais elementar, ou seja, desde a solução de uma forma genérica (anteprojecto) até ao pormenor básico. Cada pormenor teve que ser definido de forma

muito concreta e rigorosa (num desenho de projecto de pormenor) para cada componente que constituiu uma solução elementar;

- A “solução global” alcançada foi o resultado da combinação das “subsoluções” seleccionadas que, por sua vez, resultaram da combinação mais vantajosa de “soluções elementares” que, em conjunto, apresentaram maior probabilidade de sucesso na satisfação da necessidade identificada.

A aplicação deste procedimento resultou numa solução bem sucedida, a qual é mostrada na Figura 7.1.



Figura 7.1 – Vista geral do “Sistema de Verificação de Peso e Recondução de Caixas Não Conformes para Correção”.

7.2 Modelos Teóricos Simplificados

A decomposição em zigue-zague, referida no Subcapítulo 7.1, anterior, foi acompanhada pela elaboração de modelos de soluções, a maior parte dos quais realizados à mão livre, numa fase de anteprojecto, tendo em vista a obtenção de uma representação da solução global para apresentação ao cliente.

Na fase de apresentação de proposta ao cliente final, ainda não era certo que a encomenda para a realização da solução nos fosse entregue, pelo que os recursos despendidos nesta fase deveriam ser os mínimos necessários, uma vez que, no caso de não nos ser confirmada a encomenda, não receberíamos qualquer compensação financeira para cobrir os custos inerentes à apresentação da proposta.

Por outro lado, foi necessário estimar os custos inerentes à realização da solução, sendo para o efeito necessário prever os recursos envolvidos e os tempos de execução das várias tarefas para realização da solução, de modo a obter-se uma estimativa para o preço e para o prazo de entrega da solução.

Dado tratar-se de um projecto multidisciplinar, foi necessário pedir propostas, a outras entidades, para a realização das restantes especialidades envolvidas (para além da parte mecânica), como foi o caso da parte de Pesagem Electrónica, da parte de Instalação Eléctrica e da parte de Automação do funcionamento de todo o sistema.

Para esse efeito, foram enviadas consultas a potenciais fornecedores, com um modelo esquemático, realizado à mão livre (o qual foi reproduzido na Figura 7.2), acompanhado de uma memória descritiva, para especificar o que era pretendido.

Quando o referido esquema foi elaborado, não havia a intenção de o incluir neste trabalho (nem havia certeza deste projecto vir a ser realizado), não tendo havido muito cuidado com a qualidade gráfica do mesmo. Embora este esquema pudesse ter sido melhorado, consideramos que a versão original ilustra melhor o que se pratica na realidade.

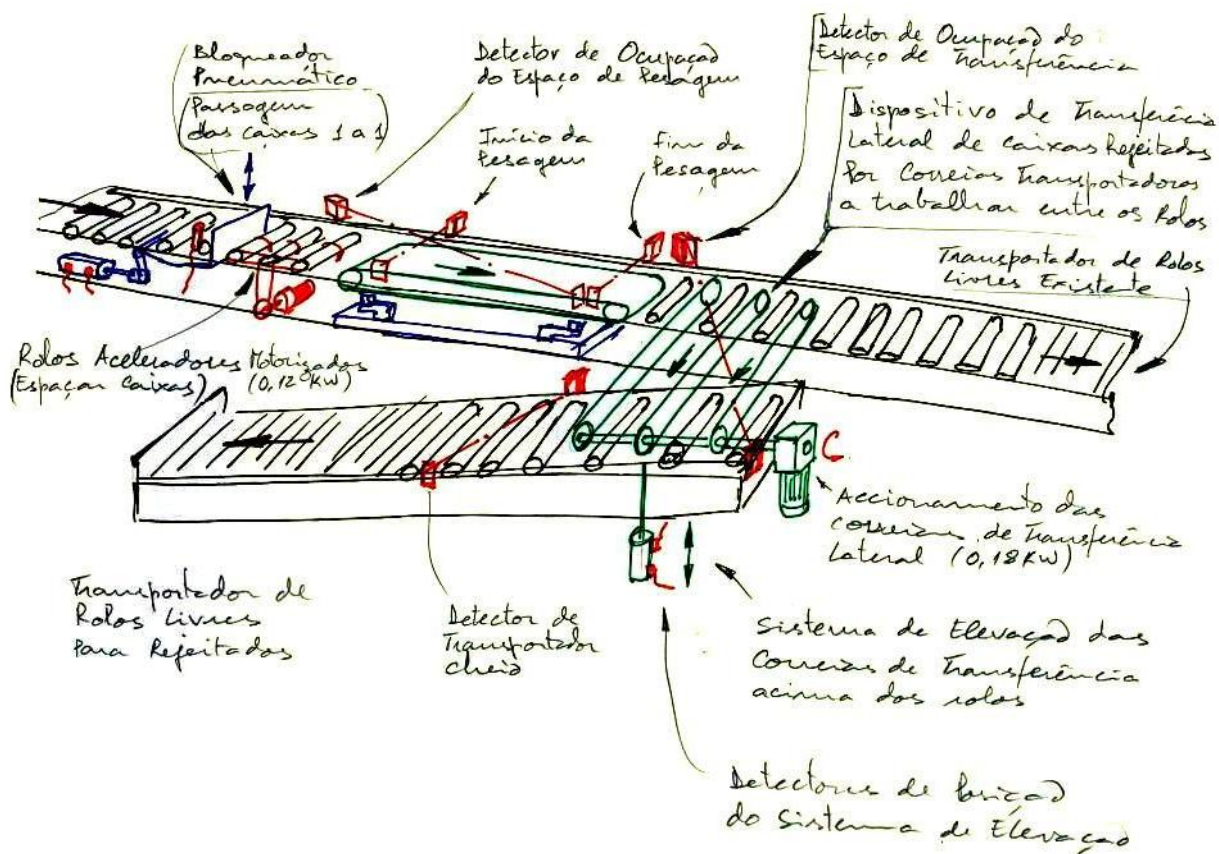


Figura 7.2 – Representação esquemática da solução proposta.

O projecto de pormenor só foi elaborado após a adjudicação da proposta de solução, por parte do cliente. Na Figura 7.3 apresenta-se o “Desenho de Conjunto Geral”, onde os vários elementos que constituem a solução global se encontram implantados no seu local de funcionamento.

Nas Figura 7.4, Figura 7.5, Figura 7.6, Figura 7.7, Figura 7.8 e Figura 7.9, encontram-se algumas fotografias que mostram o aspecto final da solução desenvolvida para “Verificação de Peso e Recondução de Caixas Não Conformes para Correção” e que mostram as várias subsoluções que compõem a solução global.



Figura 7.4 – Aspecto geral da Solução para Verificação de Peso e Retorno de Caixas Não Conformes para correção.



Figura 7.5 – Sistema de Separação e Espaçamento de caixas.



Figura 7.6 – Sistema de Pesagem Electrónico.



Figura 7.7 – Sistema de Transferência Lateral de caixas não conformes.



Figura 7.8 – Sistema Pneumático de Elevação das Correias de transferência lateral.

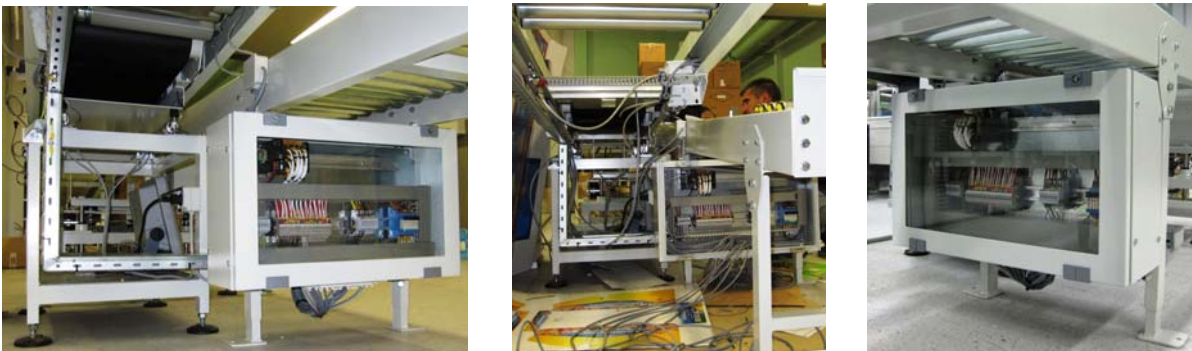


Figura 7.9 – Instalação Eléctrica e Automação do funcionamento da solução.

A aplicação do princípio do “*Minimum Constraint Design - MinCD*” está de acordo com a Teoria Axiomática de Projecto, nomeadamente com o primeiro axioma, tendo este aspecto sido mostrado através de exemplos de soluções para apoio de um veio rotativo e para apoio de um transportador pivotante [Santos *et al.*, 2009]. Este princípio permite obter soluções desacopladas, sendo, portanto, uma boa prática de projecto.

Também na realização deste projecto foram encontradas numerosas situações em que foi aplicado este princípio, para insensibilizar peças pequenas e de rigidez elevada em relação às eventuais variações dos dados do problema, devidas à incerteza presente nos mesmos.

Na Figura 7.11, é mostrado um exemplo de “*Minimum Constraint Design*” onde se vê o actuador linear pneumático, que acciona o movimento do batente retráctil de controlo do “fluxo” de caixas, no seu local de funcionamento. Devido ao tipo de construção (chapa fina, ligações aparafusadas com folgas, ligações soldadas, eventualmente, com empenos residuais, etc.) uma ligação articulada simples não garantiria que, depois de se fixar o corpo do cilindro à estrutura metálica do transportador, a “forquilha” instalada na extremidade da haste ficasse devidamente alinhada com o furo da manivela do batente retráctil.

Para evitar os esforços radiais a que a haste do cilindro poderia ficar sujeita, o que contribuiria para um desgaste prematuro dos vedantes da cabeça do cilindro, adoptou-se o princípio do “*Minimum Constraint Design*”, tendo sido decidido que a fixação da extremidade do corpo do cilindro seria uma articulação do tipo “rótula”. A extremidade do cilindro passou, assim, a ter liberdade de rotação em torno das três direcções do espaço, permitindo o correcto alinhamento do cilindro pneumático em qualquer ponto do seu curso, conforme ilustrado na Figura 7.10.

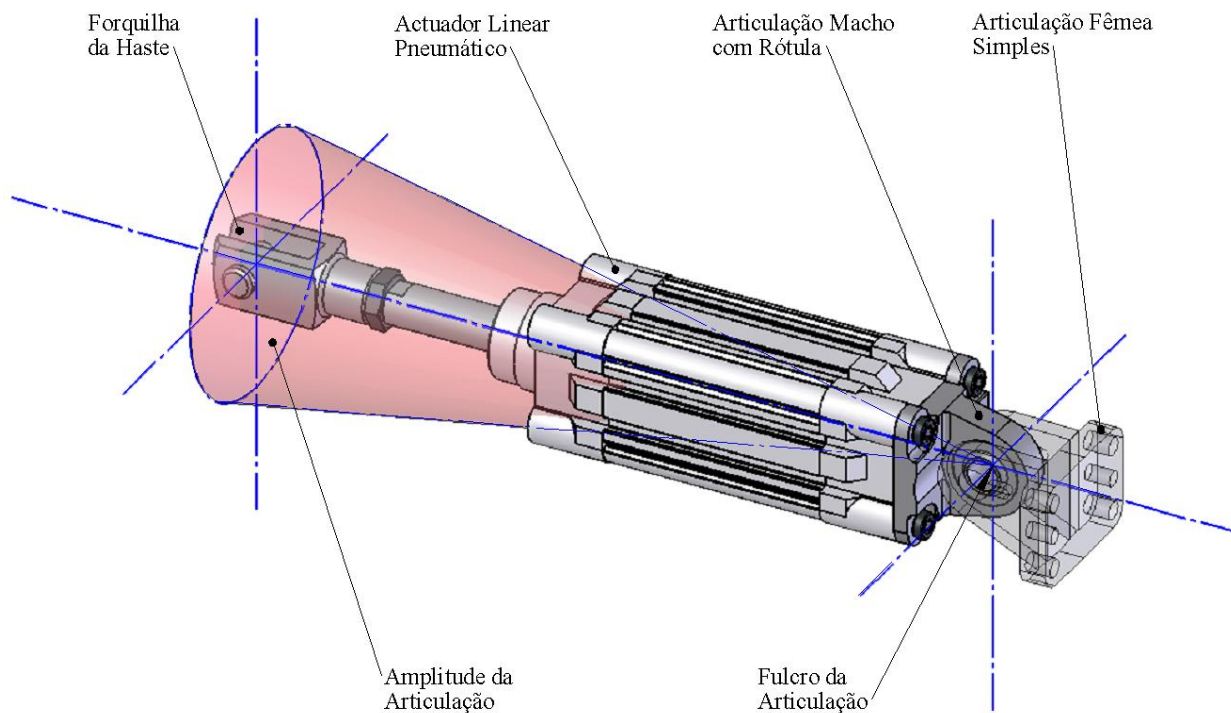


Figura 7.10 – Possibilidade de orientação do eixo do Cilindro Pneumático, conferido pela fixação do tipo rótula.

No caso da “forquilha” instalada na extremidade da haste, não é necessária a utilização de rótula, uma vez que os, eventuais, desalinhamentos angulares entre o eixo do furo da manivela do batente retráctil e o eixo da cavilha da forquilha são pequenos e são “neutralizados” pela folga existente entre a cavilha da forquilha e o furo da manivela do batente. Na Figura 7.11 é mostrado o Cilindro Pneumático que actua o batente retráctil, no seu local de funcionamento.

No projecto de produtos compostos por vários componentes e subconjuntos de peças, é necessário ter em consideração a arquitectura adoptada para o produto, a configuração das peças, assim como as dimensões e as tolerâncias das mesmas [Whitney, 2004].

A necessidade crescente da intermutabilidade dos componentes e a evolução dos métodos de montagem dos equipamentos mecânicos tornaram o toleranciamento uma vertente de grande importância no desenvolvimento dos projectos de engenharia [Navas, 2007].

Os efeitos do toleranciamento sentem-se não só nas áreas de projecto e de fabricação, mas especialmente na área de montagem dos equipamentos e na instalação dos mesmos no seu

local de funcionamento, estando a produtividade muito dependente da escolha correcta dos ajustamentos, ou seja, da natureza da conjugação dos componentes, a qual depende, por sua vez, da atribuição adequada das tolerâncias dimensionais e geométricas [Kamm, 1996].



Figura 7.11 – Fotografias do Cilindro Pneumático que actua o Batente Retráctil.

O tipo de apoios utilizados para fixação do actuador linear pneumático, supramencionado, é semelhante ao tipo de apoios utilizados para apoio do parafuso sem-fim, relativamente ao qual ficou comprovada a sua compatibilidade com o Primeiro Axioma da Teoria Axiomática de Projecto [Santos *et al.*, 2009].

Em ambos os casos, a aplicação dos princípios do “*Minimum Constraint Design*” anulou as eventuais variações que poderiam ocorrer relativamente aos dados do problema e às características do produto, devido às incertezas existentes em termos geométricos.

7.3 *Minimum Constraint Design* e a Teoria Axiomática de Projecto

No caso de um Transportador de Parafuso Sem-fim, devido à elasticidade dos materiais e às imperfeições dos processos de fabrico, não é possível garantir que o eixo do parafuso seja uma linha perfeitamente recta, que as placas que servem de base às chumaceiras dos apoios

do parafuso sem-fim sejam coplanares, ou que os eixos dos apoios do parafuso sem-fim sejam coaxiais, entre muitas outras condições que poderíamos enumerar.

No transportador acabado de referir pretende-se suportar o parafuso sem-fim apenas pelas suas extremidades e deixá-lo livre para rodar em torno do seu eixo, o que significa ter de imobilizar cinco dos seis graus de liberdade do parafuso sem-fim, através dos seus apoios, cujos deslocamentos (lineares e angulares) e as respectivas reacções (forças e momentos) são mostrados na Figura 7.12.

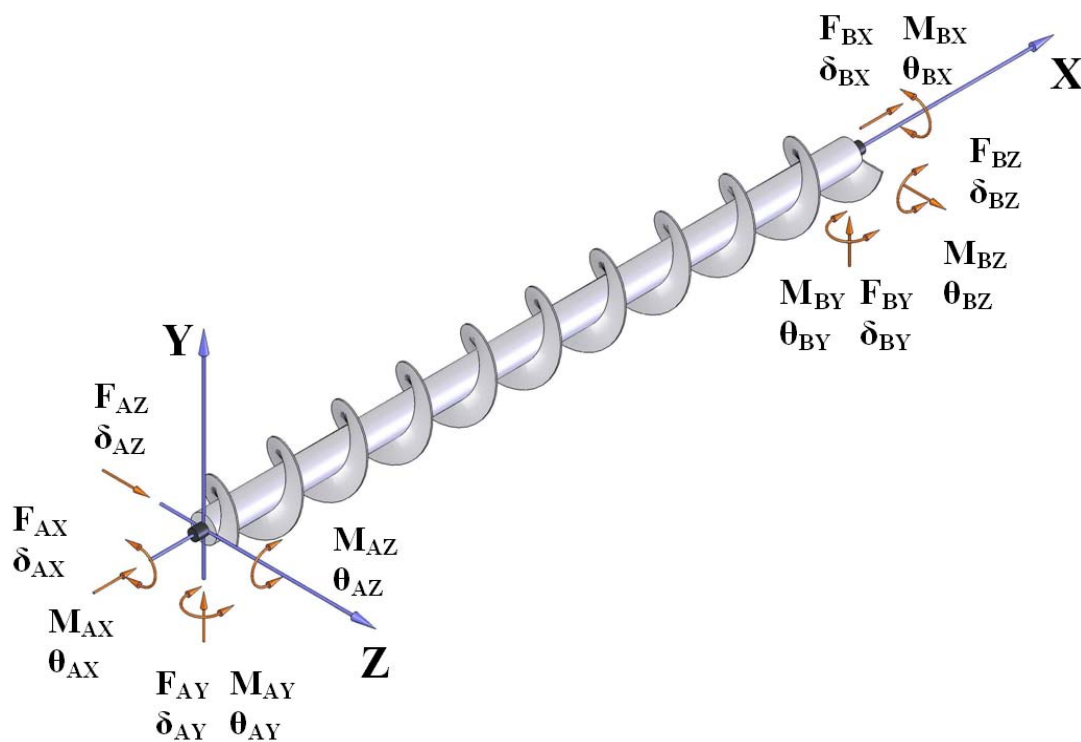


Figura 7.12 – Representação dos Graus de Liberdade presentes nos apoios do Parafuso Sem-fim e das Reacções para imobilização dos Graus de Liberdade, respectivos.

Se admitirmos que o parafuso sem-fim está suportado por rolamentos rígidos de esferas, que não permitem deslocamentos lineares nem angulares em nenhuma direcção, com excepção da rotação em torno do eixo do rolamento, a Equação de Projecto (2.1) será escrita conforme se segue:

$$\begin{Bmatrix} \text{Posição do Ponto A} \\ \text{Posição do Ponto B} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & x \\ x & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{Suporte do Ponto A} \\ \text{Suporte do Ponto B} \end{Bmatrix} \quad (7.1)$$

Substituindo a posição de cada ponto pelos seus deslocamentos lineares e angulares, e substituindo cada suporte pelas suas reacções (forças e momentos), a Equação 7.1 pode ser escrita como a Equação 7.2, em que: δ_{ij} corresponde ao deslocamento linear do ponto i na direcção j dos eixos coordenados; θ_{ij} corresponde ao deslocamento angular do ponto i na direcção j dos eixos coordenados; F_{ij} corresponde à força que é aplicada no suporte i na direcção j dos eixos coordenados e M_{ij} corresponde ao momento que é aplicado no suporte i segundo a direcção j dos eixos coordenados.

$$\begin{Bmatrix} \delta_{AX} \\ \delta_{AY} \\ \delta_{AZ} \\ \theta_{AX} \\ \theta_{AY} \\ \theta_{AZ} \\ \delta_{BX} \\ \delta_{BY} \\ \delta_{BZ} \\ \theta_{BX} \\ \theta_{BY} \\ \theta_{BZ} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & X & X \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & X \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & X & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & X & 0 & 0 & 0 & X \\ X & 0 & 0 & 0 & X & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & X & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & X & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{AX} \\ F_{AY} \\ F_{AZ} \\ M_{AX} \\ M_{AY} \\ M_{AZ} \\ F_{BX} \\ F_{BY} \\ F_{BZ} \\ M_{BX} \\ M_{BY} \\ M_{BZ} \end{Bmatrix} \quad (7.2)$$

Uma vez que o parafuso sem-fim necessita de rodar em torno do seu eixo, então só terá um grau de liberdade (rotação na direcção axial). Assim, de acordo com os princípios do *Minimum Constraint Design*, para cumprir o requisito anterior, deverão ser restringidos cinco graus de liberdade, removendo os constrangimentos (reacções) desnecessários. O parafuso sem-fim fica, deste modo, suportado por um apoio do tipo simples, fixo, numa das extremidades e, na outra extremidade, por um apoio simples deslizante na direcção paralela ao eixo do parafuso sem-fim.

Em termos físicos, essa remoção poderá ser efectuada utilizando rolamentos auto-compensadores, que permitem rotação em qualquer direcção, compensando assim eventuais deflexões do veio, rotações das suas extremidades e desalinhamento dos suportes do parafuso sem-fim. Para além disso, deve ser deixada folga na caixa de alojamento do rolamento, no sentido axial, de modo a permitir eventuais variações de comprimento do parafuso sem-fim, quer sejam originados por deformações térmicas, quer por deflexões ou quaisquer outros factores.

Para avaliar os resultados da aplicação do *Minimum Constraint Design* consideremos agora que um dos suportes, por exemplo o suporte do ponto **B**, permite rotação em qualquer direcção e permite deslocamento axial, restringindo apenas os deslocamentos nas direcções perpendiculares ao eixo do parafuso sem-fim. Adicionalmente, suponhamos que o outro suporte, do ponto **A**, restringe cinco dos seis graus de liberdade desse ponto do parafuso sem-fim, permitindo apenas rotação em torno do seu eixo. Desta forma, o parafuso sem-fim seria suportado por constrangimentos exteriores supérfluos, o que retira tanto a independência a cada constrangimento como retira a capacidade do parafuso sem-fim se adaptar às condições exteriores que, na realidade, poderão não ser perfeitas.

Numa situação real, esta situação pode ser realizada pela utilização de um rolamento rígido de esferas para apoio do ponto **A**, que apenas permite rotação axial, e pela utilização de um rolamento auto-compensador para apoio do ponto **B**, que permitirá rotação em qualquer direcção, ficando este rolamento com possibilidade de se deslocar axialmente no seu alojamento.

Uma vez que o apoio **A** é rígido e o apoio **B** só restringe os deslocamentos na direcção perpendicular ao eixo do parafuso sem-fim, então, os elementos da matriz da Equação 7.2, relativos às reacções F_{BX} , M_{BX} , M_{BY} e M_{BZ} no apoio **B**, serão zero.

Eliminando as linhas e as colunas que estão cortadas na Equação 7.3, nas quais todos os elementos são zeros, a dimensão da matriz de projecto passa a ser 8 x 8, e a relação entre o deslocamento e as reacções nas pontas de veio de suporte do parafuso sem-fim pode ser escrito conforme se mostra na Equação 7.4, que representa uma matriz de projecto desacoplável.

$$\begin{Bmatrix} \delta_{AX} \\ \delta_{AY} \\ \delta_{AZ} \\ \theta_{AX} \\ \theta_{AY} \\ \theta_{AZ} \\ \delta_{BX} \\ \delta_{BY} \\ \delta_{BZ} \\ \theta_{BX} \\ \theta_{BY} \\ \theta_{BZ} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & X & X \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & X \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & X & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & X & 0 & 0 & 0 & X \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{AX} \\ F_{AY} \\ F_{AZ} \\ M_{AX} \\ M_{AY} \\ M_{AZ} \\ \hline F_{BX} \\ F_{BY} \\ F_{BZ} \\ \hline M_{BX} \\ M_{BY} \\ M_{BZ} \end{Bmatrix} \tag{7.3}$$

Assim, a Equação 7.3 pode ser escrita conforme se segue:

$$\begin{Bmatrix} \text{Posição do Ponto A} \\ \text{Posição do Ponto B} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & x \\ 0 & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{Suporte do Ponto A} \\ \text{Suporte do Ponto B} \end{Bmatrix} \quad (7.4)$$

Devido a diversos factores, tais como o peso próprio, o carregamento, a elasticidade dos materiais, imperfeições geométricas, deformações originadas pelos processos de fabrico, deficiências nas montagens intermédias e final de componentes, etc., em condições reais é impossível garantir as condições teóricas perfeitas.

Dadas estas circunstâncias, o eixo do parafuso sem-fim não será uma linha recta; as superfícies das bases de suporte dos apoios das pontas de veio não estarão num mesmo plano; o eixo do parafuso sem-fim não será paralelo aos planos das bases dos apoios, etc.

Por uma questão de simplicidade, consideremos que existe apenas uma imperfeição. Suponhamos, por exemplo, que a base de suporte do ponto **A** está inclinada um ângulo γ_{AZ} em torno do eixo **Z**, conforme se mostra na Figura 7.13.

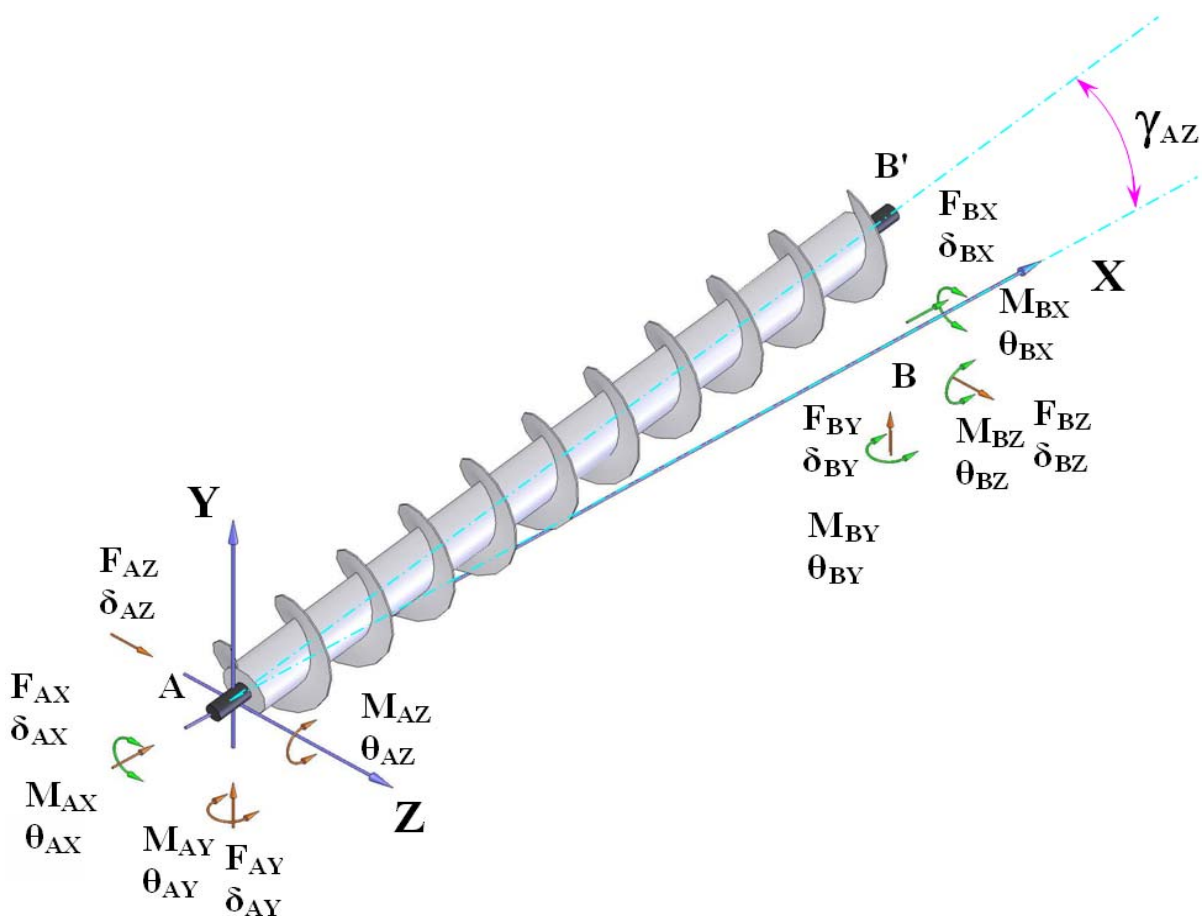


Figura 7.13 – Representação do Parafuso Sem-fim suportado por um rolamento rígido em A e livre em B'. Os Graus de Liberdade permitidos estão representados na cor verde e os Graus de Liberdade restringidos estão representados na cor laranja.

Como o apoio do ponto A é constituído por um rolamento rígido de esferas, o eixo do parafuso sem-fim ficará inclinado no plano XY e a extremidade B' do parafuso não coincidirá com a posição do apoio B.

Para fazer coincidir o ponto B' da extremidade do parafuso sem-fim com o ponto B da localização teórica do seu apoio, será necessário aplicar uma força exterior e causar deformação ao parafuso sem-fim, flectando o seu eixo flectido, conforme se mostra na Figura 7.14 .

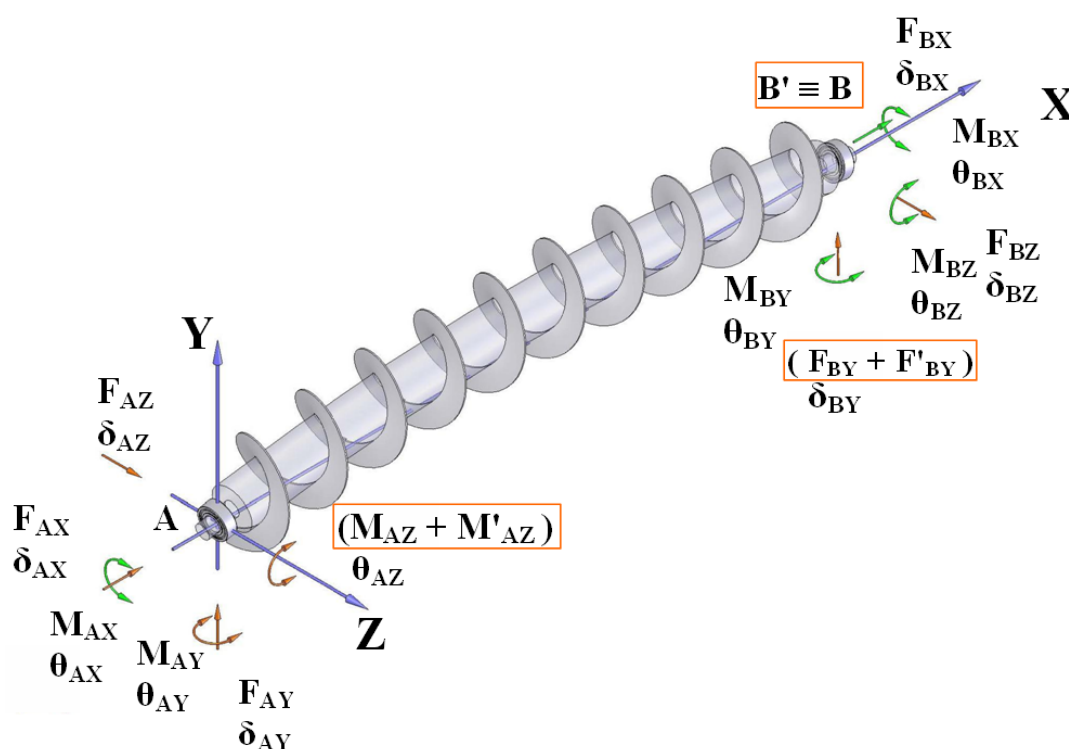


Figura 7.14 – Representação do Parafuso Sem-fim suportado por um rolamento rígido em A e forçado, de modo a que a extremidade B' coincida com o apoio B.

A reacção vertical no suporte **B**, F_{BY} , incluirá a força F'_{BY} , necessária para fazer a extremidade **B'** do parafuso sem-fim coincidir com o ponto **B**. Para manter o equilíbrio estático, o momento M_{AZ} deverá compensar o momento que a força F'_{BY} provoca no ponto **A**, ou seja $M'_{AZ} = L_{AB} \times F'_{BY}$.

Os incrementos nas reacções nos apoios são devidos ao facto de o rolamento localizado no ponto **A** não conseguir ajustar a sua configuração de modo a compensar a imperfeição angular da base do apoio **A**. Verifica-se, então, que as condições impostas pelo suporte do ponto **A** influenciam as reacções no ponto **B**. Este facto aumenta o esforço transversal e o momento flector ao longo do comprimento do parafuso sem-fim, assim como aumenta a pressão de contacto nas extremidades de suporte do parafuso sem-fim.

Pelo facto de os constrangimentos não serem mínimos, as forças exteriores aplicadas pelos suportes dependem das condições “imperfeitas” do mundo real.

Neste caso, o efeito causado é agravado pela longa distância entre os apoios **A** e **B**, a qual, combinada com a pequena largura do casquilho interno do rolamento, originam pressões de contacto muito elevadas. Este efeito é representado na Figura 7.15. Esta situação provoca a danificação do rolamento devido ao elevado momento a que fica submetido, o desgaste das pontas de veio e as conseqüentes folgas que se vão gerando devido à elevada pressão de contacto com o casquilho interno do rolamento, provocando igualmente a rotura por fadiga do veio do parafuso sem-fim, devido aos esforços de flexão alternada durante a rotação do parafuso sem-fim.

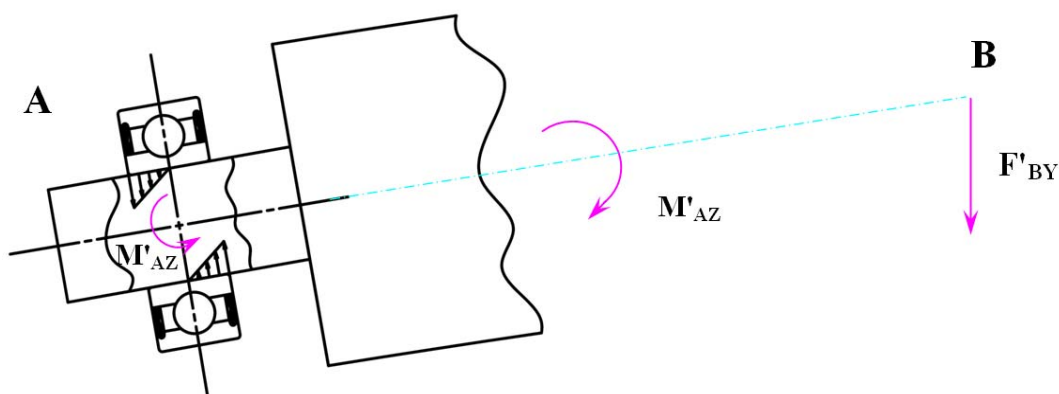


Figura 7.15 – Representação das pressões de contacto verificadas na extremidade de apoio A e no rolamento de apoio dessa extremidade A.

Consideremos agora a aplicação do princípio do “*Minimum Constraint Design*” ao parafuso sem-fim acima mencionado, de modo a torná-lo insensível às incertezas geométricas. Para tal vamos considerar que ambos os suportes, **A** e **B**, permitem rotação em qualquer direcção e restringem os deslocamentos lineares em qualquer direcção, com excepção do deslocamento axial do apoio **B**, que é permitido.

Estas condições estão representadas na Figura 7.16 e, na prática, seriam realizadas através da utilização de rolamentos auto-compensadores em ambos os suportes, **A** e **B**, ficando o rolamento do apoio **B** com folga axial no seu alojamento, para permitir os deslocamentos axiais do ponto **B**.

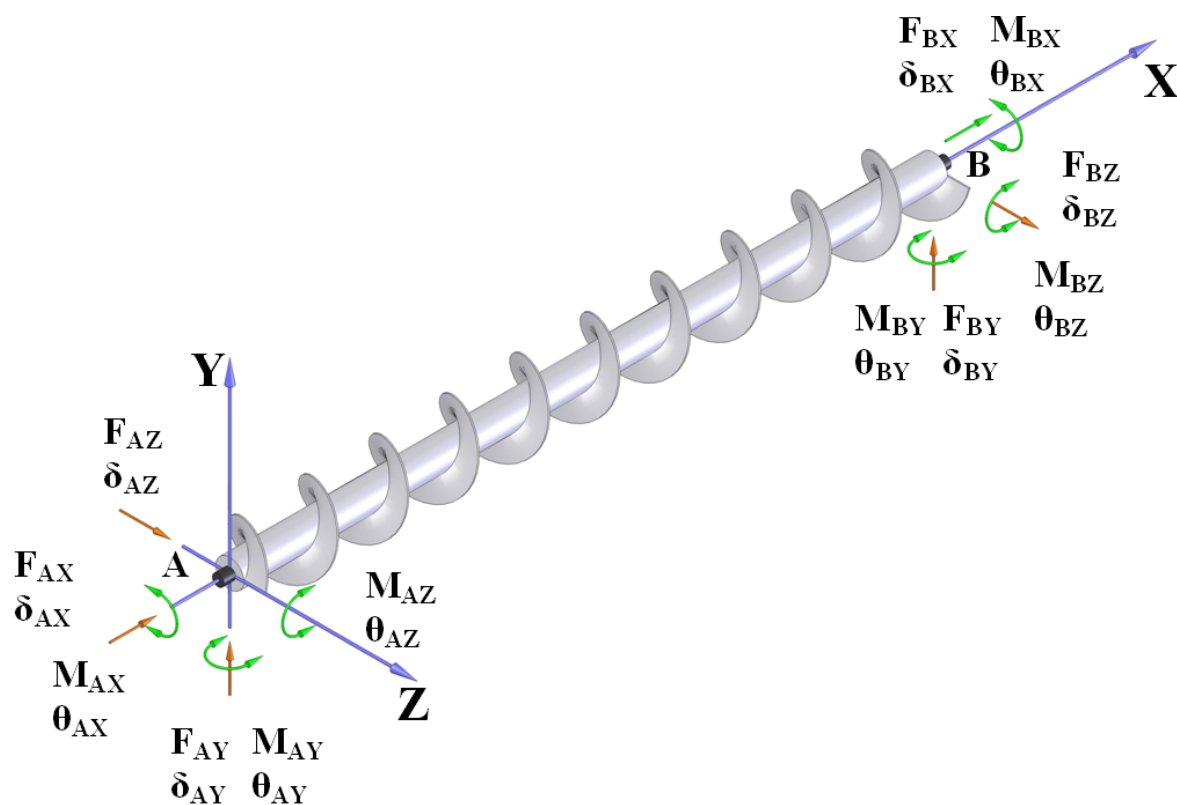


Figura 7.16 – Representação dos Graus de Liberdade presentes e restringidos (imobilizados) na situação de apoio em *Minimum Constraint Design*.

As reacções representadas com a cor verde na Figura 7.16, M_{AX} , M_{AY} e M_{AZ} no suporte A, e F_{BX} , M_{BX} , M_{BY} e M_{BZ} no suporte B, são nulas.

Desta forma, o parafuso sem-fim é suportado pelo número mínimo de forças exteriores (representadas com a cor encarnado na Figura 7.16). Estas forças exteriores restringem cinco dos seis graus de liberdade do parafuso sem-fim, dando-lhe a possibilidade de manter a sua geometria, sendo as imperfeições geométricas de todo o conjunto compensadas pelos rolamentos de apoio.

Anulando os elementos da matriz da Equação 7.2 correspondentes às reacções que são nulas, obtemos a Equação 7.5

$$\left\{ \begin{matrix} \delta_{AX} \\ \delta_{AY} \\ \delta_{AZ} \\ \theta_{AX} \\ \theta_{AY} \\ \theta_{AZ} \\ \delta_{BX} \\ \delta_{BY} \\ \delta_{BZ} \\ \theta_{BX} \\ \theta_{BY} \\ \theta_{BZ} \end{matrix} \right\} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} F_{AX} \\ F_{AY} \\ F_{AZ} \\ M_{AX} \\ M_{AY} \\ M_{AZ} \\ F_{BX} \\ F_{BY} \\ F_{BZ} \\ M_{BX} \\ M_{BY} \\ M_{BZ} \end{matrix} \right\} \tag{7.5}$$

Eliminando as linhas e as colunas marcadas com as linhas rectas na matriz da Equação 7.5, nas quais todos os elementos são zeros, a dimensão da matriz passa a ser 5 x 5, podendo ser expressa como se segue:

$$\left\{ \begin{matrix} \delta_{AX} \\ \delta_{AY} \\ \delta_{AZ} \\ \delta_{BX} \\ \delta_{BY} \end{matrix} \right\} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} F_{AX} \\ F_{AY} \\ F_{AZ} \\ F_{BX} \\ F_{BY} \end{matrix} \right\} \tag{7.6}$$

Assim, a Equação 7.6 pode ser escrita conforme se segue:

$$\left\{ \begin{matrix} \text{Posição do Ponto A} \\ \text{Posição do Ponto B} \end{matrix} \right\} = \begin{bmatrix} x & 0 \\ 0 & x \end{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} \text{Suporte do Ponto A} \\ \text{Suporte do Ponto B} \end{matrix} \right\} \tag{7.7}$$

Como se pode ver, temos agora uma matriz diagonal, o que significa que temos uma solução desacoplada e que as forças externas aplicadas pelos suportes no parafuso sem-fim são determinadas, apenas, pelas equações de equilíbrio da estática, independentemente das condições imperfeitas do mundo real.

Na Figura 7.17, são mostrados dois transportadores de parafuso sem-fim, destinados ao transporte de cimento a granel, que foram projectados utilizando o princípio do “*Minimum Constraint Design*”, anteriormente exemplificado.

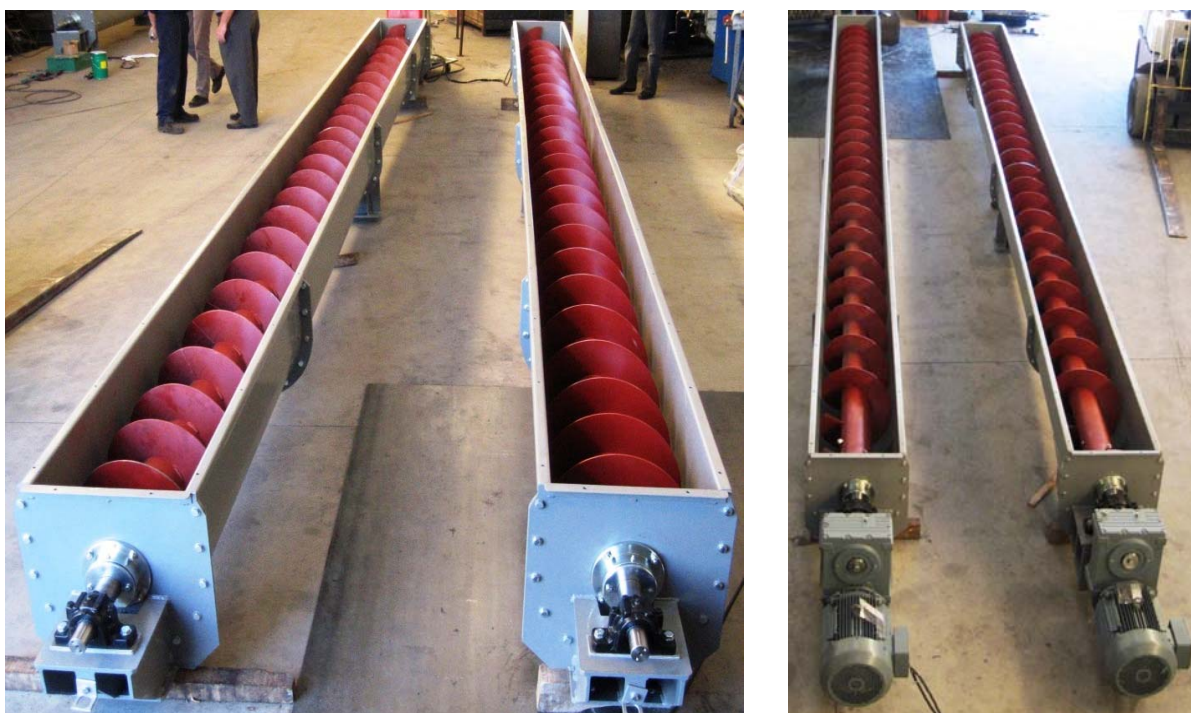


Figura 7.17 – Transportadores de Parafuso Sem-fim, projectados de acordo com o princípio de *Minimum Constraint Design*.

O caso do parafuso sem-fim anteriormente descrito enquadra-se no tipo de problemas ditos bidimensionais. A verificação da aplicação do princípio do “*Minimum Constraint Design*” ao tipo de problemas tridimensionais foi efectuada com base no caso de um Transportador de Correia Plana, apoiado através de uma rótula, numa das extremidades, e de dois pés de suporte com rodas, na outra extremidade [Santos *et al.*, 2009].

Os exemplos acima mencionados mostram que a aplicação do princípio do “*Minimum Constraint Design*” permite que as reacções de cada suporte sejam independentes das cargas aplicadas por outros suportes. De facto, suportando ou guiando os corpos, utilizando o mínimo números de constrangimentos, faz com que os elementos sejam exteriormente isostáticos e todas as forças de ligação ao exterior sejam determinadas, unicamente, pelas condições de equilíbrio estático.

Por outras palavras, podemos dizer que o “*Minimum Constraint Design*” permite transformar projectos acoplados e desacopláveis em projectos desacoplados que, de acordo com o primeiro axioma da Teoria Axiomática de Projecto, são as soluções de projecto preferíveis, ou seja, a aplicação do princípio do “*Minimum Constraint Design*” é uma boa prática de projecto.

7.4 Soluções Ajustáveis

No caso de elementos flexíveis, foram aplicados os princípios do “*Elastic Design*” [Kamm, 1991] ou “*Redundant Constraint Design – RedCD*”, tendo sido adoptadas diversas soluções relacionadas com a geometria dos corpos, tais como o caso dos pés de suporte com ajustamento de altura por dispositivos telescópicos e com bases ligadas à estrutura por varões roscados, ou o caso dos pilares e vigas de estruturas metálicas, ou ainda o caso dos veios de transmissão longitudinais, que transmitem movimento aos rolos através de polias soltas e correias cruzadas.

Também as folgas nos furos, os furos oblongos, ou as tolerâncias em cadeias de cotas, os sistemas telescópicos, os sistemas de ajustamento por parafuso e os sistemas excêntricos, conduzem a soluções que podem ser suficientemente robustas para fazer faces às variações razoáveis, deixando de haver incerteza, uma vez que as incertezas ficam contidas nos valores admissíveis do problema.

Os princípios do “Projecto Elástico” (*Elastic Design*) também podem ser aplicados a outras situações para além das geométricas, como no caso de compatibilização de fluxos de transporte em que um dos fluxos tenha velocidade variável, ou o caso dos equipamentos de moagem em que o fluxo de alimentação está interligado com o consumo do motor, para evitar que este fique bloqueado, ou o caso das embraiagens de automóveis, que são utilizadas para sincronizar a velocidade do veio motor com o veio de transmissão às rodas, etc.

Os aspectos acima referidos estão de acordo com o Teorema 8 – *Independence and Design Range*, da Teoria Axiomática, segundo o qual: “Um projecto é desacoplado quando a gama de projecto especificada for superior à soma das variações dos parâmetros de projecto (cuja derivada do requisito funcional em ordem ao parâmetro de projecto correspondente for

diferente de zero) e, nesse caso, os elementos não diagonais da matriz de projecto podem ser desprezados.” [Suh, 2001].

Este princípio foi utilizado no caso da transmissão de movimento aos rolos dos transportadores que alimentam os postos de trabalho da linha de montagem de equipamentos electrónicos, aos quais, para além da função de transporte, é exigida capacidade para realizar acumulação de caixas junto a cada posto de trabalho, sem impedir o transporte de caixas aos restantes postos de trabalho localizados ao longo da linha de produção.

O tipo de transmissão de movimento aos rolos de transporte através de polias soltas e correias de secção circular, a partir de um veio longitudinal, é apresentado e são explicadas as suas vantagens, no subcapítulo 7.6, relativo a soluções com arquitectura modular.

7.5 Soluções Alternativas

No projecto do sistema de transporte, foram consideradas várias soluções alternativas para a realização de cada funcionalidade, perspectivadas como módulos funcionais independentes.

A utilização de componentes normalizados, à venda no mercado como produtos acabados, facilita a intermutabilidade, tendo sido escolhidos, sempre que possível, os componentes normalizados (de acordo com normas ISO, ou com normas DIN). Quando foram adoptados componentes de mercado não-normalizados, deu-se preferência àqueles cujas interfaces eram comuns a diversos fabricantes.

No início do projecto, foi considerado, por preferência do cliente, que seriam utilizados actuadores lineares eléctricos para accionamento dos batentes retrácteis, destinados a efectuarem a interrupção do “fluxo” de transporte e, deste modo, controlarem o “fluxo” de caixas no circuito de transporte (garantindo, assim, que haveria sempre uma caixa junto a cada posto de trabalho, em espera, para ser recolhida pelo respectivo operador). Com o desenvolvimento do projecto, verificou-se que (por questões de rapidez de actuação, de amortecimento no final dos cursos, por razões económicas, etc.) seria preferível utilizar actuadores lineares pneumáticos.

Neste caso, a alteração foi simples, dado que, tal como foi dito, esses componentes já se encontravam localizados em níveis mais baixos da hierarquia do projecto inicial e as suas interfaces já tinham sido seleccionadas de modo a permitirem a intermutabilidade. Este aspecto tinha sido acautelado quando foram estudadas as várias soluções alternativas, tendo o projecto já ficado preparado para permitir a substituição de módulos construtivos diferentes para a realização da mesma funcionalidade.

De um modo geral, todo o projecto foi desenvolvido considerando várias soluções alternativas para cada uma das funcionalidades a realizar, em que cada solução alternativa constitui um módulo funcional independente.

Os módulos construtivos foram desenhados em “*layers*” distintas, com interfaces comuns, de modo a permitir a intermutabilidade e, sempre que possível, localizados em níveis hierárquicos mais baixos.

Houve ainda o cuidado de que os módulos intermutáveis, quer funcionais quer construtivos, fossem independentes (no sentido de verificarem o primeiro axioma) das restantes funções para que pudessem ser substituídos sem alterar as restantes funcionalidades.

Os aspectos acima referidos permitiram, para além da substituição de um módulo construtivo (actuador linear eléctrico) por outro módulo construtivo diferente (actuador linear pneumático), não obstante realizarem ambos a mesma função (posicionamento do batente retráctil em duas posições fixas), permitiram também a substituição de um módulo construtivo (actuador linear pneumático) por outro módulo construtivo diferente (actuadores pneumáticos flexíveis – balões pneumáticos), para realização de uma função diferente (introduzir mais um ponto de paragem no sistema de elevação do transportador de correias para desvio transversal das caixas rejeitadas), que é o caso descrito a seguir.

No caso do sistema de elevação do transportador de correias que desvia as caixas transversalmente, o movimento de translação vertical foi concebido inicialmente com actuação por cilindros lineares pneumáticos, com dois pontos de paragem (correias posicionadas abaixo ou acima da geratriz superior dos rolos de transporte longitudinal).

Na fase de projecto de pormenor, foi introduzido um batente mecânico retráctil, destinado a efectuar o alinhamento das caixas e garantir que estas ficariam devidamente orientadas para, de seguida, serem transferidas pelas correias. Este facto levou à substituição dos cilindros

pneumáticos considerados inicialmente por actuadores flexíveis do tipo balões pneumáticos, montados em grupos de dois, de modo a conferir três pontos de paragem ao sistema de elevação, em vez de duas posições de paragem, consideradas inicialmente. Este aspecto será apresentado no subcapítulo 7.7

As substituições de soluções alternativas foram possíveis, pois a arquitectura do projecto (estrutura funcional e estrutura construtiva) foi desenvolvida tendo em consideração o primeiro axioma da Teoria Axiomática de Projecto e os módulos intermutáveis ficaram localizados nos níveis mais baixos da hierarquia da estrutura do projecto, permitindo que a substituição das funções pudesse ser realizada sem alterar as restantes funcionalidades.

7.6 Arquitectura Modular

A arquitectura de produto do tipo modular, em que as partes comuns do projecto constituem uma “plataforma” que serve de base às várias subsoluções alternativas, consistindo cada uma delas um módulo intermutável, tem como principal aplicação a obtenção de uma “família de produtos”.

Este tipo de arquitectura permite reduzir o número total de componentes diferentes, reduzir os prazos de entrega, aumentar a quantidade a produzir de cada componente e reduzir o custo unitário de cada componente [Ulrich *et al.*, 2008].

Se, no caso dos produtos de grande consumo, a arquitectura modular permite fazer face às incertezas de mercado, no caso dos produtos únicos permite fazer face não só às incertezas de adequabilidade às condições em que irá operar, como também às incertezas de desempenho da solução global.

Para ilustrar o nosso estudo, quanto ao tipo de arquitectura modular e à sua aplicabilidade ao caso dos produtos únicos, considera-se o elemento transportador básico, com geometria recta, e com a capacidade de carga mais comum para aplicações classificadas como ligeiras.

O tipo de construção adotado para o transportador deste caso concreto tem características modulares, o que facilita a interligação com diversos tipos de equipamento, tornando assim a configuração (*layout*) do sistema de transporte bastante flexível:

- Permite futuras expansões dos sistemas de transporte, tanto em termos físicos e em termos de sofisticação, como no que se refere ao grau de automatização do sistema, por adição de novos módulos, ou de novos equipamentos;
- Por outro lado, é sempre possível realizar alterações geométricas ou funcionais no sistema de transporte, por modificação das posições de cada módulo no sistema ou por adição de novos módulos ao sistema de transporte, permitindo sempre o aproveitamento e a reutilização dos módulos existentes.

Dentro desta mesma filosofia construtiva, foi possível construir uma linha completa de acessórios e dispositivos para as mais diversas funções, tais como:

- Transportadores com geometria em curva plana ou em helicóide;
- Dispositivos para realização de curvas com raios muito pequenos;
- Dispositivos para fazer a transferência lateral entre linhas concorrentes;
- Dispositivos para fazer a convergência entre linhas concorrentes;
- Dispositivos para fazer a transferência lateral entre linhas paralelas;
- Dispositivos para fazer a convergência entre linhas paralelas;
- Dispositivos para fazer a acumulação dos produtos a transportar;
- Dispositivos para aumentar o espaçamento entre os produtos a transportar;
- Troços de transportador motorizado basculantes, do tipo cancela;
- Zonas de transportador onde pode ser feita a pesagem de cada carga individualmente e definida a cadência das cargas.

Na Figura 7.18 mostram-se alguns exemplos dos dispositivos acima indicados.

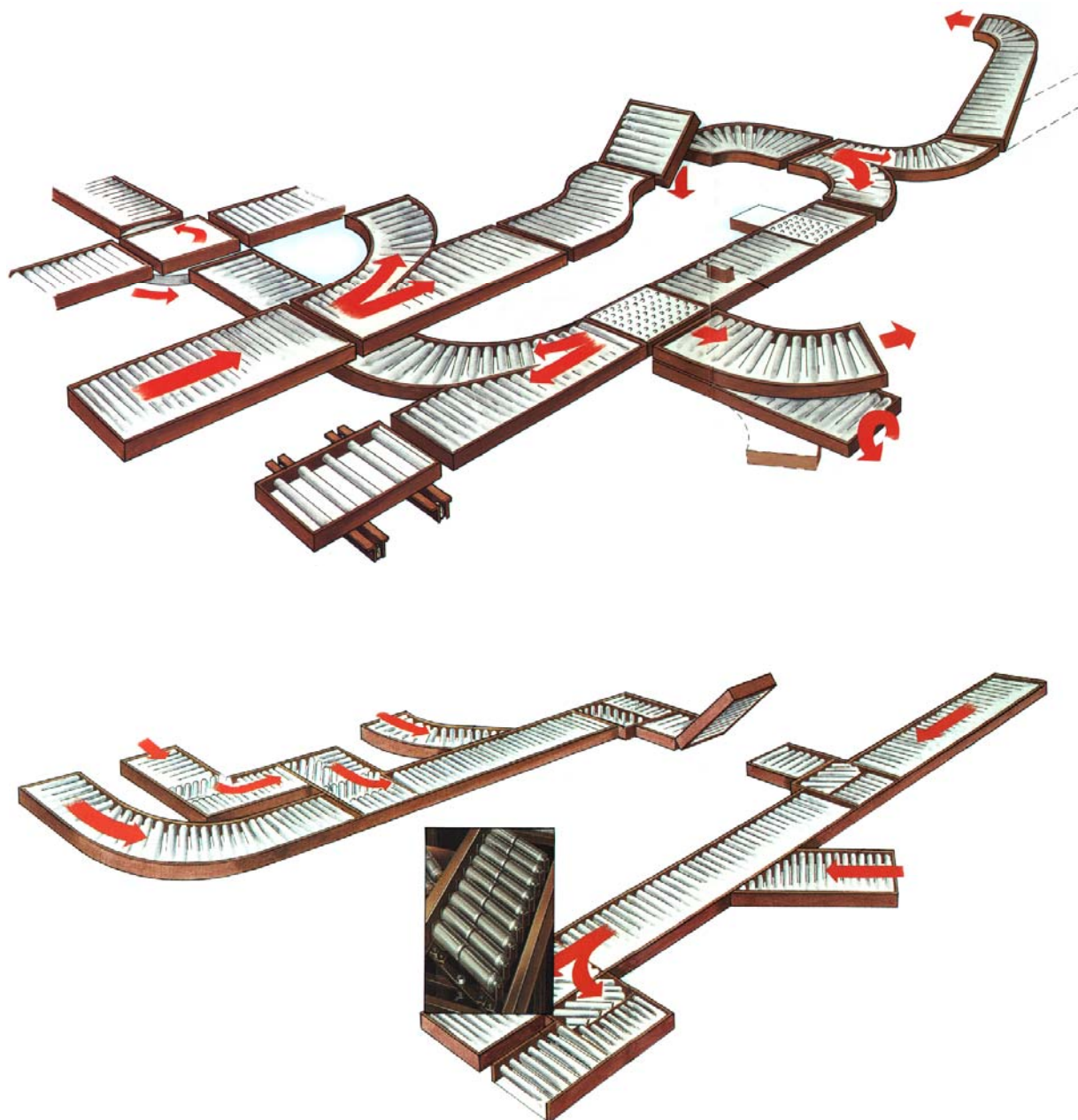


Figura 7.18 – Exemplos de Sistemas de Transportadores de Rolos Motorizados para movimentação de cargas unitárias.

Para a concretização dos conceitos acima mencionados, foi escolhido para este projecto um tipo de transportador de rolos, no qual a transmissão de movimento aos rolos é realizada a partir de um veio longitudinal, através de correias em elastômero.

Este tipo de transmissão constitui uma evolução neste tipo de transportadores e apresenta, para este género de aplicações, numerosas vantagens, como poderá ser visto mais adiante, comparativamente com os sistemas de transmissão por correntes que, tradicionalmente, eram os mais utilizados.

Os recentes desenvolvimentos na área dos plásticos industriais, polímeros e elastómeros, assim como nos seus processos de produção, tornaram viável, tanto em termos económicos como em termos técnicos, a construção em série deste tipo de transportadores, os quais passaram a constituir um produto modular e padronizado, com uma linha completa de acessórios e componentes, para realização das mais diversas funções, na movimentação de materiais.

O aspecto mais característico e relevante deste tipo de transportadores consiste na adopção de um dispositivo de transmissão do movimento aos rolos, que é constituído por um conjunto de transmissões por correia cruzada, que recebem movimento, por atrito, a partir de um veio disposto longitudinalmente, conforme se pode ver na Figura 7.19.



Figura 7.19 – Exemplo de Transportadores de Rolos Motorizados com transmissão de movimento através de polias e correias, a partir de um veio longitudinal.

Esta solução apresenta numerosas vantagens em relação às soluções tradicionais, entre as quais se destacam as seguintes:

- Este equipamento é não só bastante seguro como também extremamente silencioso (de entre os vários transportadores que podem ser considerados em alternativa, é o que apresenta o nível mais baixo de produção sonora). Assim, proporciona segurança e boas condições de trabalho, tornando-se menos cansativo, o que contribui para o aumento da produtividade;
- A utilização de correias em poliuretano para a transmissão de movimento aos rolos, a partir do veio longitudinal, evita o problema da folga nas transmissões rolo a rolo e do alongamento das correntes nas transmissões tangenciais, permitindo motorizar um maior número de rolos a partir do mesmo grupo de accionamento. Desta forma, reduz-se o número de motorizações a utilizar e, conseqüentemente, baixam-se o consumo de energia e os custos de fabricação;
- Possibilidade de ajustar a velocidade de cada rolo individualmente, no mesmo transportador, partindo de uma única unidade de accionamento;
- Possibilidade de aumentar ou reduzir a velocidade de transporte em troços do mesmo transportador, partindo de uma única unidade de accionamento;
- Os arranques e as paragens são suaves e ocorrem em simultâneo, uma vez que, neste sistema de transmissão, não existe o problema da folga nas transmissões rolo a rolo ou do alongamento das correntes nas transmissões tangenciais;
- Possibilidade de paragem de cada rolo, individualmente, por acção manual, mantendo-se o funcionamento normal em todo o sistema, evitando entalamentos e facilitando assim qualquer operação de manutenção;
- Os rolos têm eixos hexagonais para facilitar a sua imobilização, e a sua montagem é do tipo retráctil por mola, não sendo necessária a utilização de qualquer ferramenta para retirar ou instalar rolos no transportador;
- Possibilidade de paragem de cada rolo, individualmente ou em grupo, por acção manual ou por meio de um obstáculo mecânico (eventualmente retráctil), o qual, actuando sobre as caixas a transportar, fará parar os rolos sobre os quais estas se apoiam, mantendo-se todo o resto do sistema em funcionamento;

- Por este processo, é possível fazer a “acumulação de cargas”, uma vez que só se verifica a paragem dos rolos na zona onde se encontra uma caixa parada, mantendo-se os restantes em funcionamento, provocando assim a aproximação das outras caixas que lhe sucedem na linha, até eliminar a distância que as separa e encostarem-se à caixa que se encontra parada;
- Quando o obstáculo que impede o movimento da primeira caixa (por exemplo, um batente mecânico deslocado por actuador pneumático) for retirado, as caixas voltarão a deslocar-se, seguindo em grupo, à velocidade de transporte da linha;
- Possibilidade de aumentar o espaçamento entre as caixas, mediante o aumento da velocidade de um grupo de rolos relativamente aos rolos instalados a montante destes, podendo, eventualmente, serem os rolos a seguir a um batente retráctil, permitindo o controlo de passagem de caixas uma a uma;
- Possibilidade de regulação da pressão de contacto entre as caixas em fila de espera ou em acumulação, desligando-se a correia de transmissão a alguns rolos, deixando, no limite, o passo dos rolos motorizados ligeiramente inferior ao comprimento das cargas;
- Possibilidade de deslocar as caixas manualmente ao longo da linha, empurrando as caixas e fazendo rodar os rolos que as suportam, mesmo com o motor de accionamento parado;
- Este tipo de transmissão não necessita de ser lubrificado, o que torna os equipamentos mais limpos. Por outro lado, praticamente não necessitam de manutenção;
- Facilidade de manutenção, não sendo necessária a utilização de ferramentas especiais ou ter de se recorrer a profissionais qualificados;
- Facilidade de obtenção e substituição de componentes, uma vez que a maior parte dos elementos que integram este tipo de transportadores se encontra à venda no mercado;
- Os custos deste tipo de equipamentos são menores, tanto na produção como na sua instalação e operação;
- Menores prazos para entrega aos clientes, uma vez que é possível encontrar facilmente no mercado a maior parte das várias peças necessárias a cada máquina;

- O facto de a maior parte das peças necessárias a este tipo de máquinas se encontrar disponível no mercado possibilita a utilização de métodos de fabrico do tipo “*Just in Time*”, dispensando-se a imobilização de capital em materiais e componentes aprovionados, havendo apenas a necessidade de manter em armazém algumas peças específicas e um aprovionamento reduzido de componentes para poder fazer face a uma eventual situação de emergência;
- Rapidez e facilidade de montagem e instalação dos equipamentos nos seus locais de funcionamento.

Além disso, esta nova solução facilita a construção de numerosos componentes, para serem integrados na construção de sistemas de transporte complexos, tais como curvas de pequenos raios, dispositivos para desvio de caixas para ramificações, divergentes ou paralelas, da linha de transporte, etc., os quais recebem movimento do mesmo veio que acciona os rolos do transportador principal.

As vantagens ora expostas só são possíveis dadas as características de modularidade e de flexibilidade (ajustabilidade) das soluções adoptadas para este tipo de transportador.

Estas vantagens são também confirmadas pela boa aceitação que têm tido por parte dos utilizadores, tendo-se verificado a sua rápida implantação no mercado.

7.7 Planos de Contingência e Opções

Não é possível conhecer com rigor o comportamento de uma solução de projecto antes de esta ser ensaiada, havendo sempre a possibilidade de não terem sido considerados todos os factores que estarão presentes em condições reais de funcionamento.

Na fase de ensaios, poderá haver necessidade de substituir uma subsolução por outra equivalente que, embora com características construtivas diferentes, desempenhe a mesma função, mas de modo mais eficiente e mais eficaz. Por outro lado, poderá existir a necessidade de introduzir uma funcionalidade que não tinha sido identificada até serem realizados ensaios de funcionamento.

As subsoluções que forem escolhidas para ser implementadas não deverão inviabilizar as restantes alternativas, sobretudo no que diz respeito àquelas que estiveram mais próximo de ser seleccionadas. Além disso, deverão ficar preparadas para poderem receber mais algum módulo que possa ser identificado como necessário, na fase de ensaios de funcionamento.

A implementação das soluções escolhidas deverá ter em consideração a facilidade de substituição por outras soluções alternativas, ou de incorporação de novas subsoluções, de modo a minimizar os custos dessas modificações, se tal se revelar necessário.

Assim, cada subsolução deverá constituir um módulo intermutável, o qual poderá integrar a solução final de arquitectura modular que facilite a substituição de cada módulo por outro alternativo. Isso permite a modificação das características da solução global em função dos módulos que a integrem.

Com vista a facilitar a substituição ou introdução de outras subsoluções, a arquitectura do projecto (estrutura funcional e estrutura construtiva) foi desenvolvida tendo em consideração o primeiro axioma da Teoria Axiomática. Deste modo, os módulos intermutáveis são tratados como independentes e colocados nos níveis mais baixos da hierarquia da estrutura do projecto, permitindo assim que a substituição ou introdução de funções possa ser realizada sem alterar as restantes.

Os aspectos acima referidos, para além de permitirem a substituição de um módulo construtivo por outro módulo construtivo diferente, mas realizando ambos a mesma função, tal como foi no caso mencionado no subcapítulo 7.4, permitiram também a substituição de um módulo construtivo (actuador linear pneumático) por outro módulo construtivo diferente (actuadores pneumáticos flexíveis – balões pneumáticos), para realização de uma função diferente (que consistiu em introduzir mais um ponto de paragem no sistema de elevação do transportador de correias, para desvio transversal das caixas rejeitadas).

O caso que se apresenta em seguida exemplifica esta segunda situação e refere-se ao caso do sistema de elevação do transportador de correias que desvia as caixas transversalmente, no qual o movimento de translação vertical era produzido por cilindros lineares pneumáticos, com dois pontos de paragem, ficando as correias posicionadas abaixo ou acima da geratriz superior dos rolos de transporte longitudinal, consoante o ponto de paragem em que os cilindros pneumáticos se encontrassem.

Na fase de projecto de pormenor, detectou-se que o posicionamento e a orientação das caixas sobre o transportador de rolos podia não ser sempre igual, podendo as caixas vir com diferentes orientações, uma vez que estas são colocadas manualmente na linha de transporte e por vários operadores, localizados em diferentes pontos da linha de transporte.

Foi então reconhecida a necessidade de introduzir uma solução para deixar todas as caixas devidamente posicionadas e orientadas para a zona de saída do transportador de rolos. A solução construtiva adoptada consistiu na introdução de um batente mecânico retráctil, destinado a efectuar o alinhamento das caixas e a garantir que estas ficariam devidamente orientadas para serem transferidas pelas correias.

Este facto levou à substituição dos cilindros pneumáticos, considerados inicialmente para accionamento do sistema de elevação, por actuadores flexíveis do tipo balão pneumático, montados em grupos de dois, de modo a produzir os três pontos de paragem a seguir descritos:

- Correias e batente abaixo dos rolos, sendo o “fluxo” de transporte efectuado no sentido longitudinal;
- Correias abaixo dos rolos e batente acima dos rolos, ficando o “fluxo” de transporte interrompido para alinhamento da caixa a transferir transversalmente;

- Correias e batente acima dos rolos, sendo o “fluxo” de transporte efectuado no sentido transversal.

A substituição de soluções alternativas e a introdução de novas soluções são facilitadas pela utilização de arquitecturas de projecto (estrutura funcional e estrutura construtiva) do tipo modular. No entanto, as arquitecturas modulares têm custos mais elevados e a sua utilização deve, por isso, ser ponderada. Assim, no caso dos produtos únicos, a sua escolha deve ser reservada às situações em que haja maior incerteza relativamente ao desempenho das subsoluções adoptadas.

Nas actividades de montagem e instalação de equipamentos nos seus locais de funcionamento, o facto de as soluções construtivas adoptadas permitirem o seu fácil ajustamento às condições do local proporciona uma melhoria significativa na eficiência dessas operações, onde aparecem sempre situações imprevistas.

No caso do “Sistema de Verificação de Peso”, parte dos equipamentos que o constituem são equipamentos existentes e que já se encontram nas instalações do cliente, impossibilitando a realização de qualquer tipo de ensaio do “Sistema de Verificação de Peso” antes da sua colocação em serviço. Na Figura 7.20, são mostradas algumas fases da montagem no local que correspondem à modificação de equipamentos existentes para permitirem a introdução dos equipamentos novos.

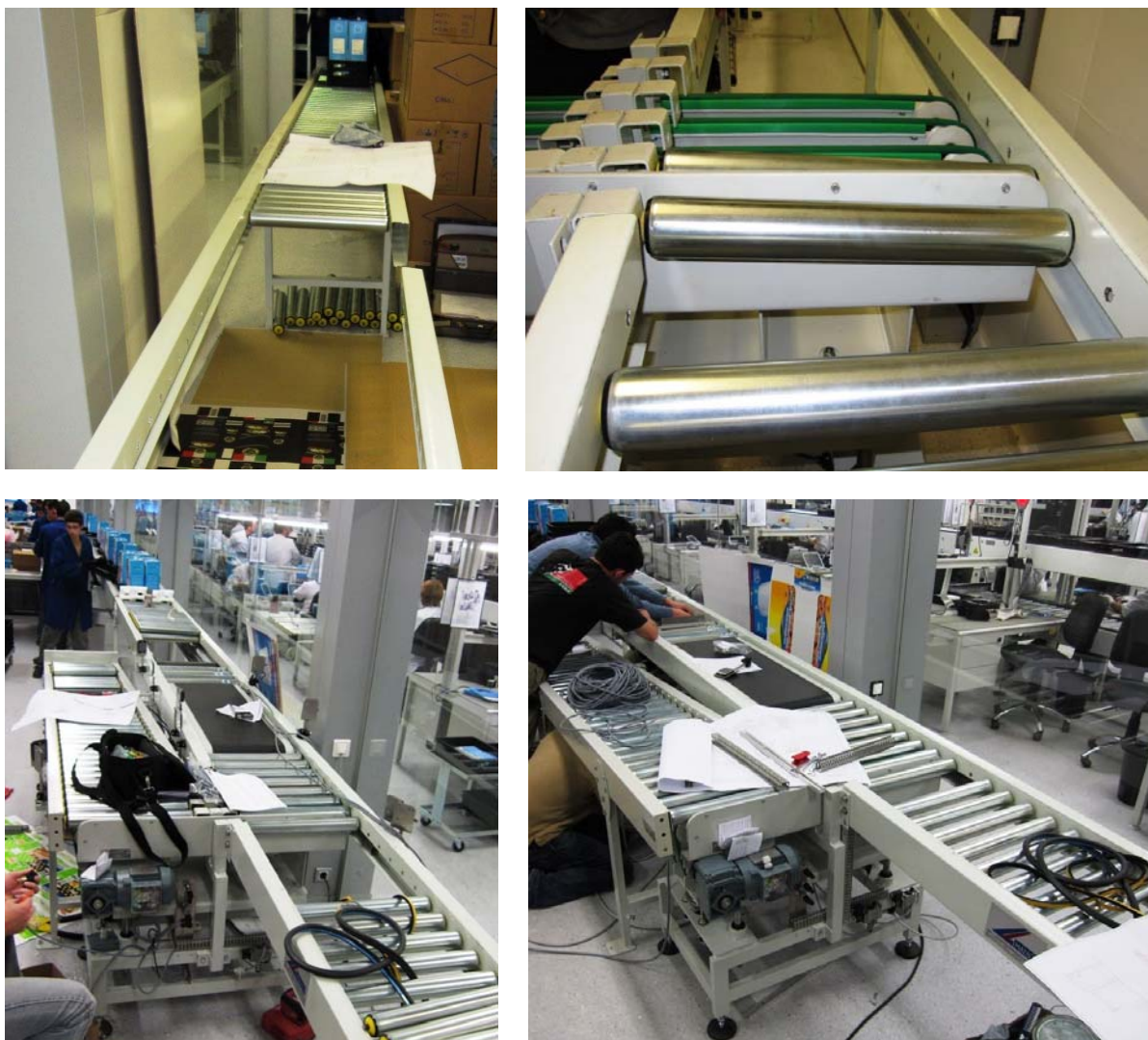


Figura 7.20 – Fases da montagem do Sistema de Verificação de Peso no local, referentes à introdução de equipamentos novos no sistema existente.

A vantagem proporcionada pela metodologia, no que se refere à redução do tempo de montagem *in situ*, constituiu um factor determinante no êxito dos projectos, com especial relevância nas situações de montagem de equipamentos novos em sistemas já existentes, como no caso da introdução do “Sistema de Verificação de Peso”, anteriormente descrito. A modificação dos equipamentos existentes, a montagem e a instalação dos novos equipamentos nos seus locais de funcionamento, obrigaram a que a zona onde foram introduzidos os novos equipamentos ficasse fora de serviço, sendo essencial que a duração do período de paragem necessário para proceder à montagem fosse a mais curta possível.

Em termos económicos, a montagem e instalação *in situ* têm custos acrescidos, devido às despesas relacionadas com a deslocação das equipas de montagem para as instalações do cliente, as quais são, muitas vezes, distantes da unidade de produção onde os equipamentos foram fabricados.

Acresce ainda o facto de os trabalhos a realizar fora da unidade de produção estarem mais sujeitos à ocorrência de situações imprevistas, as quais são mais difíceis de ultrapassar nas instalações dos clientes do que na unidade de produção onde os produtos foram fabricados, onde existem meios mais adequados para a realização de modificações e de eventuais correcções, caso se mostrem necessárias.

Além disso, a imobilização de equipamentos já existentes no cliente reduz a produtividade e onera os custos de produção, sendo o tempo de instalação e montagem um factor muito importante na avaliação de projectos.

A facilidade de modificação da solução é particularmente vantajosa nos aspectos que se relacionados com as actividades de montagem e instalação *in situ*, melhorando significativamente a eficiência de tais operações, onde surgem sempre imprevistos de vária ordem tipos e de diversas origens.

Os elementos técnicos e os pormenores construtivos das soluções que estiveram mais próximo de serem escolhidas deverão ser guardados até ao final do projecto, para facilitar o desenvolvimento de pormenor de alguma dessas soluções, no caso de ser necessário implementar uma das soluções inicialmente preteridas.

Depois de o projecto estar concluído, devem ser registadas as modificações relativas às soluções escolhidas inicialmente e os desenhos do projecto devem ser actualizados, de modo a representarem a solução e as respectivas subsoluções, efectivamente implementadas, passando a constituir as “Telas Finais” ou os “*As Built*” do projecto.

Na realização do projecto e dos ensaios de produtos únicos, o conhecimento relativo à solução (objecto do projecto) vai sendo adquirido à medida que o projecto e os ensaios vão sendo realizados, devendo os resultados e as soluções bem sucedidas ser registados, para utilização em eventuais projectos futuros que requeiram soluções semelhantes.

8 CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados e as conclusões mais importantes deste trabalho, indicando-se também algumas perspectivas para futuros trabalhos

Algumas conclusões foram apresentadas ao longo do trabalho, no entanto, resumem-se aqui os aspectos mais importantes.

8.1 Resultados Obtidos

A análise exaustiva da literatura existente na área do projecto de engenharia permitiu conhecer as teorias, metodologias e ferramentas mais importantes existentes e reunir num único documento o resumo actualizado dos trabalhos mais relevantes relacionados com o projecto de engenharia.

Neste resumo, foram também referidos alguns trabalhos relativos a aplicações em arquitectura e em computadores, os quais, de alguma forma se relacionam com o projecto de engenharia.

342 CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Para além dos trabalhos anteriormente indicados, foram também apresentados alguns excertos de trabalhos da área da Psicologia relacionados com o estudo do processo cognitivo subjacente à actividade de projectar.

A pesquisa efectuada permitiu conhecer as interpretações de diversos investigadores nas áreas do projecto de engenharia e de arquitectura, tendo sido muito interessante compreender as diferentes formas que têm sido utilizadas para descrever e tratar o problema do projecto, assim como a sua evolução ao longo do tempo. Não obstante as distintas interpretações e as diferentes aplicações do processo de projectar, verificou-se a existência de muitos aspectos comuns às várias abordagens e, em muitos casos, a sua complementaridade.

Na metodologia aqui desenvolvida, foram incorporados os aspectos seleccionados das várias abordagens (de diferentes investigadores, destinadas a diferentes aplicações) que melhor se adequam ao projecto de produtos únicos, de baixo valor económico, desenvolvidos em empresas de pequena dimensão.

Foram analisadas algumas das “boas práticas” seguidas pela indústria, muitas das quais resultantes de “lições aprendidas à própria custa”, que são aplicadas de uma forma intuitiva e desordenada no projecto de produtos únicos, tendo sido apreciadas as razões para a sua adopção e testada a sua conformidade com as teorias de projecto actuais.

Essas “boas práticas” foram generalizadas e o seu espectro de aplicação foi alargado, designadamente no que se refere aos aspectos funcionais, tendo essas “boas práticas” sido incorporadas na metodologia aqui desenvolvida.

A aplicação da metodologia em casos práticos teve como resultado soluções bem sucedidas e capazes de manter o seu desempenho, independentemente de eventuais variações das condições reais de funcionamento relativamente às especificações do projecto.

Uma das grandes vantagens da aplicação da metodologia consiste na melhoria significativa da eficiência das actividades relacionadas com a colocação em serviço das soluções realizadas, uma vez que, neste tipo de produtos, não é possível fazer ensaios prévios, dados os custos e o tempo adicional que seria necessário para reproduzir as condições reais.

Os casos reais onde foi aplicada a metodologia desenvolvida e as tácticas de projecto aqui mencionadas para o projecto deste tipo de produtos confirmaram, na prática, os benefícios da

sua adopção, e que foram comprovados pelo sucesso da implementação das soluções adoptadas e pelo êxito dos seus desempenhos.

8.2 Conclusões

Do estudo da literatura concluímos a inexistência de trabalhos anteriores dedicados especificamente ao projecto de produtos únicos, de baixo valor económico, desenvolvidos em empresas de pequena dimensão, e que tenham em consideração as particularidades deste tipo de produtos, quando realizados com poucos recursos.

Os procedimentos aqui recomendados para a actividade de projecto deste tipo de produtos desenvolvida por equipas de projecto reduzidas, consistem na adopção de táticas de projecto destinadas a tornar os produtos imunes, dentro de limites razoáveis, tanto às variações das condições reais de funcionamento como a possíveis utilizações futuras.

A metodologia desenvolvida mostrou-se consistente com as práticas bem sucedidas no projecto deste tipo de produtos e com as teorias de projecto actuais, fazendo assim a ligação entre os desenvolvimentos teóricos existentes e a prática da actividade de projecto seguida pelos projectistas de produtos únicos em empresas de pequena dimensão.

A eficiência das actividades de montagem, de instalação *in situ* dos equipamentos projectados, das afinações finais e dos ensaios dos equipamentos desenvolvidos de acordo com esta metodologia foi bastante elevada, aumentando assim a produtividade das equipas de montagem e reduzindo os prazos de execução da montagem e da instalação dos produtos no seu local de funcionamento.

Este aspecto é particularmente importante, não só pela redução dos tempos de execução da entrada em serviço dos produtos, mas também pelo facto de os trabalhos realizados fora da unidade de produção serem efectuados com meios menos adequados e estarem sujeitos aos acréscimos de custos inerentes às deslocações e estadia do pessoal que executará esses trabalhos.

Embora as soluções que não seguem os princípios de projecto recomendados nesta metodologia possam, ao nível do investimento inicial, ser soluções mais económicas, acabam por requerer mais manutenção e substituição mais frequente de componentes de desgaste, sendo a totalidade dos custos, acumulados ao longo da vida útil do produto, bastante superior.

A tendência futura para a actividade de projecto aponta no sentido de as tarefas de rotina virem a ser cada vez mais realizadas por computadores, deixando os projectistas mais libertos para se concentrarem em novos projectos e em projectos de produtos únicos, específicos para um determinado cliente [Pahl *et al.*, 2007], pelo que será de toda a conveniência aprofundar o estudo das estratégias e das táticas de projecto, no sentido de melhorar a sua eficiência.

8.3 Desenvolvimentos Futuros

A área de investigação em projecto de engenharia é relativamente recente, havendo ainda muitas possibilidades para investigação nesta área [Nordlund, 1996].

Durante a realização deste trabalho, surgiram inúmeras questões que mereciam ser mais desenvolvidas e investigadas mais profundamente; porém, enunciam-se seguidamente apenas aquelas que mais se relacionam com o âmbito do presente trabalho.

Aquando da elaboração do plano inicial da tese, e antes de iniciada a pesquisa pormenorizada da bibliografia existente, havia a intenção de analisar as várias “Filosofias de Projecto”, as várias “Correntes de Projecto” (Projecto Genérico, Projecto de Engenharia, Projecto de Arquitectura, Projecto em Psicologia, etc.), assim como as várias “Teorias de Projecto”, os vários “Modelos do Processo de Projecto” e as várias “Ferramentas de Projecto” aplicáveis às actividades do processo de projectar.

Dada a vastidão do tema, não foi possível analisar as várias “Ferramentas de Projecto” existentes, nem fazer o enquadramento das mesmas no processo de projecto. No entanto, seria útil dispor de uma “Colectânea das Ferramentas de Projecto” existentes, incluindo as

ferramentas de projecto introduzidas na metodologia desenvolvida para o projecto de produtos únicos.

A apresentação desta colectânea poderá ser elaborada em forma de tabela, a qual teria, numa das entradas, as fases do processo de projecto, de acordo com a metodologia desenvolvida neste trabalho; na outra entrada da tabela, estariam os resultados que se pretendesse obter. Em cada uma das células dessa tabela, seriam indicadas as ferramentas de projecto mais adequadas para obter os resultados pretendidos, de acordo com a fase de projecto em causa. Relativamente a cada uma das ferramentas de projecto, seriam indicados os elementos bibliográficos que melhor as descrevem e melhor explicam a sua aplicação.

De um modo geral, as ferramentas de projecto existentes até ao momento, foram desenvolvidas tendo em consideração os produtos de grande consumo, produzidos em grandes séries, pelo que seria útil, para a actividade de projecto de produtos únicos, dispor de novas ferramentas adequadas às actividades específicas do projecto de produtos únicos de baixo valor. Para esse efeito, será necessário analisar a adequabilidade de cada uma das ferramentas de projecto existentes e adaptá-las, nos aspectos necessários, à prática do projecto de produtos únicos.

A aplicação coordenada de várias ferramentas de projecto permite tirar maior proveito das vantagens de cada uma delas, complementando-se as vantagens de cada uma e eliminando, ou atenuando, as suas limitações.

Algumas das necessidades concretas que o projecto procura satisfazer podem estar relativamente bem definidas desde o início. Outras, porém, podem ser vagas ou mal definidas, obrigando a um esforço considerável para clarificar os problemas concretos que requerem soluções.

Um aspecto que poderia ser investigado prende-se com a possibilidade de utilizar a Teoria dos Conjuntos Difusos para capturar e quantificar as necessidades do cliente, as quais são normalmente expressas numa forma semântica, qualitativa e pouco rigorosa em termos técnicos [El-Haik, 2005]. Neste caso, a Teoria dos Conjuntos Difusos poderia ajudar na passagem do domínio do cliente para o domínio funcional, ou na aplicação do Desdobramento da Função da Qualidade (*QFD – Quality Function Deployment*).

Outra possibilidade a investigar seria a utilização da Teoria dos Conjuntos Difusos nos casos em que existe incerteza quanto aos valores dos dados do problema, os quais apresentam uma variação em torno do valor mais provável, para definir um grau de pertença ao conjunto dos dados de acordo com a probabilidade da sua ocorrência.

Um outro aspecto interessante seria o estudo de soluções construtivas ajustáveis e flexíveis, cujos limites de variação das soluções do projecto seriam estabelecidos em função do seu grau de probabilidade da sua ocorrência, bem como da verificação da consistência desta prática com o Segundo Axioma da Teoria Axiomática de Projecto.

Relativamente às soluções alternativas e à utilização de estruturas modulares, com módulos intermutáveis, poder-se-á fazer o seu enquadramento na formulação matemática da Teoria Axiomática de Projecto, identificando na matriz de projecto as várias opções como submatrizes, ou blocos intermutáveis, correspondentes às subsoluções alternativas e investigar as suas inter-relações com os restantes elementos da matriz de projecto, quando o problema não é desacoplado.

No projecto de produtos únicos, o seu elevado grau de originalidade e a inviabilidade de esclarecer as incertezas presentes no seu processo de projecto, fazem com que a informação disponível seja incompleta, sendo necessário estimar muitos dos dados para que seja possível resolver o problema de projecto.

O projecto deste tipo de produtos poderá ser enquadrado, de forma global, na Teoria Axiomática de Projecto, e poder-se-á, igualmente, verificar a sua compatibilidade com os aspectos relacionados com o tema “Projectar com Informação Incompleta” (*Designing with Incomplete Information*) [Suh, 2001].

Por fim, num âmbito mais alargado, poderão ser investigadas as eventuais implicações que a metodologia desenvolvida poderá ter nos processos de produção para o fabrico deste tipo de produtos, bem como a relação existente entre estes e a estrutura organizacional das empresas que se dedicam à produção deste tipo de produtos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKAO, Yoji (1990) – **“Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements in Product Design”**, (tradução de “Hinshitsu Tenkai Katsuyō no Jissai”, 1988). New York : Productivity Press, Kraus Productivity Organization, Ltd., 1990. ISBN 1-56327-313-6.
- AKAO, Yoji (1997) – **“QFD: Past, Present, and Future”**, apresentado no “International Symposium on QFD '97” – Linköping, 1997.
- ALBANO, Leonard D.; SUH, Nam Pyo (1994) – **“Axiomatic Design and Concurrent Engineering”**. Computer-Aided Design, Volume 26, Issue 7, July 1994, Pages 499-504.
- ALEXANDER, Christopher (1971) – **“Notes on the Synthesis of Form”**. Cambridge, Massachusetts, and London: Harvard University Press, 1964. ISBN 0-674-62751-2.
- ALEXANDER, Christopher (1979) – **“The Timeless Way of Building”**. New York : Oxford University Press, 1979. ISBN – 13 978-0-19-502402-9.
- ALEXIOU, Aikaterini (2007) – **“Understanding Multi-Agent Design as Coordination”**. Ph.D. Thesis, Bartlett School of Graduate Studies, Faculty of the Built Environment – University College London – University of London, 2007.
- ALTSHULLER, Genrikh Saulovich (1995) – **“Creativity as an Exact Science. The Theory of the Solution of Inventive Problems”**. Terceira Reimpressão 1995, (Primeira Edição, 1984). Gordon and Breach Publishers. ISBN 0-677-21230-5.
- ALTSHULLER, Genrich S.; ZLOTIN, B; ZUSMAN, A.; PHILATOV, V. (1999) - **“Tools of Classical Triz”**. Ideation International, Inc. Southfield, MI 48034 1999 www.ideationtriz.com (Retirado de **“Searching for New Ideas: From Insight to Methodology; The Theory and Practice of Inventive Problem Solving – Kishinev: Kartya Moldovenyaska Publishing House, 1989**). ISBN 1-928747-02-7.
- ALTSHULLER, Genrich S. (2005) – **“40 Principles – Extended Edition: Triz Keys To Technical Innovation”**, Technical Innovation Center, Inc., MA 01605, 2005 www.triz.org, Library of Congress Catalog Card: 97-80921. ISBN 0-9640740-5-2.
- ASIMOW, Morris (1962) – **“Introduction to Design”**. Englewood Cliffs N. J. : Prentice-Hall Series in Engineering Design. Editor : James B. Reswick, Prentice-Hall Inc, 1962. Library of Congress Catalog Card Number 62-10550.
- BIRMINGHAM, Richard ; CLELAND, Graham ; DRIVER, Robert ; MAFFIN, David – **“Understanding Engineering Design – Context, Theory and Practice”**, Hertfordshire : Prentice Hall Europe, 1997. ISBN 0-13-525650-X.

- CAMPATELLI, Gianni; CITTI, Paolo (2009) – “**Business Process Analysis and Reengineering of Administrative Processes Using Axiomatic Design: Theory and Case Study from the University of Firenze**”, apresentado em “The Fifth International Conference on Axiomatic Design – ICAD 2009”, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 25-27 de Março de 2009.
- CLAUSING, Dom P. (1994) – “**Total Quality Development – a Step-by-step guide to World-Class Concurrent Engineering**”. New York : ASME Press Series on International Advances in design Productivity, 1994. ISBN 0-7918-0035-0.
- COATANÉA, Eric (2005) – “**Conceptual Modelling of Life Cycle Design: A Modelling and Evaluation Method Based on Analogies and Dimensionless Numbers**”, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Helsinki University of Technology (Espoo, Finland) on the 12th of October, 2005. ISBN 951-22-7853-7.
- COLEY, Fiona; HOUSEMAN, Oliver; ROY, Rajkumar (2007) – “**An introduction to capturing and understanding the cognitive behaviour of design engineers**”. Journal of Engineering Design, Taylor & Francis Group, Vol. 18, No. 4, August 2007, pp. 311-325.
- CROSS, Nigel (1999) – “**Natural Intelligence in Design**”, Design Studies, Elsevier Ltd., Vol. 20 No 1 January, 1999, pp. 25–39. PII: S0142-694X(98)00026-X.
- CROSS, Nigel (2006) – “**Forty Years of Design Research**” Design Research Quarterly 1:2 Dec. 2006 – www.designresearchsociety.org.
- CROSS, Nigel (2007) – “**Designerly Ways of Knowing**”. Basel, Switzerland : Birkhäuser Verlag AG, 2007, (Primeira Edição – Springer-Verlag, London Limited 2006). ISBN 978-3-7643-8484-5.
- CROSS, Nigel (2008) – “**Engineering Design Methods – Strategies for Product Design**”, Fourth Edition. Southern Gate, Chichester, West Sussex, England : John Wiley & Sons, Ltd. The Atrium, 2008, (Primeira Edição, 1989). ISBN 978-0-470-51926-4.
- DARKE, Jane (1979) – “**The Primary Generator and the Design Process**”, Design Studies, Vol. 1, Issue 1, July 1979, pp. 36-44. DOI:10.1016/0142-694X(79)90027-9.
- DECRETO-LEI N.º 103/2008, de 24 de Junho, que transpõe a “**Directiva Máquinas CE**” para a Legislação Portuguesa. (Estabelece as regras a que deve obedecer a colocação no mercado e a entrada em serviço das máquinas bem como a colocação no mercado das “quase-máquinas”, transpondo para a ordem jurídica interna a Directiva n.º 2006/42/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 17 de Maio, relativa às máquinas).
- DECRETO-LEI N.º 372/2007, de 6 de Novembro, que **Define PME**, bem como os conceitos e critérios a utilizar para aferir o respectivo estatuto e certificação, conforme previstos na Recomendação n.º 2003/361/CE, da Comissão Europeia, de 6 de Maio.
- DIETER, George E.; SCHMIDT, Linda C. (2009) – “**Engineering Design**” – Fourth Edition, International Edition 2009. New York : Higher Education – McGraw Hill, 2009. (Primeira Edição, 1983). ISBN 978-007-126341-2.

- DILWORTH, James B. (1993) – “**Production and Operations Management - Manufacturing and Services**” – Fifth Edition, 1993. Singapore : McGraw-Hill International Editions – Management and Organization Series, 1993 (Primeira Edição, 1979). ISBN 0-07-112593-0.
- DIRECTIVA 2006/42/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO, de 17 de Maio de 2006, relativa às máquinas e que altera a Directiva 95/16/CE (reformulação – versão completa).
- DIRECTIVA 2009/127/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO, de 21 de Outubro de 2009, que altera a Directiva 2006/42/CE no que respeita às máquinas de aplicação de pesticidas (Versão actual).
- DORST, Kees. (2006) – “**Understanding Design**”, Second Edition. Amsterdam : Bis Publishers, 2006 (Primeira Edição, 2003). ISBN 90-6369-149-1.
- DUGAS, René (1989) – “**A History of Mechanics**”. N. Chelmsford, New York : Courier Dover Publications. 1989. ISBN 0486656322.
- EAGAN, Robert J. [*et al.*] (2002) – “**Approaches to Improve Engineering Design**”. Washington : National Research Council – The National Academies Press, 2001. ISBN 0-309-54224-3.
- ERTAS, Atila; JONES, Jesse C. (1996) – “**The Engineering Design Process**”, Second Edition. New York : John Wiley & Sons, Ltd., 1996 (Primeira Edição, 1993). ISBN 0-471-13699 -9.
- EVBUOMWAN, N. F. O.; SIVALOGANATHAN, S.; JEBB, A (1996) – “**A survey of design philosophies, models, methods, and systems**”. Journal of Engineering Manufacture, P I Mech Eng Vol. 210, 1996, pp. 301-320.
- FINGER, Susan; DIXON, John R. (1989) – “**A Review of Research in Mechanical Engineering Design - Part I and Part II**”, Research in Engineering Design, Vol. 1, pp. 51-67 and pp. 121-137, 1989 Springer-Verlag New York Inc.
- FRENCH, Michael Joseph (1999) – “**Conceptual Design for Engineers**”, Third Edition. London : Springer-Verlag London, 1999 (Primeira Publicação – Engineering Design: The Conceptual Stage – 1971) . ISBN 1-85233-027-9.
- FRENCH, Michael Joseph (1994) – “**Invention and Evolution – Design in Nature and Engineering**”, Second Edition. Cambridge : Press Syndicate of the University of Cambridge, 1996 (Primeira Publicação, 1988) . ISBN 0 521 46911 2.
- FRIEDMAN, Ken (2003) – “**Theory construction in design research: criteria: approaches, and methods**”, Design Studies Vol. 24 No. 6 November 2003, pp 507-522. DOI:10.1016/S0142-694X(03)00039-5.
- FRIEDRICH, Jtirgen (1996) – “**Design Science 97**”. London : AI & Society, Springer-Verlag London Limited, 1996 Volume 10, pp199-217

- GEBALA, David A.; EPPINGER, Steven (1991) – “**Methods for Analyzing Design Procedures**”, presented at “The 1991 ASM Design Technical Conferences – 3rd International Conference on Design Theory and Methodology. Miami, Florida 1991, Design Theory and Methodology, DE-Vol. 31, pp. 227-233; Edited by STAUFFER, Larry A.
- GERO, Jonh S.; FUJII, H. (2000) – “**A Computational Framework for Concept Formation for a Situated Design Agent**”, in Knowledge-Based Systems 13(6): 361-368 Elsevier Science B.V. PII: S0950-7051(00)00076-9.
- GERO, John S. ; KANNENGIESSER, Udo (2004) – “**The Situated Function–Behaviour–Structure Framework**”, in Design Studies 25 (2004) pp. 373–391 - Elsevier Ltd.
- GOEL, Vinod (1995) – “**Sketches of Thought**”. A Bradford Book. Cambridge, Massachusetts – London, England. The MIT Press, 1995. ISBN 0-262-07163-0.
- GONÇALVES-COELHO, A. M.; MOURÃO, António J. F.; PAMIES-TEIXEIRA, J. J., (2003) – “**Axiomatic Design as a Background for Concurrent Engineering Education and Practice**”, The Vision for the Future Generation in Research and Applications, J. Cha *et al.* (eds). Lisse : Swets & Zeitlinger, 2003. ISBN 90 5809 622 X.
- GONÇALVES-COELHO, António Manuel; (2004) – “**Axiomatic Design and the Concurrent Engineering Paradigm**”, apresentado em “Computing and Solutions in Manufacturing Engineering”, Brasov, Romania, 16-18 Setembro 2004.
- GONÇALVES-COELHO, António Manuel; MOURÃO, António José Freire; PEREIRA Zulema Paula (2005) – “**Improving the Use of QFD with Axiomatic Design**”, Concurrent Engineering: Research and Applications (ISSN 1063-293X), 13 (3), pp. 233-239, 2005.
- GONÇALVES-COELHO, António Manuel; MOURÃO, António José Freire (2007) – “**Axiomatic Design as Support for Decision-Making in a Design for Manufacturing Context: A case study**”. International Journal of Production Economics, Vol. 109 (2007), pp. 81-89. DOI: 10.1016/j.ijpe.2006.11.002.
- GONÇALVES-COELHO, A.M.; Nestian, G.; Mourão, A.J.F.(2010) – “**On the Pattern of the Design Matrix in Redundant Design Solutions**”, Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. ISSN 1011-2855, n.2, pp. 1-7, 2010.
- GRABOWSKI, Hans; LOSSACK, Ralf-Stefan; EL-MEJBRI, El-Fathi (1999) – “**Towards A Universal Design Theory**”, Proceedings of the 1999 CIRP International Design Seminar – Integration of Process Knowledge into Design Support Systems University of Twente, Enschede, The Netherlands, 24-26 March 1999.
- GUENOV, Marin D.; BARKER, Stephen G. (2004) – “**Application of Axiomatic Design and Design Structure Matrix to the Decomposition of Engineering Systems**”, Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com), Received 25 February 2004; Accepted 1 August 2004. DOI: 10.1002/sys.20015 Systems Engineering, Vol. 8, No. 1, 2005.

- GUMUS, Bulent (2005) – “**Axiomatic Product Development Lifecycle**”. Ph.D. dissertation, Mechanical Engineering Department, Texas Tech University, Lubbock, TX, December 2005.
- GUMUS, Bulent; ERTAS, Atila; TATE, Derrick; CICEK, Ismail (2007) – “**The Transdisciplinary Product Development Lifecycle Model**”, Journal of Engineering Design, Taylor & Francis Group, Vol. 19, No. 3, pp. 185-200. DOI: 10.1080/09544820701232436.
- HARUTUNIAN, Vigain; NORDLUND, Mats; TATE, Derrick; SUH, Nam Pyo (1996) – “**Decision Making and Software Tools for Product Development Based on Axiomatic Design Theory**”, Annals of the CIRP Vol. 45/1/1996.
- HATCHUEL, Armand; WEIL, Benoît (2003) – “**A New Approach of Innovative Design: AN INTRODUCTION TO C-K THEORY**”, apresentado em “International Conference on Engineering Design – ICED 03” Stockholm, August 19-21, 2003.
- HATCHUEL, Armand; WEIL, Benoît (2009) – “**C-K Design Theory: An Advanced Formulation**”, Research in Engineering Design Journal, Springer-Verlag London Limited, Vol. 19, Number 4 / January, 2009 19, pp. 18-192. DOI: 10.1007/s00163-008-0043-4.
- HAUSER, John R.; CLAUSING, Don P. (1988) – “**The House of Quality**”, The Harvard Business Review, Graduate School of Business Administration, Harvard University, Boston, MA02163, 1998, Vol. 66, No. 3, May-June 1988, pp. 63-73.
- HOOKER, John N. (2004) – “**Is Design Theory Possible?**”, JITTA – Journal of Information Technology Theory and Application; 2004; 6, 2; ABI/INFORM Global, pp. 73-83.
- HORVÁTH, Imre (2004) – “**A Treatise on Order in Engineering Design Research**”, Research in Engineering Design, Springer-Verlag London Limited (2004) 15, pp. 155-181. DOI: 10.1007/s00163-004-0052-x.
- HU, Matthew; YANG, Kai; TAGUCHI, Shin (2000) – “**Enhancing Robust Design with the Aid of TRIZ and Axiomatic Design (Part I)**”, TRIZ Journal, October, 2000.
- HU, Matthew; YANG, Kai; TAGUCHI, Shin (2000) – “**Enhancing Robust Design with the Aid of TRIZ and Axiomatic Design (Part II)**”, TRIZ Journal, November, 2000.
- HUBKA, Vladimir (1982) – “**Principles of Engineering Design**” – First English Edition. Trowbridge, England : Butterworth Scientific – Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1982 (Primeira Publicação – Allgemeins Vorgehensmodell des Konstruierens Zurich – 1980). ISBN 0-408-01105-X.
- HUBKA, Vladimir; EDER, W. Ernest (1988) – “**Theory of Technical Systems – A Total Concept Theory for Engineering Design**”, English Edition of “Theorie Technischer Systeme” – Second Edition 1984. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 1984. ISBN 3-540-17451-6; ISBN 0-387-17451-6.

- HUBKA, Vladimir; EDER, W. Ernst (2001) – “**Design Science**”, Springer. 1996. ISBN 3-540-19997-7.
- IAPMEI (2008) – “**Sobre as PME em Portugal**”. Lisboa : Direcção de Planeamento e Estudos – Fevereiro de 2008.
- JONES, John Christopher (1974) – “**Design Methods - Seeds of Human Futures**”, (Primeira Edição 1970 – 4.^a Reimpressão 1974). Letchworth, Hertfordshire SG6 1JS : Wiley-Interscience – John Wiley & Sons, Ltd., Library of Congress Catalog Card Number 77-122344. ISBN 0 471 44790 0.
- KAMM, Lawrence J. (1990) – “**Designing Cost-Efficient Mechanisms**”. New York : McGraw-Hill, Inc., 1990. ISBN 0-07-033569-9.
- KAMM, Lawrence J. (1991) – “**Real-World Engineering: A Guide To Achieving Career Success**”. New York : IEEE Press, Inc., 1991. ISBN 0-87942-273-4.
- KAMM, Lawrence J. (1996) – “**Understanding Electro-Mechanical Engineering – An Introduction to Mechatronics**”. New York : IEEE Press, Inc., 1996. ISBN 0-7803-1031-4.
- KAN, Jeff W. T.; GERO, John S. (2009) – “**Using the FBS Ontology to Capture Semantic Design Information in Design Protocol Studies**”, in J McDonnell and P Lloyd (eds), About: Designing. Analysing Design Meetings, CRC Press, pp. 213-229.
- KANNENGIESSER, Udo and GERO, Jonh S. (2009) – “**An Ontology of Computer-Aided Design**”, in CM De Smet and JA Peeters (eds), Computer-Aided Design and other Computing Research Developments, Nova Science Publishers, pp. 1-25.
- KERMOD, G. R.; SIVALOGANATHAN, S. – “**Complexity Resolution for Design Excellence**”, apresentado em “Design for Excellence – Engineering Design Conference 2000”, 20th August 2001. ISBN 9781860582592.
- KIM, Yong-Suk; COCHRAN, D. S. (2000) – “**Reviewing TRIZ From the Perspective of Axiomatic Design**”, Journal of Engineering Design, Taylor & Francis Group, Vol. 11, No. 1, pp. 79-94. DOI: 10.1080/095448200261199.
- KIM, Yong-Suk (2002) – “**A Decomposition-Based Approach for the Integration of Product Development and Manufacturing System Design**”, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology – MIT, Cambridge, MA., June, 2002.
- KULAK, Osman; CEBI, Selcuk; KAHRAMAN, Cengiz (2010) – “**Applications of axiomatic design principles: A literature review**”, Expert Systems with Applications, Volume 37 (2010), pp. 6705-6717. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.03.061.
- LAUCHE, Kristina (2005) – “**Job Design for Good Design Practice**”, Design Studies, Elsevier Ltd. Volume 26, Issue 6, November 2005, pp. 191-213. DOI: 10.1016/j.destud.2004.09.002 191.

- LAWSON, Bryan (2007) – **“What Designers Know”**, (First Edition, 2004 – Reimpressão, 2007). Oxford OX2 8DP, UK : Architectural Press, Elsevier Ltd.. ISBN 978-0-7506-6448-6.
- LAWSON, Bryan (2008) – **“How Designers Think – The Design Process Demystified”**, (Fourth Edition, 2006 – Reimpressão, 2008) (Primeira Edição, 1980). Oxford OX5 1GB, UK : Architectural Press, Elsevier Ltd. ISBN 978-0-7506-6077-8.
- LEE, Dai Gil; SUH, Nam Pyo (2006) – **“Axiomatic Design and Fabrication of Composite Structures: Applications in Robots, Machine Tools and Automobiles”**. New York : Oxford University Press, Inc., Oxford Series on Advanced Manufacturing, 2006. ISBN 0-19-5177877-7.
- LEE, Tae-Sik (1999) – **“The System Architecture Concept in Axiomatic Design Theory: Hypotheses Generation & Case-study Validation”**, M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology – MIT, Cambridge, MA., 1999.
- LEE, Taesik, (2003) – **“Complexity Theory in Axiomatic Design”**, Ph.D. Thesis, Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology – MIT, Cambridge, MA., May, 2003.
- LIU, Shaofeng; BOYLE, Iain M. (2009) – **“Engineering Design: Perspectives, Challenges, and Recent Advances”**, Journal of Engineering Design, Taylor & Francis Group, Vol. 20, No. 1, February 2009, pp. 7-19. DOI: 10.1080/09544820802670914.
- LOCKWOOD, Thomas (2009) – **“Design Thinking – Integrative Innovation, Customer Experience, and Brand Value”**. New York : Allworth Press, 2009. ISBN-13: 978-1-58115-668-3.
- LOSSACK, Ralf; GRABOWSKI, Hans (2000) – **“The Axiomatic Approach in the Universal Design Theory”**, Proceedings of ICAD2000 – First International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA – June 21-23, 2000.
- MAFFIN, David (1998) – **“Engineering Design Models: Context, Theory And Practice”**, Journal of Engineering Design, Taylor & Francis Group, Vol. 9, No. 4, pp. 315-327. DOI: 10.1080/095448298261462.
- MANN, Darrell (2009) – **“Axiomatic Design And TRIZ: Compatibilities and Contradictions”**, apresentado em “The Second International Conference on Axiomatic Design – ICAD-2002”. Cambridge, MA – June 10 - 11, 2002.
- MARQUES, P. A. ; SARAIVA, P. M. ; REQUEIJO, J. G. ; GUERREIRO, F. F. (2007) – **“Inovação nos Sistemas Técnicos Através de um Método Integrado de Decomposição Centrado na Criação de Valor”**, apresentado no 8.º Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cusco, 23-25 de Outubro de 2007.

- MARQUES, Pedro Domingos Belo Carmona; SILVA, Arlindo José; HENRIQUES, Elsa Maria (2008) – “**A Comparison between two new creative methodologies in Product Development**”, apresentado em “RPD 2008 – Designing the Industry of the Future”, Oliveira de Azeméis, Portugal, pp. 27-31, October, 2008.
- MARQUES, Pedro Domingos Belo Carmona; HENRIQUES, Elsa Maria, SANTOS, António Gabriel (2009) – “**How creativity leads to innovation: an industrial case study**”, apresentado em “IRF 2009 – Integrity, Reliability, Failure : Challenges and Opportunities”, Third International Conference. Porto, 20-24 July 2009.
- MARZAL, Jorge Alcaide; MÁZ, José António Diego; RAMÍREZ, Miguel Ángel Artacho (2005) – “**Diseño de Producto – Métodos y Técnicas**”, Primera Reimpresión (Edição Original publicada por Universidad Politécnica de Valência, España, 2004). México : Alfaomega Grupo Editor, 2005. ISBN 970-15-0991-9.
- MILES, Lawrence D. (1972) – “**Techniques of Value Analysis and Engineering**”, Second edition. New York : McGraw-Hill, 1972. ISBN: 9780070419261.
- NAVAS, Helena Víctorovna Guitiss (2007) – “**Contribuições para a Sistematização do Toleranciamento Dimensional e Geométrico**”, Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2007.
- NIEMANN, Gustav (1995) – “**Elementos de Máquinas**”, Vol. 1; 2; 3. São Paulo - Brasil, Editora Edgard Blücher, Lda. – 7.ª Reimpressão 1995, (1.ª Edição da Spirnger-Verlag em língua Alemã – 1960).
- NORMAN, Donald A. (2002) – “**The Design of Everyday Things**”, (Primeira Impressão – 1988). New York : Basic Books, 2002. ISBN 0-465-06710-7.
- NORDLUND, Mats (1996) – “**An Information Framework for Engineering Design Based on Axiomatic Design**”, Ph.D. Thesis, Department of Manufacturing Systems, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 1996.
- ORLOV, P. (1976) – “**Fundamentals of Machine Design**”, Vol. 1; 2; 3; 4. Moscow : MIR Publishers. 1976.
- PAHL, Gerhard ; BEITZ, Wolfgang ; FELDHUSEN, Jörg ; GROTE, Karl-Heinrich (2007) – “**Engineering Design – A Systematic Approach**” – Third Edition, 2007. (Primeira Edição Alemã, 1977 – Primeira Edição Inglesa, 1984). London : Springer-Verlag London, Translators and Editors – Wallace, Ken; Blessing, Lucienne. ISBN 978-1-84628-318-5.
- PETROSKI, Henry (1996) – “**Invention By Design – How Engineers Get From Thought To Thing**”.Cambridge, Massachusetts : Harvard University Press, 1996. ISBN 0-674-46368-4.
- PUGH, Stuart (1998) – “**Total Design - Integrated Methods for Successful Product Engineering**”. (Primeira Impressão, 1990). Harlow, Essex : Addison-Wesley Publishing Company, 1998. ISBN 0-201-41639-5.

- PURCELL, A. T.; GERO, J. S. (1998) – “**Drawings and the Design Process**”, Design Studies, Vol. 19, Issue 4, October 1998, pp. 389-430. PII: S0142-694X(98)00015-5.
- REICH, Yoram (1995) – “**A Critical Review of General Design Theory**”, Research in Engineering Design, Vol. 7, pp. 1-18, Springer-Verlag London Limited 1995.
- RIZO, Salvador Capuz (2001) – “**Introducción al Proyecto de Producción – Ingeniería Concurrente para el Diseño de Producto**”. (Edição Original publicada por Universidad Politécnica de Valencia, España, 1990). México : Alfaomega Grupo Editor, 2001. ISBN 970-15-0664-2.
- ROBINSON, Mark A.; SPARROW, Paul R.; CLEGG, Chris; BIRDI, Kamal (2005) – “**Design Engineering Competencies: Future Requirements and Predicted Changes in the Forthcoming Decade**”, Design Studies, Elsevier Ltd (2005), Vol. 26, pp. 123-153. DOI: 10.1016/j.destud.2004.09.004.
- ROMEVA, Carles Riba (2002) - “**Disseny de Màquines V. Metodologia**”. Catalunya : Edicions UPC, Universitat Politècnica de Catalunya, 2002.
- ROOZENBURG, N.F. M. ; EEKELS, J. (1995) – “**PRODUCT DESIGN: Fundamentals and Methods**” (Reimpressão, 1996). Chichester, West Sussex, England : John Wiley & Sons, Ltd., 1996. ISBN 0-471-95465-9.
- RUIHONG, Zhang; RUNHUA, Tan; GUOZHONG, Cao (2004) – “**Case Study in AD and TRIZ: A Paper Machine**”, TRIZ Journal (<http://www.trizjournal.com>), 2004.
- SHIRWAIKER, Rohan A.; OKUDAN, Gül E. (2008) – “**TRIZ and Axiomatic Design: A Review of Case-Studies and a Proposed Synergistic Use**”, J Intell Manuf, Springer Science+Business Media, LLC 2007 (2008) 19, pp. 33–47. DOI: 10.1007/s10845-007-0044-6.
- SANTOS, António Gabriel (2002) – “**O Projecto de Transportadores de Rolos Motorizados Accionados por Correia Cruzada de Secção Circular**”, apresentado nas “2.^{as} Jornadas Politécnicas de Engenharia – Escola Superior de Tecnologia de Setúbal” – 13-14 de Novembro de 2002.
- SANTOS, António Gabriel; SILVA, Arlindo José; GONÇALVES-COELHO, António Manuel (2009) – “**Minimum Constraint Design and the First Axiom**” apresentado em “The Fifth International Conference on Axiomatic Design – ICAD 2009”, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 25-27 Março 2009.
- SHANNON, C. E. (1948) - “**A Mathematical Theory of Communication**”, The Bell System Technical Journal, Vol. 27, pp. 379-423; 623-656, Julho; Outubro 1948.
- SIMON, Herbert Alexander (1996) - “**The Sciences of the Artificial**”, Third Edition. Cambridge, Massachusetts : The MIT Press, 1996 – Higher Education – McGraw Hill (Primeira Edição – 1969).
- SMITH, Larry R. (2001) – “**Six Sigma and the Evolution of Quality in Product Development**”, Six Sigma Forum Magazine – November 2001 – www.asq.org.

- SUH, Nam Pyo (1990) – “**The Principles of Design**”, New York : Oxford University Press, 1990. ISBN 0-19-504345-6.
- SUH, Nam Pyo (2001) – “**Axiomatic Design: Advances and Applications**”, New York : Oxford University Press, 2001. ISBN 978-0-19-513466-7.
- SUH, Nam Pyo (2005) – “**Complexity: Theory and Applications**”, New York : Oxford University Press, 2005. ISBN 0-19-517876-9.
- TATE, Derrick; NORDLUND, Mats (1995) – “**Synergies Between American and European Approaches to Design**”, Proceedings of the First World Conference on Integrated Design and Process Technology (IDPT-Vol. 1), Society for Design and Process Science, Austin, TX, pp. 103-111, December 7-9, 1995.
- TATE, Derrick; NORDLUND, Mats (1996) – “**A Design Process Roadmap as a General Tool for Structuring and Supporting Design Activities**”, Proceedings of the Second World Conference on Integrated Design and Process Technology (IDPT-Vol. 3), Society for Design and Process Science, Austin, TX, pp. 97-104, Dec. 1-4, 1996.
- TATE, Derrick, (1999) – “**A Roadmap for Decomposition: Activities, Theories, and Tools for System Design**”, Ph.D. Thesis, Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology - MIT, Cambridge, MA., February, 1999.
- TAKEDA, Hideaki; VEERKAMP, Paul; TOMIYAMA, Tetsuo; YOSHIKAWA, Hiroyuki; (1990) – “**Modeling Design Processes**”, AI Magazine Vol. 11 Number 4, American Association for Artificial Intelligence, 1990.
- THOMPSON, Mary Kathryn; THOMAS, Benjamin C. Thomas; HOPKINS, Jonathan B. (2009) – “**Applying Axiomatic Design to the Educational Process**”, apresentado em “The Fifth International Conference on Axiomatic Design – ICAD-2009”. Campus de Caparica, Portugal, March 25-27, 2009.
- TIDEMAN, Martijn; VOORT, Mascha C. van der; HOUTEN, Fred J. A. M. van (2008) – “**A New Product Design Method Based On Virtual Reality, Gaming And Scenarios**” Int J Interact Des Manuf (2008) 2, pp. 195–205. DOI: 10.1007/s12008-008-0049-1.
- ULLMAN, David G.; WOOD, Stephen; CRAIG, David (1990) – “**The Importance of Drawing in the Mechanical Design Process**”, Pergamon Press plc, Compute & Graphics, Vol. 14, No. 2, pp. 203-274, 1990.
- ULLMAN, David G. (2010) – “**The Mechanical Design Process**”, Fourth Edition (Primeira Edição, 1992). New York : McGraw-Hill International Edition, 2010. ISBN 978-007-126796-0.
- ULRICH, Karl T.; EPPINGER, Steven D. (2008) – “**Product Design and Development**” Fourth Edition (Primeira Edição – 1995). New York : McGraw-Hill International Edition, 2008. ISBN 978-007-125947-7.

- VDI (1987) – “**Design Handbook 2221: Systematic Approach to the Design of Technical Systems and Products**”, (translation of German edition), Verein Deutscher Ingenieure Verlag, Dusseldorf.
- VERMAAS, Pieter E.; DORST, Kees (2007) – “**On the Conceptual Framework of John Gero’s FBS-Model and the Prescriptive Aims of Design Methodology**”, in *Design Studies* 28 (2007), pp. 133-157, Elsevier Ltd 2006. DOI:10.1016/j.destud.2006.11.001 133.
- VERSCHUREN, Piet; HARTOG, Rob (2005) – “**Evaluation in Design-Oriented Research**”, *Quality & Quantity*, 2005, Vol. 39, pp. 733–762. DOI: 10.1007/s11135-005-3150-6.
- VOLAND, Gerard (2004) - “**Engineering by Design**”, Second Edition (Primeira Publicação 1998). Upper Saddle River, New Jersey 07458 : Pearson Prentice Hall, Pearson Education, Inc., 2004, ISBN 0-13-140919-0.
- WHITNEY, Daniel E. (2004) – “**Mechanical Assemblies – Their Design, Manufacture and Role in Product Development**”, New York : Oxford University Press, 2004. ISBN 0-19-515782-6.
- WILSON, David Robert (1980) – “**An Exploratory Study of Complexity in Axiomatic Design**”, Ph.D. Thesis, Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology – MIT, Cambridge, MA., 29 de Agosto de 1980.
- YANG, Maria C.; EPSTEIN, Daniel J. (2005) – “**A Study of Prototypes, Design Activity, and Design Outcome**”, *Design Studies*, Elsevier Ltd., Vol. 26, Issue 6, November 2005, pp. 649-669. DOI: 10.1016/j.destud.2005.04.005.
- YE, Xiuzi; LIUA, Hongzheng; CHENA, Lei; CHENC, Zhiyang; PANC, Xiang; ZHANGA, Sanyuan (2008) – “**Reverse innovative design – an integrated product design methodology**”, *Computer-Aided Design*, Vol. 40, Issue 7, July 2008, pp. 812-827. DOI: 10.1016/j.cad.2007.07.006.
- YOSHIKAWA, Hiroyuk (1981) – “**General Design Theory and a CAD System**”, in Sata, T. and Warman, E., editors, *Man-Machine Communication in CAD/CAM, Proceedings of The IFIP WG5.2 5.3 Working Conference 1980 (Tokyo)*, pp. 35-57. North-Holland, Amsterdam The Netherlands, 1981. (Citado por Hatchuel, 2003).
- YOSHIKAWA, Hiroyuk (1987) – “**General Design Theory as a Formal Theory of Design**”, em: Yoshikawa H, Gossard D (eds) *Intelligent CAD*, Vol 1. North Holland, Amsterdam, The Netherlands, 1987, pp. 51-61. (Citado por Horváth, 2004).
- YOSHIKAWA, Hiroyuk (1989) – “**Design Philosophy: The State of the Art**”, em *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 38, Issue 2, 1989, pp. 579-586. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61126-3.

ZAMENOPOULOS, Theodore (2008) – “**Design Out of Complexity – A Mathematical Theory of Design as a Universal Property of Organization**”, Ph.D. Thesis, Bartlett School of Graduate Studies – Faculty of the Built Environment – University College London – University of London, 2008.

ANEXOS

Nos Anexos seguintes são apresentadas elementos e dados que serviram de base a este documento mas que, pela sua extensão e pela sua natureza, não se enquadravam no texto principal.

A.1 Principais trabalhos existentes sobre Projecto

Survey of the 'Evolution' of Contributions to Design Science				
Legend:				
T ... Translation	G ... Germany (united)	S ... Sweden		
C ... Conference Proceedings	F ... France	AU ... Australia		
R ... Report	CZ ... Czech Republic	J ... Japan		
G ... Guideline	PL ... Poland	SU ... USSR (previous)		
J ... Journal	DK ... Denmark			
<u>69</u> ... refers also to later contributions -- some authors appear several times (with abbreviation of book title)				
	USA, CDN	D, CH	GB	Other countries
1940		1850 Redtenbacher 1853 Reuleaux 1919 Riedler		1929 Kotarbinski (PL)
45	45 Polya 47 Miller 48 Zwicky	43 Kesselring 43 Wägerbauer		
1950		48 Konstruktion (J)		
	53 Brass 54 Crawford 54 von Fange	52 Bischof-Hansen 54 Tschochner	52 Wallace	
55		55 Lohmann 57 Matousek 57 Brandenburger		58 Richtl. Ko7 (S)
1960	58 Jewkes 58 Whiting 59 Pearson 60 Simon 60 Buhl 61 Gordon 62 Ackoff 62 Asimov 62 Hall 63 Starr 63 Norris 63 Pare 63 Osborne 64 Alger 64 Drucker 64 McCrory 64 Sandor 65 Krick	63 Leyer 64 VDI-R 2225 (G)	60 Marples 62 Gosling 63 Feilden (R) 63 Matousek (T) 63 Jones (C) 64 Archer	61 Sereda (SU) 62 Goranski (SU) 63 Altschuller (SU) 63 Hubka (CZ) 63 Smilauer (CZ) 63 Backovsky (CZ)
65	66 Woodson 66 Harrisberger 66 Dixon 67 Tech-Innov (C) 67 Miller 67 Nadler 67 Roe 68 Bertalanffy 68 Gibson 69 Churchman 69 Klir 69 Middendarf 69 Vidosic 70 Parr 70 Wilson	65 Engpass-Konstr. 65 Lehrstuhl München 65 Hansen (KoSyst) 67 Müller (OpVerf) 67 Hansen (C) 68 Steuer 70 Rodenacker	65 Eder/Gosling 66 Gregory (C) 67 Mayall 68 DeSimone (C) 68 Ellinger 68 Morrison 69 Ashford 69 Glegg 70 Jones 71 French 72 Gregory (C) 72 Cross (C)	66 Olsson (S) 67 Dietrych (PL) 67 Prag (C-CZ) 69 Norbert (F) 70 Geminard (F) 71 Vidal (F) 72 Powilejko (SU)

Figure 3--1
Part 1 of 2

Historical Developments in the Literature

Tabela A.1 – Lista dos trabalhos existentes compilados por Hubka e Eder (*parte I*), retirado de [Hubka et al., 2001].

Legend:				
T ... Translation	G ... Germany (united)	S ... Sweden		
C ... Conference Proceedings	F ... France	AU ... Australia		
R ... Report	CZ ... Czech Republic	J ... Japan		
G ... Guideline	PL ... Poland	SU ... USSR (previous)		
J ... Journal	DK ... Denmark			
69 ... refers also to later contributions -- some authors appear several times (with abbreviation of book title)				
	USA, CDN	D, CH	GB	Other countries
	73 Love 73 Holloway 73 Miles 74 Wickelgren 74 Newell	73 VDI-R 2222 (G) 73 Schw.M.Mkt. (J)	73 Pitts 73 de Bono	73 Odrin (SU) 73 Chabal (F)
75	76 Warfield	74 Hubka (TMS) 74 Hansen (KoWiss)	74 Leyer (T) 74 Pitts (C)	74 Svensson (AU)
	78 Argyris	76 Hubka (TKoP) 76 Franke 76 Steinwachs 76 Koller 77 Pahl/Beitz	76 Moulton (R)	77 Orlov (SU) 78 Yoshikawa (J) 79 Tjalve (DK)
1980	80 Adams 80 McKim	79 Ropohl	79 Loughborough (C) 79 Corfield (R) 79 Design Studies (J) 80 Finniston (R)	80 Andreasen (DK) 80 Sapiro (SR) 81 ICED 81 Roma
	83 Goldberg 83 Schön	82 Roth 82 Schregenberger	82 Hubka/Eder (WDK1)	83 ICED 83 Kopenhagen 84 Gasparski (PL)
85	85 NSF	85 Ehrlenspiel 85 ICED 85 Hamburg 85 VDI-R 2221 (G) 86 Seifert	83 Lickley (R) 84 Cross 84 Langdon (C) 84 Pahl/Beitz (T)	
	86 Wales 86 Rabins (B) 87 ICED 87 Boston 88 Hubka/Eder (TTS)		88 Trade & Ind. (R) 88 Hubka/Andr./Eder 89 ICED 89 Harrogate	88 Lewis/Samuel (AU) 88 ICED 88 Budapest 89 Andreasen/Hein
1990	89 Newsome (C) 89 Westerberg 89 Suh 90 Res.E.Design (J) 90 Starfield	90 Müller (AMeth)	90 J. Eng. Design (J)	90 ICED 90 Dubrovnik
	92 Ullman	91 ICED 91 Zürich 91 Hubka/Eder (KoW) 92 Hubka/Eder (ED) 93 Pahl/Beitz (3rd)	91 J. Des. & Prod.(J) 91 Pugh	
95	94 Dym	95 Roth (2nd) 95 Hubka/Eder (DSci) (current volume)	94 Cross 95 Redford	93 ICED 93 The Hague 95 ICED 95 Prague
Figure 3--1 Part 2 of 2		Historical Development of Design Science Literature		

Tabela A.2 – Lista dos trabalhos existentes compilados por Hubka e Eder (*parte II*), retirado de [Hubka et al., 2001].

Year	Author	Theme/Title	Country	Literature
1953	Bischoff, Hansen	Rationelles Konstruieren	DDR	[1.21]
1955	Bock	Konstruktionsystematik—die Methode der ordnenden Gesichtspunkte	DDR	[1.25]
1956	Hansen	Konstruktionsystematik	DDR	[1.78]
1963	Pahl	Konstruktionstechnik im thermischen Maschinenbau	DE	[1.131]
1966	Dixon	Design Engineering: Inventiveness, Analysis and Decision-Making	USA	[1.39]
1967	Harrisberger	Engineermanship	USA	[1.79]
1968	Roth	Systematik der Maschinen und ihrer mechanischen elementaren Funktionen	DE	[1.163]
1969	Glegg	The Design of the Design, The Development of Design, The Science of Design	GB	[1.68–1.70]
1970	Tribus	Rational Descriptions, Decisions and Design	USA	[1.177]
	Beitz	Systemtechnik im Ingenieurbereich	DE	[1.16]
	Gregory	Creativity in Engineering	GB	[1.71]
	Pahl	Wege zur Lösungsfindung	DE	[1.129]
1971	Rothenacker	Methodisches Konstruieren (4th Edition 1991)	DE	[1.155]
	French	Conceptual Design for Engineers, 1st Edition (3rd Edition 1999)	GB	[1.58]
1972	Pahl, Beitz	Series of articles „Für die Konstruktionspraxis“ (1972–1974)	DE	[1.142]
1973	Altschuller	Erlinden: Anleitung für Neuerer und Erfinder	USSR	[1.5]
	VDI	VDI-Richtlinie 2222, Blatt 1 (Entwurf): Konzipieren technischer Produkte	DE	[1.192]
1974	Adams	Conceptual Blockbusting: A Guide to Better Ideas	USA	[1.1]
1976	Hennig	Methodik der Verarbeitungsmaschinen	DDR	[1.82]
1977	Flurshem	Engineering Design Interfaces	GB	[1.49, 1.50]
	Ostrowsky	Design, Planning and Development Methodology	USA	[1.126]
	Pahl, Beitz	Konstruktionslehre, 1st Edition (6th Edition 2005)	DE	[1.134]
	VDI	VDI-Richtlinie 2222 Blatt 1: Konzipieren technischer Produkte	DE	[1.192]
		Arbeitsblätter Konstruktionstechnik	DDR	[1.165]
1978	Rugenstein	Integration der industriellen Formgestaltung in den Erzeugnis-Entwicklungsprozess, Arbeiten zum Industrial Design	DDR	[1.60–1.62]
1979	Klose	Zur Entwicklung einer speicherunterstützten Konstruktion von Maschinen unter Wiederverwendung von Baugruppen	DDR	[1.99, 1.100]
	Polovnikin	Untersuchung und Entwicklung von Konstruktionsmethoden	USSR	[1.146, 1.147]
1981	Gierse	Wertanalyse und Konstruktionsmethodik in der Produktentwicklung	DE	[1.67]
	Kozma, Straub (Pahl/Beitz)	Hungarian translation of Pahl/Beitz Engineering Design	H	[1.141]
	Nadler	The Planning and Design Approach	USA	[1.119]

Tabela A.3 – Lista dos trabalhos compilados por G. Pahl/ W. Beitz/ J. Feldhusen/ K. H. Grote (parte I), retirado de [Pahl et al., 2007].

Year	Author	Theme/Title	Country	Literature
1982	Proceedings of ICED by Hubka	WDK Series biannually from 1981 to 2001; Design Society Series from 2003	CH	[1.148]
	Schreggenberger	Methodenbewusstes Problemlösen	CH	[1.170]
	Dietrych, Rugenstein	Einführung in die Konstruktionswissenschaft	PL/D	[1.36]
	Roth	Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, 1st Edition (3rd Edition 2001)	DE	[1.160, 1.161], [1.162]
	VDI	VDI-Richtlinie 2222 Blatt 2: Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen	DE	[1.193]
1983	Andreasen et al.	Design for Assembly	DK	[1.8]
	Höhne	Struktursynthese und Variationstechnik beim Konstruieren	DDR	[1.84]
1984	Hawkes, Abinett	The Engineering Design Process	GB	[1.80]
	Altschuller	Erlinden – Wege zur Lösung technischer Probleme	USSR	[1.4]
1985	Hubka	Theorie technischer Systeme	CH	[1.86, 1.87]
	Walczack (Pahl/Beitz)	Polish translation of Pahl/Beitz Engineering Design	PL	[1.139]
	Wallace (Pahl/Beitz)	English translation of Pahl/Beitz Engineering Design, 1st Edition (3rd Edition 2006)	GB	[1.140]
	Yoshikawa	Automation in Thinking in Design	J	[1.207]
	Archer	The Implications for the Study for Design Methods of Recent Development in Neighbouring Disciplines	GB	[1.10]
	Ehrlenspiel, Lindemann	Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren	DE	[1.41, 1.43]
	Franke	Konstruktionsmethodik und Konstruktionspraxis—eine kritische Betrachtung	DE	[1.51]
	Koller	Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Grundlagen, Arbeitsschritte, Prinziplösungen. (3rd Edition 1994)	DE	[1.101, 1.102], [1.103, 1.104]
	van den Kroonenberg	Design Methodology as a Condition for Computer-Aided Design	NL	[1.185]
	1986	Odrin	Morphologische Synthese von Systemen	USSR
Altschuller		Theory of Inventive Problem Solving	USSR	[1.2, 1.3]
Taguchi		Introduction of Quality Engineering	J	[1.175]
1987	Andreasen, Hein	Integrated Product Development	DK	[1.7]
	Ehrlenspiel, Figel	Application of Expert Systems in Machine Design	DE	[1.42]
	Gasparski	On Design Differently	PL	[1.63]
	Hales	Analysis of the Engineering Design Process in an Industrial Context, Managing Engineering Design	GB	[1.73–1.75]
	Schlottmann	Konstruktionslehre	DDR	[1.169]
1988	VDI/Wallace	VDI Design Handbook 2221: Systematic Approach to the Design of Technical Systems and Products. English translation	DE/GB	[1.186]
	Wallace, Hales	Detailed Analysis of an Engineering Design Project	GB	[1.203]
	Dixon	On Research Methodology—Towards A Scientific Theory of Engineering Design	USA	[1.38]

Tabela A.4 – Lista dos trabalhos compilados por G. Pahl/ W. Beitz/ J. Feldhusen/ K. H. Grote (parte II), retirado de [Pahl et al., 2007].

Year	Author	Theme/Title	Country	Literature
	French	Form, Structure and Mechanism, Invention and Evolution	GB	[1.57, 1.58]
	Hubka, Eder	Theory of Technical Systems—A Total Concept Theory for Engineering Design	CH/CA	[1.88, 1.89]
	Jakobsen	Functional Requirements in the Design Process	N	[1.92]
	Suh	The Principles of Design, Axiomatic Design	USA	[1.173, 1.174]
	Ullmann, Stauffet, Dieterich	A Model of the Mechanical Design Process Based on Empirical Data	USA	[1.182]
	Winner, Pennell, et al.	The Role of Concurrent Engineering in Weapon Acquisition	USA	[1.205]
1989	Cross	Engineering Design Methods	GB	[1.33]
	De Boer	Decision Methods and Techniques	NL	[1.35]
	Elmaragh, Seering, Ullmann	Design Theory and Methodology	USA	[1.45]
	Jung	Funktionale Gestaltbildung—Gestaltende Konstruktionslehre für Vorrichtungen, Geräte, Instrumente und Maschinen	DE	[1.93, 1.94]
	Pahl/Beitz	Chinese translation of Pahl/Beitz Engineering Design	PRC	[1.138]
	Ulrich, Seering	Synthesis of Schematic Description in Mechanical Design	USA	[1.184]
1990	Birkhofer	Von der Produktidee zum Produkt—Eine kritische Betrachtung zur Auswahl und Bewertung in der Konstruktion	DE	[1.17, 1.18]
	Konttinen (Pahl/Beitz)	Finnish translation of Pahl/Beitz Engineering Design	FIN	[1.137]
	Kostelic	Design for Quality	YU	[1.105]
	Müller	Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften—Systematik, Heuristik, Kreativität	DDR	[1.114]
	Pighini	Methodological Design of Machine Elements	I	[1.145]
	Pugh	Total Design; Integrated Methods for Successful Product Engineering	GB	[1.149]
	Rinderle	Design Theory and Methodology	USA	[1.154]
	Roozenburg, Eckels	Evaluation and Decision in Design	NL	[1.158, 1.159]
1991	Andreasen	Methodical Design Frame by New Procedures	DK	[1.6]
	Björnemo	Evaluation and Decision Techniques in the Engineering Design Process	S	[1.22]
	Boothroyd, Dieter	Assembly Automation and Product Design	USA	[1.26]
	Clark, Fujimoto	Product Development Performance: Strategy, Organisation and Management	USA	[1.31]
	Flemming	Die Bedeutung der Bauweisen für die Konstruktion	CH	[1.47, 1.48]
	Hongo, Nakajima	Relevant Features of the Decade 1981–1991 of the Theories of Design in Japan	J	[1.85]

Tabela A.5 – Lista dos trabalhos compilados por G. Pahl/ W. Beitz/ J. Feldhusen/ K. H. Grote (parte III), retirado de [Pahl et al., 2007].

Year	Author	Theme/Title	Country	Literature
	Kannapan, Marshak	Design Synthetic Reasoning: A Methodology for Mechanical Design	USA	[1.95]
	Stauffer (ed)	Design Theory and Methodology	USA	[1.172]
	Walton	Engineering Design: From Art to Practice	USA	[1.204]
1992	O'Grady, Young	Constraint Nets for Life Cycle: Concurrent Engineering	USA	[1.123]
	Seeger	Integration von Industrial Design in das methodische Konstruieren	DE	[1.171]
1993	Ullmann	The Mechanical Design Process	USA	[1.180, 1.181]
	Breiling, Flemming	Theorie und Methoden des Konstruierens	CH	[1.28]
	Linde, Hill	Erfolgreich Erfinden. Widerspruchsorientierte Innovationsstrategie	DE	[1.110]
	Miller	Concurrent Engineering Design	USA	[1.113]
	VDI	VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte	DE	[1.191]
1994	Clausing	Total Quality Development	USA	[1.32]
	Blessing	A Process-Based Approach to Computer-Supported Engineering Design	GB	[1.24]
	Pahl (Editor)	Psychologische und pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren	DE	[1.127]
1995	Ehrlenspiel	Integrierte Produktentwicklung	DE	[1.40]
	Pahl/Beitz	Japanese translation of Pahl/Beitz Engineering Design	J	[1.136]
	Wallace, Blessing; Bauert (Pahl/Beitz)	English translation of Pahl/Beitz Engineering Design, 2nd Edition	GB	[1.135]
1996	Bralla	Design for Excellence	USA	[1.27]
	Cross, Christiaans, Dorst	Analysing Design Activity	NL	[1.34]
	Hazefrigg	Systems Engineering: An Approach to Information-Based Design	USA	[1.81]
	Waldron, Waldron	Mechanical Design: Theory and Methodology	USA	[1.202]
1997	Frey, Rivin, Hatamura	Introduction of TRIZ in Japan	J	[1.59]
	Magrab	Integrated Product and Process Design and Development	USA	[1.111]
1998	Frankenberger, Badke-Schaub, Birkhofer	Konstrukteure als wichtigster Faktor einer erfolgreichen Produktentwicklung	DE	[1.55]
	Hyman	Fundamentals of Engineering Design	USA	[1.91]
	Pahl/Beitz	Korean translation of Pahl/Beitz Engineering Design	KR	[1.133]
	Terninko, Zusman, Zlotin, Herb (ed)	Systematic Innovation: An Introduction to TRIZ	USA	[1.176]
1999	Pahl	Denk- und Handlungsweisen beim Konstruieren	DE	[1.128]
	Samuel, Weir	Introduction to Engineering Design	AU	[1.168]

Tabela A.6 – Lista dos trabalhos compilados por G. Pahl/ W. Beitz/ J. Feldhusen/ K. H. Grote (parte IV), retirado de [Pahl et al., 2007].

Year	Author	Theme/Title	Country	Literature
	VDI	VDI-Richtlinie 2223 (Entwurf): Methodisches Entwerfen technischer Produkte	DE	[1.194]
2000	Pahl/Beitz	Portuguese translation of Pahl/Beitz Engineering Design	BR	[1.132]
2001	Antonsson, Cagan	Formal Engineering Design Synthesis	USA	[1.9]
	Gausemeyer, Ebbesmeyer, Kallmeyer	Produktinnovation mit strategischer Planung	DE	[1.64]
	Kroll, Condoor, Jansson	Innovative Conceptual Design: Parameter Analysis	USA	[1.106]
2002	Sachse	Entwurfsdenken und Darstellungshandeln, Verfestigung von Gedanken beim Konzipieren	DE	[1.166]
	Eigner, Stelzer	Produktdatenmanagement-Systeme	DE	[1.44]
	Neudörfer	Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte	DE	[1.120]
	Orloff	Grundlagen der klassischen TRIZ	DE	[1.125]
	Wagner	Wegweiser für Erfinder	DE	[1.201]

Tabela A.7 – Lista dos trabalhos compilados por G. Pahl/ W. Beitz/ J. Feldhusen/ K. H. Grote (parte V), retirado de [Pahl et al., 2007].

Author	Theory or Method	Country	Appr. year
Altshuller	Theory of Inventive Problem Solving [ALTS88]	Soviet	1956
Andreasen	Chromosome model [ANDR92]	Denmark	1992
Bach	Die Maschinenelemente	Germany	1881
Boothroyd and Dewhurst	DFM/ DFA [BOOT89,BOOT94]	USA	1983
Clausing	QFD [HAUS88, COHE95] Total Quality Development [CLAU94]	USA	1988
Cross	Engineering Design Methods	UK	1989
Dixon and Poli	Engineering Design and Design for Manufacturing [DIXO95]	USA	1995
Erkens	Beiträge zu Konstruktionserziehung	Germany	1928
Hansen	Konstruktionswissenschaft - Grundlagen und Methoden	Germany	1974
Hubka & WDK School	Design Science [HUBK92]	Europe	1973
Kesselring	Die starke Konstruktion	Germany	1942
Kesselring	Technische Kompositionslehre	Germany	1954
Koller	Eine Algorithmisch-physikalisch orientierte Konstruktionsmethodik	Germany	1973
Leyer	Maschinenkonstruktionslehre	Germany	1963-71
Matousek	Konstruktionslehre des allgemeinen Maschinenbaus	Germany	1957
Nieman	Machinelemente	Germany	1950
Olsson	Systematisk Konstruktion	Sweden	1976
Pahl and Beitz	Engineering Design a Systematic Approach [PAHL88]	Germany	1977
Pugh	Total Design [PUGH91, PUGH96]	UK	1985
Redtenbacher	Prinzipien der Mechanik und des Maschinenbau	Germany	1852
Riedler	Maschinenzeichnen	Germany	1913
Reuleaux	Konstruktionslehre für den Maschinenbau	Germany	1854
Reuleaux	Teoretische Kinematik: Grundzüge einer Theorie des Maschinenwesens	Germany	1875
Rodenacker	Methodisches Konstruieren	Germany	1970
Roth	Aufbau und handhabung von Konstruktionskatalogen	Germany	1974
Sohlenius et al	Prodevent (Orderstyrd, kundanpassad produktframtagning) [SOHL76]	Sweden	1976
Suh	Axiomatic Design [SUH90]	USA	1978
Taguchi	Jikken Keikakuho (Eng. trans. <i>System of Experimental Design</i>) [PHAD89]	Japan	1977-78
Ullman	The Mechanical Design Process	USA	1986
Ulrich and Eppinger	Product Design and Development [ULRI95]	USA	1995
VDI-GKE	VDI Guideline 2221: Systematic Approach to the design of technical systems and products	Germany	1973
Wögerbauer	Die Technik des Konstruierens	Germany	1943
Yoshikawa	General Design Theory	Japan	1980
Zwicky	The Morphological Method of Analysis and Construction	USA	1948

Tabela A.8 – Lista dos principais trabalhos compilados por Mats Nordlund, retirado de [Nordlund, 1996].

		Design a functional product that satisfies the external customer requirements			Design a producible product that satisfies the internal customer requirements	Reduce the overall product design and process definition time	Minimize development cost	Continuous improvement
		Ensure that external customer's requirements are mutually understood	Design product to achieve customer's requirements	Validate Designs				
Andreasen and Hein	1987	(+)	(+)		+	+	+	
Clark and Fujimoto	1991	(+)	(+)	+	(+)	+	(+)	(+)
Wheelwright and Clark	1992	(+)	(+)	+	(+)	+		+
Nevins and Whitney	1989				+			
Martin and Ishii	1997				+			
Clausing	1994	+	+	+	+	+	(+)	+
Boothroyd et al.	1994				+			
Sobek	1997	+	+	+	(+)	(+)	(+)	(+)
Pugh	1996	+	+		(+)	(+)		(+)
Ulrich and Eppinger	2000	+	+	+	+	+	+	(+)
Cunningham	1998				+			
Ulrich	1995		+		(+)	(+)		
Krishnan	1996				(+)	+		
Thornton	2000	(+)	+		+	(+)		
Feitzinger and Lee	1997		(+)		+		(+)	
Suh	1990	(+)	+		(+)			
Pahl and Beitz	1996	(+)	+		+	(+)	(+)	
Altshuller	1988	(+)	+					(+)
Meyer and Lehnerd	1997	(+)	(+)		(+)	+	+	
Cusumano and Nobeoka	1998				(+)	+		(+)

(+) abstract, process description
 + detailed description of what to do, how to do

Tabela A.9 – Lista dos trabalhos sobre projecto, compilados e classificados de acordo com as áreas de aplicação, por Yong-Suk Kim, retirado de [Kim, 2002].

Other Theories	Design theories	Methodologies for functional refinements							
		Ability to take into accounts the manufacturing requirements	Ability to take into accounts the assembling requirements	Ability to take into accounts the environmental requirements	Ability to take into accounts the using requirements	Ability to take into accounts the recycling requirements	Function as an interface between situations	Ability to generate a functional model of concepts	Ability to model functional interaction
Suh axiomatic theory	X	X							
GDT	X (mathematical framework)								
ADT	X (mathematical framework)								
Bond graph	X						X		
Qualitative physics (AI)	X						X		
Dimensional analysis	X								
Channel theory	X							X	X
Situation theory	X						X	X	X
Hubka & Eder	X								
Pahl and Beitz	X	X	X		X			X	X
TRIZ	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Pugh		X	X						
Ulrich & Eppinger		X	X	X	X	X			
Hirtz functional reconciled taxonomy									
Open system theory	X			X					
Information theory	X	X	X	X	X	X			
VAVE		X	X	X	X	X		X	X

Tabela A.10 – Classificação de teorias e metodologias de projecto, em função da sua utilidade para as fases de clarificação e formulação do problema, retirado de [Coatanéa, 2005].

	Other Theories	Design theories	Design methodologies								
			Concept development				Concept selection				
			Methods for functional refinement		methods for synthesis			Methods for Evaluation	Methods for adequacy analysis	Methods for comparing concepts	
			Standard concepts and vocabulary	Interactions analysis	Existence of invariant concepts helping the implementation	Rules related to the existing design knowledge	Rules related to resolution of contradiction				
Suh Axiomatic theory		X		X (independence of functions)					X (independence of functions) X (minimize information)		
GDT		X (mathematical framework)									
ADT		X (mathematical framework)									
Bond graph	X				X	X		X			
Qualitative physics (AI)	X				X						X
Dimensional analysis	X							X (qualitative simulation)			X (dimensionless attr.)
Channel theory	X			X							
Situation theory	X			X							
Hubka & Eder		X				X					
Pahl and Beitz		X	X	X	X	X		X (subjective)	X (subjective)		
TRIZ		X			X (Evolution laws)	X	X	X (contradiction method)			
Pugh								X (subjective)	X (subjective)	X (subjective)	
Ulrich & Eppinger								X (subjective)	X (subjective)	X (subjective)	
Hirtz functional reconciled taxonomy			X								
Open systems theory	X				X						
Information theory	X										
VAVE			X	X	X			X (Subjective)	X (subjective)	X (subjective)	

Tabela A.11 – Classificação de teorias e metodologias de projecto, em função da sua utilidade para as fases de clarificação, síntese, avaliação e adequabilidade, retirado de [Coatanéa, 2005].

Table 4-2 Summary of Tools and Applications Examined

		Primary Basis					Ratings ^a - Potential Value for:					
		Knowledge Engineering	Logic/Set Theory	Matrix Algebra	Probability	Statistics	Economics	Current Utilization	Concept Creation	Concept Development	Selection Among Alternative Concepts	Ease of Use
Practical	Concurrent Engineering						X	4	2	4	4	1
Qualitative	Decision Matrix		X				X	4	1	2	4	5
	Pugh Method		X					3	4	5	1	2
	QFD		X					2	2	4	2	1
	AHP		X					3	1	2	4	
	Product Plan Advisor	X	X	X				3	2	3	4	3
Statistical	PLS				X	X		1	3	3	2	1
	Taguchi Method				X	X		4	1	4	4	2
	Six Sigma				X	X		3	3	3	3	2
Creative	AI Support	X						2	4	2	2	2
	TRIZ	X						3	3	1	1	3
Axiomatic	Suh's Theory		X	X				2	2	3	5	1
	Yoshikawa Theory		X					1	1	1	1	1
	Math Framework		X		X	X	X	1	1	1	5	3
Validating	Game Theory				X	X		1	1	1	3	2
	Decision Analysis		X		X	X		3	1	4	5	3

^aRating by several authors: 1= low; 5= high.

Tabela A.12 – Classificação de teorias e ferramentas de projecto, classificadas em função das aplicações, retirado de [Eagan et al., 2002].

A.2 Artigos relacionados com a Teoria Axiomática de Projecto

	Axiom		Application area						Method			Type of evaluation	
	Independence	Information	Product design	System design	Manufacturing system design	Software design	Decision making	Others	An application of AD	An integrated method	Theoretical development	Crisp	Fuzzy
Suh (1990)	✓	✓	✓						✓			✓	
Kim et al. (1991)	✓					✓			✓			✓	
Gunasekera and Ali (1995)	✓					✓			✓			✓	
Suh (1995a)	✓			✓					✓			✓	
Suh (1995b)	✓			✓					✓			✓	
Harutunian et al. (1996)	✓					✓			✓			✓	
Gazdik (1996)	✓			✓					✓			✓	
Suh (1997)	✓			✓					✓			✓	✓
Tseng and Jiao (1997)	✓			✓					✓			✓	
Suh et al. (1998)	✓				✓				✓			✓	
Goel and ve Singh (1998)	✓	✓	✓				✓		✓			✓	
Cha and ve Cho (1999)	✓		✓						✓			✓	
Cochran et al. (2000)	✓				✓				✓			✓	
Suh and Do (2000)	✓					✓			✓			✓	
Chen et al. (2001)	✓					✓			✓			✓	
Donnarumma et al. (2002)	✓	✓						✓	✓			✓	
Bae et al. (2002)	✓		✓						✓			✓	
Huang (2002)	✓					✓			✓			✓	
Jang et al. (2002)	✓	✓	✓				✓		✓			✓	
Huang and Jiang (2002)	✓					✓			✓			✓	
Melvin and Suh (2002)	✓							✓	✓			✓	✓
Lee et al. (2003)	✓			✓					✓			✓	
Kim et al. (2003)	✓			✓					✓			✓	
Su et al. (2003)	✓							✓	✓			✓	
Chen et al. (2003)	✓					✓			✓			✓	
Lindkvist and Söderberk (2003)	✓					✓			✓			✓	
Deo and Suh (2004)	✓			✓					✓			✓	
Chen and Feng (2004)	✓			✓					✓			✓	
Ngai and Jiao (2004)	✓								✓			✓	
Suh (2005)	✓							✓	✓			✓	
Thielman et al. (2005)	✓			✓					✓			✓	
Hirani and ve Suh (2005)	✓								✓			✓	
Yi and Park (2005)	✓								✓			✓	
Kulak, Durmusoglu, and Tufekci (2005) and Kulak, Durmusoglu, and Kahraman (2005)	✓				✓				✓			✓	
Kulak (2005)	✓	✓							✓			✓	✓
Pappalardo and Naddeo (2005)	✓							✓	✓			✓	
Kulak and Kahraman (2005a)	✓	✓							✓			✓	
Kulak and Kahraman (2005b)	✓	✓							✓			✓	
Houshmand and Jamshidnezhad (2006)	✓				✓				✓			✓	
Thielman and Ge (2006)	✓			✓					✓			✓	
Heo and Lee (2007)	✓			✓					✓			✓	
Liang (2007)	✓	✓	✓						✓			✓	
Schnetzler et al. (2007)	✓					✓			✓			✓	
Nakao et al. (2007)	✓					✓			✓			✓	
Coelho and Mourão (2007)	✓						✓		✓			✓	
Helander (2007)	✓	✓							✓			✓	
Lo and Helander (2007)	✓			✓					✓			✓	
Bang and Heo (2009)	✓			✓					✓			✓	
Shin et al. (2008)	✓			✓					✓			✓	
Ferrer et al. (2009)	✓			✓					✓			✓	
Togay et al. (2008)	✓			✓			✓		✓			✓	
Lee and Shin (2008)	✓			✓					✓			✓	
Durmusoglu and Kulak (2008)	✓				✓				✓			✓	
Gumus et al. (2008)	✓								✓			✓	
Tang et al. (2009)	✓			✓					✓			✓	
Kahraman and Cebi (2009)	✓								✓			✓	
Celik, Kahraman, et al. (2009)	✓	✓							✓			✓	✓
Celik, Cebi, et al. (2009a)	✓	✓							✓			✓	✓
Celik, Cebi, et al. (2009b)	✓	✓							✓			✓	✓
Celik (2009a)	✓	✓							✓			✓	✓
Celik (2009b)	✓	✓							✓			✓	✓
Celik (2009c)	✓	✓							✓			✓	✓

Tabela A.13 – Classificação de artigos relacionados com a Teoria Axiomática de Projecto, publicados entre 1990 e 2009, retirado de [Kulak et al., 2010].

A.3 Definições de Projecto, compiladas por [Hubka et al., 2001]

1.2.2 Designing in the Statements of Other Authors

Many authors have tried to define the *terminus technicus* "designing." Some examples follow (several of them in translation by the authors from German originals):

Taylor [421] (1959): Engineering design is the process of applying various techniques and scientific principles for the purpose of defining a device, a process, or a system in sufficient detail to permit its physical realization.

Asimow [64] (1962): Engineering design is a purposeful activity directed towards the goal of fulfilling human needs, particularly those which can be met by the technology factors of our culture. *And: (ibid.)* Decision making, in the face of uncertainty, with high penalty for error.

Feilden [149] (1963): Mechanical engineering design is the use of scientific principles, technical information and imagination in the definition of a mechanical structure, machine or system to perform pre-specified functions with the maximum economy and efficiency. The designer's responsibility covers the whole process from conception to the issue of detailed instructions for production and his interest continues throughout the designed life of the product in service.

Alexander [39] (1963): Finding the right physical components of a physical structure.

Kesselring [246] (1964): Designing means to find a technically perfect, economically favorable and esthetically satisfactory solution for a given task.

Booker [79] (1964): Simulating what we want to make (or do) before we make (or do) it as many times as may be necessary to feel confident in the final result.

Archer [51] (1964): A goal-directed problem-solving activity.

Reswick [363] (1965): A creative activity -- it involves bringing into being something new and useful that has not existed previously.

Hansen [186] (1966): Developing a technical construct is determined through prior visual thinking out.

Jones [238] (1966): The performing of a very complicated act of faith.

Page [332] (1966): The imaginative jump from present facts to future possibilities.

Farr [147] (1966): The conditioning factor for those parts of the product which come into contact with people.

Gregory [175] (1966): Relating product with situation to give satisfaction.

Matchett [287] (1966): The optimum solution to the sum of the true needs of a particular set of circumstances.

Nadler [315] (1967): Planning and design (P & D) is a process to create or restructure a situation-specific solution. The result may be a house, legislation, an information system, a corporate plan, an appropriate technology transfer, a regional housing plan, a product design, a course outline, a factory layout -- almost anything.

VDI 2223 [25] (1973): Designing is a predominantly creative activity, founded on knowledge and experience and striving for optimal solutions by thinking ahead about technical products, in order to determine the functional and structural construction and create documents that are ready for manufacture. As part of developing, designing includes intellectual and representational form-giving, the choice of raw materials and production processes, and makes possible a technically and economically justifiable material realization. Designing is executed in two well characterized, but not strictly separated stages of laying out and detailing. (Note that despite the reference to two stages, VDI 2222 [23] also refers to "establishing and clarifying the problem," and "conceptualizing" as two other important design stages).

Alexander [40] (1979): Design is the process of inventing physical things which display new physical order, organization, form, in response to function.

Jones [239] (1980): ... the chain of events that begins with the sponsor's wish and moves through the actions of designers, manufacturers, distributors and consumers to the ultimate effects of a newly designed thing upon the world. All one can say with certainty is that society or the world is not the same as it was before the new design appeared.

Katz [243] (1984): ... we normally think of *design* as the activity involved with actually constructing the system; i.e., given a specification of the system, we map that specification into its physical realization (e.g., an integrated circuit chip, a computer program, a physical plant or airplane). The design task, however, extends throughout a *system life cycle*, from the initial commitment to build a new system to its final full scale production.

Suh [415] (1989): ... the creation of a synthesized solution in the form of products, processes or systems that satisfy perceived needs through mapping between the functional requirements (FRs) in the functional domain and the design parameters (DPs) of the physical domain, through proper selection of the DRs that satisfy the FRs.

The nature of designing is reflected in many other statements which at best capture only parts of the truth. Typical for such statements (each made with the personal conviction of its author to have fully explained designing with one simplistic phrase) are, that "design is ...":

