

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR MARCOS CARAZATTO
GIMENEZ E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 20/02/2008
.....
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Proposta de reestruturação de uma família de chassis de ônibus através da análise modular

Autor: Marcos Carazatto Gimenez
Orientador: Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini

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

Proposta de reestruturação de uma família de chassis de ônibus através da análise modular

Autor: Marcos Carazatto Gimenez
Orientador: Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2008
S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

G429p Gimenez, Marcos Carazatto
Proposta de reestruturação de uma família de chassis
de ônibus através da análise modular / Marcos Carazatto
Gimenez. --Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientador: Franco Giuseppe Dedini.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Ônibus. 2. Veículos a motor. 3. Veículos
comerciais. 4. Ônibus – projeto e construção. I. Dedini,
Franco Giuseppe. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.
Título.

Título em Inglês: Proposal of reorganization of a bus chassis family through the
modular analysis

Palavras-chave em Inglês: Modularity, Modular design, Modularity
measurement, Module, Interfaces

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto mecânico

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Gilberto Martha, Klaus Schützer

Data da defesa: 20/02/2008

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Proposta de reestruturação de uma família de
chassis de ônibus através da análise modular**

Autor: Marcos Carazatto Gimenez

Orientador: Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini
Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP

Prof. Dr. Gilberto Martha - USP
Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos - USP

Prof. Dr. Ing. Klaus Schützer - UNIMEP
Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo - UNIMEP

Campinas. 20 de fevereiro de 2008

Dedicatória:

Dedico esse trabalho ao meu querido pai, que partiu durante esse trabalho, deixando muitas saudades.

Agradecimentos

A Deus pela força de chegar até o fim.

Ao Professor Franco Giuseppe Dedini pela orientação e paciência nas horas difíceis. Aos amigos Dirceu Lavoisier, Flávio Aguiar e Alexandre Pazian pela disponibilidade e vontade de ajudar.

Aos companheiros da Unicamp.

A minha querida esposa pelo companheirismo e apoio irrestrito, aos meus familiares que me incentivaram a seguir em frente.

A minha gerência e supervisão da empresa que permitiram as minhas saídas até a Unicamp.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para conclusão desse trabalho.

Muito obrigado.

Marcos Carazatto Gimenez.

*“Instrue ao menino no caminho em que deve andar, e
até quando envelhecer não se desviará dele.”*

Provérbios 22.6

Resumo

GIMENEZ, Marcos Carazatto, *Proposta de reestruturação de uma família de chassis de ônibus através da análise modular*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 151 p. Dissertação (Mestrado)

Essa dissertação trata da reestruturação de uma família de chassis de ônibus através da análise modular. A partir de um chassi já em produção, que foi a referência dessa análise, identifica-se a arquitetura da região do motor e seus periféricos, para a formação de um modelo que permite desenvolver novas periferias do motor derivadas do chassi de referência. Através do levantamento do estado da arte da modularidade, foi possível utilizar técnicas, métodos e ferramentas para agrupamento dos módulos, identificação das interfaces, quantificação da modularidade e avaliação de impactos nos módulos devido à inserção de novos módulos ou ajustes das condições de contorno. O resultado é a formação de novas periferias do motor com alto grau de comunização e padronização dos módulos, componentes e sistemas. As consequências da unificação das arquiteturas do produto para o projeto são a redução do tempo de desenvolvimento e aumento da confiabilidade do projeto. A origem desse trabalho deriva da necessidade que as montadoras têm de adaptarem seus portfólios de veículos a cada mudança de legislação ambiental. Nos últimos anos, o meio ambiente passou a ser o centro das atenções, refletindo em legislações cada vez mais desafiadoras no controle de emissões de gases danosos à atmosfera. O não atendimento às legislações acarretaria perda de mercado e conseqüente redução de lucros. Nesse cenário, o motor e os seus periféricos passam a ter uma atenção especial, pois depende deles o atendimento dos limites de emissões. Esse trabalho busca auxiliar na reconfiguração da periferia do motor através de um modelo exequível baseado na modularidade e que apresentou resultados satisfatórios.

Palavras chave

Modularidade, Projeto Modular, Quantificação da Modularidade, Módulos, Interfaces

Abstract

GIMENEZ, Marcos Carazatto, *Proposal of reorganization of a bus chassis family through the modular analysis*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 151 p. Dissertação (Mestrado)

This thesis describes the reorganization of a bus chassis family through the modular analysis. The reference of this analysis was a chassis already in production. As a first step, it is important to identify the needs and features of the engine and the peripheral components for the creation of the model which allows us to develop new engine peripheral components derived from the reference chassis. Analyzing the state of the art of the modularity, it was possible to apply techniques, methods and tools for grouping the modules, interface identification, modularity measurement and impact evaluation on the modules due to new modules development or boundary condition adjustments. The result is the development of new engine peripheral components with high degree of standardization of the modules, components and systems. The consequences of the standardization of the product architectures to the project are the development time reduction and higher reliability of the project. The origin of this work started due to the necessity that the auto-industry plants have to in order to adapt their vehicle variants for each new emission legislation. In the last years, the environment started to be the center of attention, reflecting in more challenging emission legislation, each time more restrict in relation to the emissions of gases to the atmosphere. The unfulfillment of the legislations would produce the effect of market loss and consequently profit reduction. In this scenario, the engine and peripheral components start to have a special attention, because it will depend on them to fulfill the emission limits. The goal of this work is to redesign the engine periphery by means of a feasible model based on modularization and which produced satisfactory results.

Key Words

Modularity, Modular Design, Modularity Measurement, Module, Interfaces

Índice

Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xiv
Nomenclatura	xv
1 Introdução.....	1
1.1 A importância do trabalho	2
1.2 Objetivos	2
1.3 A Explicação do Problema	3
1.4 Motivação.....	4
1.5 Histórico de Ônibus.....	4
1.5.1 O ônibus no Brasil.....	7
1.5.2 Fabricantes e montadoras de ônibus no Brasil	10
1.6 Estrutura do Trabalho.....	13
2 Cenário da dissertação: chassi de ônibus	14
2.1 O Ônibus	14
2.2 Segmento Rodoviário e Urbano	17
2.3 Tipos de ônibus e suas aplicações.....	21
2.4 Modularidade em chassi de ônibus	23
2.5 A periferia do motor e suas funções.....	25
2.6 Legislações que afetam o motor e seus periféricos	29
3 Revisão Bibliográfica sobre Modularidade.....	31
3.1 Histórico da Modularidade e Conceitos Básicos.....	31
3.2 Arquitetura do Produto.....	38
3.3 Módulos e interfaces	48
3.4 Métodos de Modularização	56
3.4.1 Projeto Fractal de Produto (FPD), conforme Pirrung (2004).	58
3.4.2 Distribuição Modular das Funções (MFD), conforme Pirrung (2004).	58
3.4.3 Modelando a Modularidade do Produto (MPM), conforme Pirrung (2004).	59
3.4.4 Matriz de Estrutura de Projeto (DSM), conforme Pirrung (2004).	60
3.4.5 Desenvolvimento Modular de Produto (MPD), conforme Pirrung (2004).	61
3.4.6 Projeto Axiomático (AD), conforme Dedini (2000).	61
3.4.7 Algoritmo Genético (GA), conforme Pirrung (2004).	62
3.4.8 Método Heurístico (HM), conforme Padamati (2004).	63

3.4.9	<i>Discussões finais</i>	63
4	Metodologia de Desenvolvimento de Produtos	65
4.1	Evolução cronológica da Metodologia de Projetos.....	70
4.2	Perspectivas da modularidade	79
4.3	Quantificação da Modularidade	90
4.4	Posicionamento do Trabalho.....	93
5	Estudo de Caso	95
5.1	Metodologia	96
5.1.1	<i>Fase 1: Informacional</i>	96
5.1.2	<i>Fase 2: Concepção</i>	104
5.1.3	<i>Fase 3: Avaliação</i>	112
5.2	Desenvolvimento e resultados.....	120
6	Conclusão	141
6.1	Atendimento dos objetivos.....	141
6.2	Visão da teoria aplicada	142
6.3	Contribuição	143
6.4	Trabalhos futuros.....	144
	Referências Bibliográficas	145

Lista de figuras

Figura 1.5.1: Rippert. (fonte: Stiel, 2001)	6
Figura 1.5.2: Da esquerda para direita, o primeiro ônibus de Karl Benz e o primeiro ônibus de Gottlieb Daimler. (fonte: www.mercedes-benz.co.uk)	7
Figura 1.5.3: O primeiro ônibus que circulou em São Paulo, 20 de julho de 1911. (Fonte: Stiel, 2001)	8
Figura 1.5.4: Jardineira intermunicipal sobre chassi Ford 1929. (Fonte: www.carroecia.com.br)	9
Figura 1.5.5: Lançado em 1956 o monobloco O-321 HL da Mercedes-Benz. (Fonte: www.daimlerchrysler.com.br)	11
Figura 1.5.6: Chassi Scania-Vabis com carroceria Caio, 1964. (Fonte: www.milbus.com.br)	12
Figura 2.1.1: Detalhe de uma estrutura de uma carroceria e o salão de passageiros. (Fonte: Marcopolo)	15
Figura 2.1.2: Chassi de ônibus. (Fonte: Mercedes-Benz)	16
Figura 2.1.3 : Ônibus completo: chassi + carroceria (Fonte: Marcopolo)	17
Figura 2.2.1: Segmento rodoviário e suas subdivisões. (Fonte: Scania)	18
Figura 2.2.2: Característica de conforto segundo visão dos clientes e de engenharia.	19
Figura 2.2.3: Exemplo de um projeto de chassi de ônibus urbano.	20
Figura 2.4.1: Divisão de módulos em um chassi de ônibus.	23
Figura 2.4.2: Exemplos de interfaces estruturais. (Fonte: Manual de encarroçamento, Mercedes-Benz)	24
Figura 2.5.1: Balanço energético do motor. (Fonte: Mercedes-Benz)	26
Figura 2.5.2: Sistema de arrefecimento. (Fonte: Mercedes-Benz)	27
Figura 2.5.3: Sistema de admissão de ar e gaiola. (Fonte: Mercedes-Benz)	28
Figura 2.5.4: Sistema de Escape. (Fonte: Mercedes-Benz)	28
Figura 3.1.1 : Exemplo de um sistema modular. (Pahl et al., 2005)	32
Figura 3.1.2: Representação gráfica de <i>component-swapping modularity</i> . (Kusiak e Huang, 1996)	33
Figura 3.1.3 : Representação gráfica de <i>component-sharing modularity</i> . (Kusiak e Huang, 1996)	34
Figura 3.1.4 : Representação gráfica <i>bus modularity</i> . (Kusiak e Huang, 1996)	34
Figura 3.1.5 : Espécies de função e módulos em sistemas modulares e mistos. (Pahl et al., 2005)	36
Figura 3.2.1 : Arquitetura do produto. (Pahl et al, 2005)	39
Figura 3.2.2 : A estrutura funcional de um trailer.(Ulrich, 1995)	43
Figura 3.2.3 : Uma arquitetura modular exibindo um mapeamento um a um entre funções e seus componentes. (Ulrich, 1995)	44

Figura 3.2.4 : Uma arquitetura integral exibindo um mapeamento complexo entre funções e seus componentes. (Ulrich, 1995)	44
Figura 3.2.5 : Arquitetura <i>slot-modular</i> .(Ulrich e Eppinger, 2000)	45
Figura 3.2.6 : Arquitetura <i>bus-modularity</i> .(Ulrich e Eppinger, 2000)	45
Figura 3.2.7 : Arquitetura <i>sectional-modular</i> .(Ulrich e Eppinger, 2000)	45
Figura 3.2.8 : Expansão de produtos. (Otto, 2005)	46
Figura 3.3.1 : Ferramenta de modelagem de produto para avaliação da localização da interface. (Hillström, 1994)	54
Figura 3.4.1 : Dois níveis da arquitetura do projeto modular. (Baldwin e Clark, 2000)	56
Figura 3.4.2 : Mapa de gerenciamento do produto (PMM). (Erixon et al., 2004)	59
Figura 3.4.3 : Exemplo de Matriz de Estrutura de Projeto – DSM. (Whitfield et al., 2002)	60
Figura 3.4.4 : Exemplo de Algoritmo Genético – GA. (Whitfield et al., 2002)	62
Figura 4.2.1: Hierarquia de objetivos e fatores relevantes. (Gu et al., 1997).	80
Figura 4.2.2 : Sistemática modular - ambiental proposta por Miño e Rados (2001).	82
Figura 4.2.3 : Diferentes níveis de modularização em um automóvel. Hsuan (1999).	88
Figura 5.1.1: Fase 1 - Informacional.	97
Figura 5.1.2: Fragmentos da resolução CONMETRO de 01/93.	100
Figura 5.1.3: Estudo do salão de passageiros.	101
Figura 5.1.4: Exemplo de uma cobertura do motor para aplicação urbana.	102
Figura 5.1.5 : Exemplo de um gráfico de restrição à passagem de ar de um filtro de ar. (Fonte: Filtros Mann)	103
Figura 5.1.6: Composição dos componentes periféricos do motor.	104
Figura 5.1.7: Fase 2 - Concepção	106
Figura 5.1.8: Cadeia de funções. (Pahl et. al, 2005)	107
Figura 5.1.9: Mapeamento funcional. (Ulrich, 1995)	107
Figura 5.1.10: Classificação dos módulos quanto à função.	109
Figura 5.1.11: Codificação dos módulos.	110
Figura 5.1.12: Tipos de interfaces. (Ulrich, 1995)	110
Figura 5.1.13: Árvore de módulos para identificação das interfaces.(Gershenson et al., 1999)	111
Figura 5.1.14: Identificação das interfaces entre módulos e motor. (Gershenson et al., 1999)	111
Figura 5.1.15: Codificação das interfaces.	112
Figura 5.1.16: Fase 3 - Avaliação	113
Figura 5.1.17: Módulos variantes.	114
Figura 5.1.18: Variações de leiaute.	114
Figura 5.1.19: Variações do posicionamento do motor.	116
Figura 5.2.1: Divisão dos sistemas da periferia do motor do chassi-base.	122
Figura 5.2.2: Cadeia de funções para os sistemas de arrefecimento e pós resfriamento do chassi-base.	123
Figura 5.2.3: Mapeamento funcional do sistema de pós resfriamento.	123
Figura 5.2.4: Matriz para identificação dos módulos.	124
Figura 5.2.5: Identificação dos módulos quanto à função.	125
Figura 5.2.6: Resumo da etapa 2.2.	125
Figura 5.2.7: Interfaces entre módulos.	126
Figura 5.2.8: Interfaces entre módulos e motor.	126
Figura 5.2.9: Codificação das interfaces entre módulos.	127
Figura 5.2.10: Codificação das interfaces entre módulos e o motor.	127
Figura 5.2.11: Arquitetura da periferia do motor do chassi-base.	128

Figura 5.2.12 : Identificação dos módulos variantes através das características técnicas.	129
Figura 5.2.13: Verificação da inserção dos módulos variantes nos leiautes dos novos modelos.	130
Figura 5.2.14: Matriz de avaliação de impacto dos módulos variantes nos módulos do chassi-base.	130
Figura 5.2.15: Matriz de avaliação de impacto da variação do posicionamento do motor nos módulos do chassi-base.	131
Figura 5.2.16: Abstrações da árvore de componentes.	132
Figura 5.2.17: Matriz de dependências, similaridades e leiaute.	133
Figura 5.2.18: Índice de modularidade do módulo 9 do chassi-base.	133
Figura 5.2.19: Desdobramento funcional do novo M9. (Baseado em Scalice, 2003)	133
Figura 5.2.20: Matriz de Pugh para o novo módulo 9.	136
Figura 5.2.21: Projeto preliminar do módulo 9.1.	137
Figura 5.2.22: Índice de modularidade do módulo 9.1.	137
Figura 5.2.23: Resultado da cálculo de Elementos Finitos do módulo 9.1.	138
Figura 5.2.24: Fluxograma para avaliação da fase informacional.	139
Figura 5.2.25: Fluxograma para avaliação da fase de concepção.	139
Figura 5.2.26: Fluxograma para avaliação da fase de avaliação.	140
Figura 5.2.27: Composição modular final dos veículos.	140

Lista de tabelas

Tabela 2.3.1: Lista de chassis disponíveis no mercado brasileiro. (Fonte: revista Transporte Mundial, N° 6, 2007)	22
Tabela 2.6.1: Cronograma de aplicação das diferentes fases de redução de emissões gasosas na Europa e no Brasil. (Leal, 2005)	29
Tabela 2.6.2: Valores de máximos para emissões nas Fases CONAMA P5 e P6. (Leal, 2005)	30
Tabela 3.4.1 : Os seis operadores modulares. (Baldwin e Clark, 2000)	57
Tabela 3.4.2 : Métodos de Modularização baseado na classificação de Pirrung (2004).	57
Tabela 4.2.1 : Lista de fatores de prioridades do ciclo de vida, Bryant et al., (2004).	85
Tabela 4.2.2 : Quantificação da reciclagem, Bryant et. al (2004).	86
Tabela 5.1.1: Informações extraídas do portfólio de produtos.	98
Tabela 5.1.2: Comparativo dos Radiadores. (Fonte: Mercedes-Benz)	103
Tabela 5.1.3: Critério de pesos para a matriz de avaliação de impacto dos módulos variantes. (Adaptado de Salhich e Kamrani, 1999).	115
Tabela 5.1.4: Pesos para avaliação das dependências e similaridades (adaptado de Gershenson et al., 1999).	118
Tabela 5.2.1: Informações da fase 1, etapa 1.2.	120
Tabela 5.2.2: Informações da fase informacional, etapa 1.3.	121
Tabela 5.2.3: Matriz morfológica para princípios de solução. (Scalice, 2003).	134

Nomenclatura

D_{in} - Dependências dos componentes dentro do módulo

D_{out} - Dependências dos componentes fora do módulo

m_k - índice do último componente no módulo k

M_m - Número total de módulos no produto

N_c - Número total de módulos no produto

n_k - índice do primeiro componente no módulo k

R_{ij} - Valor da linha i e coluna j do elemento na matriz de modularidade

S_{in} - Similaridades dos componentes dentro do módulo

S_{out} - Similaridades dos componentes fora do módulo

[A] - Matriz de Projeto

AD - Projeto Axiomático

CI - Cluster Independence

CR - Correspondence Ratio

DP - Parâmetros de Projeto

[DP] - Matriz de Parâmetros de Projetos

DSM - Matriz de Estrutura de Projeto

EPI – Elimination Preference Index

FMEA – Failure More and Effect Analysis

FPD - Projeto Fractal de Produto

FR - Requisitos Funcionais

[FR] - Matriz dos Requisitos Funcionais

FS – Funções Secundárias

GA - Algoritmo Genético

HM - Método Heurístico

MFD - Distribuição Modular das Funções

MIM – Modular Indication Matrix

MPD - Desenvolvimento Modular de Produto

MPM - Modelando a Modularidade do Produto

MSM – Matriz de Estrutura de Módulo

QFD – Quality Function Deployment

SSC – Sistemas, subsistemas e componentes

ANTT – Agência Nacional de Transporte Terrestre

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CONMETRO – Conselho Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial

EPA – Environmental Protection Agency

FNM – Fábrica Nacional de Motores

PROCONVE – Programa de Controle de Emissões Veiculares

Capítulo 1

Introdução

Atualmente o meio ambiente ganhou destaque na mídia e chamou a atenção dos governantes. Cientistas, através de estudos, mostraram que o caminho para a restauração do clima do planeta passa obrigatoriamente pela redução de poluentes lançados à atmosfera. Essa discussão afeta diretamente as empresas automobilísticas que são submetidas às leis ambientais cada vez mais rigorosas e aplicadas em um calendário rígido.

O cenário automobilístico está cada vez mais competitivo. Grandes empresas disputam o mercado com igualdade de recursos tecnológicos. Quando se compara os veículos que competem em um mesmo segmento, percebe-se que há muitas similaridades construtivas. Essas similaridades diminuem quando se estende a análise para a família de veículos. Os veículos derivam uns dos outros e o que será o diferencial para um bom projeto é como foi concebida ou estruturada a família desse projeto.

O ônibus como qualquer outro veículo, para atender às legislações ambientais, tem que incorporar novas tecnologias o que leva as montadoras a grandes investimentos. A viabilidade econômica é alcançada se houver planejamento do desenvolvimento de uma família de veículos ao invés de apenas um único veículo.

O foco desse trabalho é estudar como se pode estruturar uma família de chassis de ônibus a partir de um único modelo, usando como base a modularidade. Através do levantamento do estado da arte da modularidade, verifica-se que há uma riqueza de técnicas de modularização e metodologias que suportarão as análises desse trabalho.

A periferia do motor é estudada, pois, reduzir limites de emissões de gases danosos ao meio ambiente significa que o motor e seus periféricos devem sofrer mudanças. Este fato implica em aumentar a eficiência dos sistemas periféricos, alterando dimensões, leiautes e obrigando muitas vezes adotar novas soluções conceituais e novos escalonamentos de potência e capacidade de carga nos chassis. Enquanto que o restante do chassi praticamente não sofre alterações.

1.1 A importância do trabalho

A importância desse estudo já se justificaria, observando-se em termos mundiais, que aproximadamente a cada quatro anos entra em vigor uma nova legislação ambiental e há uma redução significativa dos poluentes, muitas vezes na ordem de 80%, (como é o caso do limite de materiais particulados, do Euro 3 para o Euro 4, ver capítulo 2). Em termos de engenharia de produto, significa que a cada nova legislação, equipes funcionais serão montadas e novas configurações de veículos surgirão. Esse trabalho pretende colaborar mostrando uma direção na composição desses veículos, resgatando da modularidade propostas e métodos que auxiliarão a obter uma melhor comunização de componentes.

Outra contribuição aparece na clarificação dos fatores que permitem derivar um veículo do outro, buscando o mais alto grau de modularidade. Identificando módulos comuns que reprojetados podem assumir outras configurações e aplicações o que resultará em economia no tempo de desenvolvimento e na produção em escala.

Como o desenvolvimento de chassi é feito por grandes montadoras, há uma divisão nos times de projeto e o que geralmente reflete em produtos com características construtivas diferentes para executar uma mesma função. A análise desse estudo por parte dos líderes de projeto pode contribuir na busca de padronização de soluções de projeto e intensificar ainda mais o conceito de modularidade como ferramenta para organizar famílias de produtos.

1.2 Objetivos

O objetivo desse trabalho é levantar o estado da arte da modularidade em desenvolvimento de produtos e identificar as técnicas e métodos que auxiliem na composição de módulos, padronização de interfaces e quantificação da modularidade, avaliando sua exequibilidade técnica

e selecionando-as para aplicá-las como ferramentas na estruturação de uma família de chassis de ônibus a partir de um chassi de referência.

Com o estudo da modularidade pretende-se abordar técnicas para identificar potenciais de modularização onde o reprojeto de módulos é necessário, através dos princípios do projeto modular, reunindo as similaridades técnicas e funcionais, buscando a padronização e flexibilidade para ampliação futura das variantes e novos modelos.

1.3 A Explicação do Problema

A cada mudança de legislação de emissão de poluentes, as montadoras são obrigadas a rever seus portfólios de veículos para continuar a atuar nos mercados que participam. O atendimento aos limites de emissão significa a sobrevivência do produto. O papel da engenharia de produto é fundamental na elaboração desses portfólios e mais ainda: no desenvolvimento desses produtos.

A competitividade cada vez mais acirrada e o equilíbrio tecnológico impulsionam a necessidade de planejar o desenvolvimento de famílias de produtos com alto grau de comunização e padronização de componentes abandonando o desenvolvimento individual de um produto. A frequência com que as mudanças das legislações ambientais ocorrem impulsiona as empresas a buscarem um desenvolvimento rápido e confiável, necessitando a implementação de métodos, técnicas e informações para atingir esses objetivos.

Sintetizando, o problema é como estruturar o desenvolvimento de uma família de novos veículos utilizando as informações dos veículos que já estão em produção, atendendo as novas legislações, mas visando a padronização e comunização de componentes. Esse é o desafio que enfrenta a engenharia de produtos constantemente e ainda se depara com uma carência de trabalhos focados nesse problema. Essa lacuna é maior quando se busca trabalhos específicos sobre metodologias de desenvolvimento de famílias de produtos automobilísticos, ou completa quando se direciona ao motor e sua periferia, pela ausência de artigos correlatos.

Há necessidade de se pesquisar técnicas de como estender o “*know-how*” de um veículo para os veículos derivados, como projetar visando à comunização e padronização dos componentes, como ter o controle dos parâmetros do projeto tornando-o mais confiável.

1.4 Motivação

Há 20 anos atrás, os desenhistas projetistas que trabalhavam com projeto de ônibus, faziam os desenhos na prancheta e com canetas a nanquim. O projeto era fragmentado de tal forma, que era impossível se ter uma visão do todo. As tarefas eram muito longas, pois a cada estudo era necessário desenhar cada peça e colocá-la no posicionamento adequado.

Nessa época, uma empresa não sobrevivia se a equipe de projeto não dominasse todos os fundamentos da geometria descritiva, que através de épuras e VGs davam um toque de arte no trabalho.

Com o surgimento do CAD, a primeira impressão é que o “segredo” estava disponível a qualquer mortal e que o domínio do computador se sobreporia ao conhecimento de projeto e a uma vasta experiência. Engano que o tempo tratou de corrigir e de vilão o CAD passou a parceiro inseparável, com ele os trabalhos são executados com mais precisão e rapidez.

Agora, de posse de todo esse aparato tecnológico, a visão do todo em um projeto virou requisito fundamental, ou ainda de forma mais abrangente a visão de toda a família do produto.

A motivação desse trabalho está ligada à engenharia de produtos e é resultado das inúmeras dificuldades enfrentadas para solucionar problemas como o abordado aqui.

1.5 Histórico de Ônibus

Desde tempos remotos o homem procura se locomover por meios mais rápidos e práticos. Tentativas de um transporte para passageiros já podiam ser observadas durante o império romano em veículos com tração animal.

Segundo Stiel (2001), na França, por volta de 1627, algumas viaturas públicas circulavam por Paris, mas o público não as aceitou muito bem e a empresa foi fechada. Pascal, em 1661, concebeu a idéia dos ônibus e a repassou ao Duque de Roaunez que obteve do rei Luís XIV, em 1662, o privilégio de explorar as carruagens públicas para circularem em Paris seguindo um itinerário, com horários e tarifas preestabelecidos. A idéia não foi bem sucedida e o transporte coletivo caiu no esquecimento.

Outras tentativas foram feitas na França, mas nenhuma obteve êxito até que por volta de 1825 o Sr. S. Baudry, comerciante da cidade de Nantes, querendo incrementar suas vendas, ofereceu aos seus fregueses condução gratuita ao seu estabelecimento. O transporte era feito com um carro comprido, com dois bancos paralelos, puxado a cavalo. A invenção deu tão certo que as pessoas usavam o transporte para se locomover sem a intenção de ir ao seu estabelecimento. O comércio foi fechado, mas o transporte se manteve mediante a cobrança de passagens. As viaturas do Sr. S. Baudry saíam da frente do estabelecimento de um certo senhor chamado Omnes, que continha uma tabuleta com as seguintes palavras: “OMNES-OMNIBUS” (Omnes para todos). A população associou a palavra “omnibus” às viaturas, daí a origem do nome.

O serviço foi estendido para outras cidades, chegando a Paris em 1828, onde foi inaugurada a Empresa Geral de Viaturas e a palavra “omnibus” foi escrita em todos os veículos. A partir de então, outras empresas foram surgindo com novos tipos de veículos: ônibus fechado tracionado por três cavalos, veículos com dois pavimentos, fechados com janelas laterais em linha, para várias famílias, etc. Proliferando, assim, a circulação de veículos coletivos na capital francesa. Já em 1829, a Inglaterra e os Estados Unidos também inauguraram sistemas de transportes rudimentares, mas pioneiros no mundo.

As tentativas para fazer veículos mais rápidos e potentes surgem quase que paralelamente ao surgimento do veículo tracionado por animal. Conforme Dunbar (1967), os estudos e aplicações do motor prosseguem durante o século XIX, enquanto a indústria química desenvolvia técnicas para vulcanizar a borracha para o revestimento de rodas e a siderurgia aperfeiçoava técnicas de fabricação de peças fundidas e forjadas. Em 1833, na Inglaterra, já haviam inventado um veículo a vapor. Na França, no ano seguinte, outras experiências foram feitas. Nesse mesmo ano, esses dois países implantaram a primeira linha regular de transporte coletivo motorizado. Na figura 1.5.1. é apresentado o veículo de transição entre ônibus e bonde puxado por tração animal. Rodou na França no final do século XIX e início do século XX, conhecido como Rippert.

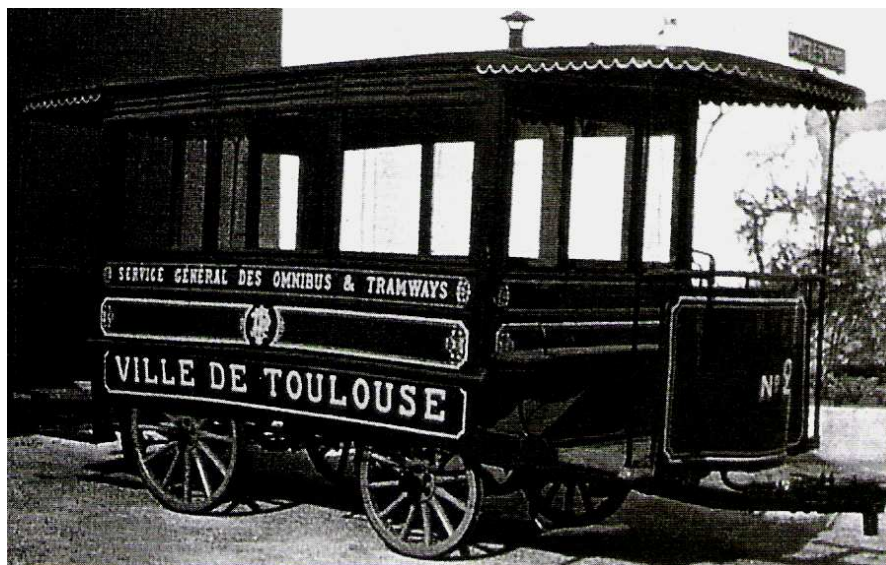


Figura 1.5.1: Rippert. (fonte: Stiel, 2001)

Lentamente, outros tipos de motores foram substituindo o motor a vapor. Em 1860, surge o motor Lenoir, que funcionava usando o gás de iluminação. Devido ao seu alto custo, procuraram-se combustíveis alternativos como a benzina e o gás de Ligroin. Uma das pessoas que contribuíram para o aperfeiçoamento desta invenção foi o técnico alemão Nikolaus August Otto, que desenvolveu um motor com melhor desempenho. Fundou com seu sócio Eugen Lang, a fábrica de motores a gás Deutz, em 1872. Um dos principais técnicos da fábrica era o engenheiro Gottlieb Daimler. Ele propôs motorizar diversos tipos de carruagens, mas sua idéia não foi aceita. Insatisfeito, sem o apoio da diretoria, se afasta da empresa e monta sua própria indústria em 1882. Em 1899, ele atravessa a ponte de Westminster, em Londres, com o primeiro ônibus a gasolina, com rodas de ferro. Nesse mesmo período, em 1879, outro alemão, Karl Benz consegue fabricar um motor no qual a alimentação com uma mistura de combustível, ar e gás são feitas por bomba. Funda a Benz & Cia Fábrica de Motores a Gás do Reno para industrializá-lo. A figura 1.5.2 indica os veículos de Gottlieb Daimler e Karl Benz.

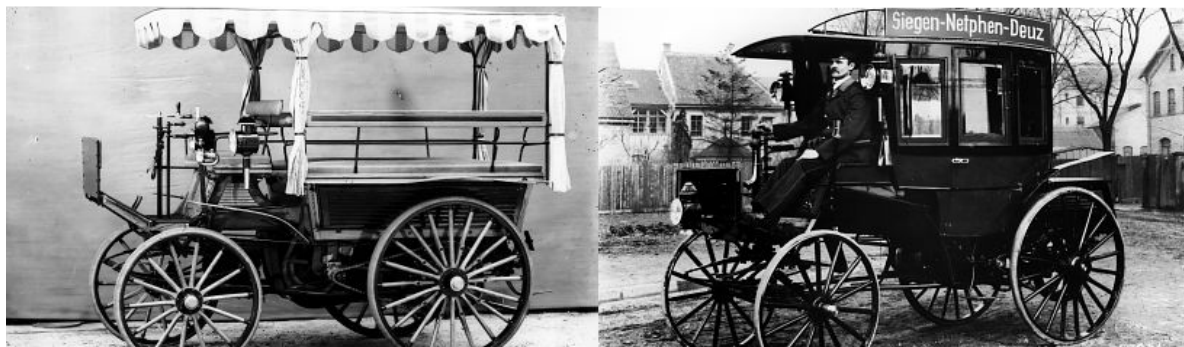


Figura 1.5.2: Da esquerda para direita, o primeiro ônibus de Karl Benz e o primeiro ônibus de Gottlieb Daimler. (fonte: www.mercedes-benz.co.uk)

Werner von Siemens, em 1881, na Alemanha, é considerado por alguns estudiosos como o primeiro a construir uma linha experimental de trólebus. No início do século XX, a tração a vapor era responsável por 40% dos veículos rodoviários motorizados de passageiros. No mesmo período, entretanto, também já circulavam pela Inglaterra, ônibus elétricos de dois andares, graças ao aperfeiçoamento do acumulador elétrico, inventado por Gaston Platé. A implantação dos trólebus era estimada em um terço do custo do bonde. Para a exposição de Paris em 1900, o francês Lombard-Gerin, construiu um pequeno sistema de trólebus. Na mesma época, é instalada uma nova linha numa outra cidade alemã, também por Siemens juntamente com Max Schiemann. Em 1903 e 1905, Inglaterra e França, respectivamente, apresentavam ao mundo os primeiros auto-ônibus. Os veículos elétricos tinham várias vantagens: mais limpos, silenciosos e flexíveis. Por outro lado, apresentavam os inconvenientes do peso dos acumuladores (1.400 kg) e a imobilização do veículo para seu recarregamento. O trólebus, a despeito da invenção do motor de combustão interna e ao contrário dos ônibus a vapor, permanece até os dias de hoje.

1.5.1 O ônibus no Brasil

A evolução do ônibus no Brasil inicia-se em 1817 com o surgimento das diligências, no Rio de Janeiro, Stiel (1984). Era um carro de quatro rodas, puxado por quatro cavalos ou mulas. Em São Paulo, antes da construção da estrada de ferro Santos a Jundiaí, em 1867, havia anúncios de viagens de diligência entre a capital e Santos. Pouco a pouco, as diligências foram sendo substituídas pelas ferrovias. Diante do panorama histórico que se tem, a história do ônibus se antecipa às ferrovias. O ônibus apareceu no Brasil, no Rio de Janeiro, por volta de 1837. Era um veículo importado da Europa, grande, com dois pavimentos e quatro rodas e tinha lotação de 20 a 24 passageiros. A primeira companhia de ônibus foi fundada no mesmo ano, mas só começou a

prosperar por volta de 1840. Expandiu-se e teve seu auge em 1860. A partir de então, a concorrência de outros tipos de transporte como as diligências, gôndolas e o bonde forçaram a companhia a reduzir algumas linhas, o tráfego de ônibus no centro do Rio de Janeiro foi extinto em 1868 e o serviço de bonde tornou-se predominante. Outros veículos também rodaram no Brasil com a função de transporte coletivo como a Maxambomba e o Rippert (figura 1.5.1).

Segundo Ovadia (1979), para o transporte de particulares e para aluguel eram usados vários tipos de carruagens. Seguindo o exemplo de Inglaterra e França, em 1910, o Brasil, especificamente em São Paulo, volta-se para a fabricação de auto-ônibus. A firma Grassi, que já fabricava carruagens, tilburies, coches, troles e outras viaturas, fabricou um ônibus sobre um chassi de fabricação francesa que pode ter sido o primeiro a trafegar na cidade de São Paulo. No ano seguinte, é fundada a Companhia Transportes Auto Paulista que importou da Europa em torno de dez auto-ônibus com capacidade para 25 passageiros cada um. A inauguração desses veículos deu-se no dia 20 de Julho de 1911, conduzindo passageiros sem itinerário nem horários fixos dentro da cidade de São Paulo. Outras cidades como Santos, Belém, Maceió, Piracicaba, Porto Alegre, Rio de Janeiro, Minas gerais, Fortaleza entre outras, também começaram a comprar os mesmos veículos. A figura 1.5.3. apresenta o primeiro ônibus que circulou em São Paulo.

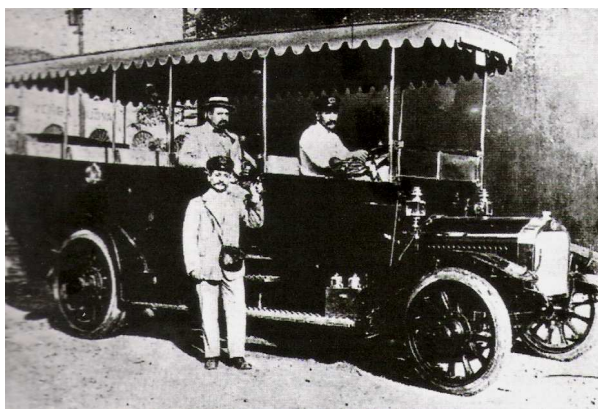


Figura 1.5.3: O primeiro ônibus que circulou em São Paulo, 20 de julho de 1911. (Fonte: Stiel, 2001)

Por volta de 1923, por solicitação do prefeito do então Distrito Federal, foram feitos estudos que apresentavam os novos auto-ônibus: carros fechados, com janelas para uma boa ventilação, com dois acessos de entrada e saída, os assentos tinham mola, o teto era abaulado, com vinte lugares dispostos em bancos para duas pessoas. A idéia era que as novas licenças

concedidas para as empresas só fossem liberadas se as mesmas se comprometessem a respeitar as novas normas para os veículos. Os antigos veículos que estavam fora dos novos padrões, terminadas suas licenças, deveriam ser retirados de circulação.

Esses estudos são um exemplo de como se deram as primeiras tentativas de padronização dos tipos de carrocerias. Contudo, a falta de fábricas desse tipo de veículo no Brasil, obrigava os interessados a importarem ou então adaptarem carrocerias feitas em carpintarias sobre um chassi de caminhão. O país ficou com essa carência de auto-ônibus padronizados até a década de 70.

A partir dos anos 20 os auto-ônibus começaram a fazer parte de várias cidades e a sua força e importância eram sentidas com mais intensidade. Nessa época, os bondes ofereciam um serviço precário de transporte, estavam ultrapassados e não tinham passado por melhorias. Outros acontecimentos também contribuíram para a diminuição do tráfego dos bondes, como guerra, revoluções internas, secas inesperadas que fizeram parar várias usinas hidrelétricas, o que provocou a diminuição e até a suspensão do tráfego de bondes. Ainda sem contar com o progresso que ocorria em várias cidades por todo o país e que tinham um terreno fértil para a implantação de serviços de ônibus. Os proprietários dos auto-ônibus começaram a apresentar à população carros novos para o transporte de passageiros. Tudo isso levou ao fortalecimento dos auto-ônibus, que começaram a aparecer em maior número, fazendo concorrência aberta aos bondes. A figura 1.5.4. mostra um exemplo de jardineira sobre chassi Ford.



Figura 1.5.4: Jardineira intermunicipal sobre chassi Ford 1929. (Fonte: www.carroecia.com.br)

O bonde, pouco a pouco, foi cedendo lugar ao ônibus que tinha facilidades na importação e na industrialização nacional. Assim, vão surgindo as primeiras indústrias de carrocerias. Após a metade da década de 20, com a formação das grandes companhias, o ônibus começou a aparecer em maior número, surgem tipos de chassis mais modernos adaptados para ônibus. As grandes

companhias que tinham o monopólio do transporte coletivo sobre trilhos sentiram essa concorrência e a partir daí, começaram a entrar também no ramo do transporte por auto-ônibus.

Em 1927, conforme Stiel (1978), um jornal americano informava que o Brasil ocupava o quarto lugar entre os melhores mercados do mundo para veículos a motor de fabricação americana, sendo um cliente que se tornava cada dia mais importante. O recenseamento mundial de automóveis, em 1º de Janeiro de 1928, informava que o Brasil possuía 95.000 automóveis de passageiro, 30.000 caminhões e 1.000 ônibus. As cidades que mais os utilizavam para o transporte urbano de passageiros eram Rio de Janeiro, São Paulo e Porto Alegre.

Na década de 20, surgiram os ônibus conhecidos como monobloco ou construção integral, freios pneumáticos e o motor começou a ser posicionado entre eixos. Outro acontecimento importante foi a utilização do motor a óleo diesel e a construção de um chassi específico para ônibus. Até então, os ônibus eram montados com o mesmo modelo de chassi para caminhão. O novo modelo de chassi era 30 cm mais baixo para facilitar o acesso e saída dos passageiros, tinha entre-eixos mais longo e bitola mais larga. Nos anos 30, o motor foi deslocado para o balanço traseiro e iniciou-se o uso de motor diesel de dois tempos. Os anos 50 trouxeram novos melhoramentos como direção hidráulica, transmissão automática, pneus sem câmara e a suspensão a ar.

1.5.2 Fabricantes e montadoras de ônibus no Brasil

Conforme Stiel (1978, 1984, 2001) os primeiros fabricantes a se instalarem no Brasil foram:

Ford Motors – instalou-se em São Paulo, em 1919. Foi pioneira no Brasil na montagem de automóveis. A inauguração dessa linha de montagem fez cair sensivelmente o preço dos automóveis, o que facilitou sua compra por parte da população. O carro da Ford passou a ser o mais utilizado no país. Além de automóveis, vários ônibus com chassi de caminhão, rodaram pelo Brasil. Somente em 1993 é que a Ford começou a produzir chassis específicos para ônibus.

General Motors – segunda grande montadora e depois construtora de automóveis e ônibus a se instalar no Brasil, em 1925. A GM também produziu muitos ônibus, todos com chassi de

caminhão, para cidade e estradas. Em 1947, foram construídos no Brasil os primeiros ônibus monoblocos, eram os urbanos GM Coach.

FNM – Fábrica Nacional de Motores – Em 1942, em plena guerra, foi instalada no Brasil a empresa Wright Aeronautic Corporation com o nome FNM, para fabricação de motores para aviação. Em 1949, começou a fabricar caminhões e somente em 1959, iniciou a fabricação de ônibus, utilizando conjunto de caminhões. Em 1971, inicia-se a comercialização do novo chassi para ônibus da FNM. Em 1985 encerra suas atividades no Brasil.

Mercedes-Benz – é uma empresa alemã, nascida em 1926. Sua vinda para o Brasil foi em 1953 com o início da construção do seu parque industrial em São Bernardo do Campo. Em 1956, ano de sua inauguração, inicia a produção de caminhões e em 1958, lança o ônibus monobloco O-321 HL. A partir de então, sua participação no mercado brasileiro e mundial tornou-se fundamental. Em 1994, a Mercedes possuía em Campinas, SP, a maior e mais moderna fábrica de ônibus do mundo ocidental. Em 1996 deixa de produzir o ônibus monobloco e concentra seu foco no desenvolvimento de chassis e plataformas. A figura 1.5.5 apresenta o ônibus O-321 HL.



Figura 1.5.5: Lançado em 1956 o monobloco O-321 HL da Mercedes-Benz. (Fonte: www.daimlerchrysler.com.br)

Scania - fundada com o nome de Vagnfabriks Aktiebolaget, em 1891, na Suécia. Lançou, em 1897-8, o primeiro carro sueco com motor a combustão. Registrou em 1906, a marca Vabis, em 1910 se uniu à Scania, outra fabricante em ascensão, surgindo a AB Scania-Vabis. A produção de ônibus se consolida no período entre as duas guerras mundiais. Em 1957 é fundada a Scania-Vabis do Brasil S/A. A Scania é responsável por diversas inovações na fabricação de ônibus: usou turbo-alimentadores, motor veicular com 300cv, fez o primeiro chassi para ônibus

integral com motor dianteiro, o primeiro articulado, entre outros projetos de sucesso. A figura 1.5.6 apresenta o chassi Scania-Vabis.



Figura 1.5.6: Chassi Scania-Vabis com carroceria Caio, 1964. (Fonte: www.milbus.com.br)

Volvo - tornou-se conhecida no Brasil em 1933, quando importou da Suécia (sede da empresa), quatro chassis de caminhão e um automóvel de passageiro. O primeiro modelo de ônibus foi exportado para o Brasil em 1934 e foi bem aceito para tráfego urbano. Do rio de Janeiro transferiu-se para Curitiba em 1980. Já em 1978, a Volvo importou e a Caio encarroçou dois protótipos de ônibus articulado. Em 1979, a Volvo produzia o seu mais bem sucedido ônibus, adequado às operações urbanas e também ao transporte por longas distâncias. Em 1991, desenvolve o primeiro ônibus biarticulado brasileiro.

Volkswagen – iniciou suas atividades no Brasil em 1953, em São Bernardo do Campo, produzindo automóveis e utilitários. Em 1981, é criada a Volkswagen Caminhões Ltda e em 1987 a empresa lança um chassi para microônibus e um de ônibus. Nesse mesmo ano a Volkswagen e a Ford se unem no Brasil e formam a Autolatina. Lançam, em 1991, um protótipo de ônibus com carroceria Marcopolo. A Autolatina deixa de existir em 1994. Em 1995, a Volks inova com o desenvolvimento de um chassi para ônibus urbano dentro de um conceito de engenharia que conta com a parceria entre montadora, fornecedor e cliente.

1.6 Estrutura do Trabalho

O trabalho é estruturado da seguinte forma: o capítulo 2 aborda o cenário dessa dissertação que é o chassi de ônibus. Apresenta tópicos que contextualizará o ônibus, os seus segmentos de aplicação, tipos, características, a descrição funcional do motor, seus periféricos e as legislações ambientais.

No capítulo 3, é feito o levantamento da literatura sobre modularidade, incluindo o histórico e os conceitos básicos e são apresentados os principais trabalhos sobre módulos, interfaces e as técnicas de modularização. É apresentada a arquitetura do produto e sua estrutura e tipos.

No capítulo 4, é apresentada uma revisão das principais metodologias de projeto, suas fases e objetivos. Discutem-se as diversas perspectivas da modularidade e os métodos de quantificação da modularidade.

No capítulo 5, inicia-se o estudo de caso. São apresentados os métodos utilizados na elaboração do trabalho e o desenvolvimento do estudo de caso, mostrando cada fase da sua execução e a discussão dos resultados observados, no capítulo 6, a conclusão do trabalho com as propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Cenário da dissertação: chassi de ônibus

Neste capítulo serão abordados os tópicos fundamentais de um chassi de ônibus, desde seu encarroçamento, sua classificação quanto ao segmento de aplicação, seus principais modelos e características e o agrupamento em famílias. O tópico principal, que é o foco dessa dissertação, será a análise da periferia do motor de um chassi, onde serão identificados os sistemas que assistem ao motor e suas funções. Serão apresentadas também as condições de contorno e restrições que são imprescindíveis para elaboração do projeto conjunto ônibus-carroceria e os fatores que determinam a atualização do motor e por consequência os sistemas periféricos.

2.1 O Ônibus

O ônibus no Brasil tem sido o principal meio de transporte das pessoas nos últimos anos. Com a urbanização dos grandes centros, o ônibus assumiu o transporte coletivo com ampla vantagem ao transporte individual, em termos de economia de combustível e espaço, adaptando-se ao planejamento dos grandes centros urbanos juntamente com a integração de outros meios de transportes. Por ano, segundo dados da Agência Nacional de Transporte Terrestre (ANTT), há uma movimentação superior a 140 milhões de passageiros.

Transportar passageiros requer um ônibus que ofereça conforto, segurança e que atenda às legislações reguladoras conforme a aplicação que se destina. No Brasil, a única oferta disponível é o ônibus encarroçado, que é aquele cuja carroceria é incorporada a um chassi através de uniões por solda, parafusos e rebites. Entenda-se por carroceria, a estrutura tubular ou perfilada, de aço ou alumínio, que revestida externa e internamente forma o corpo do ônibus e com leiaute

definido de bancos, que conhecemos como salão dos passageiros e adicionando a acessibilidade e as áreas envidraçadas. Conforme mostra a figura 2.1.1.

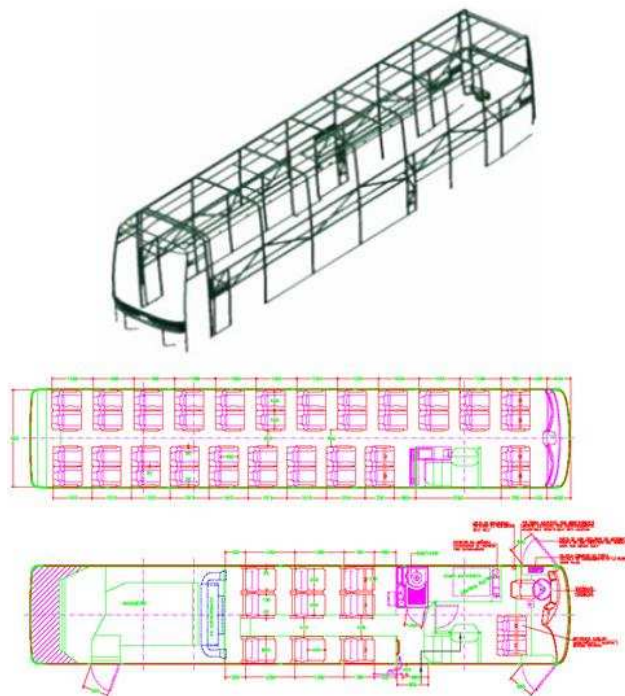


Figura 2.1.1: Detalhe de uma estrutura de uma carroceria e o salão de passageiros. (Fonte: Marcopolo)

Chassi é composto de um quadro que possui dois grandes perfis longitudinais, conhecidos como longarina (que pode ser um perfil “C” ou tubular) interligadas com travessas que dão rigidez e flexibilidade. Essa estrutura é a espinha dorsal do veículo que será responsável pela maioria dos esforços (carregamento), alojados nessa estrutura, temos o trem de força que é o conjunto formado pelo motor, embreagem e câmbio. Acoplados, temos os periféricos do motor que viabilizam o seu funcionamento. Os eixos são classificados segundo sua posição no veículo: dianteiros e traseiros, que através de suspensões, são conectados ao quadro. O sistema de direção permite a dirigibilidade do veículo. O eixo de tração é chamado de eixo motriz que no caso dos ônibus é exclusivamente o eixo traseiro. Na figura 2.1.2 são apresentados os principais componentes do chassi de ônibus.

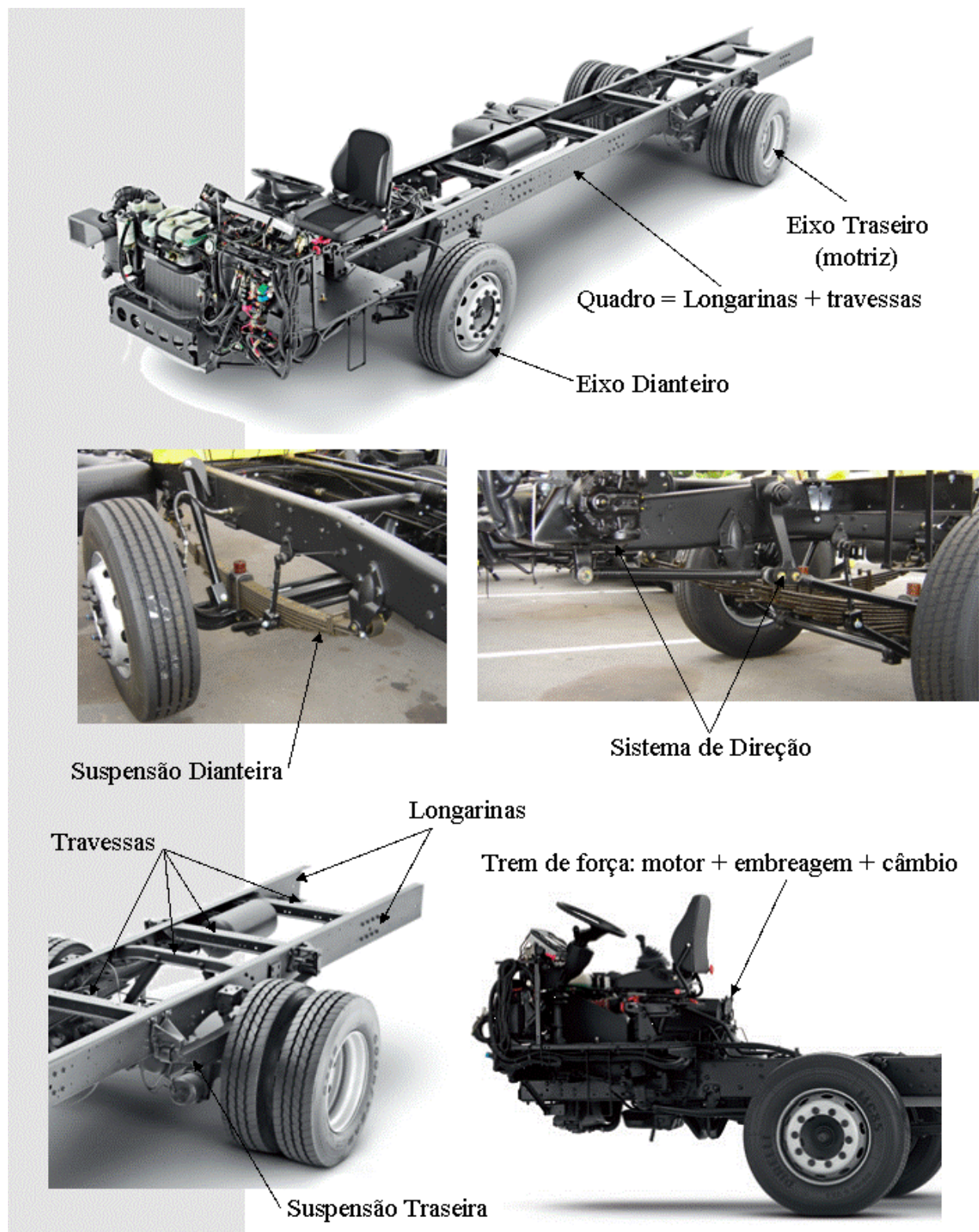


Figura 2.1.2: Chassi de ônibus. (Fonte: Mercedes-Benz)

Projetar e desenvolver ônibus são tarefas que exigem uma parceria muito grande entre a montadora, responsável pelo chassi e o encarroçador, responsável pela carroceria. O produto final dependerá da integração de ambos. Essa integração é obtida com uma visão de desenvolvimento de projetos que aplique os conceitos modulares, definindo as interfaces do chassi para carrocerias de quaisquer fabricantes. A figura 2.1.3. ilustra o momento da união entre o chassi do ônibus e a carroceria.



Figura 2.1.3 : Ônibus completo: chassi + carroceria (Fonte: Marcopolo)

2.2 Segmento Rodoviário e Urbano

A aplicação do ônibus define o tipo de chassi e carroceria, existem dois principais segmentos: rodoviário e urbano. O segmento rodoviário abrange o transporte de passageiros a médias e longas distâncias (intermunicipal, interestadual ou internacional), fretamento, turismo, linhas especiais metropolitanas. A figura 2.2.1 indica as principais subdivisões do segmento rodoviário.

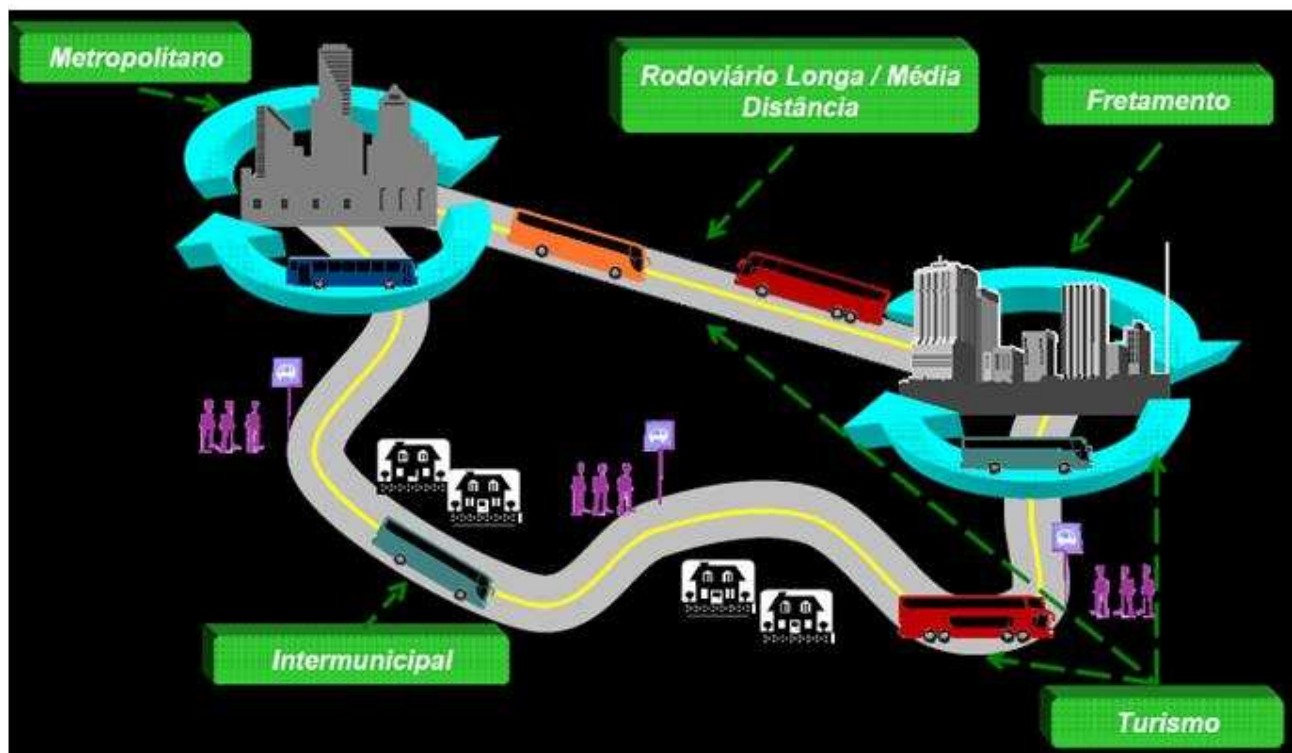
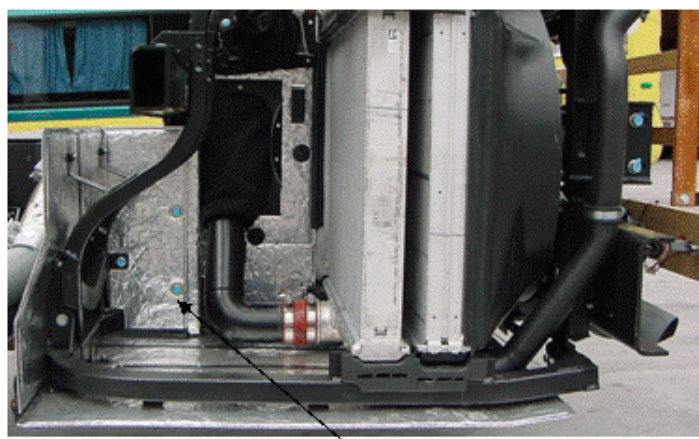


Figura 2.2.1: Segmento rodoviário e suas subdivisões. (Fonte: Scania)

O segmento rodoviário representa 95% de todos os deslocamentos brasileiros e uma frota de cerca de 13400 ônibus por ano, conforme ANTT. Esse segmento tão competitivo e promissor prioriza o conforto, que na carroceria pode ser traduzido pelos clientes como bancos com uma ergonomia adequada e com mais espaçamento entre eles, climatização apropriada, espaço suficiente para bagagem de mão, etc. Do ponto de vista de engenharia significa: vedação adequada a ruídos entre chassi e carroceria, ancoramento reforçado da carroceria no chassi diminuindo as vibrações no salão de passageiros, não permitir que os componentes estejam nos modos de frequências naturais que causam desconforto aos passageiros, etc. No chassi, suspensões a ar com barras estabilizadoras são indispensáveis, pois permitem conforto com limitação do ângulo de inclinação da carroceria. Isolação e encapsulamento do motor e seus periféricos para vedação de ruídos, embreagem eletromagnética no ventilador para reduzir vibrações e ruído, etc. Na figura 2.2.2, alguns exemplos dos principais tópicos de conforto.



Bancos confortáveis e espaçados



Isolação termo-acústica dos periféricos do motor

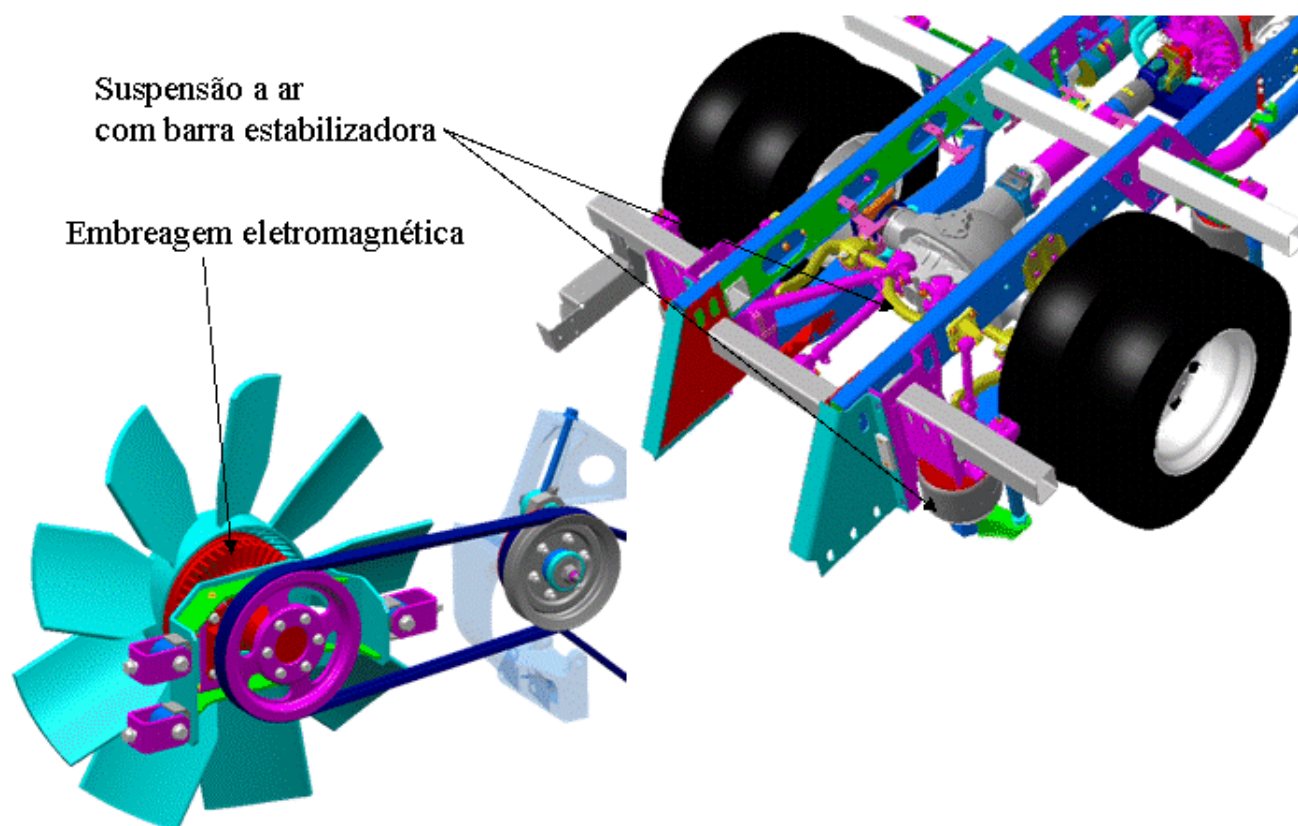


Figura 2.2.2: Característica de conforto segundo visão dos clientes e de engenharia.

A extensão da urbanização das grandes e médias cidades tem provocado um aumento nos deslocamentos de seus habitantes, gerando maiores e mais diversas demandas de mobilidade. O uso cada vez mais freqüente do automóvel particular tornou-se uma ameaça em se tratando de

espaço urbano, com aumento significativo de congestionamentos e dos índices de poluição. O uso de transporte coletivo é uma forma de se reduzir os efeitos negativos ao meio ambiente e no desenvolvimento das cidades.

Neste contexto, o papel do ônibus urbano é fundamental. Ônibus urbano é aquele que se destina aos grandes centros urbanos, é responsável pelo transporte de passageiros dos bairros ao centro, dos bairros aos terminais ou ainda entre bairros e entre terminais. Para se ter uma idéia da contribuição desse tipo de transporte, São Paulo tem uma frota de cerca de 14 000 ônibus urbanos e para atender o complexo sistema de transporte urbano dos grandes centros, existem muitos modelos de ônibus urbanos com aplicações específicas. Por ser um ônibus para pequenas e médias distâncias, não há preocupação quanto ao conforto, com exceções de linhas especiais que se diferenciam por oferecer serviço não tradicional.

A preocupação maior quando se desenvolve um ônibus urbano é a robustez da carroceria e chassi, que se obtém utilizando uma margem grande de segurança no dimensionamento dos componentes. Para as aplicações severas e com baixo custo, utilizam-se suspensões metálicas com feixes de mola, como ilustrado na figura 2.2.3.

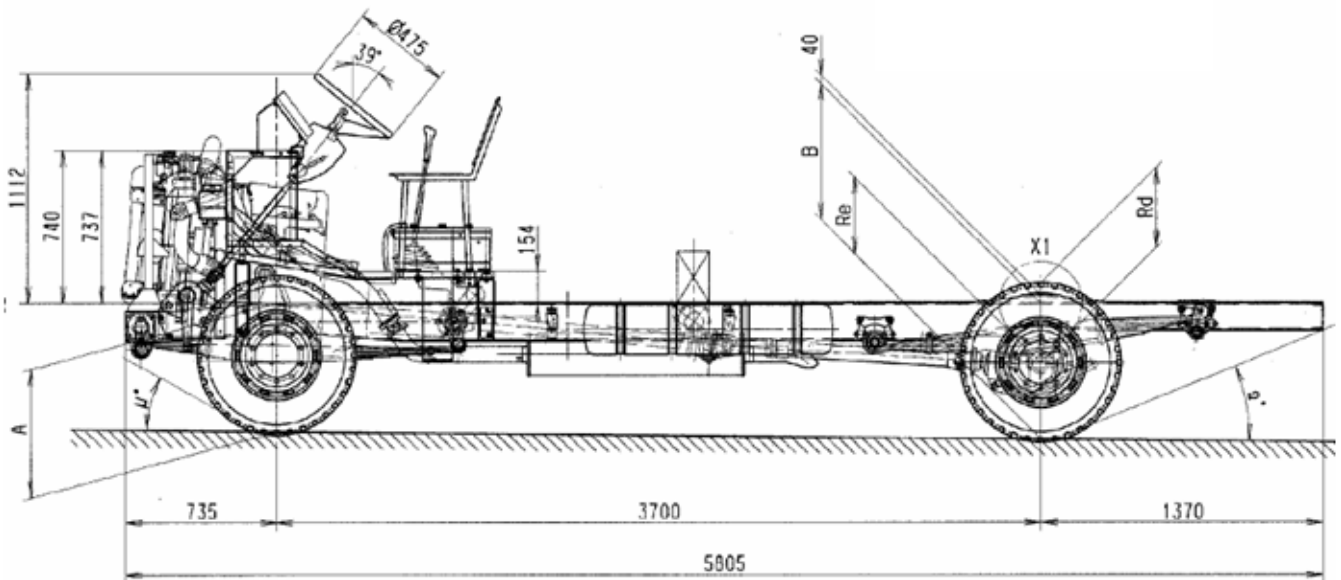


Figura 2.2.3: Exemplo de um projeto de chassi de ônibus urbano.

2.3 Tipos de ônibus e suas aplicações

Em uma malha de transporte urbano cada segmento a ser percorrido deve ser atendido pelo ônibus adequado. Essa escolha pode representar a lucratividade da linha, pois haverá maior aproveitamento da capacidade do ônibus e menor probabilidade de manutenção corretiva.

Por exemplo, há ônibus que transportam passageiros dos bairros aos terminais. Como na maioria das cidades brasileiras, a pavimentação das ruas nas regiões da periferia da cidade é precária e o fluxo de passageiros é intenso, a escolha deve recair em um veículo com alta capacidade de carga e apto as ruas esburacadas. A carroceria deve possuir somente os componentes indispensáveis, e acabamento básico, pois a preocupação maior do passageiro é chegar ao destino desejado.

No mercado brasileiro existem chassis para todas as aplicações e com um número expressivo de fabricantes, a diversidade desse segmento é bastante grande. Enumerando as características principais, pode-se mencionar que os chassis se distinguem quanto ao posicionamento do motor: dianteiro, central e traseiro. Quanto à capacidade de carga que vai de 5 a 40 toneladas, quanto à potência do motor que varia de 110 cv a 420 cv e quanto a quantidade de eixos tracionados que vai de 4x2 a 8x2. Na tabela 2.3.1 são apresentados os principais fabricantes de chassis de ônibus com os respectivos modelos e suas classificações e aplicações.

Tabela 2.3.1: Lista de chassis disponíveis no mercado brasileiro. (Fonte: revista Transporte Mundial, N° 6, 2007)

	Marca	Modelo	Potência (cv)	Aplicação	
	Microônibus				
	Agrale	MA 8.5 E-Tronic	150	Urbana, fretamento e rodoviária.	
		MA 7.9 E-Tronic	110		
		MA 9.2 E-Tronic	150		
		MA 9.2 Green E-tronic	197		
	Iveco	Scudato 60.13	125	Fretamento e escolar	
	Mercedes-Benz	LO-712	110	Urbana, fretamento e rodoviária.	
		LO-812	110		
		LO-915	150		
	Volkswagen	5.140 EOD (MVM)	137	Urbana, fretamento e escolar.	
8-120 OD (MVM)		115			
8-150 EOD (MVM)		150			
9-150 EOD (MVM)		150			
	Ônibus Urbano 4x2 - Motor Dianteiro				
	Agrale	MA 12.0 E-Tronic	170	Urbana e fretamento.	
	Mercedes-Benz	OF 1418	177	Urbana, fretamento e rodoviária.	
		OF 1722/ OF 1722 M	225		
	Volkswagen	15-190 EOD	190	Urbana e fretamento.	
		17-230 EOD	230		
		Ônibus Urbano 4x2 - 6x2 - Motor Central / Traseiro			
Agrale		MT 12.0 SB E-Tronic	170	Urbana e fretamento.	
		MT 12.0 LE E-Tronic	170		
Mercedes-Benz		OH 1518	177	Urbana, fretamento e rodoviária.	
		O 500 M 260	260		
		O 500 U	245		
		O 500 M	245		
		O 500 M Buggy	245		
Scania		K230	230	Urbana, fretamento e rodoviária.	
		K270 (6x2)	270		
		K270 (4x2)	270		
Volkswagen		17-260 EOT	260		
	Ônibus Urbano Articulado e Biarticulado				
	Mercedes-Benz	O 500 MAUA	360	Urbana.	
	Scania	K310 articulado	310	Urbana.	
	Volvo	B9 Salf	340	Urbana.	
		B12M articulado	340		
		B12M biarticulado	340		
	Ônibus Rodoviário 4x2				
	Mercedes-Benz	OH 1518	177	Urbana, fretamento e rodoviária.	
		OF 1722/ OF 1722M	218		
		O 500 M 260	260		
		O 500 M	245		
		O 500 M Buggy	245		
		O 500 R	305		
		O-500 RS/RSD	360		
	Scania	K270	270	Urbana, fretamento e rodoviária.	
		K310 Intermunicipal	310		
		K340	340		
		K380	380		
	Volkswagen	17.230 EOT	306	Urbana, fretamento.	
		18.320 EOT	320		
		17.260 EOT	260		
	Volvo	B9R Rodoviário	340 ou 380	Rodoviária	
		B12R Rodoviário	340/380/420		

	Ônibus Rodoviário 6x2 e 8x2				
	Mercedes-Benz	O-500 RSD	360	Rodoviária	
	Scania	K270 (6x2)	270	Rodoviária	
		K340	340		
		K380	380		
		K420 (6x2 e 8x2)	420		
	Volvo	B12R	340/380/420	Rodoviária	

2.4 Modularidade em chassi de ônibus

A modularidade está presente desde a fase conceitual do projeto do chassi de ônibus. Nessa fase definem-se as dimensões básicas como balanço dianteiro (distância do início do chassi até linha de centro do eixo dianteiro), distância entre o eixo dianteiro e traseiro, e o balanço traseiro. (distância entre o fim do chassi e o centro do eixo traseiro), que são determinadas pelo tipo de leiaute interno do salão de passageiros e obedecem as restrições das legislações para o mercado que se destina. Ainda nessa fase inicia-se o estudo para se determinar a divisão dos módulos do chassi, conforme é ilustrado na figura 2.4.1.

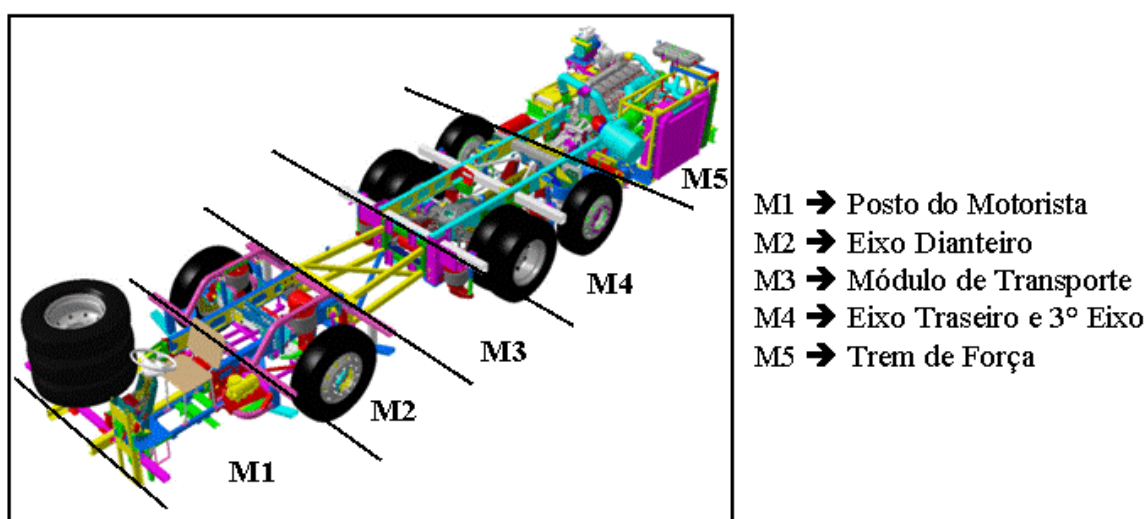


Figura 2.4.1: Divisão de módulos em um chassi de ônibus.

Quais são as razões que fazem as montadoras utilizarem a modularidade no projeto do produto e na industrialização/produção? Para se responder essa questão é necessário entender quais são as perspectivas da modularidade empregadas em cada fase do desenvolvimento do produto.

Começando pelo projeto, a divisão de módulos é utilizada com o objetivo de se comunicar componentes, isto é, pode-se desenvolver um módulo para um determinado veículo e

simultaneamente empregá-lo em outro veículo que pertence à outra família e a outro segmento de aplicação. Para isso, a modularidade com foco na comunização de componentes permite desenvolver um módulo com interfaces comuns e que pode ser ajustado para assumir outra configuração.

A grande vantagem de se ter um módulo desenvolvido e disponível para aplicação é que este já completou o ciclo de desenvolvimento, significando que já passou por cálculos estruturais e foi aprovado quanto à sua montabilidade, funcionabilidade e durabilidade. Do ponto de vista de projeto, quanto mais módulos desenvolvidos e reutilizados em outros projetos, maior será a diminuição no tempo de desenvolvimento do produto incluindo todas as fases até a produção.

A modularidade está presente também nas definições das interfaces, que podem ser entre sistemas, módulos e componentes pertencentes ao chassi e as interfaces com a carroceria. Considerando que cada chassi pode receber diversas carrocerias de diversos fabricantes, a interface entre eles é prioritária para completo funcionamento do ônibus e engloba as ligações estruturais, as conexões elétricas, hidráulicas e pneumáticas. A figura 2.4.2 mostra exemplos de interfaces.

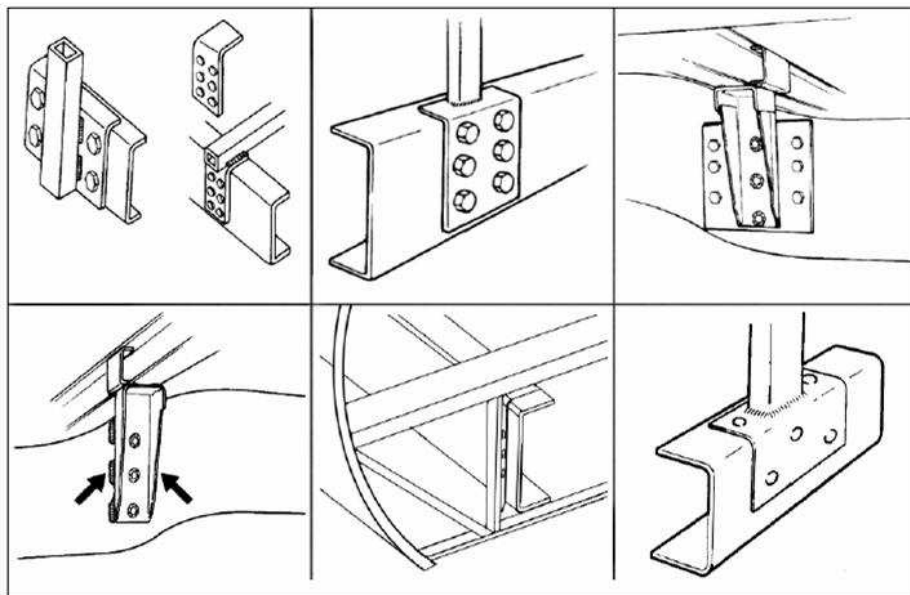


Figura 2.4.2: Exemplos de interfaces estruturais. (Fonte: Manual de encarroçamento, Mercedes-Benz)

A fase da industrialização é onde são preparados os dispositivos e ferramentais que permitirão a confecção e montagem dos componentes. A modularidade está presente como ferramenta para auxiliar na divisão dos módulos de produção. Há uma grande diferença entre módulos identificados na fase de projeto e os módulos identificados na fase de industrialização. Os módulos de projeto auxiliam também na estruturação dos desenhos e documentação do projeto, ocorre que pode não corresponder com o processo produtivo. Em outras palavras, o que para o projeto deve ser um módulo para produção pode não ser.

O foco da industrialização é compor o processo produtivo de forma a utilizar os recursos disponíveis na planta produtiva e alimentar a linha de produção com módulos que facilitem a sequência de montagem, a confiabilidade dimensional do processo, a acessibilidade e a integração com os meios produtivos que existem na produção.

A montagem final do chassi é o resultado, do ponto vista da modularidade, da integração de todas as perspectivas da modularidade que cada fase do processo de desenvolvimento do produto priorizou. Nessa última fase que inclui, além da montagem, os testes funcionais, verifica-se que o foco está na padronização dos processos. Independentes do tipo de veículo a ser montado as subestações são preparadas para utilizarem dispositivos multifuncionais e ferramentas padronizadas, que se adaptam as diferentes configurações.

2.5 A periferia do motor e suas funções

Esse tópico tem o objetivo de apresentar o compartimento do motor do chassi de ônibus e os sistemas auxiliares que possibilitam o seu funcionamento. Esse tema será estudado em profundidade no estudo de caso, mas para a compreensão desse estudo é necessário o entendimento da composição da periferia, seus componentes e funções.

O motor é o coração do veículo, podendo ser posicionado na dianteira, na região central (entre eixo) ou ainda na traseira. (neste estudo, apenas no posicionamento traseiro do motor). Sua fixação no quadro, geralmente entre longarinas, é feita através de suportes com coxins de borracha. Em alguns casos podem ser acrescentados amortecedores para equalizar sua frequência de vibração. A importância do motor é indiscutível, extrair o máximo desempenho e prolongar sua vida é uma tarefa que depende muito de como os seus componentes periféricos atuam.

O motor de combustão interna é uma máquina térmica, que transforma a energia extraída do combustível, em trabalho, porém parte desta energia transformada é dissipada em forma de calor. Esta energia dissipada necessita ser controlada para não gerar danos ao motor, ao meio ambiente e a sociedade. O controle da dissipação desta energia é efetuado através dos sistemas periféricos do motor que são: sistema de arrefecimento (incluindo o pós resfriamento), escape e admissão de ar. Conforme mostra a figura 2.5.1.

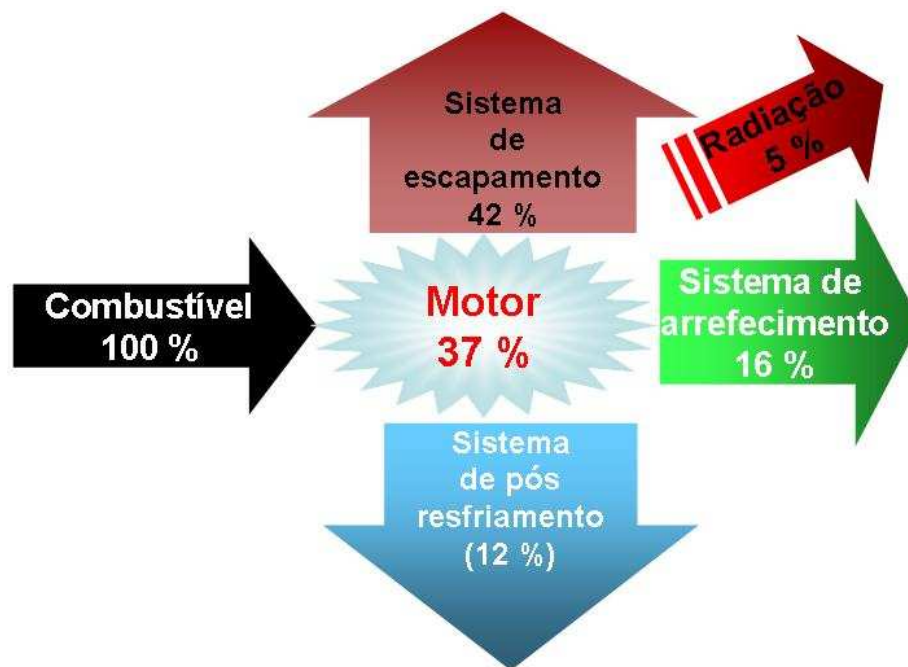


Figura 2.5.1: Balanço energético do motor. (Fonte: Mercedes-Benz)

O sistema de arrefecimento do motor é responsável por retirar calor do motor, através da água que resfria o bloco do motor e do ar que alimenta a combustão. É composto por um radiador responsável pela água (+ etileno glicol) e um radiador responsável pelo ar. O fluxo de ar é obrigado a passar pelos radiadores devido à sucção de ar executada por um ventilador acionado pelo próprio motor e através de uma embreagem eletromagnética o acionamento é executado quando necessário. Um defletor de ar, que é fixado ao radiador de água, canaliza esse fluxo. Tubulações metálicas transferem esse fluxo ao motor, no caso do ar e mangueiras de borracha fazem o ciclo da água.

No circuito da água existe uma ramificação que vai ao tanque de expansão, posicionado acima dos radiadores. A função deste tanque é alimentar o sistema com água + etileno glicol e

receber o excesso. O outro fator importante é ausência de bolhas de ar no fluxo da água, para garantir isso, mangueiras são conectadas do motor ao tanque e do radiador ao tanque que com divisões internas no seu compartimento, separa as bolhas da água.

Outro componente importante é a estrutura que sustenta todo o arrefecimento e a admissão de ar, que é conhecida como gaiola. A gaiola é responsável pela interface com o quadro e ainda faz toda isolação termo acústica, deve ser robusta, leve e permitir a captação de ar para os radiadores e tomada de ar. A figura 2.5.2 apresenta o sistema de arrefecimento do motor.

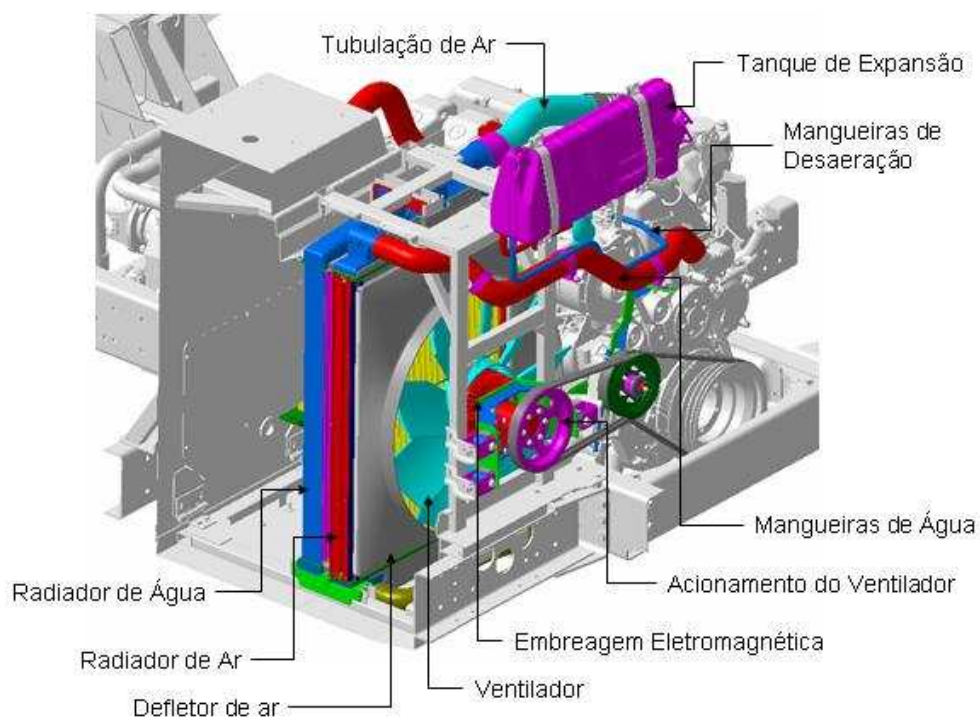


Figura 2.5.2: Sistema de arrefecimento. (Fonte: Mercedes-Benz)

O sistema de admissão de ar é composto por uma tomada de ar, filtro e mangueira de ar limpo. Tomada de ar é um duto que capta o ar externo e com uma grade e barreiras internas promove somente a passagem do ar e restringe a entrada de gotículas de água. Esse ar é filtrado e succionado pela turbina do motor através de uma mangueira estruturada para resistir à pressão negativa do sistema. O ar então é resfriado pelo radiador de ar e direcionado para o motor para a combustão. A figura 2.5.3 apresenta o sistema de admissão de ar do motor.

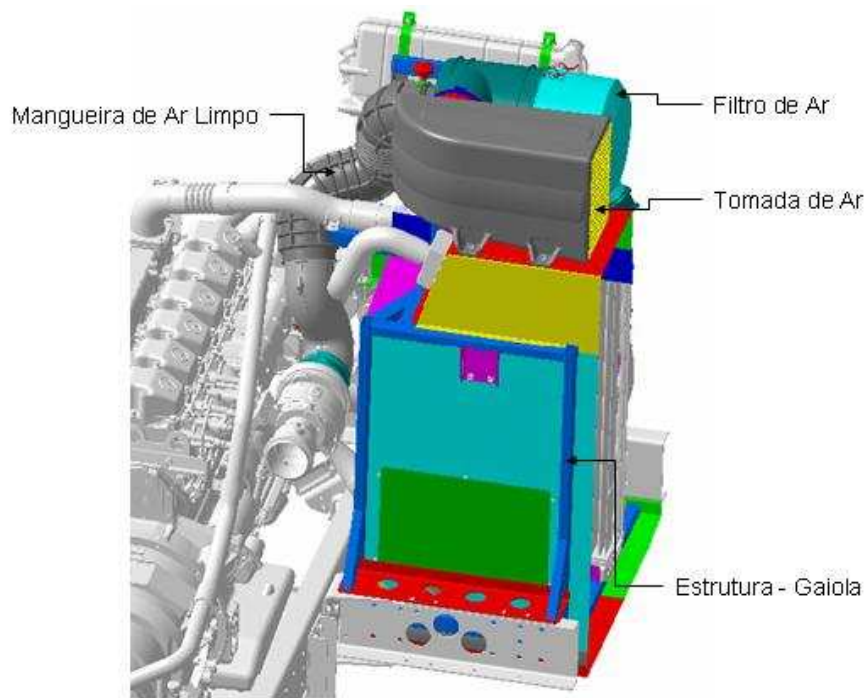


Figura 2.5.3: Sistema de admissão de ar e gaiola. (Fonte: Mercedes-Benz)

O sistema de escape é composto de uma tubulação metálica conectada a turbina do motor, cuja função é transportar os gases depois da combustão e um silencioso fixado ao quadro que trata esses gases em termos de ruído e controle da emissão. A figura 2.5.4 apresenta o sistema de escape do motor.

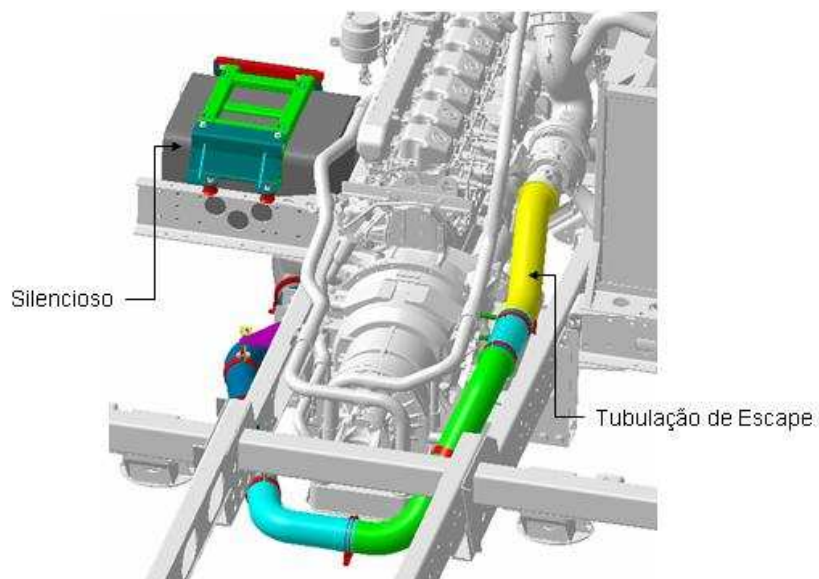


Figura 2.5.4: Sistema de Escape. (Fonte: Mercedes-Benz)

2.6 Legislações que afetam o motor e seus periféricos

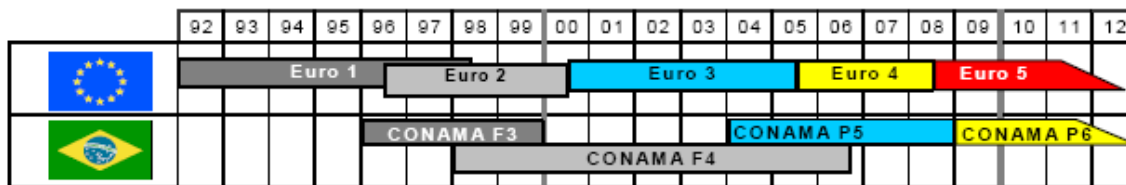
Nos últimos 10 anos as empresas automobilísticas fizeram um esforço significativo para reduzir emissões de gases poluentes e comprometeram-se em continuar assim no futuro. Desta maneira, estão trabalhando para que estejam à frente das exigências da sociedade para a qualidade do ar e no cumprimento das legislações ambientais, que restringem as emissões de gases ao meio ambiente afetando diretamente o motor e por consequência os sistemas periféricos.

Em 1992 a comunidade européia iniciou um programa de controle de emissões de gases sob o nome “Euro” e no Brasil em 1995 sob a sigla de “CONAMA”, (Conselho Nacional do Meio Ambiente) em um programa chamado Proconve (Programa de Controle de emissões Veiculares). Outros países também adotam legislações para controlar as emissões gasosas, por exemplo, os Estados Unidos – com a legislação EPA (Environmental Protection Agency).

Desde 2006, (após postergada a aplicação) está em vigor no Brasil o CONAMA fase 5 que corresponde ao Euro 3 na Europa. O Euro 4 está em vigor na Europa desde outubro de 2005, para novos veículos homologados, ou seja, só poderão ser comercializados após esta data veículos Euro IV.

A partir de 2009, está prevista a entrada em vigor no Brasil do CONAMA fase P-6, que corresponde ao Euro 4 na Europa. Até a aplicação do CONAMA fase P-6, tendo que conceituar, desenvolver, testar e entrar em produção com motores que atendam aos limites exigidos, ressaltando que o atendimento ao Euro 4 representa um grande desafio. A tabela 2.6.1 indica a previsão de aplicação das legislações, o que pode ser prorrogada conforme negociação entre empresas e órgãos governamentais.

Tabela 2.6.1: Cronograma de aplicação das diferentes fases de redução de emissões gasosas na Europa e no Brasil. (Leal, 2005)



Para efeito de correlação entre as diferentes denominações, considera-se que:

CONAMA P5 equivale aos limites de emissões Euro 3 e CONAMA P6 equivale aos limites de emissões Euro 4.

O foco dessas legislações é a redução de materiais particulados, óxidos de nitrogênio (NOx), Hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO), os limites são mostrados na tabela 2.6.2.

Tabela 2.6.2: Valores de máximos para emissões nas Fases CONAMA P5 e P6. (Leal, 2005)

Poluente	CONAMA P5 (Euro 3)	CONAMA P6 (Euro 4)	Redução percentual
Valores máximos em [g/kWh]			
Monóxido de Carbono – CO	2,10	1,50	29 %
Hidrocarbonetos – HC	0,60	0,46	23 %
Óxidos de Nitrogênio – NOx	5,00	3,50	30 %
Material Particulado – PM	0,10	0,02	80 %

O impacto, quando se alteram os limites de emissão, no motor e na periferia é considerável. Grandes mudanças são feitas no motor em termos de combustão para redução dos poluentes em consequência há uma maior rejeição de calor que determina o aumento da capacidade do sistema de arrefecimento. Se houver tratamento dos gases pós combustão, mais alterações no sistema de escape e acréscimo de filtro de particulados. Resumindo, sempre que houver alterações importantes nos limites de emissões, haverá necessidade de uma análise profunda no motor e nos seus periféricos.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica sobre Modularidade

A análise da bibliografia envolve o mapeamento da literatura, localizando o tópico da pesquisa no seu contexto e sua influência no desenvolvimento da teoria nos tópicos escolhidos (Miguel, 2005). Inicia-se com abordagem do tema projeto modular, onde serão apresentadas algumas definições e terminologias necessárias para a compreensão do tema. Serão também discutidas as vantagens e desvantagens do desenvolvimento de produtos baseados na teoria de modularidade. Na sequência será apresentada a revisão da literatura sobre as principais abordagens relacionadas ao projeto modular.

3.1 Histórico da Modularidade e Conceitos Básicos

A origem de produtos com características modulares surgiram no início do século XX. Em 1932 um arquiteto belga De Koninck iniciava uma nova concepção no projeto de móveis. O projeto consistia em uma série de elementos funcionalmente padrões que combinados se ajustavam ao ambiente. Segundo Starr (1965), na mesma época alunos de um curso de produção estudaram um sistema para se obter produtos similares a partir de elementos diferentes, iniciando a produção em massa. Nos anos 60 a modularidade surgiu como vantagem competitiva na indústria de computadores, demonstrando grande importância no processo de desenvolvimento de produto. (Arnheiter e Harren, 2006). Conforme Fourcade e Midler (2004), somente no início dos anos 90 é que a modularidade ganhou forte interesse da indústria automobilística.

A maior parte da pesquisa sobre modularidade originou-se do axioma da independência de Suh (1990), que diz: “no bom projeto, a independência dos requisitos funcionais é mantida”.

Assim, se possível, cada função que um produto realiza deve ser independente de todas as outras realizadas pelo produto. Este axioma levou à busca de uma conexão entre independência física e independência funcional. Em um dos primeiros trabalhos que discutiu a teoria do projeto modular, Ulrich e Tung (1991) usaram a modularidade de um produto como objetivo do projeto. Eles definem a modularidade em termos de duas características do projeto do produto:

- 1) similaridade entre a arquitetura física e funcional do projeto do produto e
- 2) minimização das interações incidentais entre componentes físicos.

Numa extensão desse trabalho, Ulrich (1995) afirma que um produto ou subconjunto modular tem “um mapeamento 1:1 dos elementos funcionais na estrutura da função para os diferentes componentes do produto”, e que todas as interfaces entre os componentes dos diferentes módulos são desacopladas. (será explicado em 3.2 Arquitetura do Produto)

Kusiak e Huang (1996) definem projeto modular como aquele que seus componentes podem realizar diversas funções e através de combinações distintas de módulos (ou blocos) que resultam em variantes de produto, conforme figura 3.1.1.

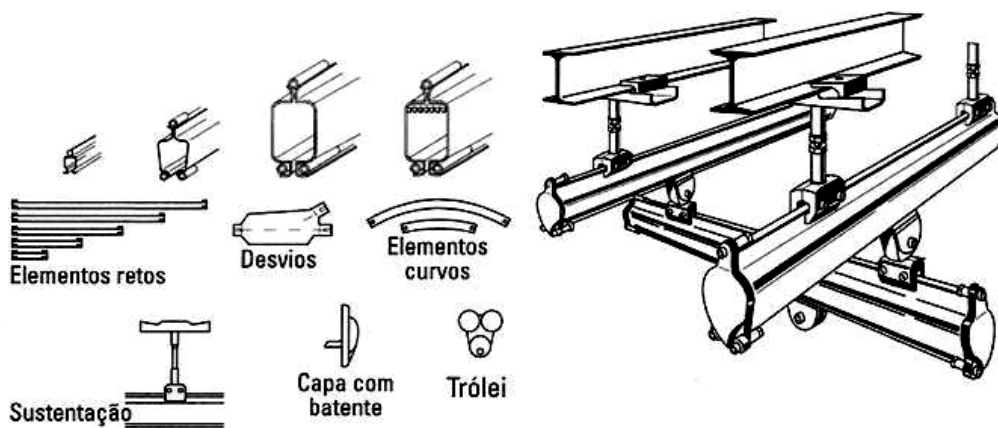


Figura 3.1.1 : Exemplo de um sistema modular. (Pahl et al., 2005)

Módulos têm como definição um ou mais componentes ou submontagem que seguem os seguintes requerimentos: capacidade de submeter-se a testes funcionais, ajustabilidade em termos funcionais, padronização das interfaces, intercambiabilidade, transportabilidade (sem afetar as

funções) (Hillström, 1994), fraca interdependência entre eles e alta interdependência dentro deles (Fixson, 2003).

Interface é a conexão entre os módulos e permite a montagem de diferentes variantes. A especificação das interfaces é vista por muitos como o principal item na modularização e facilita o sucesso na implementação das variantes do produto. (Persson, 2004)

Baseadas nas interações dos módulos dentro do produto três categorias são definidas segundo Kusiak e Huang (1996):

Component-swapping modularity - ocorre quando dois ou mais módulos diferentes são combinados com uma plataforma básica criando variantes de produtos pertencentes à mesma família. Figura 3.1.2.

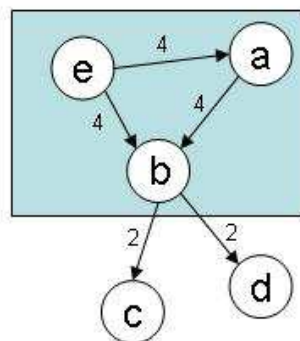


Figura 3.1.2: Representação gráfica de *component-swapping modularity*. (Kusiak e Huang, 1996)

Component-sharing modularity - é o caso complementar ao anterior. Várias plataformas básicas, dividindo o mesmo módulo, formam diferentes variantes de produto pertencentes a diferentes famílias. Figura 3.1.3.

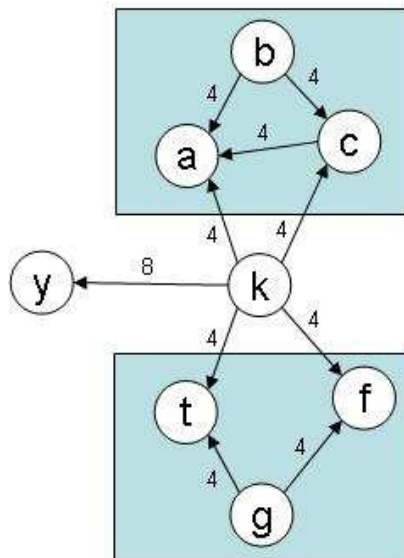


Figura 3.1.3 : Representação gráfica de *component-sharing modularity*. (Kusiak e Huang, 1996)

Bus Modularity - ocorre quando uma plataforma básica pode ser trocada por um ou vários módulos. *Bus Modularity* permite a variação no número e localização dos componentes básicos no produto enquanto que *component-sharing modularity* permite variar apenas os tipos de componentes básicos. Figura 3.1.4.

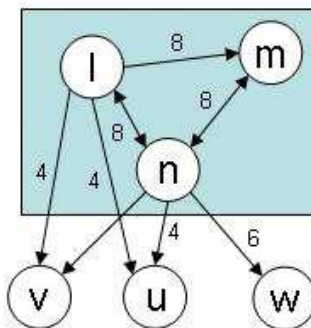


Figura 3.1.4 : Representação gráfica *bus modularity*. (Kusiak e Huang, 1996)

O potencial de benefícios da modularidade inclui, segundo Kusiak e Huang (1996):

- 1) economia de escala de componentes,
- 2) facilidade de atualização de produto,

- 3) aumento da viabilidade do produto,
- 4) maior variedade de produtos,
- 5) menor tempo entre pedido e entrega,
- 6) facilidade de teste, diagnóstico de falhas e manutenção nos produtos.

Ainda segundo Kusiak e Huang (1996), o projeto é freqüentemente definido como a criação da síntese de soluções na forma de produtos, processos ou sistemas que satisfazem as necessidades através do mapeamento de funções requeridas (FR's) no domínio funcional e os parâmetros de projetos (DP's) no domínio físico. De forma matricial, considerando que $[A]$ é matriz de projeto, a escolha dos parâmetros de projeto deve satisfazer a seguinte equação 3.1.

$$[FR] = [A] \times [DP] \quad (\text{Equação 3.1})$$

O projeto de produtos modulares na fase conceitual consiste em determinar a matriz $[A]$ tal que os requerimentos funcionais sejam extraídos de um espaço modular funcional, que se baseia nas similaridades funcionais para constituírem os módulos. Conforme Pahl et al. (2005), as similaridades são definidas como a relação de valores em que pelo menos uma mesma variável em um projeto básico e no subsequente deve permanecer constante e as classificam como: geométrica, temporal, força, elétrica, de temperatura e fotométrica.

Sistemas modulares são constituídos de blocos interligados que executam funções globais e suas variantes que conforme Pahl et al. (2005) e Kusiak e Huang (1996) essas funções podem ser classificadas:

- Funções básicas são fundamentais, repetitivas e imprescindíveis para o atendimento da função global e de suas variantes. Pode participar de forma solitária ou interligada a outras funções e são executadas pelos módulos obrigatórios. Ex: a energia de um sistema.
- Funções auxiliares são as de interconexões entre os blocos ou as que fazem a integração do sistema e são executadas por módulos auxiliares.

- Funções especiais são funções isoladas, complementares, específicas de uma tarefa, que não se repete em todas as variantes da função global.
- Funções adaptativas são funções que por razões imprevisíveis das condições de contorno são necessárias para o ajuste de outros sistemas a condições complementares.
- Funções específicas ou customizadas são funções específicas de um pedido e que não foram previstas no sistema modular, são executadas por blocos não modulares.

A figura 3.1.5 apresenta um resumo das principais funções em um sistema.

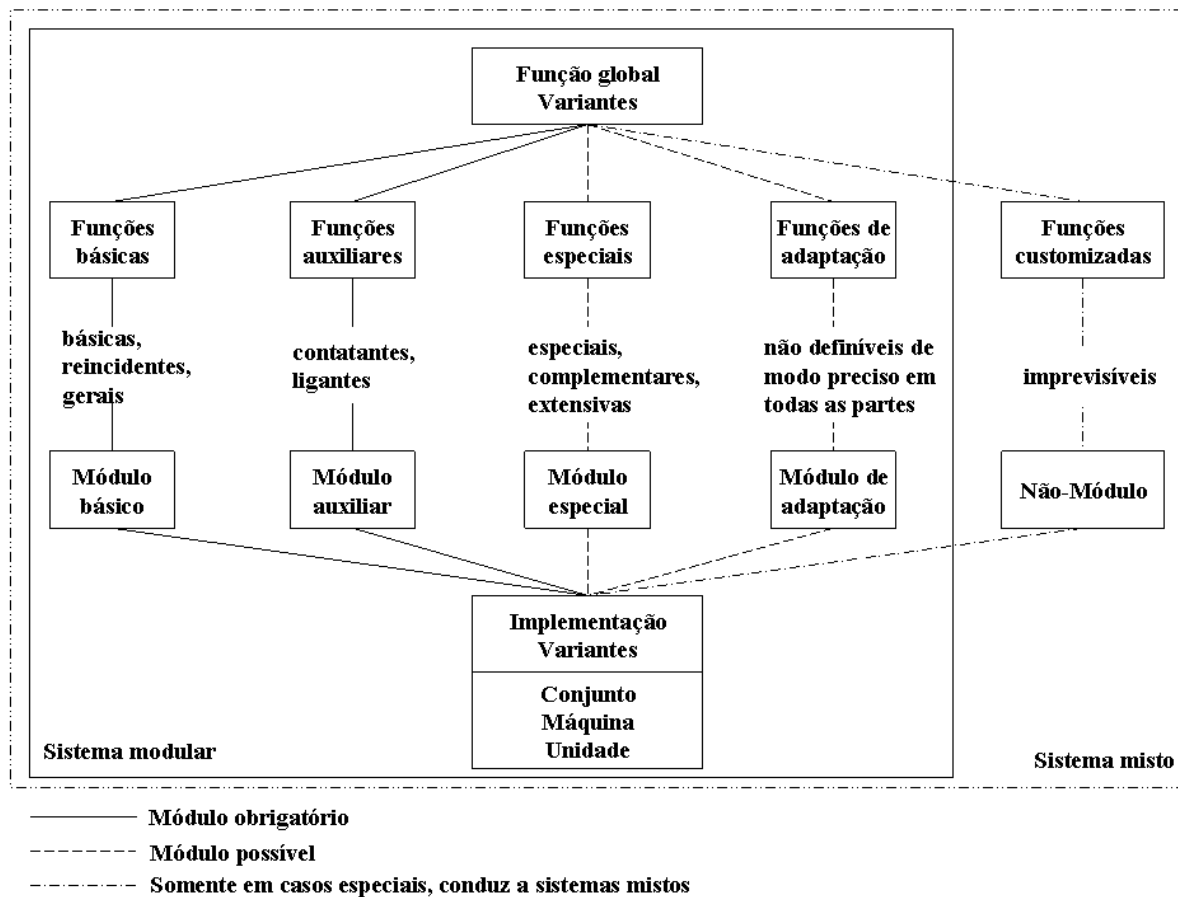


Figura 3.1.5 : Espécies de função e módulos em sistemas modulares e mistos. (Pahl et al., 2005)

O projeto modular envolve a criação de variantes de produtos baseadas na configuração de um conjunto definido de módulos. Módulos são comumente descritos como grupos de

componentes “estruturalmente” ou “funcionalmente” independentes (Gu et al., 1997). O principal objetivo é criar variedades, reduzir a complexidade e maximizar o parentesco nos projetos dentro das famílias de produtos. Os benefícios principais de um projeto modular incluem: atualizações eficientes, complexidade reduzida, custos menores, desenvolvimento rápido de produtos e melhor estruturação de conhecimento do projeto (Miller 1999, Muffato 1999, O’Grady e Liang 1998).

Segundo Miguel (2005), modularidade pode ser classificada em três domínios: modularidade em projeto, modularidade em produção e modularidade organizacional.

- Modularidade em projeto é definida como a escolha do projeto dos contornos do produto e seus componentes, isto é a divisão dos sistemas em módulos, definindo e agrupando-os bem como a definição da interface entre eles.
- Modularidade em produção refere-se à escolha dos contornos do projeto da planta para facilitar a manufatura e montagem de uma variedade de produtos e as exigências de custo e qualidade no fluxo produtivo.
- Modularidade organizacional refere-se ao processo organizacional, estruturas de controle e processos empregados que é adotado ou usado para instalar a produção modular.

Modularização segundo Pahl et al. (2005) é a estruturação do produto onde se incrementa a modularidade com o objetivo de otimizar uma arquitetura existente atendendo os requisitos do produto e permitindo a racionalização na geração de próximos projetos. A modularização pode reduzir significativamente o tempo de manufatura e processo de montagem, conduzindo ao aumento de variedade e customização do produto. Esse resultado é possível devido à possibilidade de se desenvolver módulos em paralelo.

O sistema ainda pode ser modular fechado, onde o número de variantes é finito e previsível e sistema modular aberto, onde há uma multiplicidade de combinações, de modo que não pode ser planejado e indicado integralmente.

3.2 Arquitetura do Produto

Empresas de manufatura estão dando cada vez mais atenção à customização de produtos em larga escala, os quais buscam a satisfação das necessidades dos clientes pela proliferação de seus produtos. Para competir no mercado, as empresas expandem seus portfólios o que pode estimular as vendas e torná-las mais atrativas, mas continuar criando novas variantes de produtos pode não resultar retorno esperado. (Jiao et al., 2006)

Os benefícios da comunização e padronização de componentes são óbvios, vários produtos compartilharão módulos em larga escala reduzindo os custos de fabricação.

O desenvolvimento de famílias de produtos tem sido reconhecido efetivamente como uma forma que gera economia em escala, favorecendo o aumento da variedade de produtos em diversos nichos de mercado. Além disso, quando se desenvolve uma família de produtos os riscos de projeto são reduzidos pela utilização de componentes iguais em diversas variantes.

Nesse cenário de família de produtos, existe uma estrutura bem planejada e uma organização lógica de criação que permite reconhecer e utilizar o que é padrão dentro de cada novo produto é conhecida como arquitetura do produto.

Para Ulrich (1995), arquitetura do produto é o esquema que relaciona a estrutura funcional do produto com a estrutura física dos componentes ou ainda mais precisamente descrita como o esquema que aloca as funções do produto em seus componentes físicos. Arquitetura de um produto é uma tarefa fundamental no desenvolvimento do produto e pode ser interpretada como a transformação da descrição funcional em uma descrição física do produto (Goepfer, 1998, citado por Pahl et al., 2005). A figura 3.2.1 apresenta a arquitetura do produto através do mapeamento componente/funções.

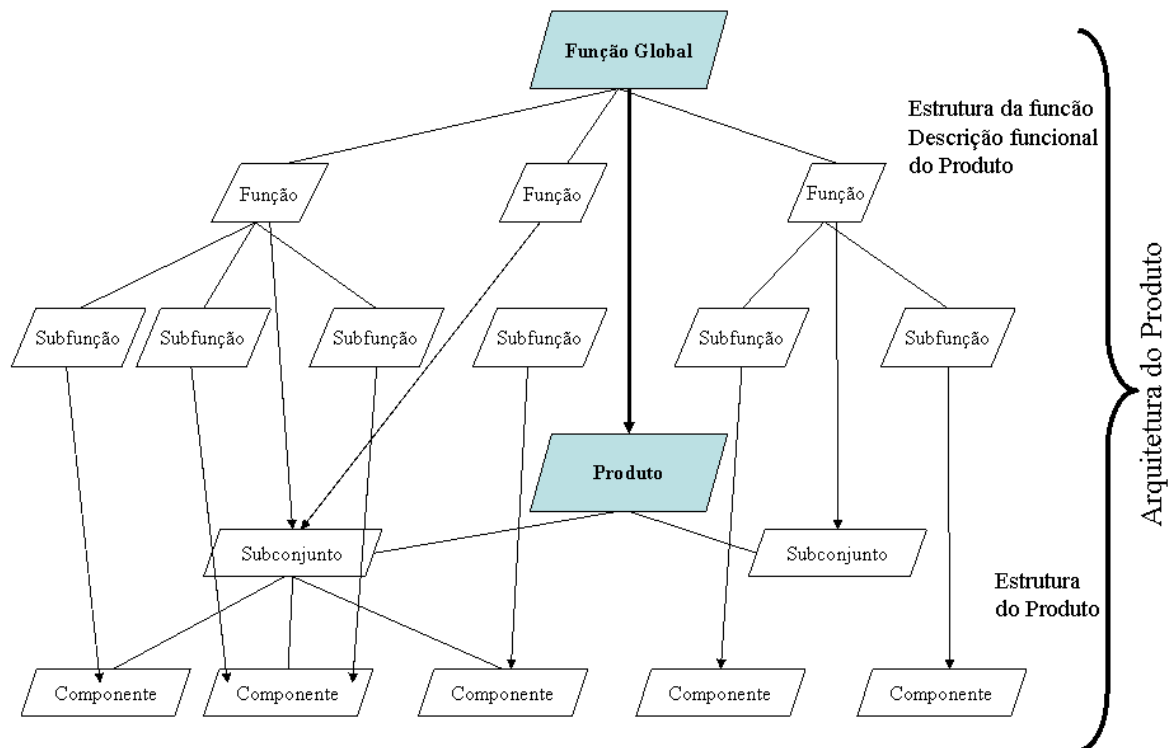


Figura 3.2.1 : Arquitetura do produto. (Pahl et al, 2005)

A arquitetura é definida depois da definição do mercado alvo, entre a fase conceitual de desenvolvimento e o projeto de sistemas, buscando coerência com a estratégia da empresa, por exemplo: atualização do produto, custo e etc. A arquitetura é classificada como integral e modular. Na arquitetura modular existe a relação um a um entre função e componente e o desenvolvimento do produto permite alterar um módulo sem necessariamente alterar outro. Na arquitetura integral o projeto é orientado para otimizar o produto, seria o desenvolvimento clássico onde um componente não pode ser feito sem considerar o outro. Inclui interações complexas, não um para um, entre funções e componentes.

Miguel (2005) também declara que na arquitetura integral as interações entre seus componentes não são bem definidas e as mudanças de projeto impactam com mais abrangência. Na arquitetura modular as interações entre módulos são bem definidas e quaisquer mudanças de projeto são mais bem absorvidas pelos módulos.

Para Pahl et al.(2005) a arquitetura do produto pode ser utilizada para descrever a modularidade do produto e pode ser classificada com base na independência funcional e física de seus componentes.

A arquitetura de produto pode ser visualizada como a fundação do produto, pois a plataforma de produtos e as famílias de produtos se apóiam na sua existência. (Onuwaje, 2004)

Ulrich e Eppinger (2000) estabelecem quatro passos para criar uma arquitetura modular:

1) Criar um esquema do produto: desenvolvendo um modelo conceitual de componentes e funções.

2) Reagrupar os componentes dentro dos módulos de acordo com:

a) precisão de montagem, dois componentes devem estar no mesmo módulo quando for necessária uma montagem com precisão. Evitar na linha de montagem operações que requerem precisão.

b) divisão de funções, quando duas funções são compartilhadas pelos mesmos componentes, é melhor gerenciá-las em um mesmo módulo.

c) similaridades técnicas, desenvolver módulos baseados em similaridades técnicas ou com vantagens para produção.

d) localização da alteração, separar componentes com alto risco de alteração.

e) variedade adaptável, isolar componentes que são diferentes de um produto para outro.

f) favorecer padronização, unificar um módulo se os mesmos componentes são compartilhados entre produtos.

3) Criar um leiaute geométrico, observar o leiaute ou esboço do projeto para ajudar a detectar os módulos e interfaces.

4) Identificar interações fundamentais no esquema, encontrar as fortes relações no modelo conceitual que ajudará a encontrar os módulos e os grupos de pessoas responsáveis por eles.

Du et al. (2001) analisam o desenvolvimento de produtos através da estrutura conceitual da arquitetura de família de produtos, incluindo toda organização lógica da geração de família de produtos. Apresentam vários métodos com respeito à customização de produtos baseados na arquitetura modular e na *configure-to-order* para desenvolvimentos de produtos. Propõem uma metodologia chamada de Estrutura de Geração de Produtos, como sustentação para a arquitetura de família de produtos, essa estrutura é como uma plataforma que adapta o produto as necessidades individuais gerando as variantes do produto com uma estrutura comum.

Conforme abordagem de Du et al. (2001) na revisão da literatura, o desenvolvimento de produtos com variantes e famílias de produtos pode ser classificado como: plataforma de produtos, arquitetura de produtos e arquitetura de família de produtos.

Plataforma de produtos é definida sob várias perspectivas, como a base de sustentação para o desenvolvimento de famílias de produtos e como algo físico que abriga muitos elementos de produtos similares.

Arquitetura de produtos é definida como o arranjo entre os componentes físicos e suas respectivas funções de um produto e a interação dessas unidades.

Arquitetura de família de produtos é definida como a organização lógica da família de produtos sob pontos de vistas, como engenharia, vendas etc. No contexto de customização de produtos em massa, pode-se definir como o equilíbrio entre comunizar e distinguir características ou ainda separar o que são comuns e o que são diferentes entre os membros da família, bem como entender os critérios para derivação das variantes de produtos.

Conforme Du et al. (2001), a arquitetura de famílias de produtos consiste de três elementos: base comum, fator de diferenciação e mecanismos de configuração.

Base-comum: refere-se à divisão correta dos elementos dentro da família de produtos. Os elementos podem ser divididos em funções, características, sob a perceptiva de vendas ou do cliente. Estruturas comuns e componentes comuns podem ser divididas sob critérios de engenharia, formando a base do desenvolvimento da família de produto.

Fator de diferenciação: são os elementos básicos que tornam os produtos diferentes uns dos outros, são esses fatores que originam as variantes dos produtos. Podem ser abordados sob a perspectiva do cliente que determinam as características opcionais, acessórios ou valores selecionáveis. Na visão de engenharia pode ser incorporado em distintas relações estruturais e/ou nos vários módulos com diferentes performances funcionais.

Mecanismos de configuração: definem as regras para as derivações de variantes do produto. Podem ser identificados pela seleção de restrições, onde as restrições são identificadas na combinação de opções. Pela identificação das condições, define a condição sob a qual a variante do produto deve ser usada a fim de executar as características requeridas do produto. Pela geração de variantes, que se refere à forma de incorporar a distinção do produto focando a estrutura do produto, sendo que cada variedade satisfeita deve ser relativa a um fator de diferenciação.

Ulrich (1995) declara que arquitetura do produto é particularmente relevante para pesquisa e desenvolvimento funcional de uma empresa, porque as decisões sobre arquitetura são tomadas nas fases iniciais do processo de inovação. Discute a conexão da arquitetura do produto com cinco áreas gerenciais: modificação do produto, variantes do produto, padronização de componentes e o gerenciamento do desenvolvimento do produto. Apresenta os conceitos e fundamentos sintetizando os fragmentos da teoria existente dentro de uma nova estrutura para compreensão da arquitetura do produto. Conclui que o desempenho das empresas de manufaturas está relacionado à arquitetura do produto e discute como estabelecê-la. Na maioria dos casos, a escolha pela arquitetura não recai somente entre as arquiteturas completamente modular ou completamente integral, mas especialmente focada em quais elementos funcionais devem ser tratados como modular e quais elementos devem ser tratados como integral. Seguem alguns conceitos do trabalho de Ulrich (1995).

Como definição de arquitetura de produto, apresenta três passos práticos que a caracterizam:

Arranjo funcional dos elementos.

Mapeamento dos elementos funcionais com os componentes físicos.

A especificação das interfaces entre os componentes físicos.

Arranjo funcional dos elementos ou também chamado de estrutura funcional dos elementos, são descrições dos princípios físicos de trabalho no qual o produto foi baseado. Essas estruturas podem ser criadas em diferentes níveis de abstração, podem acontecer casos em que dois produtos ao executarem a mesma função tenham diferentes estruturas funcionais. Como exemplo, Ulrich (1995) cita a estrutura funcional de um trailer, mostrada na figura 3.2.2.

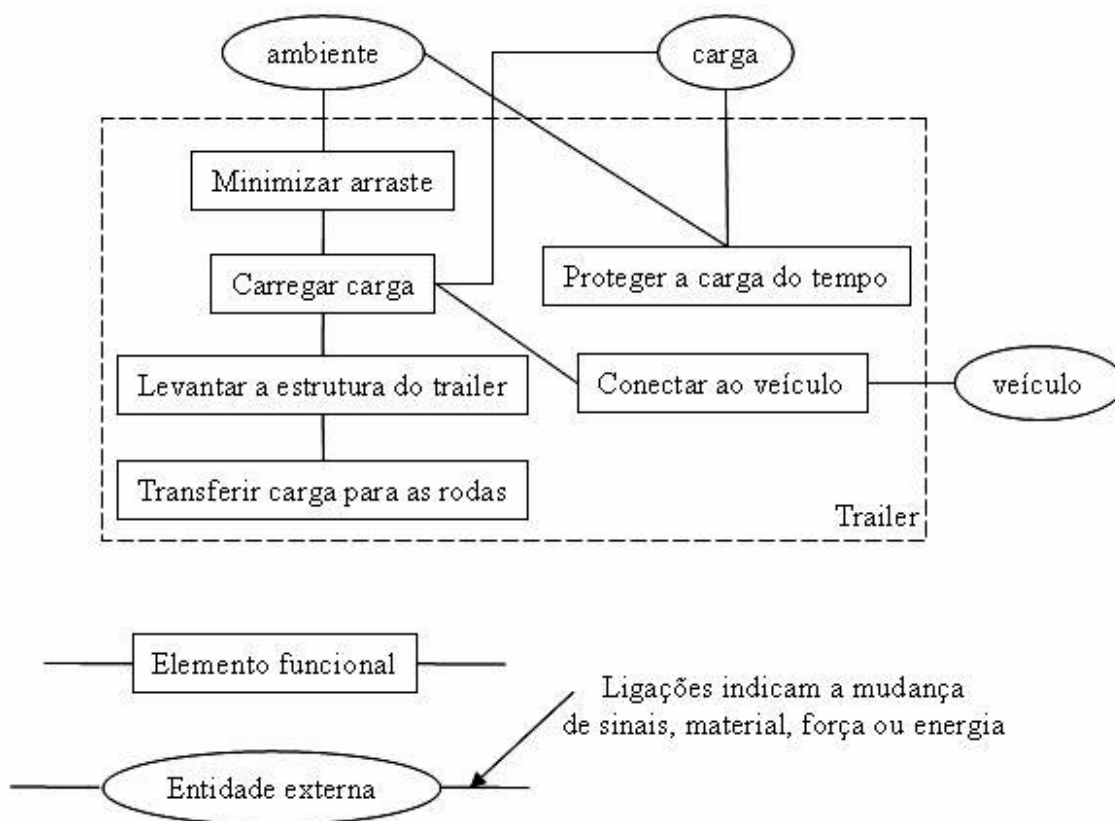


Figura 3.2.2 : A estrutura funcional de um trailer.(Ulrich, 1995)

A segunda parte da arquitetura do produto segundo Ulrich (1995) é o mapeamento dos elementos funcionais com os elementos físicos, que pode ser um a um, um com vários, ou vários com um, como mostram as figuras 3.2.3 e 3.2.4, exemplificando as arquiteturas modular e integral já mencionada anteriormente.



Figura 3.2.3 : Uma arquitetura modular exibindo um mapeamento um a um entre funções e seus componentes. (Ulrich, 1995)

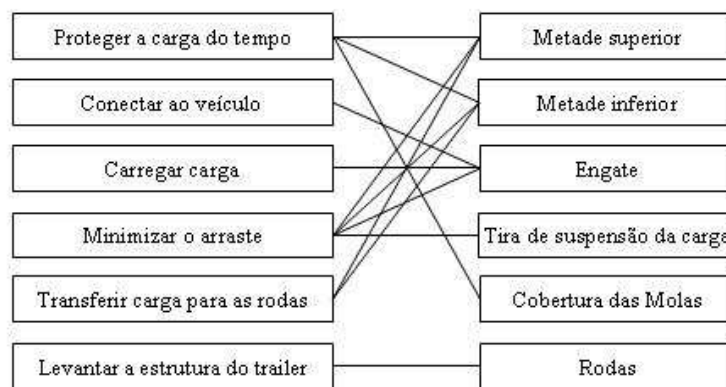


Figura 3.2.4 : Uma arquitetura integral exibindo um mapeamento complexo entre funções e seus componentes. (Ulrich, 1995)

A interação dos componentes é conectada pela interface entre eles. A interface pode envolver conexões geométricas entre dois componentes, como exemplo um par de engrenagens ou ainda a conexão pode ser pelo não contato, como exemplo o controle remoto da TV. As especificações das interfaces incluem o dimensionamento das superfícies de contato entre os dois componentes, a posição e as dimensões do elemento de fixação e a especificação do esforço que pretende resistir. Todas as especificações das interfaces devem seguir um protocolo que podem aderir a um protocolo padrão conhecido, ou ainda pode ser definido para uma linha de produtos que, não necessariamente, atenderá outros padrões externos.

A arquitetura modular usa interfaces desacopladas, isto é, se um módulo sofrer alteração não implica em alterar o outro módulo que está conectado a ele. Esse princípio provê independência entre os módulos e o mapeamento funcional/físico um para um. Na arquitetura integral é o oposto, as interfaces são do tipo acoplado e a alteração de um componente implica

em alterar os demais componentes periféricos, o que justifica um mapeamento funcional/físico mais complexo.

Segundo Ulrich e Eppinger (2000) os diferentes tipos de modularidade baseiam-se na forma de interação entre os módulos:

Arquitetura *slot-modular* refere-se à situação onde cada interface entre módulos são de tipos diferentes e vários módulos podem ser intercambiáveis. Como exemplo o rádio do veículo que executa uma função, mas sua interface é diferente dos outros módulos do veículo. Figura 3.2.5.

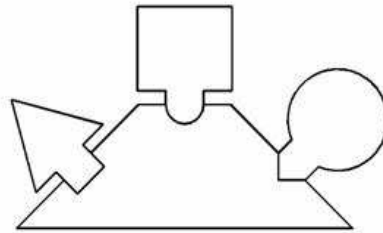


Figura 3.2.5 : Arquitetura *slot-modular*.(Ulrich e Eppinger, 2000)

Arquitetura *bus modularity* existe quando plataforma que possui interfaces iguais conecta-se a módulos diferentes. Como exemplo as conexões USB do computador. Figura 3.2.6.



Figura 3.2.6 : Arquitetura *bus-modularity*.(Ulrich e Eppinger, 2000)

A arquitetura *sectional-modular* é aquela que todas as interfaces são iguais, mas não existe nenhum módulo único que se conecte a todos. Como exemplo os biombo de escritório. Figura 3.2.7.

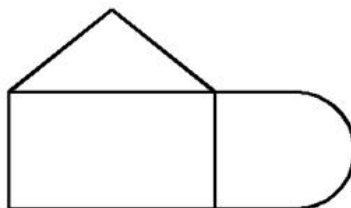


Figura 3.2.7 : Arquitetura *sectional-modular*.(Ulrich e Eppinger, 2000)

Abordou-se até o momento o conceito de arquitetura do produto, existem dois tipos de arquitetura a modular e a integral, discutiu-se como são estruturadas, suas características e a importância no desenvolvimento do produto. Uma ferramenta importante que contribui para o desenvolvimento do produto dentro dessas arquiteturas é o conceito de plataforma de produtos. Assim como o conceito de famílias de produtos, já abordado nesse capítulo, a plataforma de produtos tem um papel importante no desenvolvimento de produtos, pois cada vez mais, empresas se esforçam em lançar produtos derivativos que proporcionam redução no tempo de desenvolvimento e padronização de componentes gerando economia na produção de larga escala.

Otto (2005) argumenta que ao invés de se desenvolver um produto único, devem-se desenvolver vários produtos, em um processo de plataforma de produtos. Plataforma de projetos desenvolve a base de onde muitos produtos derivarão mais tarde e deve estar em sintonia com o planejamento estratégico da empresa. Existem diferentes projetos derivativos, onde múltiplas variantes são desenvolvidas dentro da organização de desenvolvimento de projetos com curto tempo para a demanda do mercado. Na figura 3.2.8, Otto exemplifica que o desenvolvimento de um produto único pode ser expandido em muitos produtos, mas o desenvolvimento de família de produtos pode se expandir em famílias de produtos.

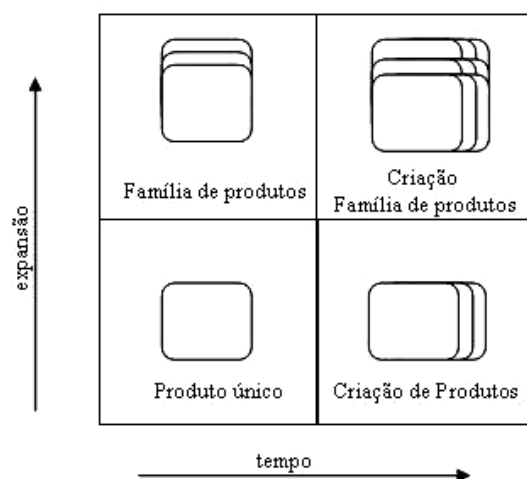


Figura 3.2.8 : Expansão de produtos. (Otto, 2005)

Segundo Pahl et al. (2005) a primeira indústria a utilizar o sistema de plataforma foi a automobilística. Como plataforma ele define como um sistema produtivo capaz de desenvolver produtos variantes com curta duração do ciclo de vida do produto, no qual se aproveitam

potenciais de racionalização com base em componentes estruturais por meio de um planejamento objetivo. É definida por critérios funcionais e constitui o máximo divisor comum de uma família de produtos. Conforme as características mencionadas, o sistema de plataforma não pode ser qualificado como idêntico ao sistema modular, pois as variantes do sistema plataforma não são basicamente compostas por arranjos de módulos preexistentes.

Gonzalez et. al (2000), definem plataforma de produto como um conjunto de partes, subsistemas, interfaces e processos de manufatura que são compartilhadas entre um conjunto de produtos e que permitem o desenvolvimento de produtos derivados com economia de custo e tempo. Isso inclui que o desenvolvimento de um novo produto através de uma plataforma de produtos está espalhado por todos os departamentos de uma companhia.

Lahr (2004) declara que a plataforma pode ser vista como a fundação das famílias de produtos. Dessa maneira é muito importante despende a maior parte do esforço, e provavelmente a maior parte dos gastos, para desenvolver a plataforma, o que força as companhias a incorporá-las em diversos produtos. É também importante neste estágio de desenvolvimento o envolvimento das necessidades do cliente e das propriedades do produto no desenvolvimento de uma plataforma de produtos.

Neste estágio do desenvolvimento é necessário trabalhar com ferramentas tais como desdobramento da função de qualidade (Quality Function Deployment - QFD), por exemplo, ou outras. Caso contrário, muitas mudanças precisarão ser feitas posteriormente. Uma plataforma de produtos é a base comum para todos os produtos individuais dentro de uma família de produtos. (Halmann et al., 2003).

Para o desenvolvimento de uma plataforma de produtos, muitos aspectos têm de ser considerados. É importante gerenciar e equilibrar o trabalho de desenvolvimento em três níveis: família de produtos, produtos e componentes. (Sundgren, 1998)

Este equilíbrio também deve ser levado para dentro da companhia. As equipes de desenvolvimento têm de trabalhar juntos em uma rede que proporcione eficiência e o fluxo de informações. Economias de tempo e produções mais bem-sucedidas pode ser o resultado de

eficiência e de troca de informações sustentada entre diferentes departamentos da produção. (Lahr, 2004).

Um tópico importante no estudo de plataforma de produtos é a interface entre componentes. Como a interface é a ligação entre os módulos/componentes de um produto, o grau de standardização define a compatibilidade entre os componentes. Langerak et. al. (1997) relaciona diretamente o sucesso da plataforma com um bom projeto de interface e empresas que desenvolvem produtos com interfaces melhores conduzem a melhores produtos.

3.3 Módulos e interfaces

As definições de módulos e interfaces e sua importância já foram discutidas anteriormente. Abordando-se inicialmente as classificações e os métodos elaborados para tentar resolver talvez que seja a maior dificuldade do projeto modular, que é, como agrupar os componentes em módulos e como definir as interfaces para atendimento dos conceitos modulares, tais como: ser intercambiável, assumir várias funções, acoplar a vários módulos, etc.

Começando por Pahl et al. (2005), a primeira classificação dos módulos é se o critério de desenvolvimento foi atender funções específicas ou critérios de produção, isto é, se a configuração do módulo foi definida favorecendo o processo produtivo. Dessa forma, tem-se os módulos de função e de produção. Os módulos de função podem ser classificados como:

Módulos Básicos são obrigatórios para execução da função global.

Módulos Auxiliares são elementos de ligação e integrantes, executam funções auxiliares.

Módulos Especiais são aqueles que executam funções isoladas, que não se repete em todas as variantes da função global.

Módulos de Adaptação são necessários para ajustes e condições complementares.

Nos módulos de produção existe um tipo de módulo conhecido como fictício. Módulos fictícios são aqueles que se mantêm inalterados mesmo quando no produto há variantes com escalonamento dimensional. Por exemplo, o mancal de uma turbina industrial.

Conforme Pahl et al. (2005), esses módulos fictícios não devem ficar restritos à área de projetos, mas devem subsistir como conjuntos da produção na preparação do trabalho e seqüenciamento programado da produção e incorporado a moldes de fundição ou a sistemas mais complexos. Dependendo da demanda, o grau de concretização pode ser definido de forma diversificada com a possibilidade de manter módulos dos sistemas modulares, na forma virtual (projeto) ou como componente real no estoque.

Persson (2004) argumenta a existência de módulos-guias, que são propriedades na modularização e servem como base para avaliação das subfunções ou soluções técnicas, auxiliando na determinação dos módulos no produto. Segundo Erixon (1998), esses módulos-guias são de fundamental importância quando se utiliza o método de modularização MFD (Distribuição Modular das Funções) e podem ser classificados conforme a área de aplicação:

1) Desenvolvimento de produto e projeto

- Carry-over → ser reusado para próxima geração
- Evolução tecnológica → permitir novas soluções dos fornecedores
- Mudanças planejadas do projeto → poder ser aperfeiçoado separadamente

2) Variância

- Especificações técnicas → isolar as variantes
- Estilo → isolar projeto, marca etc.

3) Produção

- Unidade comum → proteger altos volumes
- Reuso de processo e/ou organização → proteger processos ou recursos escassos

4) Qualidade

- Teste separado das funções → poder ser testado separadamente

5) Compras

- O fornecedor oferece uma caixa preta → poder ser desenvolvido, produzido, etc por um terceiro

6) Pós-vendas

- Assistência técnica e manutenção → ser facilmente substituído no campo
- Atualização → aumentar o pós-venda
- Reciclagem → proteger o meio ambiente

Portanto, subfunções com poucos módulos-guias são mais fáceis de serem integrados ou agrupados, desde que haja igualdade nos padrões dos módulos-guias e que não haja contradições entre as subfunções, ou seja, um “carry-over” não deve ser agrupado com uma “inovação tecnológica”, pois isso poderia impossibilitar o desenvolvimento gradual a baixo custo, Erixon (1998). Subfunções com módulos-guias únicos ou múltiplos têm um padrão de requisitos complicado, e deve ser considerado para formar um módulo em si mesmo, ou a base para um módulo.

Segundo Whitfield et al. (2002), o desafio para a pesquisa de projeto modular é identificar uma estrutura modular otimizada, bem como agrupar os seus componentes em módulo. Com foco na modelagem das dependências e identificação dos módulos através de um sistema automatizado, desenvolve um método de dois estágios para facilitar a identificação da estrutura modular. O primeiro estágio calcula um valor para o critério de agrupamento e pode ser usado como valor de dependência dos componentes. O segundo representa o grau de modularidade do grupo de componentes. A abordagem permite identificar a hierarquia da modularidade sem a exigência de qualquer conhecimento adicional de domínio específico dentro do sistema.

O objetivo é facilitar a identificação dos módulos com respeito aos requisitos modulares: modularidade inerente, configurações modulares potencialmente diferentes e diferentes níveis hierárquicos de modularidade na estrutura do produto. A maneira de se fazer isso é combinar os pontos fortes tanto do projeto – em termos de conhecimentos específicos do domínio e do

problema – quanto do suporte computadorizado, em termos de suas capacidades avançadas para análise e cálculos rápidos.

Avalia-se a modularidade a partir do equacionamento das dependências externas e das dependências internas dentro dos módulos. Através da subtração dessas equações e da derivação do objeto em relação às dependências internas e externas, é possível avaliar a modularidade através da função MSI “Indicador de Força do Módulo”. (Apresenta-se dois estudos de caso para validação do método: sistema de Climatização e um Alternador).

Dobrescu e Reich (2003) demonstram um método de projeto de leiaute de um grupo dos produtos. O aspecto geométrico da otimização da família de produto é enfatizado, mas os aspectos funcionais relacionados às características de produto e às necessidades de cliente são também dirigidos devido à manifestação deles no leiaute. O espaço da busca do projeto é explorado usando as regras que alteram a geometria do componente e conseqüentemente, funcionalidade da forma. A busca para o projeto otimizado é executada usando uma simulação. Dadas as formulações ou os ajustes dos objetivos diferentes dados dos parâmetros, o método pode ser usado para explorar o espaço da solução. O estudo se concentra em projetar a arquitetura da família de produto incluindo seu projeto detalhado do leiaute. O projeto final consiste em uma plataforma comum, composta de diversos módulos, compartilhados por todos os membros da família, e os módulos que são montados para obter as variantes. Há os módulos que são compartilhados pela maioria das variantes e módulos particulares para variante única, criando uma progressiva diferenciação entre as variantes.

Höltä et al. (2003) desenvolveram um método de encontrar módulos comuns chamado de dendrogramas. O objetivo é encontrar um módulo comum para toda a família de produtos, de modo que a sua mudança pode realizar o aperfeiçoamento em toda uma família de produtos.

Dendrograma é um algoritmo de cinco passos que segue o método de fluxo, mais do que o método de decomposição funcional e descrição do produto a ser modularizado. Este método ignora funções do produto, pois funções não são tão importantes, considerando apenas o fluxo de entrada e de saída. Concomitantemente, esclarece o fluxo do produto com relação ao fluxo de saída do produto (o trabalho que o produto tem de executar), e os requisitos de entrada, de modo

a obter esse fluxo de saída. Este algoritmo pode ser armazenado no computador para uso fácil e repetido do método para diferentes produtos.

A interface é a conexão entre módulos e a especificação das interfaces é visto por muitos como o principal problema do processo de modularização. A definição de interfaces, de acordo com Andersson e Sellgren (2004), divide-se em dois tipos principais:

- Interface técnica – uma superfície funcional técnica dentro ou sobre um sistema técnico que interage com outra superfície funcional técnica dentro do sistema técnico ou no meio ambiente.
- Interface interativa – uma superfície funcional ergonômica ou comunicativa em um sistema técnico, que interage com um ser humano, através de um dos seus sentidos.

Superfícies funcionais são definidas como superfícies cujo propósito principal é interagir com outras superfícies ou com um ser humano.

De acordo com Mikkola (2000), a especificação das interfaces deve ser bem definida com tolerâncias que estejam suficientemente largas para permitir a um componente interfacear com outro componente, sem compromisso da funcionalidade do novo componente, criado pela combinação destes componentes.

Definindo as interfaces no início do processo de desenvolvimento e projetando interfaces que sejam robustas e estáveis ao longo do tempo, o desenvolvimento de futuras variantes do produto é facilitado. Este é um resultado da possibilidade do desenvolvimento de módulos independentes uns dos outros, Erixon et al.(2004). Um dos principais benefícios desta possibilidade é a redução do lead time de desenvolvimento e manufatura do produto, que resulta em uma redução no tempo para o lançamento do produto, que é um ponto importante no aumento de participação de mercado. Quando a interface é definida, a sua forma física será posteriormente incorporada ao módulo.

De modo a capacitar a avaliação e seleção da melhor localização de uma interface, o tipo de interface deve ser determinado. Os seguintes tipos de interfaces que ocorrem entre módulos são descritos por Sanchez (2000) e citado por Persson (2004).

- Interfaces de fixação – definem como um componente se liga fisicamente a outro.
- Interfaces espaciais – definem o espaço físico (dimensão e posição) que um componente ocupa com relação a outros componentes.
- Interfaces de transferência – definem a maneira que um componente transfere potência mecânica ou elétrica, fluidos ou outro fluxo primário para outro componente.
- Interfaces de comunicação e controle – definem a maneira pela qual um componente informa outro da sua condição atual e a forma que outros componentes comunicam um sinal para mudar a condição atual do componente original.
- Interfaces de circunvizinhança – definem os efeitos, freqüentemente não intencionais, que a presença ou funcionamento de um componente, podem ter sobre o funcionamento de outro (por exemplo, calor, campos magnéticos, vapores corrosivos, radiação, etc.).
- Interfaces ambientais – definem a faixa de condições ambientes de uso (por exemplo, temperatura ambiente, umidade, altura em relação ao nível do mar, etc.) na qual um componente é projetado para ser utilizado.
- Interfaces com o usuário – definem as maneiras específicas nas quais os usuários vão interagir com um produto.

No processo de projeto modular, as interfaces entre os módulos têm uma influência vital sobre o produto final e sobre a flexibilidade dentro do agrupamento. Sendo assim, a avaliação das conexões de interface é um fator importante para a seleção do conceito modular, Erixon (1998).

Hillström (1994) esboçou um método que auxilia o projetista a encontrar e selecionar o melhor local para a interface em um produto. O método é aplicar o Projeto Axiomático descrito em Suh (1990), e usa o axioma da independência para escolher entre diferentes localizações da interface. O primeiro passo no método é projetar o módulo com várias localizações de interface diferentes, usando o axioma de independência, de acordo com o Projeto Axiomático. As DPs de interface devem ser decompostas tanto quanto possível, de preferência até que as superfícies funcionais (já abordadas) da interface sejam estabelecidas. O passo seguinte é avaliar a localização da interface, utilizando uma ferramenta de modelagem de produto. A ferramenta

consiste de quatro tipos de objeto: objetos FR (contorno tracejado) que representam os Requisitos Funcionais, objetos C (contorno pontilhado) que representam restrições (por exemplo, espaço limitado), objetos DP (contorno sólido) representando Parâmetros de Projeto (ou seja, a solução física), e objetos de interface DP (contorno sólido grosso), representando os Parâmetros de Projeto que constituem a interface do módulo. Cada acoplamento no axioma de independência é representado por uma linha fina entre DPs e FRs. A abordagem da avaliação é examinar como as interfaces afetam diferentes funções do módulo. Soluções com muitas interdependências (acoplamentos rotulados na figura) entre FRs do módulo e DPs de interface não são aceitáveis. Em um projeto aceitável, de acordo com o Projeto Axiomático, o mapeamento entre os FRs e DPs é tal que cada FR pode ser satisfeito sem afetar qualquer outro FR.

Neste estágio, o número de soluções de interface foi reduzido. Para selecionar a melhor entre as soluções restantes, uma avaliação é feita para investigar como as superfícies funcionais da interface afetam a simplicidade do projeto. Nesta etapa, o software DFMA da Boothroyd Dewhurst Inc. (1991, 1992), é proposto para a estimativa dos custos de manufatura e montagem, que serve como uma base para a escolha final da solução com os menores custos de manufatura e montagem. Para finalizar, interfaces que são simples e robustas são preferidas. Entretanto, de acordo com Hillström (1994), este método somente tem sido usado em exemplos de produtos simples, para produtos mais complexos ainda deve ser mais bem investigado. A figura 3.3.1 ilustra o método.

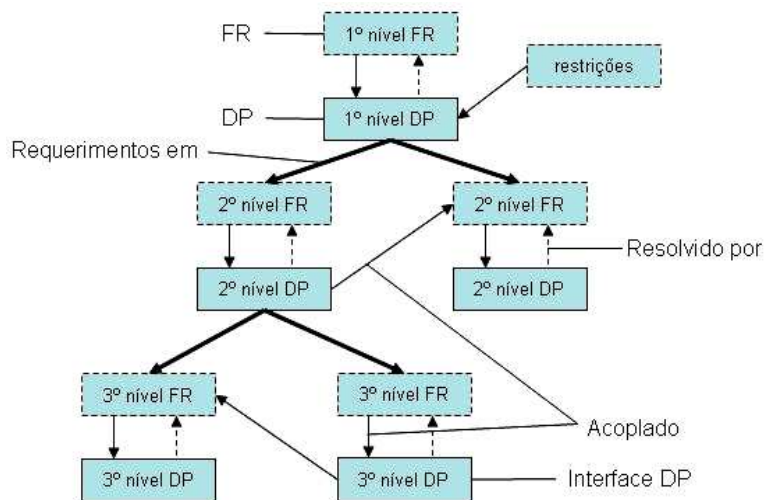


Figura 3.3.1 : Ferramenta de modelagem de produto para avaliação da localização da interface. (Hillström, 1994)

Sosa et al.(2003) destacam a importância de identificar as interfaces do projeto durante o estágio de planejamento do projeto, de modo que as equipes de projetos correspondentes sejam controladas eficientemente durante a execução do mesmo. Propõem um método de pesquisa que permite estudar como a modularidade do sistema impacta interações da equipe de projeto.

O método consiste em três passos principais:

- 1) capturar a arquitetura do produto pela documentação do projeto das interfaces.
- 2) capturar a organização do desenvolvimento pela documentação das interações da equipe.
- 3) acoplar a arquitetura do produto com a organização do desenvolvimento comparando o projeto das interfaces com as interações da equipe.

Blackenfelt e Sellgren (2000) abordam o desenvolvimento de interfaces dos módulos para atender as variantes do produto. Combina métodos de otimização com projeto robusto e Elementos Finitos. Aborda a necessidade de definir as interfaces na fase inicial do projeto.

O objetivo é apresentar uma visão de simulação computacional no processo de projeto robusto de interfaces dos módulos para variantes de produtos. Como pode ser gerado o conceito de interface, escolhida e otimizada pela combinação de Elementos Finitos, método de otimização da topologia e da forma com Projeto Robusto. Sugere que alguns controles e exigências na definição das interfaces sejam definidas no início, no entanto o projeto detalhado da interface é deixado como uma caixa preta até que as informações de acoplamento dos módulos estejam disponíveis. O método é baseado na idéia de que é necessário expandir o espaço de soluções, então escolhida a mais promissora solução reduz-se o espaço de solução pelos métodos mencionados anteriormente.

A interface deveria não somente ser projetada para a variedade de módulos e definidas dentro de alguns limites, mas também ser especificada antes, para permitir atividades paralelas no começo do processo. Mais tarde, quando mais informações sobre os módulos e suas variantes estão disponíveis, a interface é conceituada pela otimização topológica e detalhada pela otimização do contorno que é complementada pela técnica do Projeto Robusto para aumentar a comunização das interfaces para a gama de variantes.

3.4 Métodos de Modularização

Modularizar produtos, isto é, tornar os produtos modulares tem sido discutido como uma forma de trazer benefícios às indústrias de manufatura. Modularizar não é uma tarefa fácil, pois os projetistas de sistemas modulares têm que conhecer os mecanismos internos do produto global para desenvolver regras necessárias para execução das funções modulares, (Baldwin e Clark, 2000).

Conforme Baldwin e Clark (2000), os métodos de modularização baseiam-se em três passos:

- 1) Formulação das regras de projeto
- 2) Desenvolvimento paralelo dos módulos
- 3) Teste e integração, conforme figura 3.4.1.

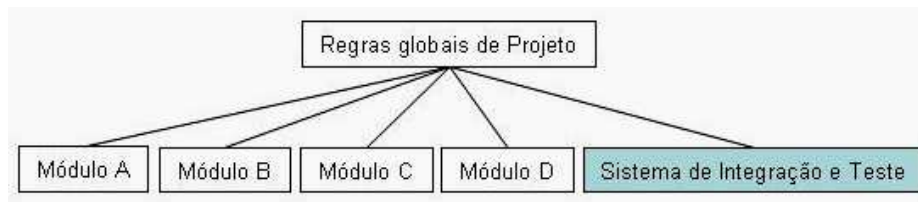


Figura 3.4.1 : Dois níveis da arquitetura do projeto modular. (Baldwin e Clark, 2000)

Conforme figura 3.4.1, o primeiro passo é reunir as regras do projeto para todo o sistema, contendo as informações sobre a arquitetura, interfaces e o protocolo de testes e integração. Nesse passo é definida a representação e organização do sistema. O segundo passo de acordo com Baldwin e Clark (2000) é utilizar os operadores modulares no processo de modularização. São classificados conforme tabela 3.4.1.

Tabela 3.4.1 : Os seis operadores modulares. (Baldwin e Clark, 2000)

Operador	Definição
Divisor	Divide um sistema independente dentro dos módulos
Substituir	Substitui um módulo pelo outro
Adicionar	Adiciona um novo módulo ao sistema
Excluir	Exclui um módulo do sistema
Inverter	Cria uma nova regra e uma arquitetura modular
Conduzir	Torna um módulo compatível com dois ou mais sistemas.

Segundo Calcagno (2001), os seis operadores trabalham com vários tipos de regras e têm efeitos diferentes, proporcionando um grau de modularização ao sistema.

As ferramentas de modularização são usadas para resolver problemas de complexidade e variedade de produtos (Pirrung, 2004), também para dividir o produto em módulos adequados (Holmquist e Persson, 2003). Na tabela 3.4.2 segue um resumo das principais ferramentas, baseado no trabalho de Pirrung, (2004).

Tabela 3.4.2 : Métodos de Modularização baseado na classificação de Pirrung (2004).

Ano	Autor	Ferramenta de modularização
1989	Goldberg	Algoritmo Genético (GA)
1990	Suh	Projeto Axiomático (AD)
1994	Kahmeyer	Projeto Fractal de Produto (FPD)
1994	Pimmler & Eppinger	Matriz de Estrutura de Projeto (DSM)
1996	Pahl & Beitz	Desenvolvimento Modular de Produto (MPD)
1998	Huang & Kusiak	Modelando a Modularidade do Produto (MPM)
1998	Erixon	Distribuição Modular das Funções (MFD)
2000	Stone	Métodos Heurísticos (HM)

3.4.1 Projeto Fractal de Produto (FPD), conforme Pirrung (2004).

Um fractal é definido como “um módulo independente com funcionalidade precisamente definida”, Kahmeyer et al.(1994). O método é composto por cinco passos:

- 1) Análise do produto, limites relevantes são estabelecidos e estrutura funcional é analisada, os resultados são a definição dos representantes das duas estruturas.
- 2) O projeto conceitual de produtos fractais alternativos é criado.
- 3) O projeto conceitual das interfaces é criado.
- 4) O método de produtos fractais é avaliado e validado.
- 5) Reprojeto e otimização.

Os critérios de validação têm de ser montados de acordo com os objetivos principais, tais como qualidade, montagem e desmontagem, projetos para a produção, função e assim por diante. A avaliação dos fractais mostra suas fraquezas, e estas devem ser corrigidas neste momento. Portanto, ferramentas como a análise através do FMEA são de muita utilidade neste ponto.

3.4.2 Distribuição Modular das Funções (MFD), conforme Pirrung (2004).

O método é composto por cinco passos:

- 1) Exigências dos clientes são clarificadas através do QFD.
- 2) Técnicas de solução são selecionadas (por ex.: Design Matrix or Functional-and-Means-Tree) para que funções e subfunções do produto sejam identificadas.
- 3) O conceito é gerado com auxílio da MIM (Modular Indication Matrix), os módulos são combinados de acordo com o objetivo de modularização.
- 4) Os conceitos são comparados com a situação inicial e avaliadas as interfaces entre os módulos.
- 5) Cada módulo é aprimorado.

Além desses pontos, outros fatores tais como a Complexidade da Interface, a Complexidade da Seleção, o Lead Time, a Flexibilidade das Variantes, etc. podem ser utilizados para avaliar os conceitos. No último passo do método cada módulo é aperfeiçoado. Neste passo, cada módulo unitário é considerado para aperfeiçoamento, de acordo com a importância específica de cada módulo. Dessa maneira, a matriz funciona como um indicador. Os cinco passos do método MFD podem variar quanto à sua seqüência, e iterações necessárias para encontrar uma solução aceitável.

Um importante elemento nesse método é o uso de módulos-guias no planejamento como no projeto do produto. O Mapa de gerenciamento do produto (PMM) mostra uma visão ampla do processo de modularização. Usa o DPM junto com o QFD e o MIM. Através do PMM é fácil encontrar as conexões entre as necessidades dos clientes, propriedades do produto, soluções técnicas, módulos-guias e módulos, conforme ilustra a figura 3.4.2.

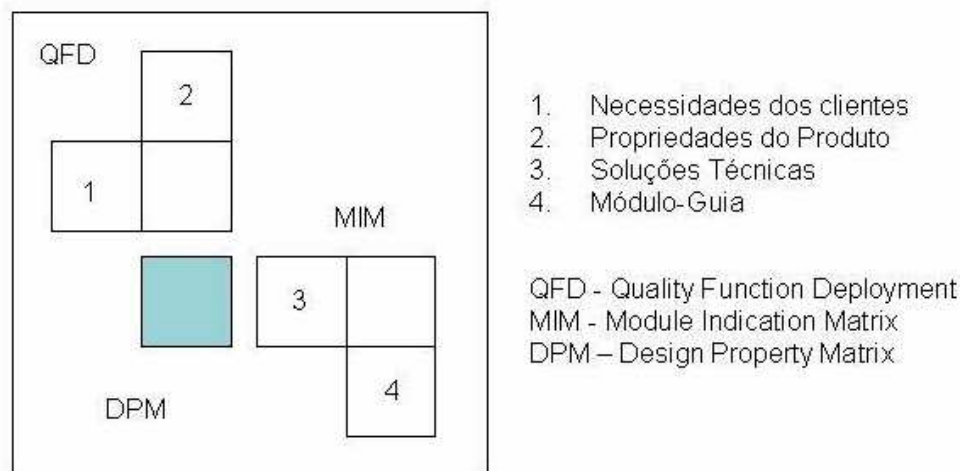


Figura 3.4.2 : Mapa de gerenciamento do produto (PMM). (Erixon et al., 2004)

3.4.3 Modelando a Modularidade do Produto (MPM), conforme Pirrung (2004).

O método é baseado na matriz algébrica, duas matrizes são usadas para estruturar as interações entre as partes do produto e estruturar a combinação de interações, gerando um módulo que é a base direcionada pelo foco da modularidade, por exemplo: reciclagem.

1) Duas matrizes são criadas com o mesmo número de linhas que as partes especificadas do módulo. A cada interação entre duas partes é marcado na matriz, o mesmo na matriz combinatória.

2) A matriz de interação é rearranjada de forma triangular, deixando para baixo os pontos marcados. A matriz combinatória é rearranjada de forma que linhas e colunas tenham a sequência da matriz de interação. As partes marcadas combinadas ao longo da diagonal são combinadas em um módulo.

3.4.4 Matriz de Estrutura de Projeto (DSM), conforme Pirrung (2004).

O método permite analisar diferentes estágios da modularização.

1) O sistema é decomposto para que as relações entre os elementos sejam identificadas e marcadas em uma matriz.

2) A matriz de relações deve ser transformada em matriz triangular inferior, onde as relações marcadas estejam próximas a diagonal, com auxílio de algoritmo. Na matriz é possível identificar quais elementos são paralelos e quais podem ser acoplados, a partir disso o módulo pode ser criado. Na figura 3.4.3 exemplifica-se a DSM.

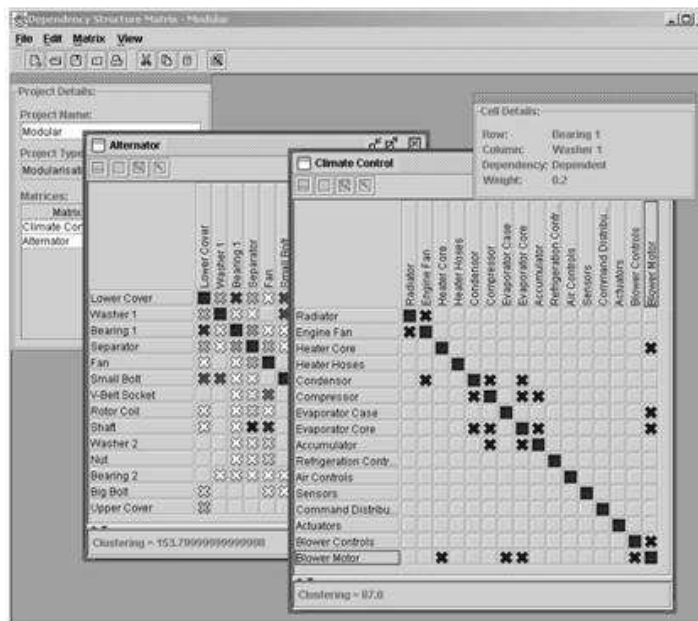


Figura 3.4.3 : Exemplo de Matriz de Estrutura de Projeto – DSM. (Whitfield et al., 2002)

3.4.5 Desenvolvimento Modular de Produto (MPD), conforme Pirrung (2004).

O método é composto por seis passos:

- 1) Clarificar as funções do sistema modular do ponto de vista tecnológico e financeiro.
- 2) São estabelecidas as estruturas funcionais e subdivididas em subfunções. Conforme a combinação das funções e subfunções, elas podem ser divididas em quatro grupos: funções básicas, auxiliares, especiais e adaptáveis.
- 3) As variantes e princípios do conceito são ajustados.
- 4) Devem ser avaliadas e selecionadas as variantes do conceito mais favoráveis.
- 5) Nesta etapa as soluções selecionadas têm que ser projetadas com suas funções e exigências da produção. Os custos devem ser examinados e o número das peças similares deve ser maximizado.
- 6) As documentações da produção devem estar preparadas, as peças numeradas e classificadas, bem como a lista de variantes dos módulos.

3.4.6 Projeto Axiomático (AD), conforme Dedini (2000).

O método procura delimitar o projeto de sistemas através de axiomas e presume que haja uma linguagem comum de pensamento a todos os campos de criação, consistindo de definições de palavras, dados específicos e conhecimento. O método presume a existência de quatro domínios:

- 1) Domínio do consumidor é composto pelas necessidades do consumidor.
- 2) Domínio Funcional é o conjunto de vetores representando os requisitos funcionais, que responderão as necessidades dos consumidores.
- 3) Domínio Físico é o conjunto de vetores que representam os parâmetros de projeto, que preenchem os requisitos do domínio anterior.

4) Domínio do processo é o conjunto de vetores que representam as variáveis do processo que controlaram os parâmetros de projeto do domínio físico.

3.4.7 Algoritmo Genético (GA), conforme Pirrung (2004).

O GA do sistema é genérico por natureza e usa técnicas orientadas ao objeto, permitindo a codificação de uma sequência de qualquer tipo de conceito. São métodos generalizados de busca e otimização que simulam os processos naturais de evolução, aplicando a idéia darwiniana de seleção. Difere dos métodos tradicionais de busca e otimização, principalmente em quatro aspectos:

- 1) GAs trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros.
- 2) Trabalham com uma população e não com um único ponto.
- 3) Utilizam informações de custo ou recompensa e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar.
- 4) Utilizam regras de transição probabilísticas e não determinísticas. A figura 3.4.4 exemplifica o método.

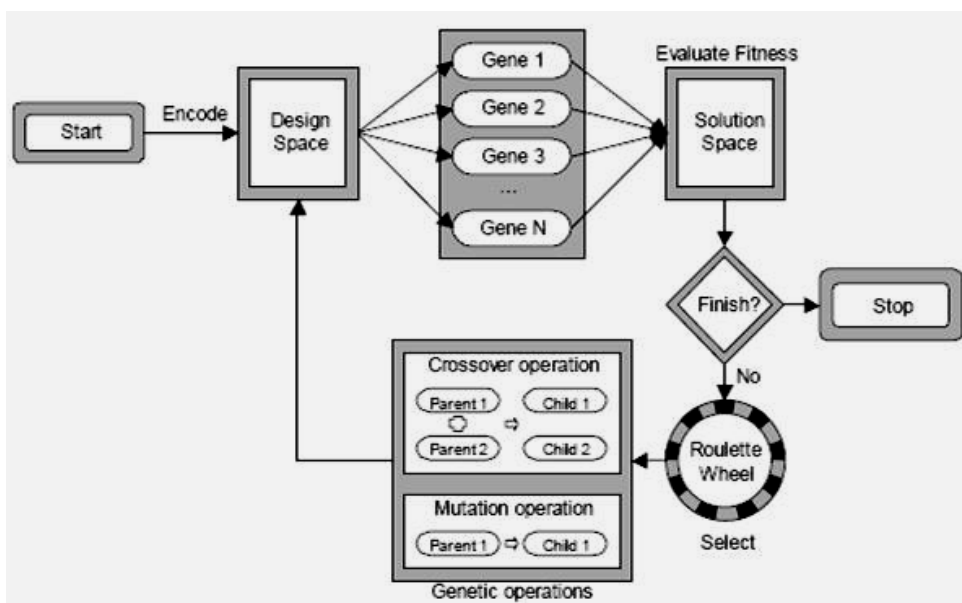


Figura 3.4.4 : Exemplo de Algoritmo Genético – GA. (Whitfield et al., 2002)

3.4.8 Método Heurístico (HM), conforme Padamati (2004).

O método trata de funções e subfunções do produto divididas nos módulos. Os grupos de subfunções são relacionados pelas observações dos fluxos, três heurísticas de identificação dos módulos são formuladas baseadas em observações:

- 1) Fluxo dominante, o grupo de subfunções pelo qual o fluxo passa desde a entrada até a saída do sistema, definindo o módulo.
- 2) Fluxo ramificado, grupo de funções paralelas que constituem os módulos e com cada uma de suas interfaces com o resto do produto.
- 3) Conversão-Transmissão dos Módulos, a conversão de subfunções ou grupo adequado de subfunções que constituem o módulo.

3.4.9 Discussões finais

Pirrung (2004) discute cinco dos oitos métodos citados na tabela 3.4.2. Os diferentes métodos de modularização, que diferem no seu alcance, seu procedimento, sua estrutura e no esforço necessário para utilizá-los. Além disso, alguns métodos lidam apenas com o próprio processo de modularização, outros métodos abrangem também outras limitações.

Os métodos de Modelagem da Modularidade do Produto (MPM) e de Matriz de Estrutura de projeto são similares. Estes lidam com a idéia básica de criação dos módulos, sem outras limitações, como por exemplo, financeiras. Portanto, esses métodos precisam de um trabalho extenso anterior e posterior à criação dos módulos. Estes têm a desvantagem de que o processo de modularização é separado, e informações podem ser perdidas entre os trabalhos anteriores, o processo de modularização e o trabalho posterior. Também é necessário mais esforço e a documentação não é tão clara, comparada com os métodos nos quais a modularização é integrada em todo o processo do projeto.

Estas são as razões pelas quais esses métodos não devem ser usados para produtos complexos. Sua melhor aplicação é em projetos de desenvolvimento pequenos e gerenciáveis, que permitam uma boa visão geral.

Os métodos de Projeto Fractal de Produto (FPD) e Desenvolvimento Modular de Produto (MPD) contêm passos mais elaborados do que o processo de modularização. Esses métodos também podem iniciar com uma análise clara do produto, e levar em consideração os resultados dessa análise no processo de modularização. Além disso, uma ordem de trabalho é incluída, a qual permite aperfeiçoamentos dos módulos já durante o processo de desenvolvimento. Esses métodos são complexos e necessitam de um departamento de desenvolvimento estruturado. Portanto, aplicam-se melhor a projetos de desenvolvimento maiores e mais complexos, pois o benefício nesses casos é maior.

O método de Distribuição Modular de Funções (MFD) é comparável aos métodos FPD e MPD, mas o método de MFD inicia um passo antes no processo de desenvolvimento, engloba todos os passos do processo de desenvolvimento – incluindo análise de mercado – e é o método mais abrangente entre os apresentados. Como os métodos FPD e MDP mencionados acima, sua melhor aplicação é no desenvolvimento de projetos complexos.

Capítulo 4

Metodologia de Desenvolvimento de Produtos

Antes de se falar sobre metodologia de projetos é necessário contextualizar os desafios que cercam o desenvolvimento de novos produtos. Com a acirrada disputa por mercado, a responsabilidade do sucesso ou fracasso de um produto cada vez mais se credita ao projeto. Produtos devem incorporar as necessidades dos clientes e serem flexíveis para adaptação e mudanças que ocorrem no mercado. Considerando que as empresas investem milhões em pesquisa e em tecnologia, as incertezas de um projeto devem ser tratadas com técnicas que as minimizem e diminuam os riscos de perder participação no mercado, diminuindo os lucros.

Neste contexto, segundo Filho (2004), a atividade de projeto assume características próprias. Não basta criar um produto que seja belo (segundo o conceito de um grupo específico ao qual este produto será destinado) ou adequado à sua função principal. Existe um grande número de parâmetros que devem ser levados em consideração, que incluem os meios de fabricação, questões de vendas e transporte, manutenção, matérias-primas utilizadas, etc. O objetivo final do projeto é a criação de um produto que seja adequado aos diversos níveis de usuários, como cliente, fornecedores, produtores, distribuidores, vendedores, consumidores e a própria sociedade, em sua forma mais ampla. Para isso é necessário compreender a relação entre estes diversos usuários e antecipá-las no caso do desenvolvimento de novos produtos que é a grande dificuldade, pois se deve conhecer o resultado final do projeto antes de tê-lo concluído.

Conforme Filho (2004), o processo de desenvolvimento de projeto de produto consiste basicamente na transformação de idéias e informações em representações bi ou tridimensionais. A atividade principal de transformação ocorre entre um estágio inicial de busca de informações, assimilação, análise e síntese; e um estágio conclusivo no qual as decisões tomadas são organizadas em uma linguagem que possibilite a comunicação e arquivamento dos dados e a fabricação do produto.

Para Rozenfeld et al. (2006), o desenvolvimento de produtos consiste em um conjunto de atividades para chegar às especificações de projeto de um produto e de seu processo de produção, a partir das necessidades do mercado e das possibilidades e restrições tecnológicas, considerando as estratégias competitivas da empresa. Apresentam um modelo de desenvolvimento de produtos baseados em três macros fases: pré-desenvolvimento, desenvolvimento e pós-desenvolvimento. Figura 4.1.

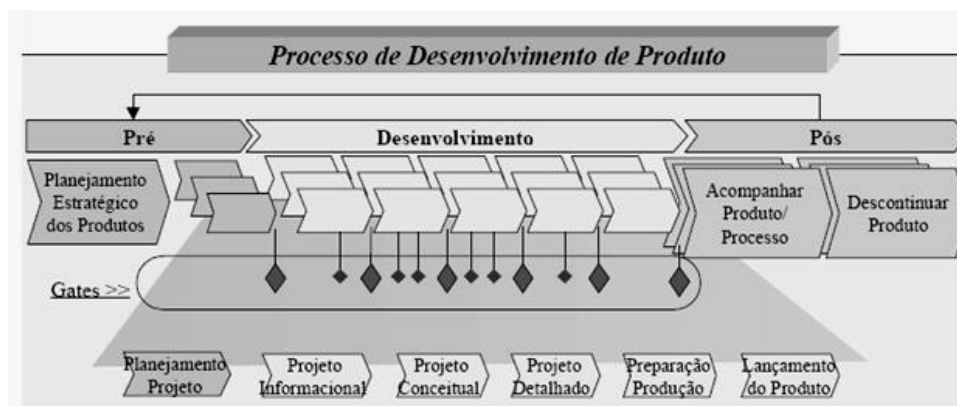


Figura 4.1: Processo de desenvolvimento de produto. (Rozenfeld et. al 2006)

Para Alvarenga (2006), o lançamento de um produto novo no mercado é o resultado de um esforço que pode durar um tempo significativo e envolver quase todos os setores funcionais da empresa. Nas fases iniciais do projeto é que são definidas as principais soluções construtivas e as especificações do produto. As escolhas de alternativas ocorridas no início do ciclo de desenvolvimento são responsáveis por cerca de 85% do custo do produto final. A tomada de decisões sobre o projeto de um produto, na fase de desenvolvimento, pode antecipar problemas e reduzir o tempo de lançamento do produto, conforme ilustra a figura 4.2.

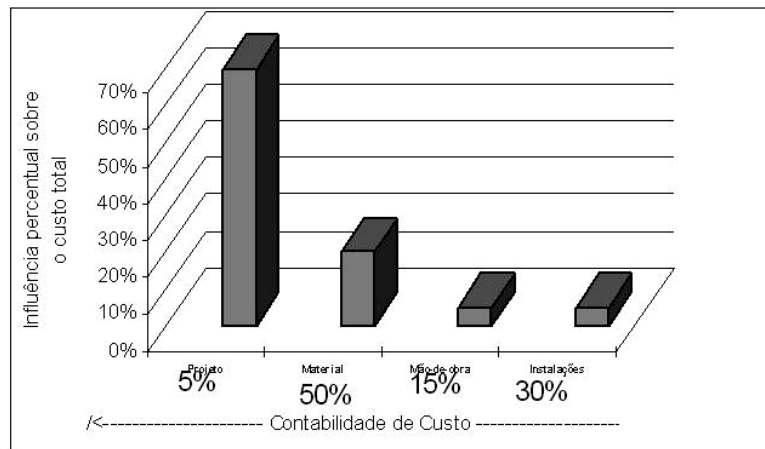


Figura 4.2: Influência percentual sobre o custo do produto, (Smith e Reinertsen, 1991, citado por Alvarenga, 2006).

Para Pahl et al. (2005), o projeto tem grande influência nos custos de produção, operação e qualidade. Rozenfeld et. al (2006) declara que o conhecimento e solução antecipada dos problemas de projeto, pode-se obter uma redução de até 50% do tempo de lançamento do produto e ainda reduzir o número de modificações aumentando a competitividade, conforme figura 4.3.

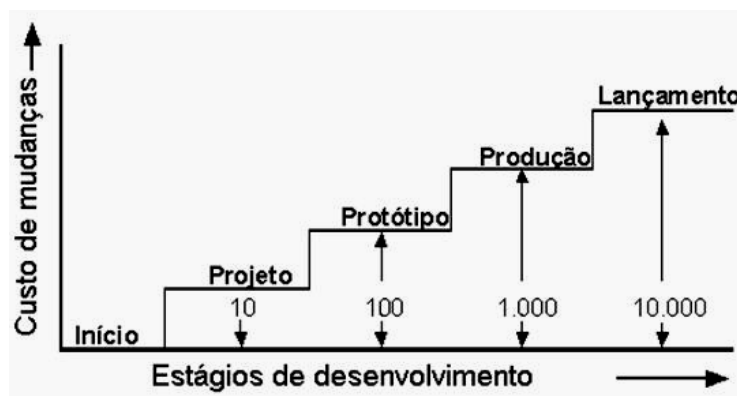


Figura 4.3: Influência percentual sobre o custo do produto, (Smith e Reinertsen, 1991, citado por Alvarenga, 2006).

O desempenho do processo de desenvolvimento do produto é avaliado por meio de indicadores associados à qualidade total do produto desenvolvido, aos custos, ao tempo total de desenvolvimento, e de sua contribuição para a competitividade da empresa. O modo como a empresa desenvolve produtos, ou seja, sua estratégia de produto e como ela organiza e gerencia o desenvolvimento é que determinará o desempenho do produto no mercado e a eficiência e qualidade no processo de desenvolvimento. Em outras palavras, o desempenho do PDP depende

da gestão da empresa (estratégias, organização e gerenciamento). As empresas bem sucedidas em desenvolvimento de produtos têm um padrão de coerência e consistência em todo o processo de desenvolvimento.

Maximiano (1997), citado por Filho (2004), define a atividade de projeto como singular e finita e que existe um componente de incerteza, que cerca o resultado esperado ou as condições de realização ou ambos. Quanto maior o grau de desconhecimento, maior a incerteza e risco. O resultado do projeto é o atendimento da solução ou interesse, dentro das restrições de tempo e recursos. O grau de sucesso é verificado se foram atendidos os objetivos previstos.

Segundo Pahl et al (2005), o projeto metódico possibilita a racionalização eficaz do processo de projeto e produção. A estruturação dos problemas e das tarefas facilita a percepção das possibilidades de emprego de soluções consolidadas vindas de projetos anteriores, ou de catálogos de soluções. Essa visão é a base do desenvolvimento organizado que chamamos de metodologia de projetos.

Como definição, metodologia de projetos é um conjunto de procedimentos planejados com indicações concretas de conduta a serem observadas no desenvolvimento e no projeto de sistemas técnicos que resultaram de conhecimento na área de ciência do projeto e da psicologia cognitiva e também da experiência com diferentes aplicações. Ainda fazem parte os procedimentos para interligação de etapas de trabalho e fase do projeto tanto pelo conteúdo como pela organização.

Uma metodologia de projetos deverá:

- 1) possibilitar o procedimento orientado por problemas, ou seja, ser aplicada em princípio em qualquer atividade de projeto, independente da especialidade;
- 2) incentivar invenções e conhecimentos, isto é, facilitar a busca de soluções ótimas;
- 3) ser compatíveis com conceitos, métodos e conhecimentos de outras disciplinas;
- 4) não gerar soluções somente por acaso;
- 5) permitir uma fácil transferência das soluções de tarefas semelhantes;

6) ser possível de ser ensinada e aprendida;

7) estar em conformidade com conhecimentos da psicologia cognitiva e da ergonomia, ou seja, facilitar o trabalho, economizar tempo, evitar decisões erradas e arregimentar colaboradores ativos e interessados;

8) facilitar o planejamento e controle do trabalho em equipe num processo integrado e multidisciplinar de geração de um produto e

9) ser orientação e diretriz para os gerentes de projeto de equipes de desenvolvimento.(Pahl et al, 2005).

A metodologia de forma geral pode ser dividida em quatro fases, (Dedini, 2000):

1ª fase – Estudo de viabilidade: nessa fase as necessidades do mercado são levantadas. Busca-se determinar as características necessárias ao produto para sua aceitação pelos consumidores. Além disso, determinam-se as necessidades econômico-financeiras para a sua produção, alocando recursos que serão utilizados no decorrer de todo o processo. São levantadas as primeiras soluções do problema proposto.

2ª fase – Avaliação do Produto: as concepções apresentadas na fase anterior serão avaliadas segundo critérios estabelecidos. Surgirão novas concepções e melhorias para as já estabelecidas. A conclusão da solução principal do problema está definida e algumas soluções alternativas.

3ª fase – Detalhamento do Produto: o produto delimitado na segunda fase será detalhado, as soluções propostas são avaliadas e se o projeto apresentar chances reais de sucesso será produzido.

4ª fase – Execução do produto: as etapas necessárias para a produção do projeto especificado são realizadas. Produções pilotos, pré-série e produção em série ocorrem de acordo com a realidade do mercado e características do produto.

Yoshikawa (1989) propõe uma divisão em escolas, onde agrupa metodologias semelhantes dentro de premissas básicas, classificando-as em Escola Semântica, Sintática, Historicista, Filosófica e Psicológica.

Escola Semântica é aquela que qualquer máquina é um objeto de projeto, é algo que transforma as entradas básicas, substância, energia e informação em saídas dos três tipos respectivos, que possuem diferentes estados das entradas. A diferença entre os dados de entrada e saída são denominados funcionalidades. Os requisitos iniciais são dados em forma de funcionalidades. A filosofia desta escola aproxima-se de um estudo semântico do projeto, onde vários elementos do produto são divididos e a compreensão dos menores elementos poderá fornecer a compreensão do produto como um todo.

Escola Sintática é aquele que é dada mais atenção aos aspectos procedurais no desenvolvimento do projeto que no produto projetado. O aspecto dinâmico ou temporal é abstraído do projeto, negligenciando aspectos estáticos.

Escola Historicista é baseada no conhecimento da atividade de projeto para desenvolvê-lo. Em outras palavras, é necessário conhecer a história do desenvolvimento de casos anteriores, dessa forma negam a possibilidade de se desenvolver metodologias que não se baseiam em estudos de casos reais.

Escola Psicológica e Filosófica desenvolvem pesquisas nas áreas de sistemas cognitivos, teoria do conhecimento, inteligência artificial e modelos de criatividade humana como base para o desenvolvimento dessas escolas.

4.1 Evolução cronológica da Metodologia de Projetos

Baseado na evolução cronológica apresentada por Pahl et al. (2005), já na observação dos esboços de Leonardo da Vinci notava-se como variava sistematicamente uma solução com base em critérios por ele mesmo estabelecidos, mostrando traços dos conceitos de projeto metódico.

Até a revolução industrial, projetar restringia-se a obras de arte e artesanato. Com o início da era tecnológica no século XIX, muitos autores desenvolveram conceitos importantes, mas de forma ainda parcial. O primeiro trabalho a ensaiar uma abrangente exposição da ciência do projeto foi Wörgerbauer (1943), onde desdobrava a tarefa global em subtarefas e estas em tarefas funcionais e de concretização, mas ainda não de forma sistemática. A busca de solução era ainda de forma intuitiva.

Com uma analogia lógico-funcional de elementos com diferentes efeitos físicos (efeitos elétricos, mecânicos e hidráulicos), Franke (1948) encontrou uma abrangente estrutura dos mecanismos e por esse motivo é considerado um dos principais representantes da comparação funcional de componentes de solução, fisicamente diferentes.

Kesselring (1942) divulga os princípios de um método por aproximações sucessivas e convergentes no seu livro “Projeto Robusto”. Esse trabalho foi a diretriz para a publicação da norma VDI 2225, cujos princípios são os custos mínimos de produção (produção enxuta), necessidade mínima de espaço, peso mínimo (construção leve), desperdício mínimo e manipulação mais adequada.

Tschochner (1949) menciona quatro realidades básicas de um projeto: princípio da função, material, forma e dimensão. Niemann (1965) antecipa critérios e métodos de trabalho, bem como regras de configuração como uma tentativa de aplicação sistemática. Ainda nos anos 50, Hansen e outros apresentam uma abrangente sistemática de projeto, definindo um sistema básico que é aplicado nas fases de conceituação, no projeto básico e na configuração. O princípio básico abrange a função global derivada das tarefas, as condicionantes e suas características, bem como as providências necessárias.

Muller (1970) descreve uma idéia teórica e abstrata do processo de projeto ou da atividade de projeto, novamente Hansen (1974) apresenta fundamentos teóricos sobre a ciência do projeto, com mais ênfase que as diretrizes práticas para o projeto. Wächtler (1969) a partir de sistemas cibernéticos familiares, tais como comandar, controlar e aprender, por considerações de analogia, deduz que projetar é a mais difícil forma de aprender e representa uma forma superior de controle ao lado de uma variação quantitativa mantendo constante a qualidade (controlar), também a própria qualidade é alterada.

Asimow (1968) desenvolve uma metodologia que de forma ampla abrange todo o desenvolvimento de produtos. É composta por dois grandes grupos que se subdivide em fases. O primeiro grupo contém as fases primárias do projeto (fases de 1 a 3) que compõe o estudo da exequibilidade do projeto, projeto preliminar, projeto detalhado. O segundo grupo (fases de 4 a 7) compõe as partes da metodologia ligadas ao desenvolvimento da produção.

Pahl e Beitz (1971) propõem uma metodologia de projetos composta por quatro fases:

- Fase 1: Planejamento da tarefa - Clarificação da tarefa e elaboração das especificações de projeto.
- Fase 2: Projeto conceitual - Identificação dos problemas; estabelecimento da estrutura de funções; pesquisa por princípios de solução; combinação de variantes de concepções; avaliação segundo os critérios técnicos e econômicos.
- Fase 3: Projeto Preliminar - Desenvolvimento de leiautes e formas; seleção dos melhores leiautes preliminares; refinamento e avaliação sob critérios técnicos e econômicos; otimização, verificação de erros, controle de custos, preparação de lista das partes preliminares e os documentos de produção
- Fase 4: Projeto Detalhado - desenhos detalhados e documentos para produção; verificação de todos os documentos.

Munari (1975), citado por Filho (2004), apresenta uma visão de metodologia aplicada à comunicação visual, mas que possui uma natural similaridade com diversos conceitos do projeto na engenharia, embora apresente um enfoque especial às características estéticas e visuais do produto. É dividido nas seguintes etapas:

- Enunciado do problema. O problema a ser abordado deve estar bem definido, de acordo com a análise das necessidades, seja esta análise realizada pela empresa (pelo departamento de marketing, por exemplo) ou pelo próprio designer, sob pena de todo o processo de concepção ser alterado por uma definição equivocada da questão a ser atendida.
- Identificação dos aspectos e funções. O problema deve ser analisado a partir de dois componentes principais: o físico e o psicológico. O componente físico (viabilidade técnica e econômica) se refere à forma do produto, enquanto o psicológico (aspectos culturais, históricos e geográficos) aborda a relação entre o produto e seu usuário.

- Limites para o projeto. Durabilidade prevista para o produto, utilização de componentes já existentes, limites legais (proibições de determinados produtos ou substâncias, por exemplo), exigências e características do mercado.
- Disponibilidade técnica. Deve-se ter pleno conhecimento dos processos e materiais a serem utilizados, visando à obtenção do melhor resultado com o menor custo.
- Criatividade. Elemento central do processo de concepção, pois deve levar a uma síntese das necessidades e dos elementos identificados, sem, contudo atuar fora dos limites previamente impostos, levando a uma “solução ótima” para o produto, que atenda as necessidades levantadas e dentro dos limites existentes, apresentando um produto com variável grau de inovação.
- Modelos. Da síntese criativa nascem os modelos, de tamanho natural ou em escala, em níveis crescentes de detalhamento e sofisticação, até atingirem a forma do produto final, com a construção de um ou mais protótipos.

Bonsiepe (1978) apresenta uma metodologia mais elaborada, determinando etapas desde o descobrimento e valoração da necessidade até a fabricação em pré-série. Pode-se notar a separação entre duas etapas fundamentais: a estruturação do problema de projeto e o projeto propriamente dito. Bonsiepe chama desta forma a atenção para a importância de um firme enfoque em relação ao problema a ser atendido como forma de tornar consistente a solução adotada. Neste caso é observada uma maior amplitude em relação ao processo de projeto, que inclui etapas como construção de protótipos e fabricação da pré-série, etapas importantes para que, através de um processo de feedback, sejam estabelecidos parâmetros para novos projetos com base em erros e acertos dos projetos desenvolvidos. É dividida nas seguintes etapas:

- Estruturação do problema de projeto. Formulação: descobrimento de uma necessidade, valoração da necessidade. Análise: formulação geral do problema, finalidade particular do produto, finalidade geral do projeto. Síntese: formulações particularizadas do problema, requisitos específicos e funcionais, características do produto, fracionamento do problema, hierarquização dos problemas parciais. Avaliação: análise de soluções existentes.

- Projeto. Concepção e desenvolvimento: desenvolvimento de alternativas. Avaliação e solução: verificação e seleção de alternativas. Execução: elaboração de detalhes particulares. Revisão: protótipo, modificação do protótipo. Execução: fabricação da pré-série.

Medeiros (1981) desenvolve uma metodologia em sete etapas:

- Etapa de Identificação - Identificação inicial do contexto de projeto (situação do projeto, processos de solução, produtos e política existentes, mercado e normas de legislação). Identificação dos fabricantes e usuários. Planejamento do trabalho (definição do escopo do projeto, do produto ou sistema de produtos.).
- Etapa de Análise. Análise do processo de trabalho, das tarefas de comando (importância, frequência e tempo de uso), dos fatores antropométricos, das condições ambientais, das tarefas de manutenção, dos fatores morfológicos, de operação (sistema, subsistemas e funções técnicas do produto, obsolescência), difusão, produção, e avaliação dos produtos existentes.
- Etapa de Definição dos Requisitos. Definição dos requisitos e restrições, das características e subsistemas do produto, fracionamento e hierarquização dos subsistemas do produto. Programação da etapa seguinte.
- Etapa de Desenvolvimento. Desenvolvimento de alternativas de concepção do produto como um todo. Avaliação e seleção de alternativas de concepção e seleção de alternativas para o produto. Desenvolvimento de alternativas para cada subsistema. Detalhamento da solução para cada subsistema e alternativas para cada componente. Detalhamento da solução para cada componente. Detalhamento da solução para cada peça. Desenvolvimento da concepção formal - avaliação da compatibilização dos subsistemas - execução de modelos e desenhos.
- Etapa de Testes. Construção de protótipos das soluções adotadas.
- Revisão de Projetos. Revisão de documentação do projeto.

Blanchard e Fabricky (1981) abordam uma metodologia focando a fase de viabilização do ciclo de vida e projeto sem a participação dos consumidores. Desta forma o desempenho do produto tem sido o objetivo principal, em detrimento ao desenvolvimento de um sistema global com fatores econômicos. Compõe-se da seguinte forma:

- Definição da necessidade: Identificação de desejos por sistemas.
- Projeto conceitual: estudo da viabilidade, análise das necessidades, requisitos operacionais, concepção da manutenção, planejamento avançado do sistema.
- Projeto preliminar: análise funcional do sistema, síntese preliminar e alocação de critérios de projeto, otimização do sistema, definição e síntese do sistema.
- Projeto detalhado: projeto do produto do sistema, desenvolvimento do protótipo do sistema, teste e avaliação do protótipo do sistema.
- Produção e/ou construção: avaliação do sistema, modificações para ações corretivas.
- Utilização e suporte: avaliação do sistema, modificações para ações corretivas.
- Descarte.

Back (1983) desenvolve uma metodologia com as seguintes fases:

- Estudo da viabilidade: análise de necessidade, exploração de sistemas envolvidos, síntese de soluções alternativas, viabilidade física, viabilidade econômica, conjunto de soluções possíveis.
- Projeto preliminar: seleção da melhor solução, formulação do modelo matemático, análise de sensibilidade e compatibilidade das variáveis, otimização dos parâmetros, teste do processo e previsão do desempenho, simplificação.

- Projeto detalhado: especificação de subsistemas, especificação de componentes, descrição das partes, desenho de conjuntos de montagem, verificação de dimensões e a padronização, liberação do projeto para fabricação.

A norma alemã VDI 2221 (1987) procura determinar de forma geral o que deve ser o projeto. É dividida em quatro fases:

- Fase 1: Esclarecimento da tarefa: esclarecimento e formulação da tarefa.
- Fase 2: Projeto conceitual: verificação das funções e de suas estruturas, pesquisa por princípios de solução, divisão em módulos.
- Fase 3: Desenvolvimento do conceito: configuração dos módulos principais e configuração do produto total.
- Fase 4: Projeto detalhado: preparação de instruções de execução e uso.

Hubka (1988), citado por Alvarenga (2006), desenvolve uma metodologia com as seguintes fases:

- Fase 1: Elaboração do problema: elaboração das especificações.
- Fase 2: Projeto conceitual. Estabelecimento das estruturas de funções, estabelecimento das concepções.
- Fase 3: Leiaute. Estabelecimento do leiaute preliminar, estabelecimento do leiaute dimensional.
- Fase 4: Elaboração. Detalhamento e elaboração.

Ullman (1992) apresenta uma metodologia com as seguintes fases:

- Fase 1: Desenvolvimento, planejamento e especificação. Entendimento do problema, desenvolvimento dos requisitos do cliente, assegurar competitividade, geração de requisitos de engenharia, estabelecimento dos objetivos de engenharia e planejamento do projeto.

- Fase 2: Projeto conceitual: desenvolvimento de conceitos, desenvolvimento da decomposição funcional, geração conceitos a partir das funções, avaliação dos conceitos, seleção do melhor conceito.
- Fase 3: Projeto do produto: geração do produto, definição do produto e fabricação, avaliação e refinamento do produto, avaliação do desempenho do produto, otimização do produto, avaliação de custos, finalização do produto.

Clausing (1993), citado por Dedini (2000), propõe uma metodologia voltada para a engenharia simultânea e desenvolvimento em equipes. É composta pelas seguintes fases:

- Concepção. É a fase inicial que é dividida em três etapas: Casa da Qualidade, Seleção da Concepção do Sistema Total. Nessa fase são adquiridas novas tecnologias, novos processos, técnicas, materiais, etc.
- Projeto. A concepção é detalhada e avaliada segundo critérios estabelecidos na fase anterior.
- Preparação. Nessa fase é realizada a preparação para a produção.

Erta e Jones (1993) propõem uma metodologia baseada em Asimow, onde sugere a utilização de equipes de projetos, ferramentas computacionais e técnicas de qualidade, como QFD (Quality Functon Deployment). É dividida nos seguintes passos: identificação e reconhecimento das necessidades. Conceituação de projeto. Análise de viabilidade. Processo decisório e liberação de fundos. Determinação das responsabilidades e equipe de projeto. Projeto preliminar. Projeto detalhado e testes de qualificação. Planejamento produtivo e ferramentas e produção.

Baxter (1995), citado por Alvarenga (2006), desenvolve uma metodologia com as seguintes fases:

- Fase1: Planejamento do produto: pesquisa das necessidades de mercado; análise de produtos concorrentes, seleção sistemática de oportunidades, especificação do estilo.

- Fase 2: Projeto conceitual: geração de idéias, análise funcional; seleção das idéias, análise das possibilidades de falha e seus efeitos, construção e testes do protótipo.
- Fase 3: Projeto Detalhado: especificação dos materiais, novos componentes, procedimentos de montagem, componentes padronizados.

Rozenfeld et al.(2006) propõem uma metodologia com as seguintes fases:

- Fase 1: Projeto informacional: desenvolvimento de um conjunto de informações, análise de tecnologias disponíveis, pesquisa em normas e patentes, pesquisa por produtos concorrentes, detalhamento do ciclo de vida do produto, identificação dos requisitos dos clientes, definição dos requisitos, especificações do produto, viabilidade econômica e financeira.
- Fase 2: Projeto conceitual: modelamento funcional do produto, desenvolvimento de princípios de soluções, desenvolvimento das alternativas de solução, definição da arquitetura do produto, análise de sistemas, subsistemas e componentes (SSCs), definição da ergonomia e estética do produto, definição de fornecedores, seleção da concepção do produto, definição do plano macro de processo, atualização da viabilidade econômica e financeira.
- Fase 3: Projeto detalhado: Criação e detalhamento dos sistemas, subsistemas e componentes (SSC), codificação dos SSCs, cálculo e desenho dos SSCs, especificação de tolerâncias, integração dos SSCs, desenhos detalhados, configuração do produto. Decisão entre fazer ou comprar SSCs, desenvolvimento de fornecedores, planejamento do processo de fabricação e montagem, projeto de recursos de fabricação, avaliação dos SSCs e configuração e otimização do produto e processo, criação de material de suporte do produto, projeto da embalagem, planejamento do fim da vida do produto, teste e homologação do produto, monitoramento da viabilidade econômica e financeira.

Ainda é importante destacar as metodologias com aplicações específicas, como Ogliari (1999) apresenta uma proposta de sistematização do projeto conceitual de produtos de plásticos injetados, incluindo as principais ferramentas de apoio à concepção de componentes de plástico

injetados. Maribondo (2000) realiza a sistematização de uma metodologia de projeto para sistemas modulares. Ferreira (2002) propõe uma metodologia de projeto para componentes de plástico injetado nas fases iniciais do processo integrando aspectos de custo. Romano (2003) formula uma metodologia voltada para máquinas agrícolas, já Scalice (2003) propõe uma metodologia de produtos modulares para o cultivo de mexilhões. Delgado (2005) elabora um software para contribuir a uma metodologia para o desenvolvimento de brinquedos infantis. Alvarenga (2006) propõe uma metodologia voltada a produtos inclusivos.

4.2 Perspectivas da modularidade

A modularidade tem sido estudada e utilizada como ferramenta de desenvolvimento de produtos que com recursos como combinar blocos distintos criando variedade de produtos, ou ainda fazer com que esses blocos executem muitas funções, tornou-a indispensável quando se pretende balancear a comunização de componentes com a variedade de produtos, gerando economia na produção em larga escala. Modularizar produtos significa antes de qualquer coisa definir qual a perspectiva da modularidade que se vai priorizar, pois um projeto pode ser mais ou menos modular sob uma perspectiva do que outra (Miller, 1998). Por exemplo, se o foco for a montagem como prioridade, outras perspectivas como manutenção, reciclagem, reuso podem conflitar e será necessário fazer um balanço para tomada de decisão.

Outra perspectiva da modularidade é o desenvolvimento sustentável de produtos, que se caracteriza pela priorização da redução de recursos naturais, consumo de energia e redução das emissões tóxicas na manufatura. Esse ecodesign que objetiva projetar produtos com impactos mínimos no meio ambiente, encontra na modularidade quanto ao ciclo de vida, técnicas e métodos que avaliam não só o desenvolvimento completo do produto, mas a estratégia ambiental para o produto em forma de soluções de projeto e futuro descarte ou reuso.

Além das diversas perspectivas que serão abordadas, com descrições dos métodos, das fases, etc., enfocam-se também as discussões atuais sobre o impacto da modularidade na competitividade e desempenho das empresas, nas relações diretas entre a modularidade do produto e o custo do descarte, etc. O objetivo dessa abordagem é tentar mostrar quão ampla pode ser vista a modularidade e quais questões atuais preocupam os pesquisadores envolvendo direta ou indiretamente a modularidade. Em ordem cronológica serão abordados os principais métodos.

Começando por Gu et al. (1997) que através da engenharia do ciclo de vida, desenvolvem um método para modularizar produtos sob as perspectivas da montagem, manutenção, reuso e reciclagem, aplicado na fase de projeto. Há duas formas de aplicação do método, a primeira é formar módulos a partir de cada perspectiva e depois fazer um balanço das vantagens e desvantagens e a segunda é modularizar o produto baseado no peso médio dos objetivos.

O método consiste em três fases:

1) Definição do problema, que incluem a identificação do tipo e das características do problema do projeto e a definição dos objetivos do projeto modular.

2) Análise das interações, elaboração de *check lists* para identificação das interações nos módulos e a minimização das interações entre módulos. Os fatores relevantes são identificados e escalonados entre 0 e 10, dando o grau de importância a cada objetivo. É feito o cálculo da média ponderada. A figura 4.2.1 ilustra os fatores relevantes.

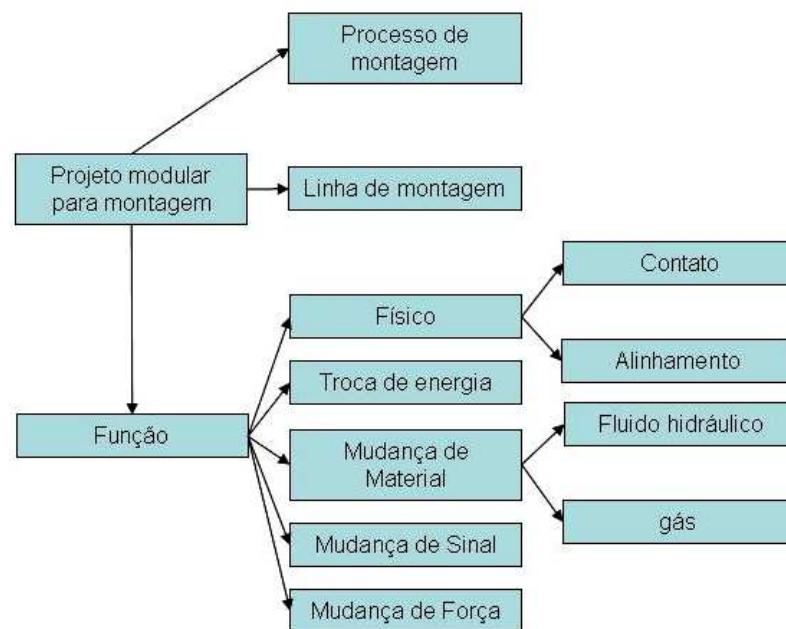


Figura 4.2.1: Hierarquia de objetivos e fatores relevantes. (Gu et al., 1997).

3) Formação dos módulos, é a fase onde os algoritmos são aplicados para juntar os componentes em módulos os quais maximizem as interações entre os componentes.

O resultado final é uma sugestão de módulo que deve ser verificado sua viabilidade e ajustados os parâmetros de controle.

Miño e Rados (2001) propõem uma sistemática que eles denominam de modular-ambiental, onde se aplica já na fase conceitual do desenvolvimento do produto cujo foco é meio-ambiente. Através de quatro etapas, apresentam o uso de ferramentas adequadas na integração simultânea dos diversos fatores de projeto como função, desempenho e o ambiente.

A sistemática baseia-se no QFD (Quality Function Deployment) na classificação por grau de importância dos requisitos de projeto, através de matrizes de inter-relação, as funções, materiais e demais critérios são organizados para composição dos possíveis módulos. Ainda utiliza desdobramentos funcionais para reduzir a complexidade do problema, matriz morfológica para encontrar soluções e a matriz de Pugh na escolha da melhor concepção. Na figura 4.2.2 indica a metodologia em forma de fluxograma.

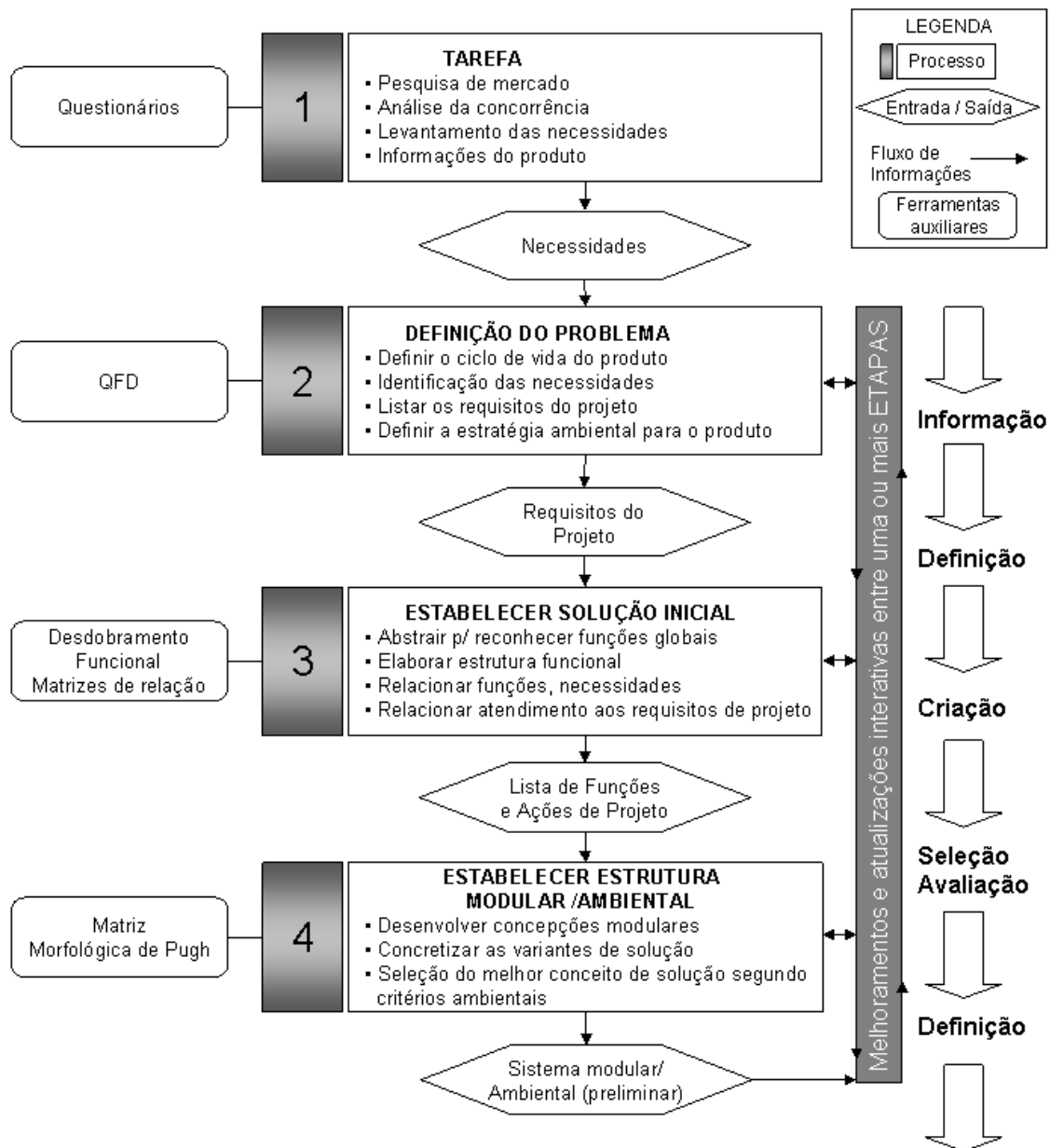


Figura 4.2.2 : Sistemática modular - ambiental proposta por Miño e Rados (2001).

Kimura et al. (2001) abordam a modularidade como ferramenta para aumentar o reuso dos produtos, que eles intitulam de manufatura inversa. Declaram que se deve conceber todo o ciclo de vida do produto desde o planejamento, todo o projeto e manufatura, o uso do produto, manutenção, reuso, reciclagem, descarte e deve-se ter o controle de todas essas fases.

Segundo os autores, o desafio é como aumentar a relação de peças para reuso e reduzir o material para reciclagem. Se peças usadas são reusadas apropriadamente isso significa que haverá

uma redução de uso de matéria-prima e consumo de energia na manufatura, mas por outro lado, peças reusadas devem ter a qualidade assegurada e verificada a confiabilidade.

Para modularizar o produto com foco no reuso é importante que o produto tenha as seguintes características: tecnologia estável, atualizável funcionalmente, longa vida, qualidade facilmente assegurada, facilidade de manutenção, etc.

O método consiste nas seguintes fases:

Análises das dependências funcionais, através de gráficos são descritos os módulos ou a estrutura dos componentes e identificadas a importância funcional, onde o nível de detalhamento depende dos requerimentos de projeto. Gráficos de componentes antigos com funcionalidade similar são executados e sobrepostos aos gráficos em análise.

Comunização é a fase onde é identificado o número repetitivo de interações iguais e dado o peso de acordo com a interação (representando maior ou menor importância na comunização dentro dos módulos) e associado aos módulos.

Identificação é a fase onde se identificam quais os tipos de módulos foram gerados e partindo da classificação de Kusiak e Huang (1996) como *component swapping modularity*, *component-sharing modularity* (já abordados em 3.1 conceitos básicos), módulos são combinados e novos módulos são criados.

Divisão de módulos é a fase onde mais uma vez os módulos são reagrupados de acordo com suas similaridades com o objetivo principal de se reduzir o número de módulos.

Consideração do ciclo de vida é a fase onde dois índices são introduzidos para indicar as características do ciclo de vida, que inclui material apropriado, opções para o término da vida do produto, como reciclagem, reuso, descarte, manutenção e etc. Com a combinação desses índices e atribuição adequada de pesos para todas as características é possível avaliar a modularidade.

Qian e Zhang (2003) apresentam um método para desenvolvimento de produtos modulares, levando em consideração os fatores que, segundo os autores, impactam o meio ambiente. Declaram que a preocupação com o ciclo de vida do produto inicia-se já na fase de projeto e antes da análise da modularidade. Os diferentes estágios do ciclo de vida de um produto, como:

manufatura, montagem, serviço ao consumidor, desmontagem, reuso / reciclagem / remanufatura ou descarte, devem ser considerados quando se estabelecem os critérios de desenvolvimento visando ao meio ambiente.

O método é constituído de uma análise quantitativa envolvendo a seleção dos objetivos ambientais e os critérios para verificação da modularidade. Através do Processo Hierárquico Analítico Fuzzy, são listados os objetivos por prioridades para se entender todos os efeitos dos critérios ambientais escolhidos.

Para a análise modular são criados e quantificados índices, como: compatibilidade, sustentabilidade, tempo de montagem, energia de desmontagem, montagem. Usando uma matriz de comparação e uma avaliação com índices fuzzy (fraco, limitado, parcial, alto) e analisando as similaridades, são encontrados os componentes incompatíveis com os módulos e a partir disso, são feitas sugestões ou ainda são avaliadas se as incompatibilidades devem ser mantidas. O último critério de análise é independência modular que avalia cinco critérios ambientais, como: sustentabilidade, conexão geométrica, tempo de desmontagem, energia de desmontagem e montagem, onde se busca encontrar o grau de dependência entre os módulos.

Newcomb et al. (2003) propõem um método de reprojeto com foco ambiental. O objetivo do método é auxiliar na reconfiguração do produto usando a modularidade como estratégia para melhorar a funcionabilidade, reciclagem, fim da vida do produto e as características de serviço.

Apresentam duas medidas de modularidade, uma que mede a correspondência entre módulos sob vários pontos de vistas e outra que mede o acoplamento entre módulos. Essas medidas incorporam as configurações do produto e podem ser usadas antes da fase de detalhamento do projeto. Com as informações do modelo em CAD, contendo os materiais utilizados, condições de trabalho e os objetivos pós-término da vida do produto, os autores descrevem o método com os seguintes passos:

Analisar o projeto existente (incluem a construção de matrizes sob vários aspectos ambientais, matriz de decomposição de desempenho, cálculo das métricas de modularidade)

Gerar novas configurações de produto pela introdução de novos módulos.

Gerar novas configurações de módulos.

Propor novos materiais e serviços e novos objetivos para o pós-término da vida do produto.

A configuração do método passa por três ciclos que são guiados pelos critérios adotados como prioridades (funcionabilidade, reciclagem, fim da vida do produto e as características de serviço) e analisados pelas métricas da modularidade. Os resultados são comparados e discutidos, e as melhores soluções incorporadas ao projeto.

Bryant et. al, (2004) propõem um método de reprojeção baseado no desenvolvimento sustentável, correlata modularidade dos produtos com vários aspectos do ciclo de vida do produto na fase conceitual do projeto. O foco principal do método é o aumento da sustentabilidade do produto em termos de reciclagem, desmontagem e redução de recursos usados na fase conceitual. Através da análise dos passos anteriores de forma retroativa até a fase conceitual partindo da forma atual, pode-se ter a compreensão de várias relações importantes sobre o ciclo de vida do produto.

O método tem por objetivo desenvolver uma arquitetura modular do produto onde se priorize a redução do número de componentes e reduza o impacto do ciclo de vida do produto no ambiente. Os principais aspectos abordados são: tempo de montagem, facilidade de manuseamento e montagem e real necessidade do componente, desmontagem e reciclagem. Como avaliação desses fatores, é criada uma métrica com pesos de 1 a 10 conforme a importância dada à característica, de forma subjetiva. Por exemplo, tabela 4.2.1.

Tabela 4.2.1 : Lista de fatores de prioridades do ciclo de vida, Bryant et al., (2004).

Fator	Prioridade
Tempo de Montagem	10
Necessidade real do componente	10
Desmontagem	7
Reciclagem	5
Facilidade em manusear	3
Facilidade de montagem	3

Contabilizando os pesos através de uma matriz EPI (Elimination Preference Index), as seis características mencionadas são avaliadas quanto ao impacto ambiental e qual solução melhor incorpora a similaridade entre módulos e subfunções nos produtos. O próximo passo é quantificar os fatores do ciclo de vida do produto para ser reprojetado, conforme tabela 4.2.2.

Tabela 4.2.2 : Quantificação da reciclagem, Bryant et. al (2004).

Tipos de peças	Reciclagem
Parafusos e peças padronizadas	1,0
Plásticos comuns	2,0
Peças metálicas não padronizadas	3,0
Plásticos não comuns	4,0

O método é composto por oito fases:

- 1) Criar um modelo funcional.
- 2) Identificar as funções dos módulos através do método heurístico.
- 3) Criar uma lista de materiais baseados na ordem de desmontagem.
- 4) Agrupar componentes pelo critério de montagem.
- 5) Identificar os componentes que compreendem cada módulo funcional
- 6) Avaliar se cada componente está para cada módulo-função e se os componentes de cada montagem está para um módulo-função.
- 7) Se sim, calcular o EPI para cada componente.
- 8) Eliminar ou trocar os componentes focando a redução da EPI.
- 9) Se não, rearranjar os módulos funcionais dentro do leiaute geométrico.
- 10) Eliminar ou trocar componentes para melhorar a correspondência funcional dos módulos e montagens.

Lai e Gershenson (2006) desenvolvem um método para representação das similaridades e dependências no reprojeto para montagem modular. Segundo os autores, a modularidade dos produtos expandiu sua definição, de modularidade baseada nas funções, para modularidade baseada no processo do ciclo de vida do produto. Para compor a matriz de similaridades, utilizam os fatores de custo de montagem, incluindo a mudança de ferramental. O objetivo é identificar os benefícios de custo da reconfiguração através da modularidade. A representação das dependências é baseada nas características do projeto que impactam o processo de montagem, isto é, como os componentes são fisicamente relacionados durante a montagem. O método pode ser aplicado em outras perspectivas modulares.

A modularidade, como já foi vista, tem uma abordagem muito ampla e suas diversas perspectivas fazem com que esteja presente em muitos segmentos. Discussões atuais como o impacto do ciclo de vida de um produto no meio ambiente, o ecodesign, o desenvolvimento sustentável tornam a modularidade uma ferramenta útil e imprescindível nos projetos de produto. Outros tópicos têm sido discutidos e relacionados com o uso da modularidade como um caminho promissor para solução dos problemas em questão.

Começando por Hsuan (1999) que discute os efeitos das relações fornecedor - comprador na modularização, em novos desenvolvimentos de produto, através da avaliação das oportunidades de modularização e das correspondentes restrições das interfaces dos produtos em quatro níveis: componente, módulo, subsistema e sistema. A figura 4.2.3 ilustra os quatro níveis.

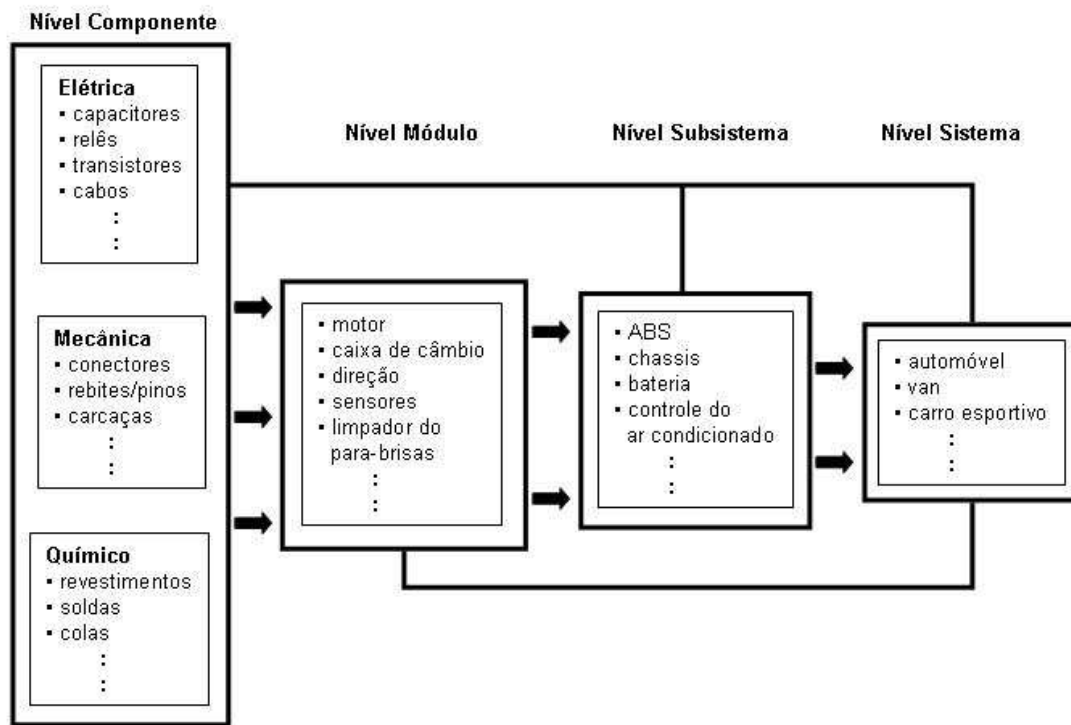


Figura 4.2.3 : Diferentes níveis de modularização em um automóvel. Hsuan (1999).

Através de uma representação gráfica onde o eixo do x, representa restrições das interfaces e o eixo do y, representa oportunidades para modularização, propõe uma curva “z” para representar essa relação. Segundo a autora, componentes tendem a ter baixas restrições de interfaces e alta possibilidade de modularização. À medida que se avança para os módulos, subsistemas e sistemas as restrições das interfaces aumentam e a modularização diminui de forma não linear.

O conceito de modularidade sensível é definido como a razão entre as taxas de mudanças de oportunidades de modularização pelas mudanças de restrições de interfaces. Observa-se que a mudança da modularidade em um nível pode afetar os demais níveis.

Zhang e Gershenson (2002) discutem qual é a relação da modularidade com o custo de retirada do produto. Partindo de relatos da literatura que relacionam o aumento da modularidade com diminuição do custo da retirada do produto (que pode ser remanufaturar, reusar, reciclar ou eliminar), criam um método de avaliação de produtos existentes para verificar e comprovar o que já foi abordado sobre isso.

Os autores utilizam medidas de modularidade em reprojeto de alguns produtos e relacionam com índices representativos do custo de retirada do produto e buscam as relações em diversos níveis de abstração. Concluem baseados em análises estatísticas, que não há uma relação geral entre o aumento da modularidade e a diminuição do custo de retirada do produto e sim que para se obter a redução dos custos de retirada é necessário se desenvolver produtos utilizando metodologias com foco nesse tópico.

Mukhopadhyay e Setoputro (2004) analisam o built-to-order, sistema que a empresa produz o produto depois de confirmado o pedido, como um sistema que não sobrevive sem uma política de retorno. Muitas empresas utilizam vendas pela internet e o fato de não se poder comprovar a qualidade do produto, gera desconfiança dos clientes e somente uma política que garanta o retorno, caso haja insatisfação, poderá ganhar a confiança dos clientes.

Uma generosa política de retorno será um diferencial e aumentará a receita. Por outro lado, isto incidirá no custo de desenvolvimento do produto, uma vez que haverá a probabilidade de um número maior de produtos devolvidos. A solução proposta pelos autores é utilizar a modularidade como base para a criação de uma política de modularização através de um modelo de maximização que junte os parâmetros ótimos para uma política de retorno com um nível de modularidade obtendo os parâmetros para reação do mercado. Concluem através dos resultados analíticos que os parâmetros de reação devem ser as diretrizes para a área de marketing e variáveis de estratégia operacional para obter os benefícios da otimização.

Antonio et al. (2004) discutem o impacto da modularidade do produto na capacidade competitiva e desempenho das empresas de manufatura de Hong Kong. Propõem um modelo baseado na premissa que modularidade está relacionada às mudanças nas múltiplas capacidades competitivas tais como o baixo preço, qualidade do produto, entrega, flexibilidade e serviço ao consumidor que são determinantes no desempenho do produto. Essas relações também dependem do tamanho da empresa.

Os autores através de um método de pesquisa quantitativo avaliam os dados e discutem a relação da modularidade com cada capacidade competitiva já mencionada. Concluem que há um alto impacto da modularidade no serviço ao consumidor, seguida pela flexibilidade e entrega. A modularidade não está correlacionada ao baixo preço e a qualidade do produto.

4.3 Quantificação da Modularidade

Muitos autores se dedicaram a pesquisar uma forma de dar números a modularidade. Questões como: o que é mais modular e o que é menos modular? Medir a eficiência na construção dos módulos e avaliar o grau de modularidade de um produto tem sido um grande desafio. As vantagens de se ter um índice numérico da modularidade pode representar um grande diferencial na tomada de decisões. Por exemplo, se dois projetos concorrem em um portfólio de produtos, saber qual deles tem maior modularidade pode ser decisivo na melhor escolha.

Outras aplicações são encontradas na literatura, principalmente nas fases da metodologia de projetos modulares. A maioria dos autores inclui a quantificação da modularidade como uma ferramenta obrigatória para se passar de uma fase a outra do desenvolvimento, pois ela sinaliza se os métodos propostos estão modularizando os projetos conforme o esperado.

Se considerarmos que os módulos são compostos por componentes e submontagens com diferentes graus de modularidade e ainda possuem similaridades e dependências entre seus componentes e com outros módulos, torna-se quase impossível criar um índice que represente a modularidade com toda sua abrangência.

Como já foi visto, a modularidade depende da perspectiva que se deseja, em consequência disso a avaliação da quantificação da modularidade também depende do que se deseja avaliar. Se focado no ciclo de vida do produto, tem-se um índice que permite comparar ciclos de vida de produtos e concluir qual deles tem maior modularidade. Se focada a manutenção, tem-se outra avaliação que permitirá saber qual produto é mais modular sob essa perspectiva. Essa visão é encontrada principalmente nos trabalhos de Gershenson et al. (1999), Qian e Zhang (2003) e Whitfield et al.(2002) que utilizam os conceitos acima para avaliar a modularidade hierárquica inerente a estrutura do produto, com foco nas relações de dependências internas e externas nos módulos. Bryant et al.(2004) avaliam separadamente as perspectivas e criam um índice que as reúne avaliando todo o ciclo de vida do produto.

Newcomb et al. (2003) para medir a modularidade definem dois índices, onde o primeiro índice (CR) mede quão modular é o módulo sob várias perspectivas: funcionalidade, reciclagem, final da vida do produto e serviço. O segundo índice (CI) mede as interações incidentais entre módulos. Onde a quantificação da modularidade será um índice entre 0 e 1.

Chakrabarti (2001) menciona a possibilidade de se medir a modularidade através de índices que relacionam os componentes com suas funções. Kumar e Chandrasekharan (1990) abordam uma forma de medir a eficiência dos módulos através de um cálculo percentual de componentes dentro e fora dos módulos. Hata et al. (2001) desenvolvem duas formas de avaliar o módulo, uma pela percentagem de componentes baseados em regras do ciclo de vida e a segunda pela percentagem das relações dos componentes dentro dos módulos em relação às relações dos componentes fora dos módulos.

Segundo Hölta (2005) os métodos de medir a modularidade são diferentes e dão resultados diferentes para o grau de modularidade. A maioria dos métodos trata com componentes físicos, mas alguns podem ser estendidos para a fase abstrata do projeto pela substituição dos componentes com funções. Ainda classifica a quantificação da modularidade como aquela que se refere ao ciclo de vida do produto e a que se refere à conectividade. Sugere que a quantificação da modularidade deve ser calculada considerando as conectividades dentro e entre módulos como uma DSM.

$$Modularidade = \frac{\sum_{k=1}^{M_n} \frac{\sum_{i=n_k}^{m_k} \sum_{j=n_k}^{m_k} R_{ij}}{(m_k - n_k + 1)^2} - \sum_{k=1}^{M_n} \frac{\sum_{i=n_k}^{m_k} \left(\sum_{j=1}^{n_k-1} R_{ij} + \sum_{j=m_k+1}^{N_c} R_{ij} \right)}{(m_k - n_k + 1)(N_c - m_k - 1)}}{M_n} \quad (\text{Equação 4.3.1})$$

Onde:

n_k = índice do primeiro componente no módulo k

m_k = índice do último componente no módulo k

M_m = Número total de módulos no produto

N_c = Número total de módulos no produto

R_{ij} = Valor da linha i e coluna j do elemento na matriz de modularidade

Outros trabalhos mencionam índices que não representam a modularidade como um todo, mas ajudam no desenvolvimento de produtos modulares e auxiliam na tomada de decisões em quaisquer fases do desenvolvimento. Como exemplo, David et al. (1998) que desenvolve um algoritmo para avaliar a capacidade de um módulo ser substituído por outro. O método considera as restrições de funcionabilidade em uma família de produtos através de materiais e seqüência de montagem.

Dentre todos os trabalhos pesquisados sobre a quantificação da modularidade vale destacar o trabalho de Gershenson et al.(1999), por ser talvez o único que possibilite ser replicado na íntegra. O trabalho mostra todos os passos do método com clareza e detalhes e um conteúdo muito útil para avaliação da modularidade, podendo ser aplicado em outras perspectivas diferentes das abordadas pelos autores.

O método proposto por Gershenson et al.(1999) para quantificar a modularidade tem o foco no ciclo de vida do produto. É composto por quatro fases:

1) Gerar uma árvore de componentes, nessa fase detalha-se as relações físicas em todos os níveis de abstração, dividindo o produto em seus módulos e componentes. Os módulos são também classificados em subconjuntos, depois em componente individuais e finalmente nos atributos dos produtos que descrevem os componentes.

2) Gerar gráficos de processo, nessa fase, todos os componentes são analisados quanto ao processo utilizado (por exemplo, manufatura, montagem, manutenção, funcionamento e descarte). Cria-se um gráfico para cada processo para detalhar cada fase do ciclo de vida

3) Construir matrizes, nessa fase, utiliza-se a árvore e os gráficos de processo para gerar uma matriz onde se estimará a modularidade e poderá agrupar as similaridades e dependências dos componentes e processos.

4) Calcular a modularidade relativa, através do conteúdo das matrizes de estimativa da modularidade, avalia-se que para alto grau de modularidade teremos alta similaridade entre componentes dentro do mesmo módulo (S_{in}) e uma baixa similaridade entre componentes fora desse módulo (S_{out}), quanto às dependências, teremos alta dependência entre componentes dentro

do módulo (D_{in}) e uma baixa dependência entre um componente de um módulo com o componente de outro módulo (D_{out}). Dessa forma a quantificação da modularidade estará relacionada diretamente às similaridades e dependência entre módulos e componentes. Se acharmos a razão da soma das similaridades dentro dos módulos pela similaridade total e somarmos com a razão da soma das dependências dentro do módulo pela dependência total, teremos um número de 0 a 2 que representará a modularidade, conforme a equação 4.3.5.

$$Modularidade = \frac{S_{in}}{(S_{in} + S_{out})} + \frac{D_{in}}{(D_{in} + D_{out})} \quad (\text{Equação 4.3.2})$$

4.4 Posicionamento do Trabalho

Após o levantamento do estado da arte da modularidade e dos tópicos que a circundam é possível posicionar esse trabalho no contexto da literatura. Os principais trabalhos sobre modularidade focam o que considera o maior desafio: agrupar componentes tornando-os um módulo. Nessa linha encontram-se os trabalhos de Kusiak cuja preocupação é desenvolver técnicas coerentes que minimizem espaços e agrupem os componentes levando em consideração sua funcionalidade e com ampla aplicação no projeto de circuitos eletrônicos.

O trabalho de Whitfield visa à identificação dos módulos através dos Algoritmos Genéricos, Gu e Sosale desenvolvem uma metodologia que desenvolve os módulos em paralelo reduzindo o tempo de projeto. Esses trabalhos estudam com profundidade a formação dos módulos, mas não abordam outros aspectos da modularidade, como a formação das interfaces, quantificação da modularidade entre outros.

Nessa dissertação a identificação dos módulos baseou-se principalmente nas relações de dependências, o que diverge dos trabalhos mencionados. Apesar de Whitfield também usar a DSM só que para identificar similaridades, os módulos resultantes não se destinam a formar uma arquitetura do produto.

Esse trabalho, no que diz respeito à arquitetura do produto, reproduziu parte do trabalho de Ulrich. Os conceitos estão fundamentados nele, mas o objetivo de se identificar a arquitetura é para auxiliar no desenvolvimento do projeto, suas modificações e atualizações. Quando se compara os objetivos do trabalho de Ulrich, percebe-se um foco mais gerencial e uma

preocupação em relacionar arquitetura do produto com a estratégia de desenvolvimento de produtos.

Outro tópico importante é a quantificação da modularidade que Gershenson desenvolveu para avaliar o processo produtivo, agrupando os componentes produzidos por processos similares e que segundo o autor, terão o mesmo ciclo de vida e conseqüentemente o mesmo fim. Baseado nesse trabalho foi adaptado o mesmo cálculo e é usado aqui para outra perspectiva: o leiaute.

As matrizes de impacto que Salhich e Kamrani desenvolveram para avaliar o impacto de modificações em projeto, receberam modificações para ser ter maior abrangência e avaliarem impactos de novos módulos em uma arquitetura de produto existente.

Não se pode esquecer de mencionar as metodologias de projetos, sua utilidade e clareza na proposição de idéias. Nesse trabalho, toda a organização das idéias foi baseada nas principais metodologias, como Pahl e Beitz, VDI 2221, Dedini, Scalice entre outros. Como o objetivo desse trabalho não é esquematizar uma metodologia, portanto não é possível tecer comparações com os grandes trabalhos sobre o assunto.

Capítulo 5

Estudo de Caso

Os estudos de caso representam a estratégia preferida quando surgem questões do tipo “como” e “por que”, quando o pesquisador tem pouco controle sobre os eventos e quando o foco se encontra em fenômenos inseridos em algum contexto da vida real, (Yin, 2001). O estudo de caso é útil também nas investigações exploratórias onde as variáveis ainda são desconhecidas e os fenômenos não são totalmente entendidos (Voss et al., 2002). Esses autores complementam que os estudos de caso podem ainda ser úteis para propostas de construção de teorias, testes de teorias e refinamento/complemento de teoria.

Esse estudo de caso foi desenvolvido em uma montadora de chassis de ônibus, onde se pretendia a partir de um chassi-base, formar/estruturar uma família de chassis de diversos tipos e aplicações, utilizando a modularidade para comunização dos componentes e como avaliação do projeto quanto à capacidade de viabilizar a derivação de um chassi em relação a outro.

Como já foi explicado no capítulo 1, será abordado somente o motor e seus sistemas periféricos. O estudo aconteceu por razões de redução nos limites de emissões de gases danosos ao meio ambiente exigida pelas legislações ambientais mundiais e afeta somente essa região do veículo (veja capítulo 2). Verificou-se que muitos modelos de chassis não atenderiam essas especificações e que seria necessário criar um novo portfólio para manter a participação dos produtos no mercado.

A estratégia para se conseguir no menor tempo possível a composição e viabilidade técnica desses veículos foi estudar em um único chassi todo o processo de formação da periferia,

envolvendo questões de leiaute, sistemas, funções, módulos e interfaces. O aprofundamento desse estudo permitiu entender os fatores de projeto que transferem a modularidade de um projeto para o outro. Através de técnicas de projeto modular, foi possível identificar quais as alterações e em quais módulos ou componentes deveriam ser feitas e adicionando a visão de todas as composições de periférias desejadas e o mapeamento de todos os componentes que a compõe criou-se um modelo base de formação e estruturação para novos veículos.

5.1 Metodologia

Os métodos utilizados nesse trabalho foram baseados no levantamento do estado da arte de projetos modulares apresentados nos capítulos 3 e 4 dessa dissertação. Adotou-se estruturar o trabalho utilizando a forma das metodologias de projeto, isto é, dividir em fases, etapas e tarefas, identificando quais ferramentas devem ser usadas. As ferramentas ou técnicas podem ser um método, uma análise, um cálculo, uma matriz etc.

5.1.1 Fase 1: Informacional

A primeira fase do trabalho constitui-se na coleta de informações para compreensão da abrangência do estudo, é baseada nos trabalhos de Scalice (2003), Pahl et al. (2005) e na norma alemã VDI 2221, e chamada de fase informacional, conforme ilustra a figura 5.1.1.

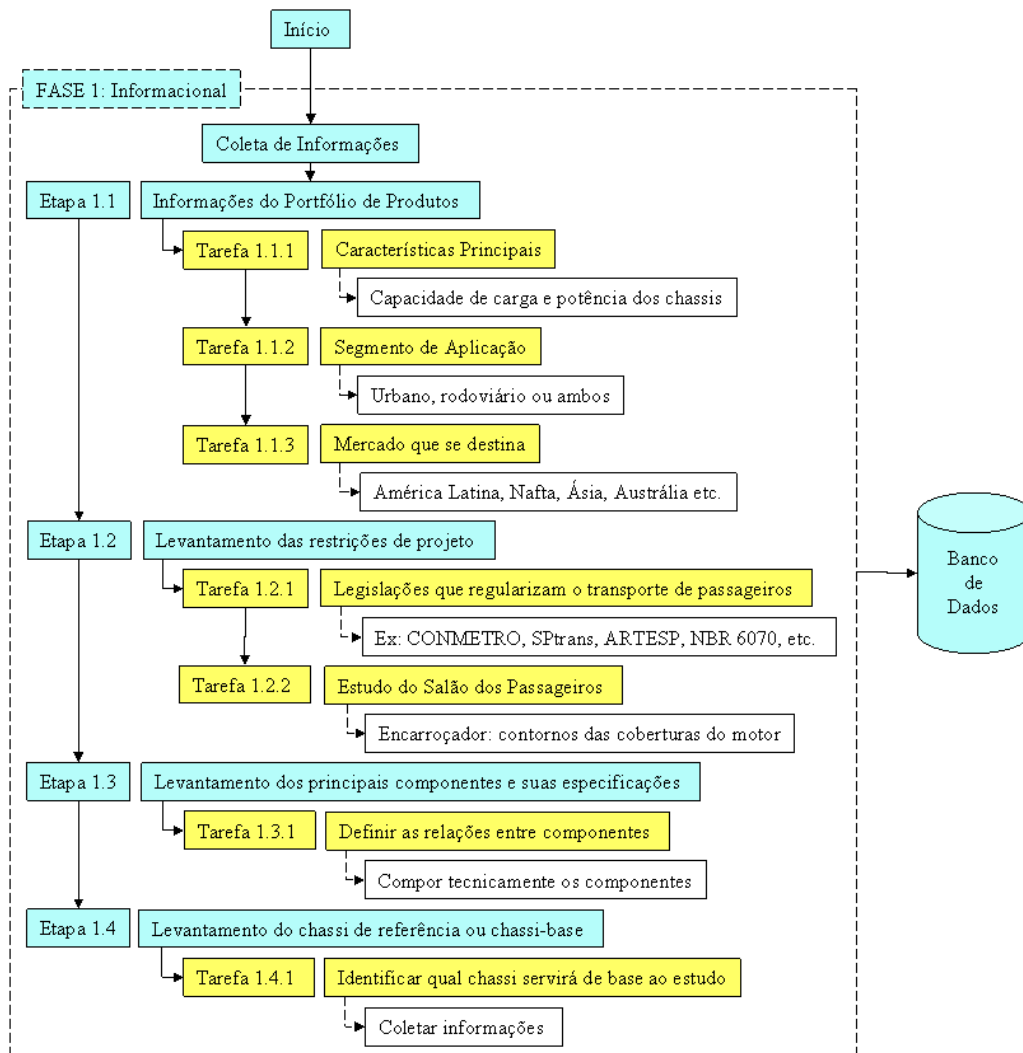


Figura 5.1.1: Fase 1 - Informacional.

O portfólio dos produtos é definido geralmente por uma equipe responsável pela implantação da nova legislação ambiental nos projetos. Essa equipe é formada por engenheiros da área experimental e de projetos e das áreas de planejamento estratégico e marketing. A responsabilidade desse grupo é definir quais veículos existentes atendem ou não a nova legislação e quais as lacunas que deverão ser preenchidas com novos modelos.

A Etapa 1.1 consiste em analisar o portfólio extraíndo as informações técnicas que serão utilizadas nas próximas fases e etapas. A tarefa 1.1.1 inicia-se com a identificação dos modelos de chassis que compõem o portfólio de produtos através das características principais dos chassis

que são a capacidade de carga, ou seja, quantas toneladas o chassi pode transportar e a potência do motor.

Na tarefa 1.1.2 os modelos de chassi são agrupados quanto ao segmento de aplicação: urbano, rodoviário ou ambos. Como já explicado no capítulo 2, essas informações são fundamentais para o desenvolvimento da periferia do motor, pois para cada segmento existe uma carroceria com características próprias e afetará diretamente o espaço disponível para o motor e seus periféricos. Na tarefa 1.1.3 são levantados os mercados potenciais de cada chassi, como: Nafta, Ásia, Europa, Austrália etc. Cada mercado possui restrições técnicas e exigem características específicas que o chassi deve atender, portanto é muito importante saber exatamente o mercado que se pretende atender. Essa etapa termina com o armazenamento das informações. Na tabela 5.1.1, as informações da etapa 1.1 são apresentadas.

Tabela 5.1.1: Informações extraídas do portfólio de produtos.

		Modelos			
		A	B	C	D
Quadro (capacidade de carga)	até 17 toneladas				
	até 28 toneladas				
Motor (Potência)	250 cv				
	300 cv				
	360 cv				
Segmento	Urbano				
	Rodoviário				
	Ambos				
Mercado	Aplicações Especiais				
	América Latina				
	Nafta				
	Europa				
	Ásia				
	Austrália				

A etapa 1.2 consiste em levantar todas as restrições de projeto que afetam a região do motor. Essas restrições podem ser em forma de normas aplicadas a um nicho específico. Por exemplo, se o ônibus se destina à cidade de São Paulo, é necessário que este atenda as especificações do órgão que controla o transporte da cidade. Outras análises podem ser feitas quando o chassi se destina a um mercado que faz exigências não usuais, por exemplo, a Nigéria exige porta traseira em ônibus rodoviário, como não reflete o padrão do segmento esses casos não são abordados nesse trabalho e devem ser tratados separadamente.

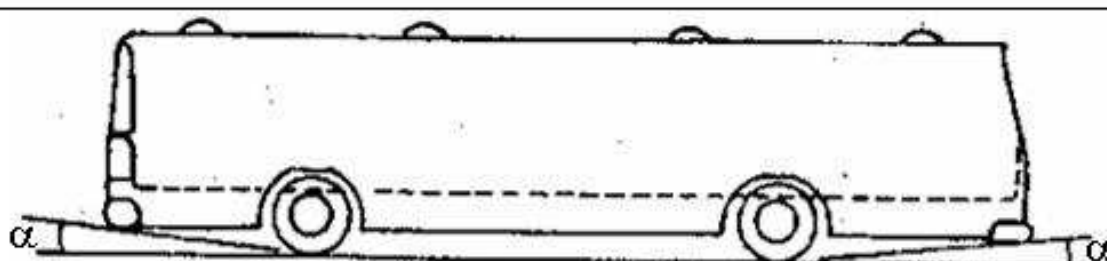
As restrições que afetam a região do motor são encontradas nas normas e legislações que regularizam a carroceria prescrevendo as dimensões, características básicas e os equipamentos auxiliares aplicáveis na fabricação de veículos utilizados no transporte coletivo urbano e rodoviário de passageiros. Definem e classificam cada tipo de ônibus e são específicas para o mercado de aplicação, de forma a garantir condições de segurança, conforto e mobilidade aos seus condutores e usuários.

Resgatando as informações da etapa anterior, sabem-se quais mercados são destinados, os segmentos de aplicação e características principais dos chassis. A tarefa 1.2.1 consiste em levantar todas as legislações que devem ser atendidas pelo ônibus. Para esse estudo, deve-se focar quais normas e legislações afetarão a região do motor e seus periféricos. Por exemplo, a especificação dos ângulos de entrada e saída dos ônibus que todas as legislações alertam. Esses ângulos, quando atendidos, garantem que o ônibus não terá problemas com lombadas e valetas, trafegando na região sem sofrer danos com impacto da traseira ou dianteira com o piso.

As legislações determinam o número e o posicionamento de portas. Frequentemente encontram-se mercados que exigem portas na traseira para aplicação urbana, o que afetará diretamente o posicionamento dos periféricos do motor. Outra restrição característica do mercado refere-se as dimensões principais do chassi, como balanço dianteiro, distância entre eixos e o comprimento total. Para alguns mercados que possuem limitações de espaço como, por exemplo, o transporte de passageiros em regiões montanhosas, há necessidade de diminuir o comprimento e largura dos ônibus para dirigibilidade em estrada sinuosa e estreita. Na figura 5.1.2 é apresentado um fragmento da resolução CONMETRO (Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial).

Capacidade nominal de passageiros	Quantidade de portas de serviço
Até 30 passageiros	1
31-60	2
61-100	3
Acima de 100 lugares	4

➤ **Porta simples:** Largura 600 mm x Altura 1900 mm
 ➤ **Porta dupla:** Largura 700 mm x Altura 1900 mm



- O ângulo mínimo de entrada e saída deve ser de 8° (oito graus), estando o veículo com sua massa em ordem de marcha, sendo aceita uma tolerância de 1° (um grau).



Dimensão das Escadas	Ônibus, leve, médio, pesado e articulado		Microônibus	
Dimensão (mm)	Básico	Especial	Básico	Especial
A	Max. 450	Max 370	Max 410	Max 430
B	Min. 120 / Max 300	Min. 120 / Max 275	Min. 120 / Max 330	Min. 120 / Max 330
C	Mín. 270	Mín. 300	Mín. 220	Mín. 250
D	-	-	Mín. 180	Mín. 200
Tolerâncias Admitidas nas Alturas	5%	5%	5%	5%

Figura 5.1.2: Fragmentos da resolução CONMETRO de 01/93.

[illegible]

A tarefa 1.2.2 consiste em pesquisar os contornos das coberturas do motor para cada veículo em estudo, considerando os diversos tipos que cada encarroçador utiliza para cada segmento e mercado que se destina. Essas informações devem ser armazenadas para utilização na próxima fase. Exemplo na figura 5.1.4.

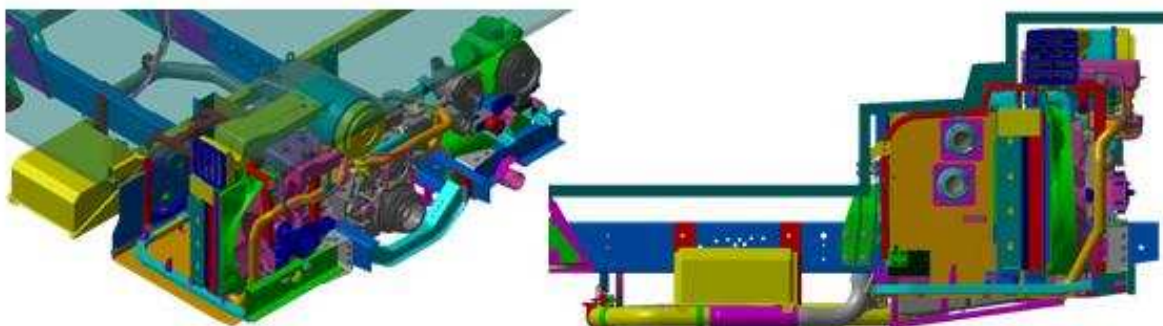


Figura 5.1.4: Exemplo de uma cobertura do motor para aplicação urbana.

A etapa 1.3, através da tarefa 1.3.1, inicia-se com o levantamento dos componentes que vão compor a periferia do motor. Como se sabe quais veículos compõem o portfólio e suas respectivas potências e capacidade de carga, é necessário identificar quais componentes que satisfazem as especificações técnicas e como podem ser relacionados de forma a se obter o desempenho desejado. Esse processo é auxiliado por uma equipe funcional que é composta por engenheiros de produto, experimental e os principais fornecedores do componente, que calculam e especificam cada componente e o submetem a testes funcionais e de durabilidade.

O levantamento começa pela especificação do motor que deve atender a potência e torque desejados conforme o cálculo de desempenho esperado do veículo. Essa avaliação do desempenho do veículo é ainda teórica e é elaborada pela área conceitual da engenharia de produtos. Os motores atendem uma faixa de potência que é parametrizado através da central eletrônica do motor, dessa forma, para diferentes modelos de veículos podemos ter o mesmo motor com parametrizações diferentes.

Após definir quais motores serão aplicados nos veículos, devem-se selecionar os radiadores que atendam a especificação de cada motor. O radiador deve ser capaz de dissipar o calor rejeitado pelo motor e prover tanto para a água (que resfria o bloco do motor) como para o ar (que participa da combustão), as temperaturas adequadas para funcionamento do motor com a durabilidade esperada. Na tabela 5.1.2 é um exemplo da avaliação dos radiadores de diversos fabricantes e a recomendação quanto sua aplicação.

Tabela 5.1.2: Comparativo dos Radiadores. (Fonte: Mercedes-Benz)

Comparação dos Radiadores															
Veículo				Modelo A				Modelo B				Modelo C			
Motor				Motor X - 180 PS				Motor X - 220 PS				Motor X - 230 e 280 PS			
Fornecedor				Garrett	Denso	Behr	Valeo	Garrett	Denso	Behr	Valeo	Garrett	Denso	Behr	Valeo
Item		Unidade	Valor orientativo	xxxx = Sub dimensionado				yyy = Normal				xxxx = Super dimensionado			
Radiador água	Potencia do motor por unidade de área da colmeia	PS / dm2	LKW e Ônibus 5,5.....6,6	NA	7,0	4,7	4,52	NA	8,6	5,80	4,56	NA	7,9	6,1	5,8
	Potencia do motor por unidade de volume da colmeia	PS / dm3	LKW 12,8...15,5 Ônibus 11.....13		19,5	11,3	14,11		23,8	13,81	8,76		22,0	14,64	11,15
Radiador de ar	Potencia do motor por unidade de área da colmeia	PS / dm2	LKW e Ônibus 6,3.....7,5		4,7	4,6	4,1		5,7	5,6	5,1		7,3	7,2	6,4
	Potencia do motor por unidade de volume da colmeia	PS / dm3	LKW e Ônibus 12.....13	7,8	8,8	10,9	9,5	10,8	8,9	12,1	13,8	11,3			

Outro componente importante que dever selecionado é o filtro de ar. O motor necessita de ar limpo para a combustão e em quantidade adequada, deve-se ter um filtro que atenda a vazão especificada para cada motor e atenda os limites de restrição de ar. Na figura 5.1.4 é apresentado um exemplo de um gráfico com medições de restrição a passagem do ar de um filtro de ar.

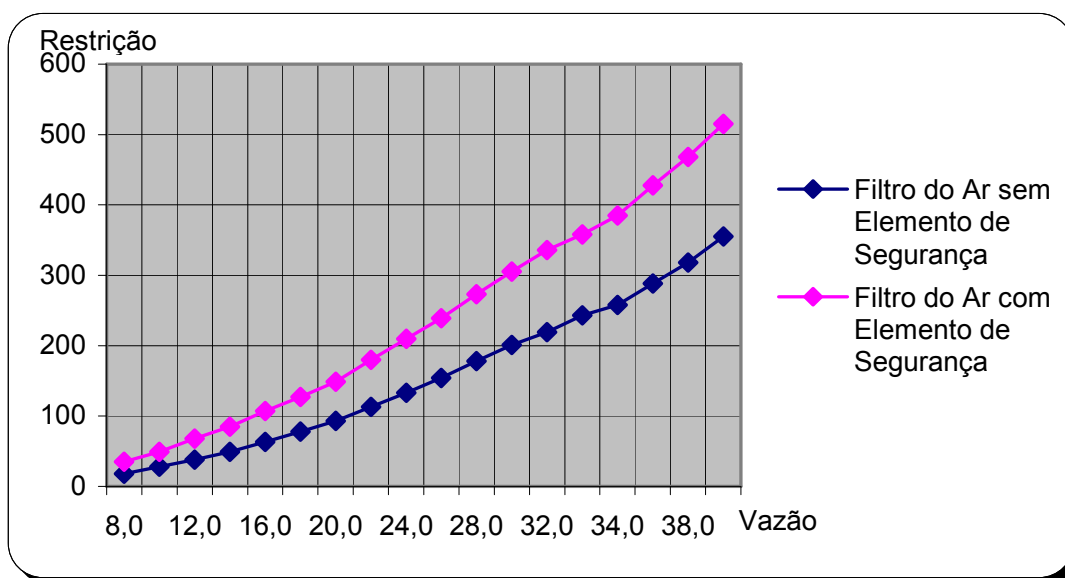


Figura 5.1.5 : Exemplo de um gráfico de restrição à passagem de ar de um filtro de ar. (Fonte: Filtros Mann)

O processo de seleção dos componentes se estende utilizando os mesmos critérios mencionados anteriormente. Inicia-se sempre pelas especificações do motor e o componente é

selecionado pela eficiência no atendimento às especificações necessárias e pelo bom desempenho nos testes funcionais, durabilidade e muitas vezes a aprovação no cálculo de Elementos Finitos. Os demais componentes a serem selecionados: tomada de ar, tanque de expansão, ventilador, embreagem do ventilador, silencioso.

A etapa 1.3 finaliza-se com a composição do veículo agrupando os componentes selecionados, formando as relações entre esses componentes. Por exemplo, para o motor X pode-se utilizar os radiadores A e B para as calibrações X1 e X2 do motor e podem-se concluir também quais componentes que nunca serão utilizados na mesma montagem, conforme figura 5.1.6.

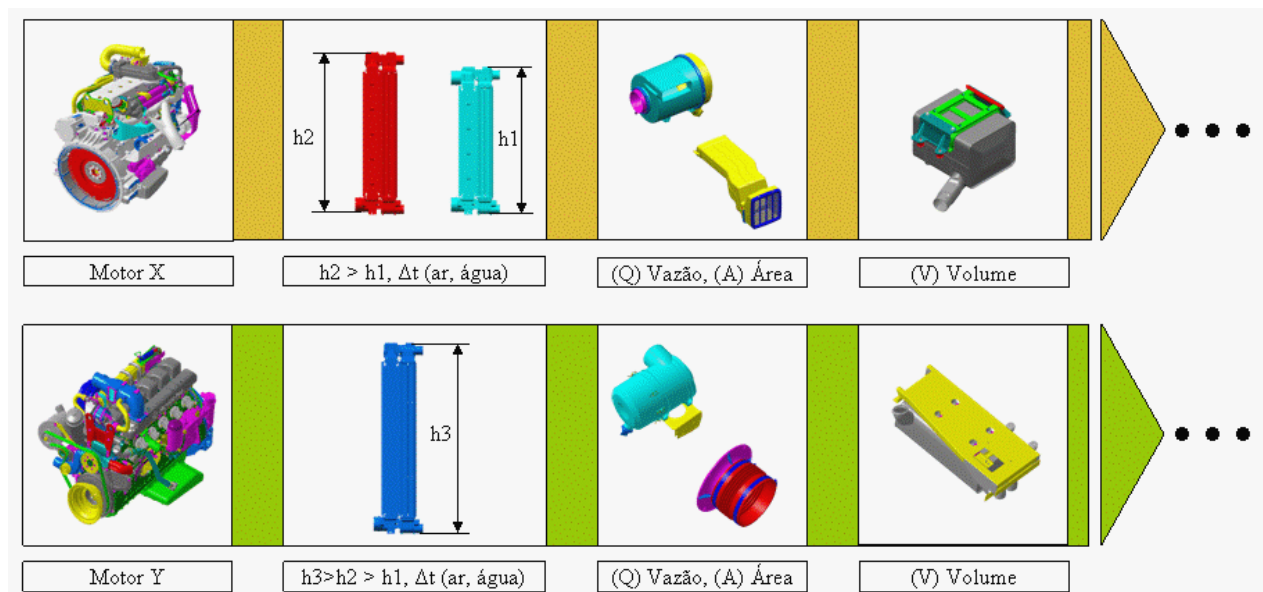


Figura 5.1.6: Composição dos componentes periféricos do motor.

A etapa 1.4, através da tarefa 1.4.1, consiste em identificar qual chassi será à base do estudo ou a referência da análise modular da periferia do motor. Os critérios de escolha do chassi-base não serão discutidos nesse trabalho, pois o objetivo é apresentar uma análise modular tomando como referência um chassi em produção, seja qual for o modelo.

5.1.2 Fase 2: Concepção

A fase 2 consiste em analisar um chassi-base identificando a arquitetura da periferia do motor e a partir daí constituir um modelo que permita estender a modularidade dessa periferia aos

demais chassis que irão compor o portfólio de novos produtos. Esse modelo permitirá ter o domínio dos parâmetros fundamentais na formação de outras periferias que derivarão do chassi-base, minimizando o tempo de análise e desenvolvimento, promovendo a padronização e a modularidade. É importante estabelecer a validade desse trabalho, sabendo que por questões de leiaute será possível a composição de chassi até 360 cv, pois a partir desse valor a rejeição de calor do motor exige radiadores, que por questões de espaço, não permitem a montagem conforme o leiaute do chassi-base. Para chassi acima desse valor deve-se desenvolver uma nova concepção de periferia que não está contemplada nesse trabalho.

Segundo Pahl et. al (2005) e a norma alemã VDI 2221 (1987), a fase 2 é chamada de fase conceitual. Nesta fase estabelece-se a estrutura funcional e combinam-se as variantes de concepções e a identificação dos módulos. Neste trabalho a fase 2 é denominada concepção, pois não é o objetivo criar uma metodologia para conceber periferias do motor e sim, organizar a concepção da solução em forma de metodologia. Essa forma de apresentar o estudo de caso visa à busca da clareza e replicabilidade da pesquisa.

O desdobramento da fase 2 segue o modelo da figura 5.1.7.

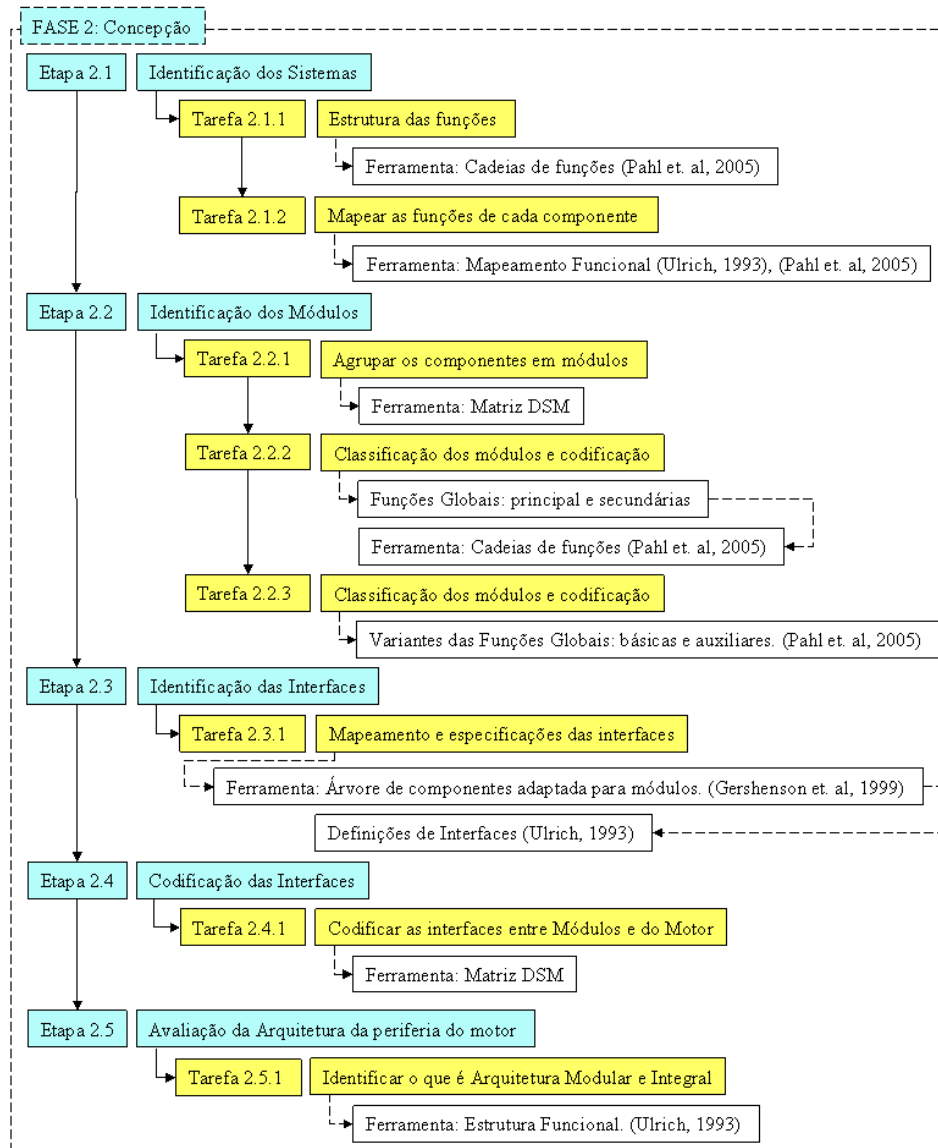


Figura 5.1.7: Fase 2 - Conceção

A fase de concepção inicia-se com a etapa 2.1. Nessa etapa são identificados os sistemas que executam as funções globais (tarefa 2.1.1.). Através da cadeia de funções utilizada por Pahl et al. (2005), Scalice (2003), Ulrich (1995), pode-se desdobrar a função global em funções principais, as que são imprescindíveis para o funcionamento do sistema e em funções secundárias que executam o transporte do fluxo, sustentam e fixam os componentes do sistema etc., e tem uma contribuição indireta na função global. É possível ainda identificar todo o fluxo de material, energia e sinal, com sua direção e sentido entre os componentes, conforme a figura 5.1.8.

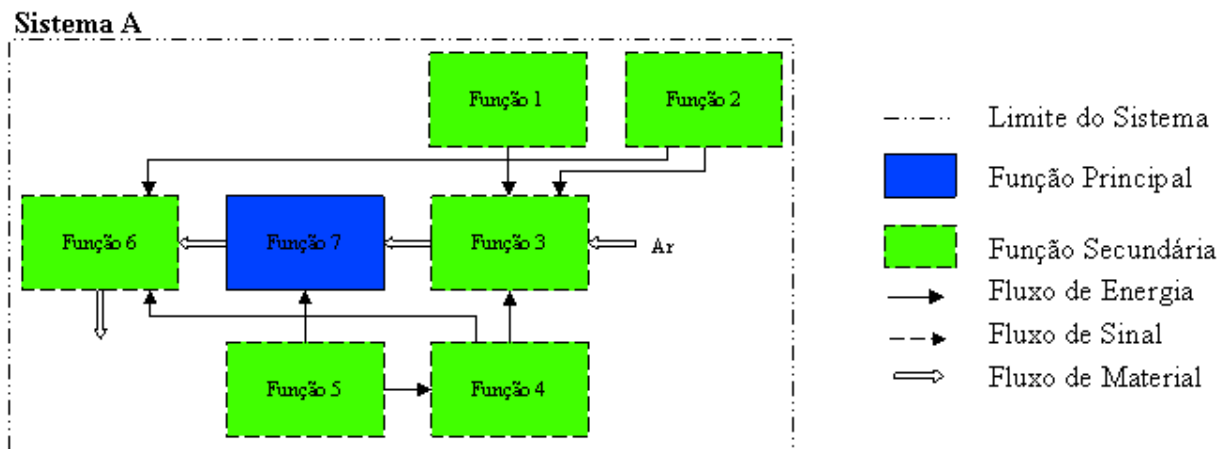


Figura 5.1.8: Cadeia de funções. (Pahl et. al, 2005)

A etapa 2.1 é concluída com a tarefa 2.1.2. Essa tarefa consiste em mapear funcionalmente cada componente do sistema. Segundo Ulrich (1995), o mapeamento funcional auxilia na avaliação da arquitetura do produto que pode ser modular ou integral. Como o objetivo dessa fase é determinar que tipo de arquitetura a periferia do motor possui, é necessário através da divisão de sistemas (tarefa anterior) fazer o desmembramento de cada sistema em componentes e avaliar a função de cada componente, conforme figura 5.1.9.

Componentes		Sistema em análise	Funções
		Sistema A	
1	Componente 1	Fixar a mangueira, evitando vazamentos.	
2	Componente 2	Transportar o ar quente, ser flexível para compensar vibrações, suportar a alta temperatura.	
3	Componente 3	Transportar o ar quente, ser rígido para não se movimentar devido à pressão interna.	
4	Componente 4	Fixar o tubo para não haver deslocamentos e consequentemente vazamentos.	
5	Componente 5	Permitir montagem com pequenos desalinhamentos e suportar a alta temperatura.	
6	Componente 6	Retirar o calor do ar.	
7	Componente 7	Amortecer as vibrações vindas do motor.	
8	Componente 8	Amortecer as vibrações vindas do motor.	
9	Componente 9	Permitir montagem com pequenos desalinhamentos.	
10	Componente 10	Transportar o ar frio, ser rígido para não se movimentar devido à pressão interna.	
11	Componente 11	Fixar o tubo para não haver deslocamentos e consequentemente vazamentos.	
12	Componente 12	Transportar o ar frio, ser flexível para compensar vibrações.	

Figura 5.1.9: Mapeamento funcional. (Ulrich, 1995)

A etapa 2.2 consiste em determinar os módulos e identificá-los. Subdivide-se em três tarefas, a tarefa 2.2.1 é definida como a análise dos sistemas e identificação de quais componentes podem ser agrupados e formar módulos. A formação dos módulos segundo Whitfield et. al (2002) é uma tarefa complexa. Existem muitos métodos que são sugeridos na literatura, como a Matriz Indicadora de Módulos (MIM) sugerida Scalice (2003) que é muito

eficiente para identificar quais componentes ou atividades podem se tornar módulos e tem uma melhor aplicação para um novo desenvolvimento. Outra técnica aprimorada por Whitfield et. al (2002) é a Matriz de Estrutura do Módulo (MSM), que se baseia na DSM (Matriz de Estrutura de Projeto) e trabalha com as dependências expondo as fronteiras da estrutura modular mesmo em matrizes densamente povoadas com auxílio de programas computacionais.

Nesse trabalho a identificação de módulos foi feita utilizando a DSM (Matriz de Estrutura de Projeto). Separaram-se cada sistema e seus componentes, de forma que cada análise busca o agrupamento de componentes dentro de cada sistema. A DSM foi usada para agrupar as dependências entre os componentes e a identificação das dependências seguiu critérios de projeto e funcionais. Por exemplo, o componente 1 depende do componente 2 e vice-versa, quando possuírem interfaces comuns, dividirem a responsabilidade de uma função principal ou secundária. A DSM foi preenchida considerando que na primeira linha e coluna da matriz cada componente é relacionado, na diagonal principal o campo deve ser nulo, pois não há dependência de si próprio. A intersecção entre linhas e colunas, quando preenchida, deve representar a dependência do elemento da linha com o elemento da coluna.

A identificação do agrupamento de dependência entre os componentes significa que há um grande potencial de se tornar um módulo. A confirmação que esse agrupamento se tornará um módulo depende da análise subjetiva do grupo de projeto.

A tarefa seguinte inicia-se após o conhecimento da divisão dos módulos de cada sistema. A tarefa 2.2.2 consiste em classificar os módulos quanto à função que desempenham no sistema. Segundo Pahl et al. (2005) os módulos devem ser classificados conforme sua função e importância no sistema. Essa tarefa mais uma vez utiliza a cadeia de funções de Pahl et al. (2005), onde módulos que desempenham funções principais serão módulos principais e os que desempenham funções secundárias serão os módulos secundários, conforme figura 5.1.10.

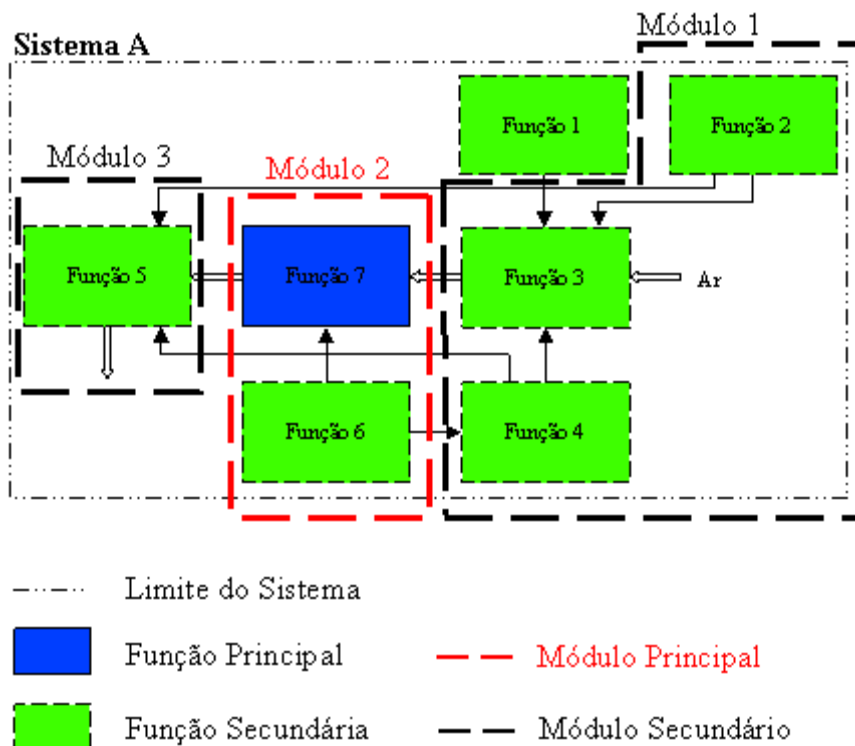


Figura 5.1.10: Classificação dos módulos quanto à função.

A tarefa 2.2.3 classifica os módulos de acordo com sua importância no sistema. Os módulos que são fundamentais, repetitivos ou imprescindíveis são denominados de básicos e os que auxiliam esses módulos como elementos de ligação, integração ou que funcionam como sustentações são chamados de módulos auxiliares.

Nessa tarefa ainda se desenvolve a codificação dos módulos. Cada módulo deve ser codificado para que suas características principais sejam decifradas apenas com a leitura desses códigos. Em outras palavras, inicia-se a documentação do projeto, a partir desse momento os módulos terão uma identificação que segue o critério da figura 5.1.11.

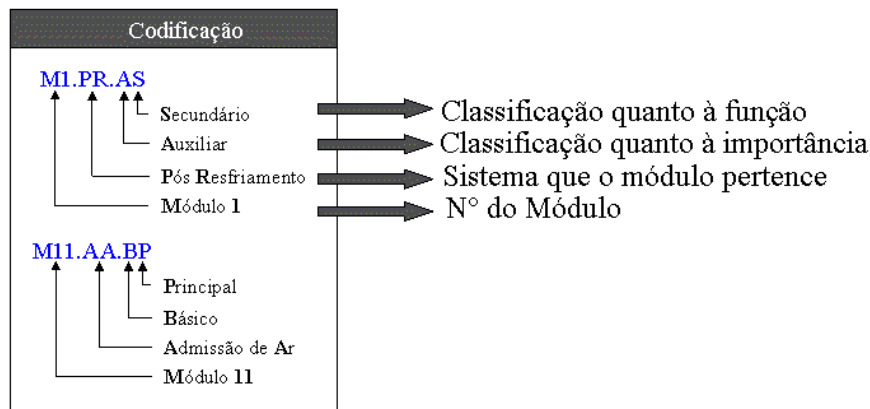


Figura 5.1.11: Codificação dos módulos.

A etapa 2.3 inicia-se com a tarefa 2.3.1 que consiste em identificar as interfaces entre os módulos e as interfaces dos módulos com o motor. Segundo Persson (2004) a interface é a grande responsável pelo sucesso da modularidade, ainda Ulrich (1995) classifica-as como interfaces acopladas, desacopladas e sem contato. Nesse trabalho foi adotado o mesmo critério de classificação, portanto interface acoplada é aquela que se alterar um lado conectado deverá alterar também o outro lado. Interface desacoplada é aquela que um lado conectado pode sofrer alteração sem alterar o outro lado. Sem contato é a interface que apenas requer alinhamento e garantia da folga entre os componentes para o bom funcionamento. A figura 5.1.12 ilustra essas definições.

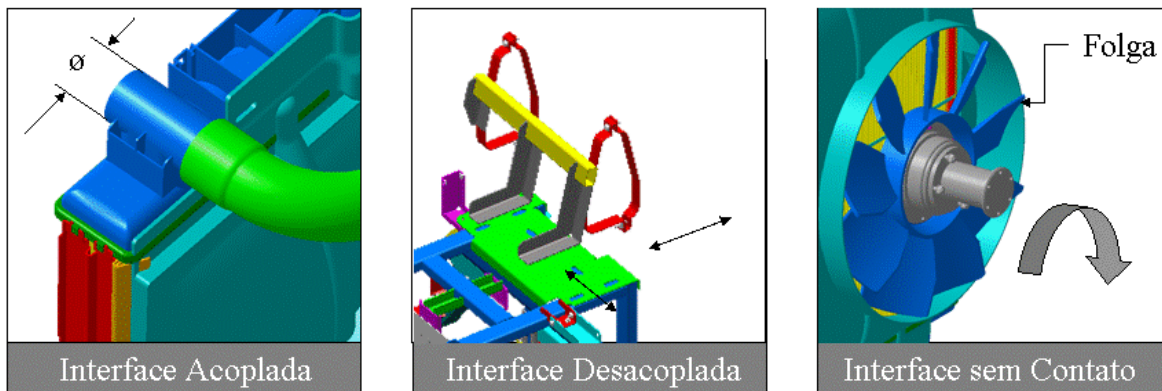


Figura 5.1.12: Tipos de interfaces. (Ulrich, 1995)

Para identificação das interfaces utiliza-se a árvore de componentes adaptada do trabalho Gershenson et. al, (1999). Essa árvore permite visualizar todos os módulos e identificar suas interfaces, figura 5.1.13.

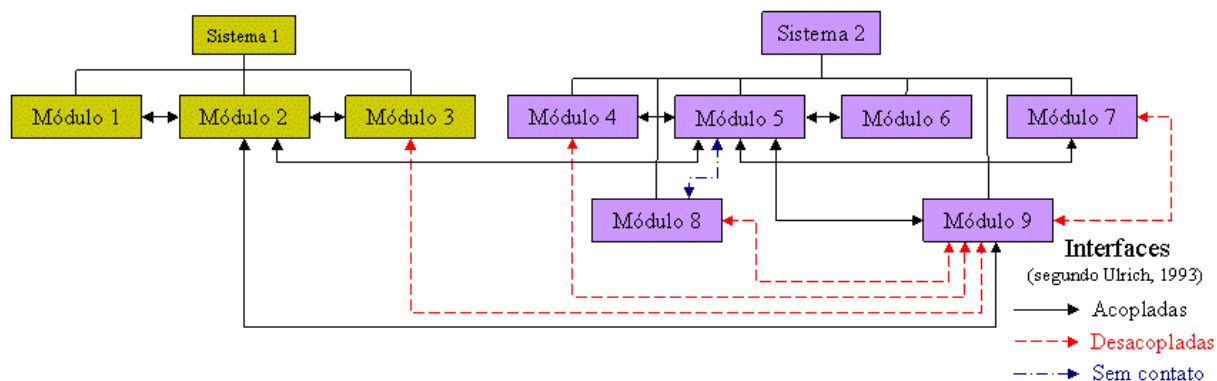


Figura 5.1.13: Árvore de módulos para identificação das interfaces.(Gershenson et al., 1999)

A tarefa 2.3.2 é a repetição da tarefa 2.3.1, mas agora identificando as interfaces dos módulos com o motor, utilizando a árvore de componentes adaptada do trabalho Gershenson et al., (1999), figura 5.1.14.

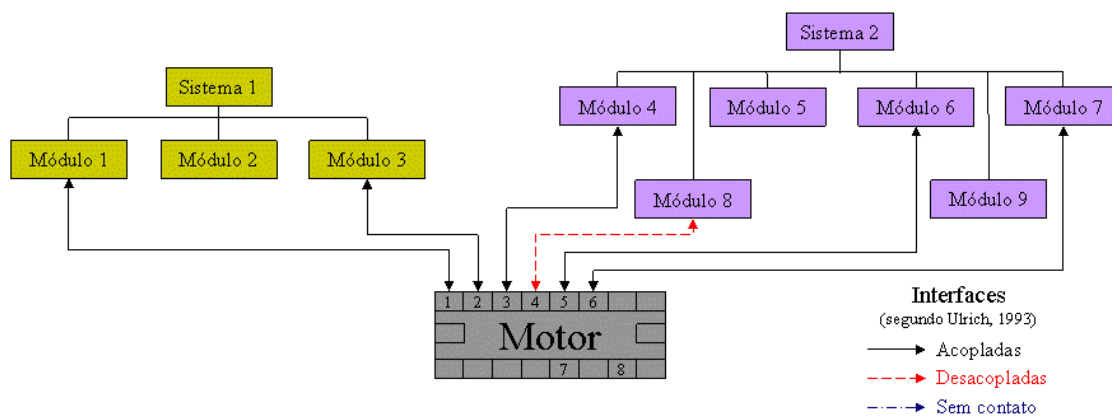


Figura 5.1.14: Identificação das interfaces entre módulos e motor. (Gershenson et al., 1999)

A etapa 2.4 através da tarefa 2.4.1 consiste em codificar as interfaces, da mesma forma que foi feito com os módulos na etapa 2.2. A codificação das interfaces permite identificar suas propriedades sem a necessidade de consultar o projeto. O mapeamento total das interfaces é feito através de duas DSM (Matriz de Estrutura de Projeto). A primeira é utilizada para identificação das interfaces entre módulos. O preenchimento da matriz é feito colocando os módulos na primeira linha e coluna, a diagonal principal deve ser nula, pois não há interface do módulo com o próprio módulo. A intersecção dos módulos cujas interfaces existem são codificadas e as demais são nulas. A segunda DSM é utilizada para mapear as interfaces entre módulos e o motor,

o preenchimento da matriz é idêntico a primeira DSM, com uma diferença que os módulos passarão a compor a matriz com os pontos de conexão do motor.

Os critérios de codificação de todas as interfaces seguem o esquema da figura 5.1.15..

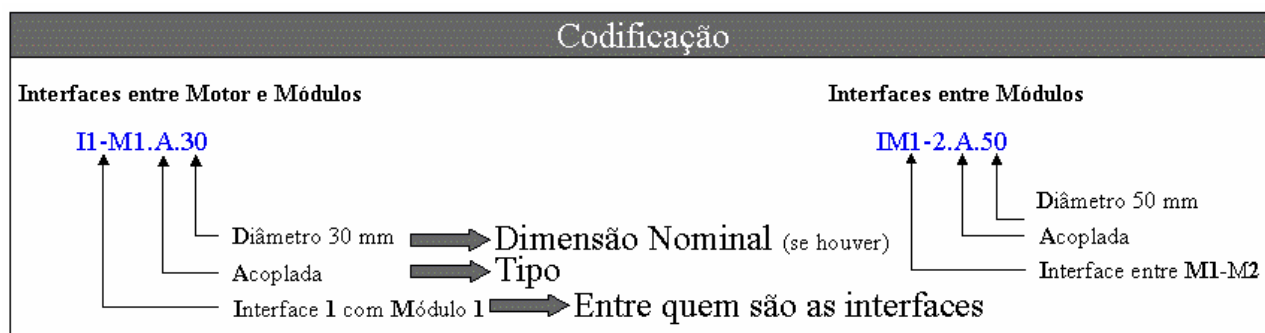


Figura 5.1.15: Codificação das interfaces.

A etapa 2.5 finaliza a fase de concepção. A tarefa 2.5.1 consiste em identificar o que possui arquitetura modular e o que possui arquitetura integral na periferia do motor. A base dessa análise é o trabalho de Ulrich (1995), que declara que a arquitetura modular possui o mapeamento 1:1 entre função e módulo e na arquitetura integral esse mapeamento não é bem definido. Como já conhecemos os módulos, é necessário identificar quais as funções principais e se houver apenas uma função principal por módulo a arquitetura será modular e se houve mais funções principais por módulo a arquitetura será integral, portanto a arquitetura também pode ser mista, ou seja, uma parte se comportar como modular e outra como integral.

5.1.3 Fase 3: Avaliação

A fase 3 nesse trabalho é chamada de avaliação, pois é avaliada a possibilidade de se estender a periferia do motor do chassi-base para os demais chassis do novo portfólio. O desdobramento dessa fase segue a sequência da figura 5.1.16.

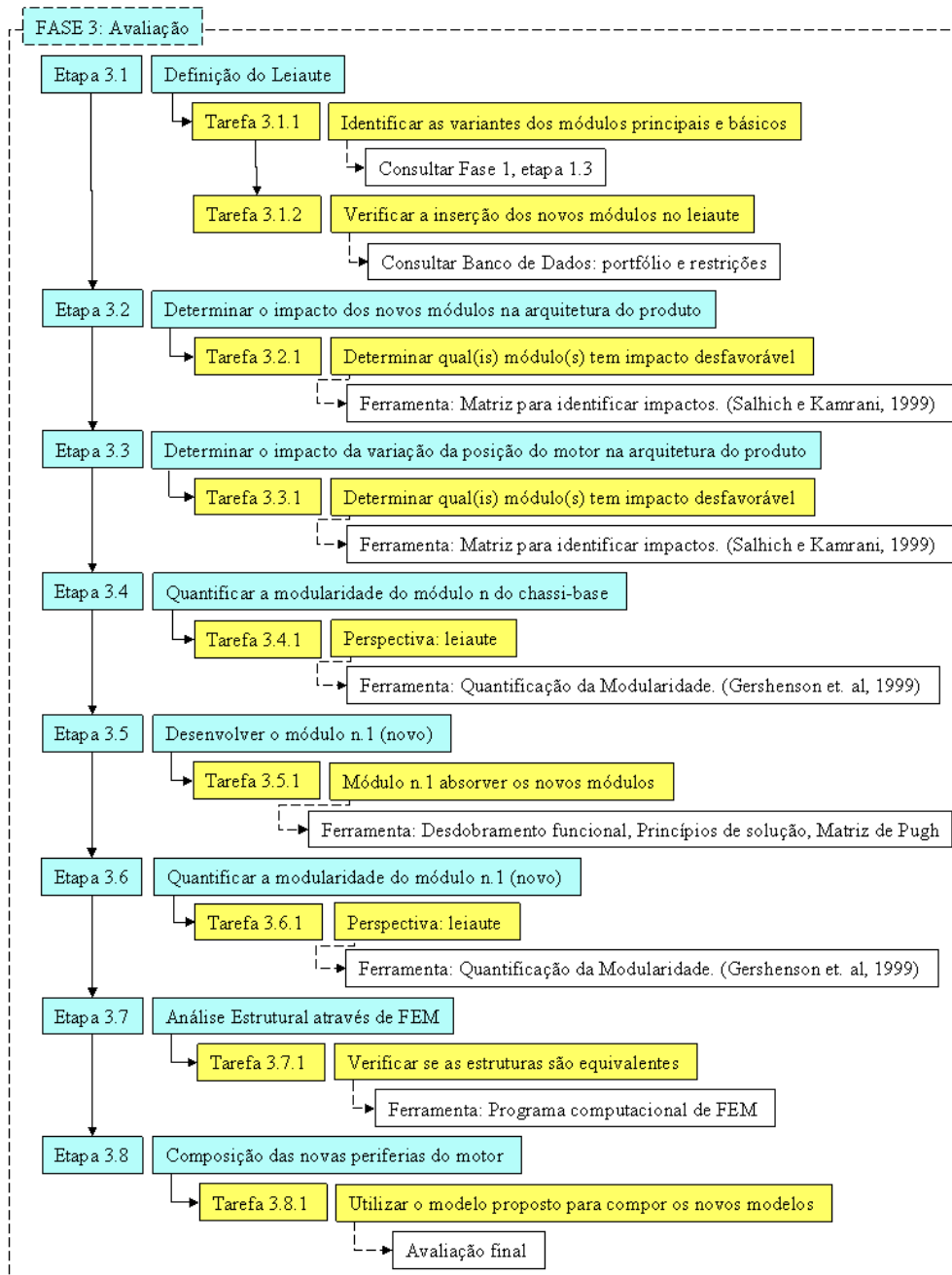


Figura 5.1.16: Fase 3 - Avaliação

A etapa 3.1 inicia-se com a tarefa 3.1.1 que consiste em identificar quais módulos possuem variantes. Se lembrada a etapa 1.3 da fase 1, foi elaborada uma lista com os componentes que possuíam variantes, isto é, para atendimento ao portfólio de produtos esses componentes deveriam atender as especificações como volume, vazão etc. A tarefa 3.1.1 deve compor os novos módulos com esses componentes e identificá-los com a denominação de origem e

acrescentar o número da variante, por exemplo, o módulo M que possui duas variantes deve ser identificado como M1.1, M1.2 etc., conforme ilustra a figura 5.1.17.

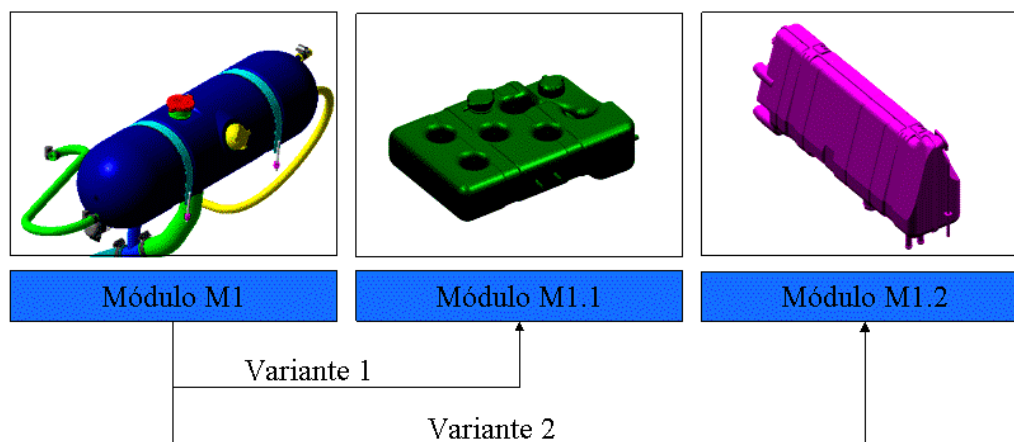


Figura 5.1.17: Módulos variantes.

Na tarefa 3.1.2, todos os módulos já foram identificados, mas ainda é necessário saber se os novos módulos, aqueles criados devido às variantes de seus componentes, sofrerão alterações de leiaute. Em outras palavras, se no chassi-base o filtro de ar existe uma posição no leiaute, quando se verifica outro filtro variante (como dimensões diferentes) que atende outro chassi com aplicação diferente, esse filtro pode não ser possível montá-lo na posição de referência do chassi-base, exemplo na figura 5.1.18.

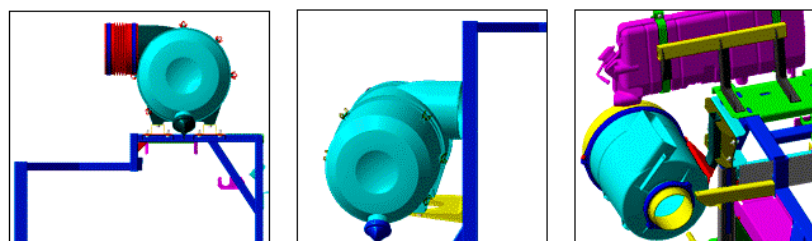


Figura 5.1.18: Variações de leiaute.

Essa tarefa avalia os possíveis novos leiautes para os módulos variantes e a inserção desses módulos no leiaute. Para avaliação dessa inserção é necessário consultar o banco de dados criado na fase informacional, avaliando cada veículo do portfólio e suas características.

A etapa 3.2, através da tarefa 3.2.1 avalia o impacto dos novos módulos variantes causam na arquitetura do produto do chassi-base. A periferia do motor, já divididas em módulos e

conhecidas todas as variações de módulos e leiautes, resta avaliar se o impacto dessas variantes é desfavorável ou não nos demais módulos. Essa avaliação tem o objetivo de determinar se na composição de uma nova periferia seguindo o modelo do chassi-base, quais módulos deverão sofrer modificações para que se mantenha a mesma arquitetura, isto é, a mesma composição dos módulos e suas funções.

Essa avaliação é baseada no trabalho de Salhich e Kamrani (1999), que desenvolveu uma matriz para determinar o impacto que uma modificação de projeto causaria nos módulos existentes. Esse impacto era avaliado com índice 0 quando não impactava, 1 para impacto favorável e -1 para impacto negativo. Nesse trabalho essa matriz foi modificada para se ter uma avaliação mais precisa do impacto causado pela substituição do módulo de referência pelo módulo variante. Os novos índices de avaliação são conforme a tabela 5.1.3.

Tabela 5.1.3: Critério de pesos para a matriz de avaliação de impacto dos módulos variantes. (Adaptado de Salhich e Kamrani, 1999).

Pesos	Impacto
5	Muito desfavorável, necessidade de grandes retrabalhos. O conceito do módulo deve ser reavaliado.
3	Desfavorável, necessidade de retrabalhos. Possibilidade de ajuste sem alteração do conceito.
1	Desfavorável, necessidade de pequenos retrabalhos.
0	Não impacta.
-1	Impacta positivamente. Por exemplo, favorece o leiaute.

A matriz de avaliação de impacto dos módulos variantes nos demais módulos é preenchida colocando na primeira linha os módulos variantes que serão usados no veículo em estudo e na primeira coluna os módulos que se mantêm inalterados em relação ao chassi-base. As intersecções das linhas com as colunas devem ser preenchidas com os índices da tabela 5.1.3. Essa atividade deve ser executada por especialistas no projeto.

A etapa 3.3 consiste em avaliar outro fator que influencia diretamente a composição da periferia do motor que é o posicionamento do motor. Quando possível, a posição do motor deve ser unificada, pois vários módulos têm interfaces comuns com o motor (veja figura 5.1.14), quaisquer alterações de posicionamento do motor implicam em alterações nos módulos. A tarefa 3.3.1 avalia o impacto nos módulos quando não é possível manter o posicionamento do motor unificado. As razões técnicas para a não unificação são a utilização de eixos com diferenciais deslocados do centro do veículo, obrigando o motor a se deslocar também. Motor com cárter (reservatório de óleo do motor) com maior volume e que invade o ângulo de saída do veículo, fazendo com que o motor seja deslocado para cima, enfim, muitas razões podem forçar a não unificação do posicionamento do motor e é muito importante conhecer quais impactos podem causar nos módulos. A figura 5.1.19 ilustra as variações de posicionamento do motor.

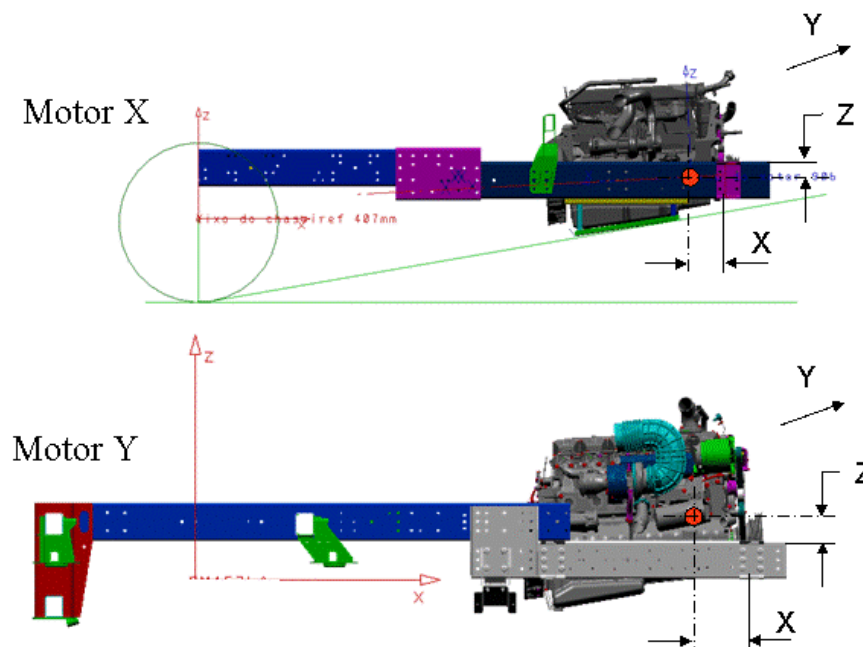


Figura 5.1.19: Variações do posicionamento do motor.

A ferramenta utilizada para essa avaliação é a mesma da etapa 3.2., isto é, foi baseada no trabalho de Salhich e Kamrani (1999) e os critérios de pesos seguem a tabela 5.1.3. A única alteração é no preenchimento da matriz que deve colocar na primeira linha da matriz as variações do posicionamento do motor, o restante é exatamente igual à tarefa 3.2.1.

A etapa 3.4 existirá se após a avaliação do impacto dos módulos variantes e do posicionamento do motor na arquitetura do produto do chassi-base concluir que será necessário reprojeter algum módulo para permitir a extensão da arquitetura de referência para os demais chassis.

O reprojeto de um módulo implica que haverá uma substituição do módulo inicial pelo módulo reprojetoado. A tarefa 3.4.1 visa à garantia de que a modularidade do módulo reprojetoado deve ser no mínimo igual ao anterior. A avaliação da modularidade é baseada no trabalho Gershenson et. al (1999), que utiliza a quantificação da modularidade conforme apresentado no capítulo 4, equação 4.3.5.

O trabalho de Gershenson et. al (1999) avalia a quantificação da modularidade com a perspectiva do ciclo de vida do produto, nesse trabalho a perspectiva da quantificação da modularidade é quanto ao leiaute, isto é, será mais modular o projeto que for mais flexível e adaptável as variações de leiaute.

O cálculo é composto por quatro passos:

1. Construir a árvore de componentes do módulo que se pretende avaliar a modularidade, desmembrando as submontagens, componentes e identificando as relações físicas entre eles.
2. Utilizando a árvore de componentes, identificar quais componentes/conjuntos receberão as variações de leiaute, ou seja, componentes/conjuntos que podem receber módulos montados em outras posições no módulo em estudo.
3. Construir as matrizes que registrarão as relações físicas dos passos 1 e 2, através das similaridades, dependências entre os componentes, leiaute entre conjuntos e possíveis módulos, avaliando-as através de pesos conforme tabela 5.1.4.
4. Aplicar a equação 4.3.5 do capítulo 4.

Tabela 5.1.4: Pesos para avaliação das dependências e similaridades (adaptado de Gershenson et al., 1999).

Pesos para Similaridades e Dependências				Leiaute	
1	Não Similar	1	Não Dependente	1	Básico
2	Levemente Similar	3	Dependente	3	Flexível
3	Similar	5	Altamente Dependente	5	Altamente Flexível
4	Muito Similar				
5	Extremamente Similar				

A etapa 3.5 consiste em desenvolver o(s) módulo(s) para substituição do(s) módulo(s) que impactaram negativamente na avaliação das etapas 3.2 e 3.3. Essa etapa baseia-se no trabalho de Scalice (2003) que abordou uma metodologia de desenvolvimento de produtos modulares através de ferramentas conhecidas e de eficiência comprovada em outros trabalhos acadêmicos e introduziu outras ferramentas muito úteis no projeto modular.

A tarefa 3.5.1 consiste em determinar quais os passos que levarão o desenvolvimento do novo módulo em um reduzido período de tempo e atingindo o objetivo que é atender as possíveis variações de leiaute e manter no mínimo a mesma modularidade do módulo que será substituído. Os passos são:

1. Identificar a função global e desdobrá-la em funções principais e auxiliares.
2. Listar os princípios de solução para as funções identificadas. Ferramenta: matriz morfológica.
3. Através da Matriz de Pugh, selecionar as soluções de projeto que atendem com vantagem as funções estabelecidas.
4. Projetar o módulo.

A etapa 3.6 é a mesma da etapa 3.4. Nessa etapa, através da tarefa 3.6.1, quantifica-se a modularidade do novo módulo e compara-se com o módulo que será substituído, o resultado deve ser no mínimo igual, isto é, o novo módulo deve possuir no mínimo a mesma modularidade. O critério adotado justifica-se, pois o novo módulo possui interfaces com diversas possibilidades de montagens dos módulos variantes. O grau de modularidade medido provavelmente será maior

que a modularidade do módulo anterior porque a avaliação da quantificação da modularidade tem como perspectiva o leiaute e os pesos maiores serão para propriedades que o flexibilizam.

A etapa 3.7, através da tarefa 3.7.1, avalia-se se o novo módulo é equivalente estruturalmente. Para essa avaliação utiliza-se uma ferramenta computacional de Elementos Finitos, através de ciclos de cálculos e com possíveis adaptações no projeto, busca-se a aprovação com os mesmos critérios que aprovaram o módulo que será substituído.

A última etapa do trabalho, etapa 3.8 é a avaliação final. Através da tarefa 3.8.1 simula-se a composição de uma nova periferia e avalia-se se o modelo utilizado permite estender a arquitetura do chassi-base aos novos veículos do portfólio, isto é, deve-se verificar se há o controle de todos os parâmetros de projeto. Essa simulação segue os seguintes passos:

1. Definir qual veículo será simulado. Escolher no portfólio de novos veículos.
2. Identificar as características do veículo, selecionar o motor com a potência adequada.
3. Verificar no caderno de conceitos do veículo se o posicionamento do motor é unificado com o chassi-base, se unificado, não haverá modificações nos módulos que sofrem influência desse quesito. (veja etapa 3.3)
4. Caso haja alteração no posicionamento do motor, identificar os módulos que devem ser alterados e substituí-los pelos módulos variantes.
5. Compor cada sistema com seus respectivos módulos, observar que essa composição já se deve montar os módulos variantes que atendem as especificações técnicas do veículo. Esses módulos foram desenvolvidos baseados nas restrições de projeto da fase 1, informacional, etapas 1.1, 1.2 e 1.3.
6. Codificar todos os módulos conforme etapa 2.2.
7. Identificar todas as interfaces entre módulos e entre módulos e motor.
8. Codificar as interfaces conforme etapa 2.4.

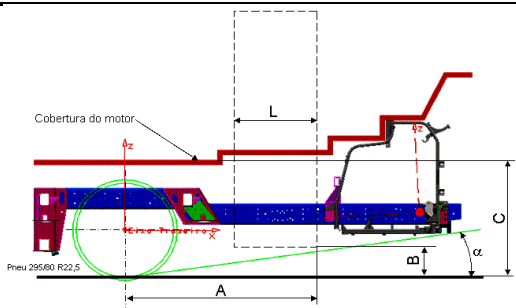
9. Montar o leiaute final com todos módulos e informações do portfólio, registrando as principais restrições da fase 1, informacional.
10. Caso o leiaute atenda as especificações do portfólio, encerra-se o trabalho. Se houver algum item não atendido, deve-se identificar em que fase foi concebida e refazê-la até atendimento de todas as especificações do projeto.

5.2 Desenvolvimento e resultados

O trabalho inicia-se com a coleta de informações, conforme descrita na metodologia. As informações são usadas no decorrer do trabalho. A figura 5.1.1 resume as informações da etapa 1.1, onde se encontram os chassis denominados de modelos A, B, C e D. Esses modelos terão a periferia do motor modelada conforme a arquitetura do chassi-base.

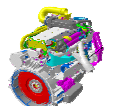
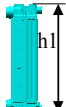
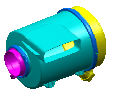
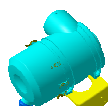
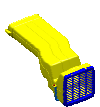
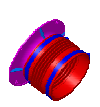
Na etapa 1.2 faz-se o levantamento das restrições de projeto para cada segmento e mercado que se destina, devem ser pesquisadas quais alturas de acesso e do salão de passageiros, qual o posicionamento das portas, qual o ângulo de saída e os principais contornos da cobertura do motor utilizados pelos encarroçadores. Não é necessário utilizar todos os contornos de todos os encarroçadores, mas fazer uma seleção e identificar qual o contorno possui mais restrições para cada segmento e utilizá-los como padrão. Na tabela 5.2.1 é apresentado um resumo das informações dessa etapa.

Tabela 5.2.1: Informações da fase 1, etapa 1.2.

							
	α = Ângulo mínimo de saída	Porta			Cobertura do Motor		
		A	B	L	C	Encarroçador	Modelo
Modelo A	8°	1700	370	850	920	Induscar	Apache
Modelo B	8°		370		1050	Marcopolo	Viaggio 1050
Modelo C	8°	1900	370	1100	920	Marcopolo	Viale
Modelo D	8°	1700	370	850	920	Busscar	Urbanuss

Na etapa 1.3 são identificados os principais componentes que vão compor a periferia do motor dos modelos do portfólio, para cada modelo devem ser relacionados os componentes com as especificações técnicas adequadas, um detalhe importante é que muitas vezes temos dois componentes que atendem as mesmas especificações, mas são utilizados em conjuntos distintos. Por exemplo, a tomada de ar é especificada pela área de captação do ar, outro fator é o posicionamento que pode ser na lateral ou no teto. A posição de montagem que for escolhida deve ser composta por uma tomada de ar e um filtro de ar específico para aquela posição. Outra observação, os radiadores são escolhidos pela área de captação de ar, mas como as larguras são iguais para os diversos modelos optou-se por mencionar somente a altura que é o fator que o diferencia. Na tabela 5.2.2 é apresentada a composição de cada modelo.

Tabela 5.2.2: Informações da fase informacional, etapa 1.3.

			Modelo A	Modelo B	Modelo C	Modelo D
Motor X		Potência	250 cv			250 cv
Motor Y		Potência		300 cv	360 cv	
Radiadores de Ar e Água		Altura	660 mm	925 mm	925 mm	750 mm
Filtro de Ar 1		Vazão	21 m3/min.			21 m3/min.
Filtro de Ar 2		Vazão		33 m3/min.	33 m3/min.	
Tomada de ar 1		Área	3,9 dm2			3,9 dm2
Tomada de ar 2		Área		3,9 dm2	3,9 dm2	
Silencioso		Volume	70 l.	100 l.	104 l.	100 l.

A fase informacional encerra-se com a etapa 1.4 que é a identificação do chassi-base para referência da análise modular, com isso está completa a coleta das informações necessárias para alimentar as demais fases. A próxima fase é a fase 2 denominada concepção, pois é nessa fase que será analisada a arquitetura da periferia do motor do chassi-base. Inicia-se com a etapa 2.1 identificando os sistemas que compõem a periferia do motor. Conforme o capítulo 2, os sistemas periféricos do motor têm a função de auxiliar o bom desempenho e garantir a longevidade do motor. É composto por sistema de pós resfriamento, responsável pela temperatura adequada do ar da combustão do motor, o sistema de arrefecimento, responsável pela temperatura da água que resfria o bloco do motor, sistema de admissão de ar, responsável pela captação e filtragem do ar que alimenta o motor e o sistema de escape responsável pela exaustão e tratamento dos gases de escape, conforme ilustra a figura 5.2.1.

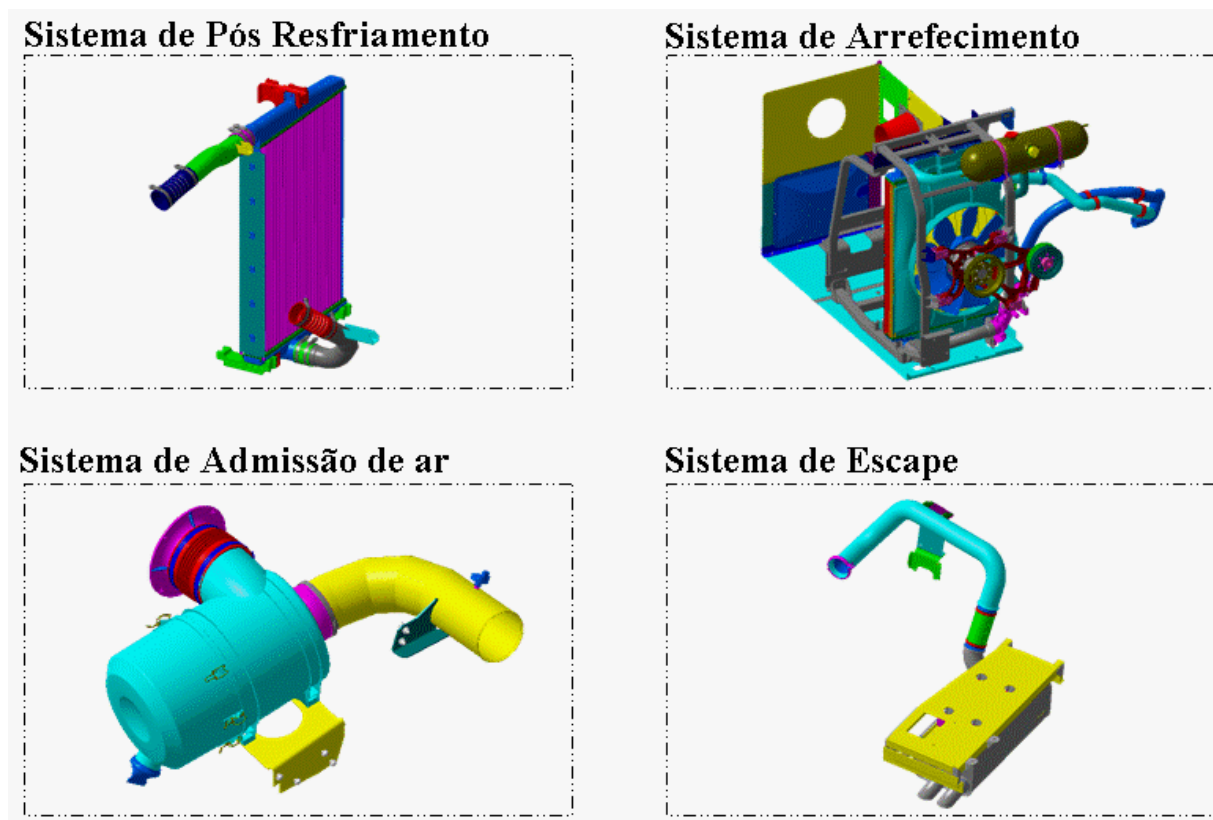


Figura 5.2.1: Divisão dos sistemas da periferia do motor do chassi-base.

A divisão dos sistemas permitiu identificar quais componentes estão executando a função global do sistema, mas é necessário conhecer as demais funções que compõe a função global. A cadeia de funções permite identificar os fluxos de material, sinal e energia, clarificando o

funcionamento de cada sistema e identificando a importância das funções que compõe a função global e deve ser aplicada a todos os sistemas. Na figura 5.2.2 é mostrada a cadeia de funções dos sistemas de pós resfriamento e arrefecimento.

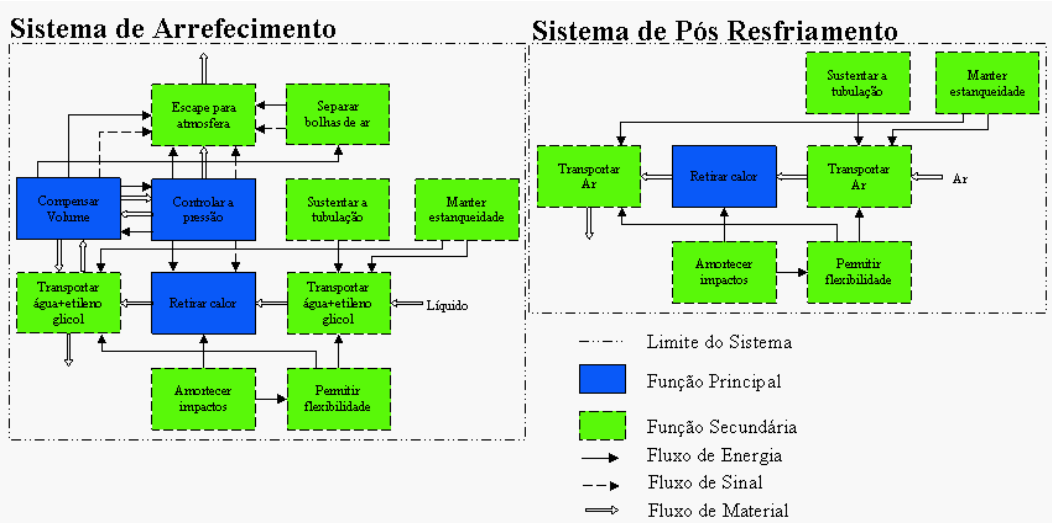


Figura 5.2.2: Cadeia de funções para os sistemas de arrefecimento e pós resfriamento do chassi-base.

Observando a cadeia de funções dos sistemas, identificam-se em um único sistema várias funções principais e secundárias, mas ainda não se pode relacioná-las com os componentes. A etapa 2.1 finaliza-se relacionando componente e função através do mapeamento funcional dos componentes, segundo Ulrich (1995). A figura 5.2.3 ilustra o mapeamento funcional.

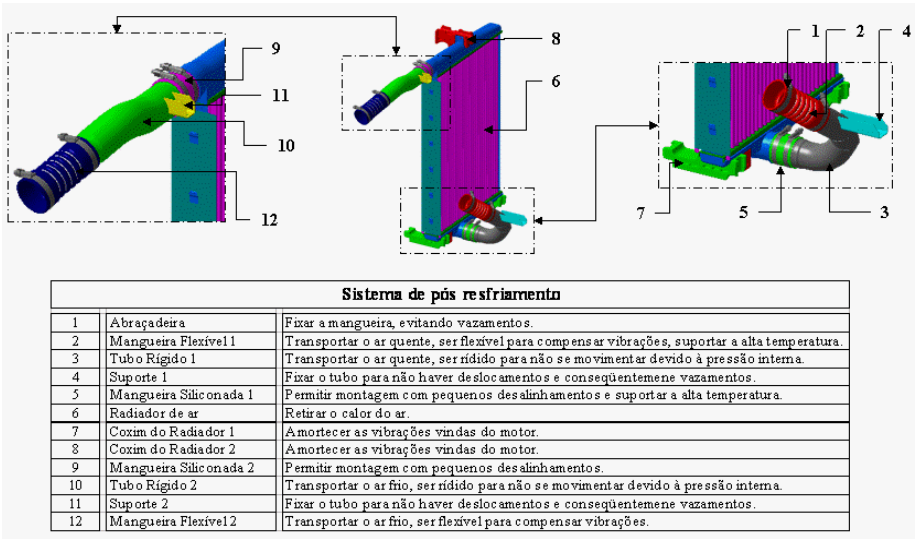


Figura 5.2.3: Mapeamento funcional do sistema de pós resfriamento.

No exemplo da figura 5.2.3, foi mapeado o sistema de pós resfriamento e facilmente é possível identificar que o componente 6 (radiador de ar) executa a função principal do sistema que é retirar o calor do sistema e os demais componentes realizam as funções secundárias. A função principal muitas pode ser executada por mais de um componente, ou ainda um componente executar mais de uma função principal. O mapeamento funcional é feito para todos os sistemas.

A etapa 2.2 é a análise de todos os sistemas do chassi-base para identificação dos módulos. Utilizando a DSM (Matriz de Estrutura de Projeto) podemos agrupar os componentes com maior grau de dependência entre eles, formando um módulo. Dessa forma mantemos o conceito de Gu et al.(1997), que em um módulo deve haver alta interdependência de seus componentes. Na figura 5.2.4 é apresentado um exemplo da DSM do sistema de pós resfriamento.

Matriz de Dependências do Sistema de Pós Resfriamento												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1
2	1		1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
3	0	1		1	1	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1		0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	0	1	0		1	0	0	0	0	0	0
6	0	1	0	0	1		1	1	1	1	0	1
7	0	0	0	0	0	1		0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	1	0		0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	1	0	0		1	0	0
10	0	0	0	0	0	1	0	0	1		1	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		0
12	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	

0 → Não Dependência

1 → Dependência

Módulo 1

Módulo 2

Módulo 3

Figura 5.2.4: Matriz para identificação dos módulos.

Identificados os módulos de cada sistema é necessário identificar quais módulos executam as funções principais e as secundárias. Através da cadeia de funções são delimitados os módulos e relacionados com o tipo de função, conforme mostra a figura 5.2.5.

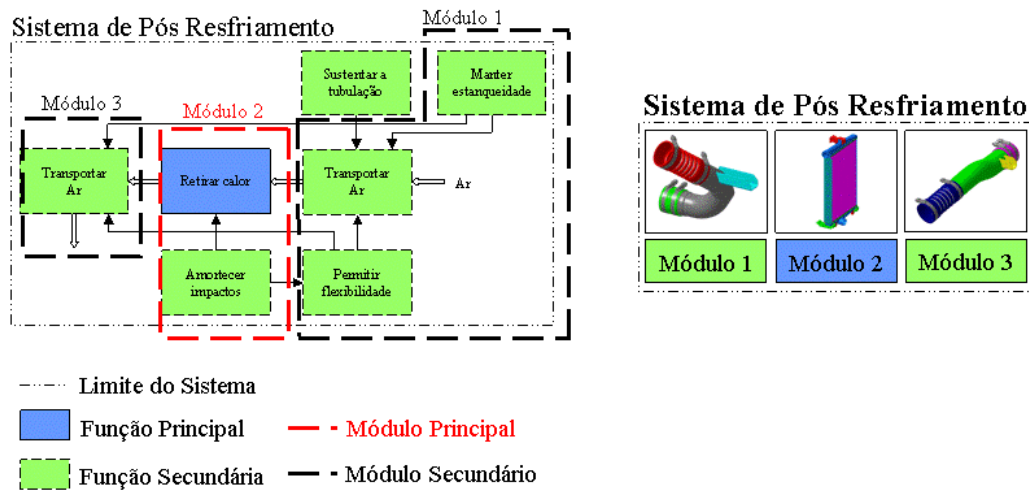


Figura 5.2.5: Identificação dos módulos quanto à função.

Na etapa 2.2 os módulos são classificados quanto à importância: básicos ou auxiliares. Outro ponto importante é a codificação dos módulos segundo os critérios já abordados no tópico 5.1., é aqui que se inicia a documentação do projeto. Os códigos trazem informações que determinam as características dos módulos, auxiliando nas próximas etapas do desenvolvimento do projeto. Na figura 5.2.6 é apresentado um resumo com os sistemas e a divisão dos módulos já codificados.

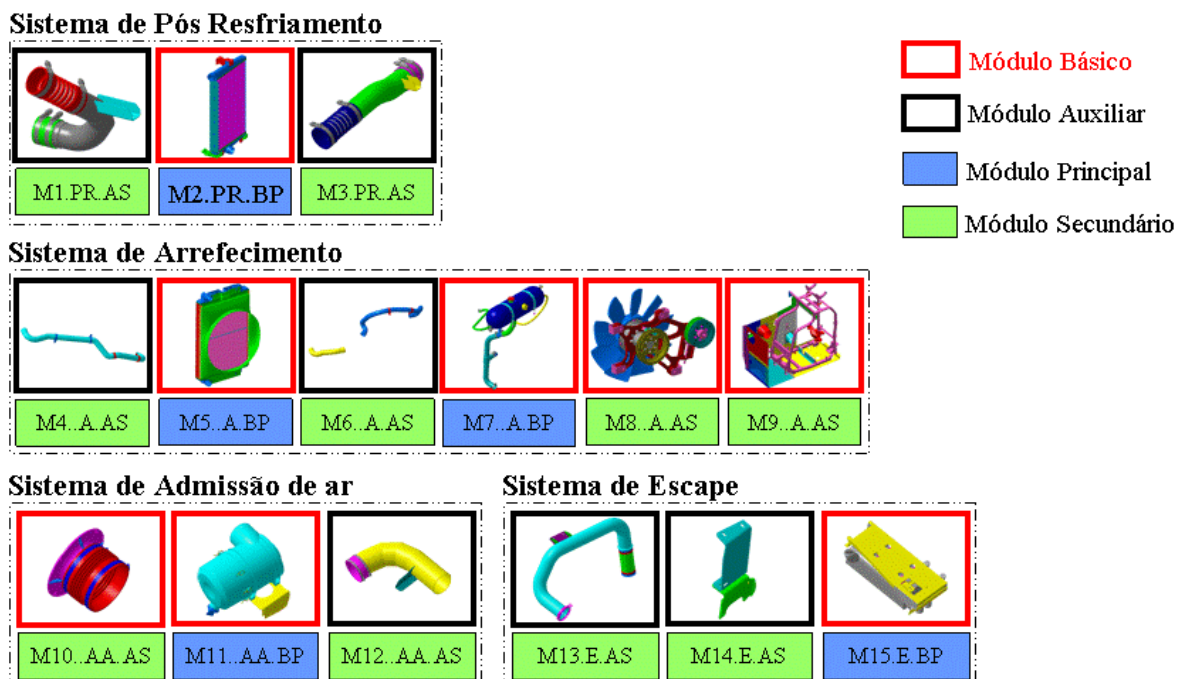


Figura 5.2.6: Resumo da etapa 2.2.

		Pós Aquecimento			Arrefecimento					
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
P. Aquecimento	M1		IM1-2.A.55							
	M2	IM1-2.A.55		IM2-3.A.55		IM2-5.A				IM2-9.A
	M3		IM2-3.A.55							IM3-9.D
Arrefecimento	M4					IM4-5.A.55				IM4-9.D
	M5		IM2-5.A		IM4-5.A.55		IM5-6.A.55	IM5-7.A.10	IM5-8.S	IM5-9.A
	M6					IM5-6.A.55				
	M7					IM5-7.A.10				IM7-9.D
	M8					IM5-8.S				IM8-9.D
	M9		IM2-9.A	IM3-9.D	IM4-9.D	IM5-9.A		IM7-9.D	IM8-9.D	
	M10									IM9-10.D
Admissão de Ar	M11									
	M12									IM9-12.D
Escape	M13									
	M14									
	M15									

		Admissão de Ar			Escape		
		M10	M11	M12	M13	M14	M15
P. Aquecimento	M1						
	M2						
	M3						
Arrefecimento	M4						
	M5						
	M6						
	M7						
	M8						
	M9	IM9-10.D		IM9-12.D			
	Admissão de Ar	M10		IM10-11.A.145			
M11		IM10-11.A.145		IM11-12.A.145			
M12			IM11-12.A.145				
M13						IM13-14.A	IM13-15.A
Escape	M14				IM13-14.A		IM14-15.A.102
	M15				IM13-15.A	IM14-15.A.102	

Figura 5.2.9: Codificação das interfaces entre módulos.

Classificação das Interfaces do Motor									
Pós Aquecimento			Arrefecimento					Escape	
		M1	M3	M4	M6	M7	M8	M12	M13
Motor	1	I1-M1.A.80							
	2		I2-M3.A.80						
	3			I3-M4.A.55					
	4						I4-M8.A.12		
	5				I5-M6.A.55				
	6					I6-M7.D			
	7							I7-M12.A.145	
	8								I8-M12.A

Figura 5.2.10: Codificação das interfaces entre módulos e o motor.

A etapa 2.5 finaliza a análise da arquitetura da periferia do motor do chassi-base. Nessa fase verifica-se se o mapeamento funcional dos módulos é 1:1 o que conforme Ulrich (1995) caracteriza uma arquitetura modular ou se o mapeamento é diferente disso, a arquitetura seria integral. Na figura 5.2.11 é apresentada a arquitetura do chassi-base.

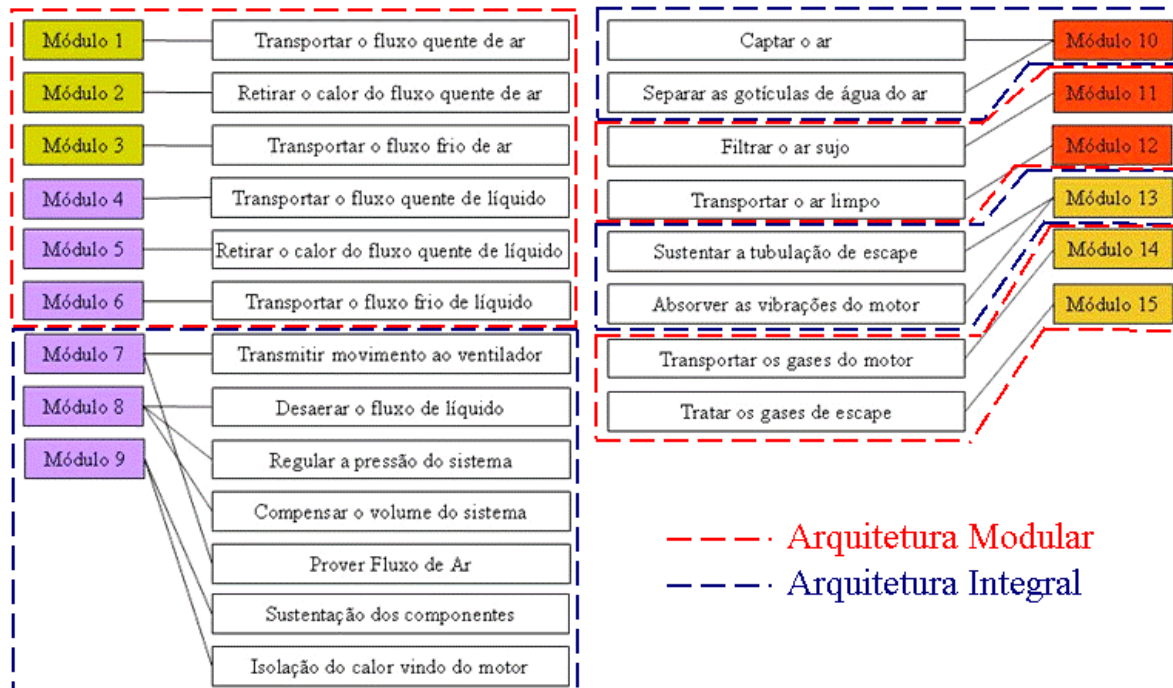


Figura 5.2.11: Arquitetura da periferia do motor do chassi-base.

A arquitetura do chassi-base é mista, isto é, dos módulos 1 ao 6, incluindo os módulos 11, 12, 14 e 15 o mapeamento funcional é 1:1 o que implica ser uma arquitetura modular. O conhecimento do tipo de arquitetura permite saber o quanto pode ser abrangente modificar os módulos. No caso apresentado podemos afirmar que se modificarmos quaisquer dos módulos mencionados acima, a modificação se limitará apenas a esses módulos, não afetando os módulos vizinhos. As regiões da periferia do motor onde a arquitetura é integral têm que ser avaliadas criteriosamente se for necessárias modificá-las. A modificação de um módulo pode refletir em outros módulos que também sofrerão modificações.

A fase 2 encerra-se na etapa 2.5. A análise modular do chassi-base que envolveu a determinação dos sistemas, módulos, interfaces e suas classificações conforme os trabalhos de Pahl et. al (2005), Ulrich (1995) e ainda a proposição de uma codificação de módulos e

interfaces, reuniu as informações necessárias para se conhecer a arquitetura da periferia do motor. Essa arquitetura será estendida para os demais veículos e conseqüentemente a modularidade também.

A fase 3 é chamada de avaliação, pois nessa fase serão feitas avaliações do que pode acontecer se um veículo utilizar o mesmo modelo de arquitetura de outro veículo da mesma família. A fase anterior já definiu que os veículos do novo portfólio serão compostos por quatro sistemas, quinze módulos, interfaces pré-estabelecidas e já identificadas às regiões cuja arquitetura será modular ou integral. A avaliação desse modelo de arquitetura inicia-se com a etapa 3.1, que se baseia na etapa 1.3 para estabelecer quais módulos variantes serão necessários para compor cada modelo do portfólio, conforme figura 5.2.12.

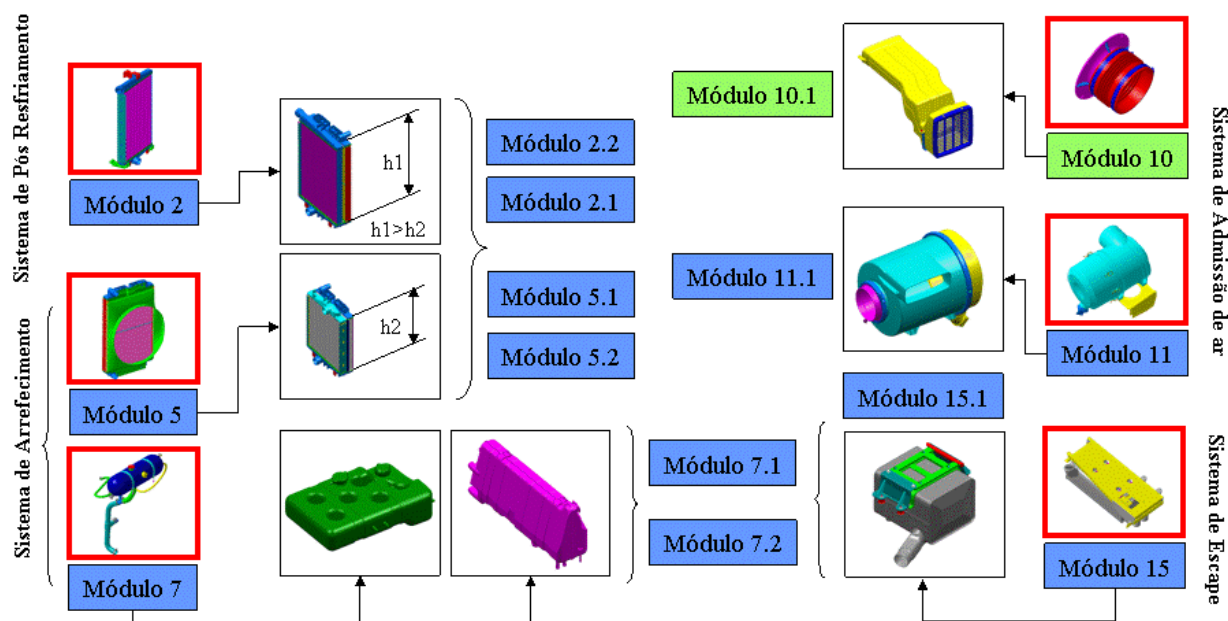


Figura 5.2.12 : Identificação dos módulos variantes através das características técnicas.

A etapa 3.1 finaliza-se com a avaliação da inserção dos módulos variantes nos leiautes de cada novo modelo, o objetivo é identificar se há variação de posição de montagem dos módulos variantes e se essa variação pode ser absorvida ou se devem criar outras variações de módulos, conforme figura 5.2.13.

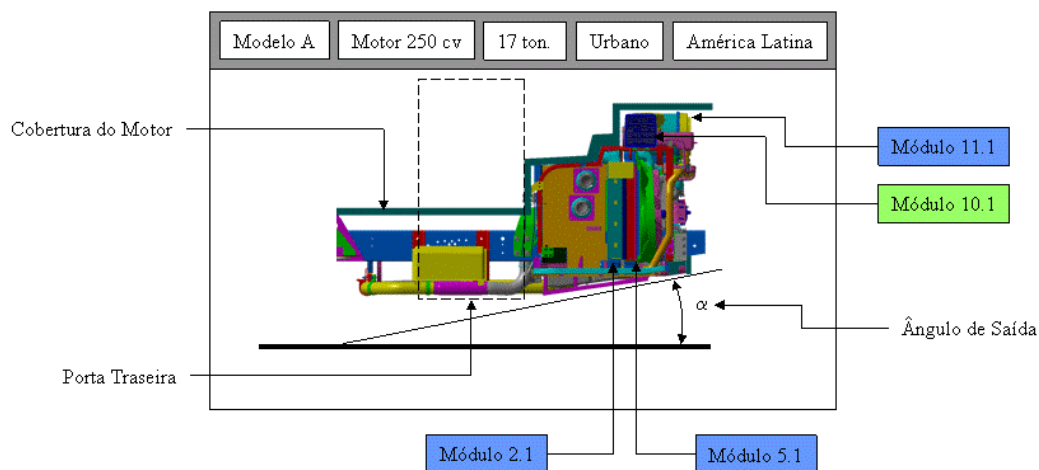


Figura 5.2.13: Verificação da inserção dos módulos variantes nos leiautes dos novos modelos.

A fase 3.2 avalia o impacto dos módulos variantes na arquitetura do chassi-base, isto é, identificam quais módulos são favorecidos ou desfavorecidos e analisa através dos critérios e métodos descritos no tópico 5.1, o que deve ser feito com os módulos afetados, conforme figura 5.2.14.

Matriz de Impacto dos módulos variantes nos módulos existentes											
		Pós Aquecimento		Arrefecimento				Admissão de Ar		Escape	
		M2.1	M2.2	M5.1	M5.2	M7.1	M7.2	M10.1	M11.1	M15.1	Σ
P. Aquecimento	M1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2
Arrefecimento	M4	0	0	1	1	0	0	0	0	0	2
	M5	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2
	M6	0	0	1	1	1	1	0	0	0	4
	M7	0	0	3	3	0	0	0	0	0	6
	M8	0	0	3	3	0	0	0	0	0	6
	M9	5	5	5	5	3	3	3	3	0	32
Admissão de Ar	M10	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3
	M11	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3
	M12	0	0	0	0	0	0	3	3	0	6
Escape	M13	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
	M14	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
	M15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 5.2.14: Matriz de avaliação de impacto dos módulos variantes nos módulos do chassi-base.

A análise da matriz acima permite concluir que os módulos 3, 4, 5 e 6 sofrerão pequenos ajustes quando se relacionarem com as variantes M2.1, M2.2, M5.1, M5.2, M7.1 e M7.2. Esses ajustes vão gerar novas variantes para compor os novos modelos. O módulo 9 é o que sofrerá maior impacto quando se relacionar com as variantes dos módulos de outros sistemas, o que é compreensível se lembrar que esse módulo tem uma arquitetura integral e executa mais que uma função. Outro ponto importante, o módulo 9 é responsável pela sustentação dos componentes o que o leva a ter interfaces com o restante dos módulos.

O módulo 9, segundo os critérios de avaliação da tabela 5.1.3, deve ser reprojeto sob um novo conceito, para que a inserção de módulos variantes cause o menor impacto possível.

A etapa 3.3 avalia o impacto nos módulos do chassi-base quando não é possível unificar a posição do motor dos novos modelos o chassi-base, isto é, o objetivo é determinar quais módulos sofrerão modificações e qual a abrangência e importância, gerando novos módulos variantes, conforme figura 5.2.15.

Matriz de Impacto da variação da posição do motor				
Módulos		Motor X	Motor Y	Σ
P Aquecimento	M1	3	3	6
	M2	0	0	0
	M3	3	3	6
Arrefecimento	M4	3	3	6
	M5	0	0	0
	M6	3	3	6
	M7	1	1	2
	M8	1	1	2
	M9	0	0	0
Admissão de Ar	M10	0	0	0
	M11	0	0	0
	M12	3	3	6
Escape	M13	3	3	6
	M14	0	0	0
	M15	0	0	0

Figura 5.2.15: Matriz de avaliação de impacto da variação do posicionamento do motor nos módulos do chassi-base.

A análise da matriz acima identifica que a variação do posicionamento do motor vai gerar novos módulos variantes, mas com pequenas alterações em relação aos módulos do chassi-base. Não será necessário o desenvolvimento de novos conceitos de módulos, apenas os módulos 1, 3, 4, 6, 12 e 13 implicarão em modificações mais relevantes. Os módulos 7 e 8 devem sofrer pequenos ajustes.

A etapa 3.4 avalia a substituição do módulo 9, isto é, o módulo substituto deve ser no mínimo tão modular quanto o módulo substituído. Para isso avalia-se a quantificação da modularidade do módulo 9 segundo o método e critérios do tópico 5.1. A figura 5.2.16 apresenta a árvores de componentes com as abstrações e as conexões dos conjuntos com os módulos.

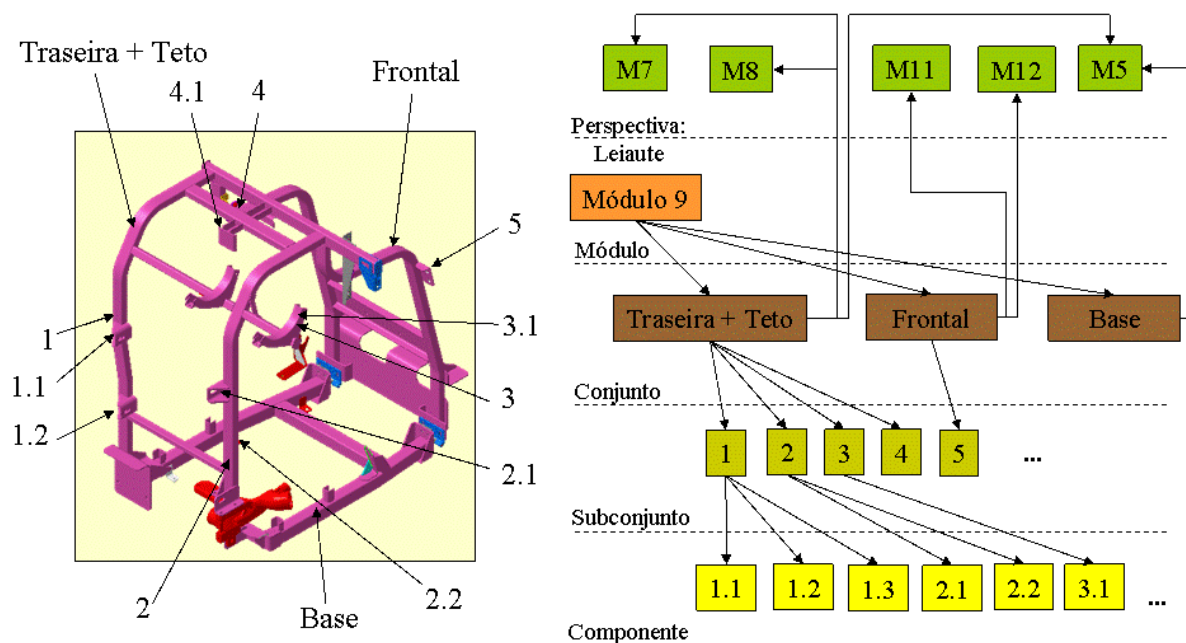


Figura 5.2.16: Abstrações da árvore de componentes.

A árvore de componente auxiliará na determinação das dependências e similaridades, essas questões são avaliadas com o objetivo de incorporar na quantificação da modularidade o conceito de padronização e comunização. Se o projeto possuir componentes com funções similares e geometrias similares e ainda não dependam funcionalmente de outro módulo, o índice que avaliará a modularidade será maior. Questões de leiaute, quanto mais possibilidades de interfaces com módulos variantes sem alterar sua construção, maior será a modularidade do módulo. Na figura 5.2.17 é apresentado um exemplo da matriz de dependências e similaridades.

		Traseira +Teto				Leiaute
		Conj.1	Conj.2	Conj.3	Conj.4	
Conj.1			4 e 5	0 e 3	0 e 3	
Conj.2		4 e 5		0 e 3	0 e 3	
Conj.3		0 e 3	0 e 3		0 e 0	
Conj.4		0 e 3	0 e 3	0 e 0		

Figura 5.2.17: Matriz de dependências, similaridades e leiaute.

A avaliação de dependências, similaridades e leiaute deve ser feita no nível de abstração que for representativo para o projeto, nesse estudo de caso avaliou-se apenas até o nível dos conjuntos, pois o fator mais importante que decidirá a substituição do módulo 9 é a flexibilidade em absorver novos módulos variantes com o mínimo impacto desfavorável. O cálculo da modularidade servirá como um parâmetro de comparação do módulo 9 com o módulo substituto, visto na figura 5.2.18.

Módulo / Sub conjunto	Sin	Sout	Din	Dout	RM
Frontal	7	12	13	10	0,93
Traseira + Teto	4	6	15	12	0,95
Base	5	6	12	20	0,82
Modularidade Total Relativa					0,9

Figura 5.2.18: Índice de modularidade do módulo 9 do chassi-base.

Avaliação total da modularidade resultou em índice 0,9 que é um número adimensional e só terá significado quando comparado com o índice de modularidade do módulo substituto.

A fase 3.5 desenvolve o módulo que substituirá o módulo 9, seguindo os passos do tópico 5.1, a função global é identificada e desmembrada em funções principais e secundárias, conforme figura 5.2.19.

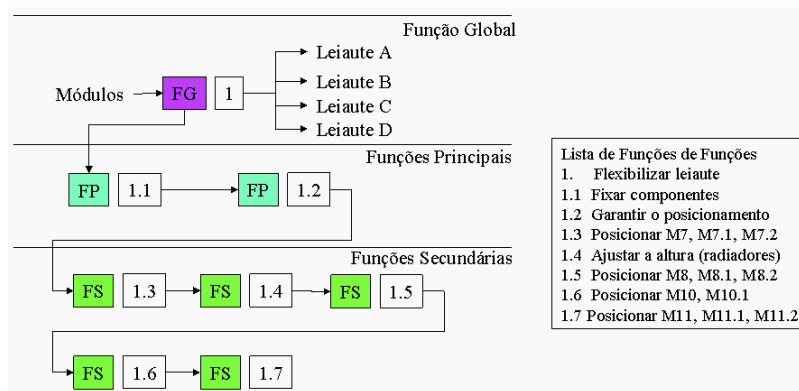
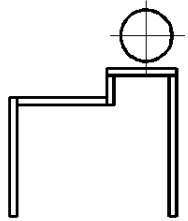
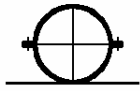
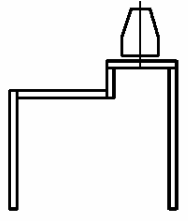
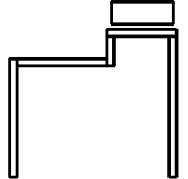
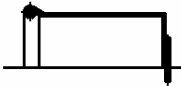
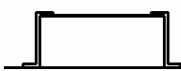
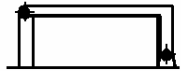
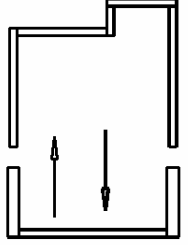
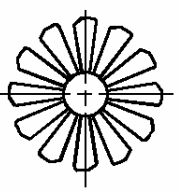
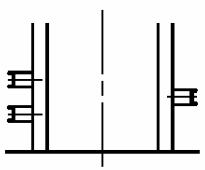
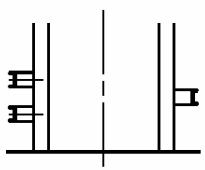
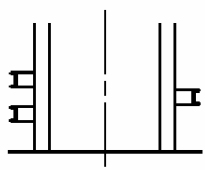
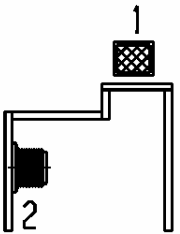
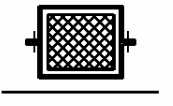
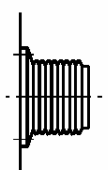
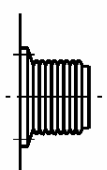
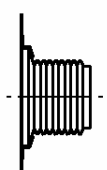
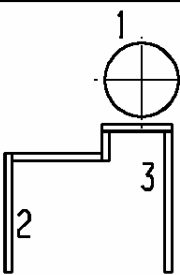
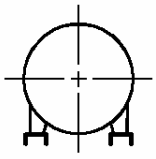
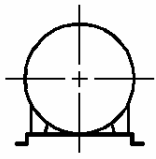
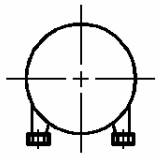


Figura 5.2.19: Desdobramento funcional do novo M9. (Baseado em Scalice, 2003)

O próximo passo é determinar quais soluções de projeto podem executar as funções identificadas no desdobramento funcional da função global. A ferramenta utilizada é a busca por princípios de solução que pode ser sintetizada em uma matriz morfológica, vista na tabela 5.2.3.

Tabela 5.2.3: Matriz morfológica para princípios de solução. (Scalice, 2003).

		S1	S2	S3
FS 1.3				
		Cinta	Presilha	Perfil U
				
		Cantoneira + Presilha	Presilha	Perfil U + Cinta
				
		Cinta	Perfil Z	Tubo
FS 1.4				
		Trilho: Tubo + Perfil	Trilho: 2 Perfis	Trilho: 2 Tubos

		S1	S2	S3
FS 1.5				
		Suporte Parafusado	S. Soldado + S. Paraf.	Suporte Soldados
FS 1.6		1 	1 	1 
		Suporte Parafusado	Cinta	Presilha
		2 	2 	2 
		Parafusos	Rebites	Perfil Soldado
FS 1.7				
		Perfil U	Perfil Omega	Tubos + Buchas

As soluções de projeto listadas na matriz morfológica devem ser selecionadas de forma que apenas as soluções mais viáveis sejam incorporadas ao projeto. A ferramenta utilizada é a matriz de Pugh que permite avaliar as soluções através de parâmetros de processo, projeto, montabilidade e custo, conforme figura 5.2.20.

Necessidades		Pesos	FS 1.3									FS 1.4			FS 1.5			FS 1.6						FS 1.7			Referência chassi-base
			S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	
Projeto	Robustez	3	0	0	+	0	-	+	0	+	+	+	+	+	0	0	0	0	-	0	0	-	+	0	0	+	
	Funcionabilidade	5	0	0	0	0	-	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Simplicidade	3	0	+	-	0	+	0	0	0	-	-	-	-	-	0	0	+	0	0	+	+	0	0	-		
Processo de Fabricação	Meios convencionais	5	0	0	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	-	0	0	0	0	0	-	0	0	-		
	Ferramental	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	0	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Dispositivos	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0		
Montagem	Simples	5	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	+	0	0	-	-	0	+	0		
	Dispositivos	1	0	0	0	0	-	0	0	+	0	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-		
	Ergonomia	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Custo	Componente	5	0	-	-	0	+	-	0	+	-	-	-	-	-	0	0	+	-	0	0	-	0	+	-		
	Total +		0	1	1	0	2	1	0	3	1	2	2	1	1	1	0	3	0	0	1	2	0	3	1	0	
	Total -		0	-1	-4	0	-3	-1	0	-1	-2	-4	-4	-3	-3	-4	-1	0	-1	-1	0	-2	-3	0	0	-4	
	Total Global		0	0	-2	0	-1	0	0	2	-1	-2	-2	-2	-3	-1	0	2	-1	0	-1	-1	0	3	-3	0	
	Total (com pesos)		0	-2	-10	0	-1	-2	0	4	-5	-8	-8	-6	-10	-15	-5	0	10	-5	0	-5	-9	0	13	-11	

Figura 5.2.20: Matriz de Pugh para o novo módulo 9.

A análise da matriz de Pugh permite concluir quais soluções são as mais adequadas para o projeto, observando a maior pontuação, para algumas funções secundárias como FS 1.4 e FS 1.5 a pontuação é negativa para todas as soluções, o que deve ser explicado. O novo módulo terá múltiplas interfaces e possibilidade de ajustes para os módulos variantes, isto é, as soluções técnicas para execução dessas funções são mais complexas que as soluções do chassi-base. A matriz de Pugh foi elaborada tendo como referencial o chassi-base, dessa forma a escolha correta é a que apresenta o menor valor negativo. Outro ponto é que algumas soluções obtiveram pontuação nula, o que significa que essas soluções são equivalentes as do chassi-base.

O último passo é o projeto das geometrias para definição completa do novo módulo. O projeto deve atender a possibilidade de montagem dos módulos variantes, a divisão de conjuntos ser similar ao M9 do chassi-base. As funções global, principal e secundária devem ser satisfeitas. Na figura 5.2.21 é apresentado o projeto preliminar do novo módulo.

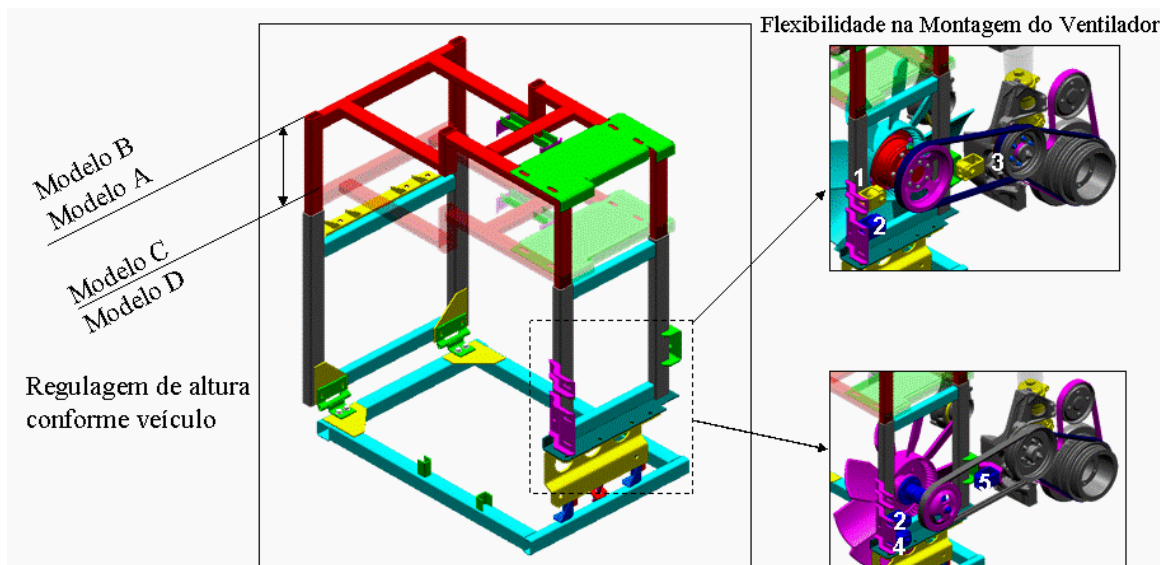


Figura 5.2.21: Projeto preliminar do módulo 9.1.

A etapa 3.6 verifica se o novo módulo 9, chamado de módulo 9.1, é no mínimo tão modular como o módulo 9 anterior. Essa etapa repete o procedimento da etapa 3.4, mas agora a quantificação da modularidade é aplicada ao novo módulo desenvolvido. Vista na figura 5.2.22.

Módulo / Sub conjunto	Sin	Sout	Din	Dout	RM
Teto	12	10	16	9	1,18
Frontal	8	7	17	10	1,16
Traseira	8	7	14	18	0,97
Base	9	8	13	20	0,92
Modularidade Total Relativa				1,05	

Figura 5.2.22: Índice de modularidade do módulo 9.1.

O valor índice de modularidade do novo módulo, quando comparado o módulo 9 do chassi-base, representa que sob a perspectiva do leiaute o novo módulo é mais modular que o anterior. Em outras palavras, se for utilizado o módulo 9.1 haverá maior flexibilidade no leiaute, os módulos variantes serão inseridos no veículo com o mínimo de impacto nesse módulo.

A quantificação da modularidade, neste caso particular, representa qual módulo incorporou os valores mais importantes que foi destinado ao projeto, mesmo sendo um número adimensional e teórico, é uma ferramenta útil no direcionamento de decisões nas fases de desenvolvimento.

A etapa 3.7 inicia-se já conhecendo que novo módulo é capaz de substituir o anterior com vantagens, mas é necessário avaliar estruturalmente se é possível aplicá-lo em qualquer um dos

novos veículos do portfólio. Não é necessário fazer uma simulação computacional para cada modelo, pois seria dispendioso e pouco objetivo. A escolha de qual modelo deve ser calculado é uma decisão que deve ser compartilhada com toda a equipe de projetos e de cálculos estruturais.

A simulação computacional utilizou uma composição de veículo com os módulos que possuíam componentes maiores, com especificações limites e motor com a maior potência. Apesar de não haver um veículo exatamente com essas características, o objetivo da simulação é validar o novo módulo para quaisquer composições até o limite do motor de 360 cv, como já mencionado anteriormente. Os critérios da simulação computacional através do cálculo de Elementos Finitos abordaram vários aspectos, como peso próprio, frenagens, acelerações, simulação virtual da pista de teste, torção etc., os resultados foram satisfatórios com tensões em níveis aceitáveis. Figura 5.2.23, as tensões em % da tensão admissível.

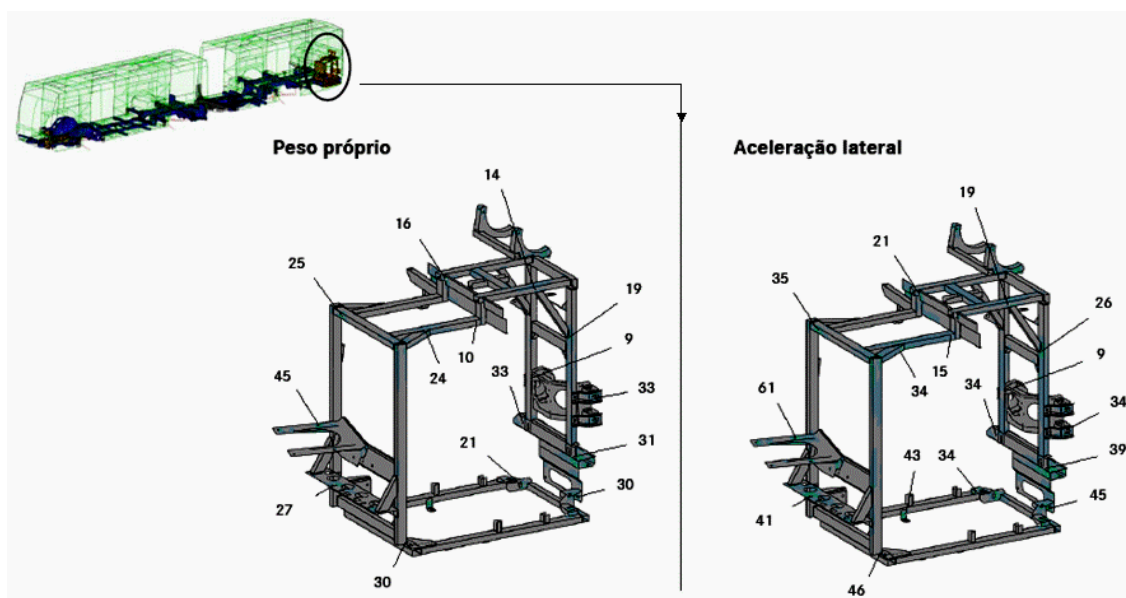


Figura 5.2.23: Resultado da cálculo de Elementos Finitos do módulo 9.1.

A etapa 3.8 é avaliação final de todas as fases. O objetivo é desenvolver um fluxograma que aborde o que há de mais importante em cada fase, simular a elaboração da periferia do motor para os veículos do portfólio aplicando a divisão e codificação dos módulos e interfaces, juntamente com todos os módulos variantes identificados neste estudo. O resultado final deve ser a composição modular de cada veículo.

A simulação começa pela fase informacional, na figura 5.2.24 é apresentado o fluxograma com a simulação do modelo A, cada passo desse procedimento está descrito no tópico 5.1 da metodologia.

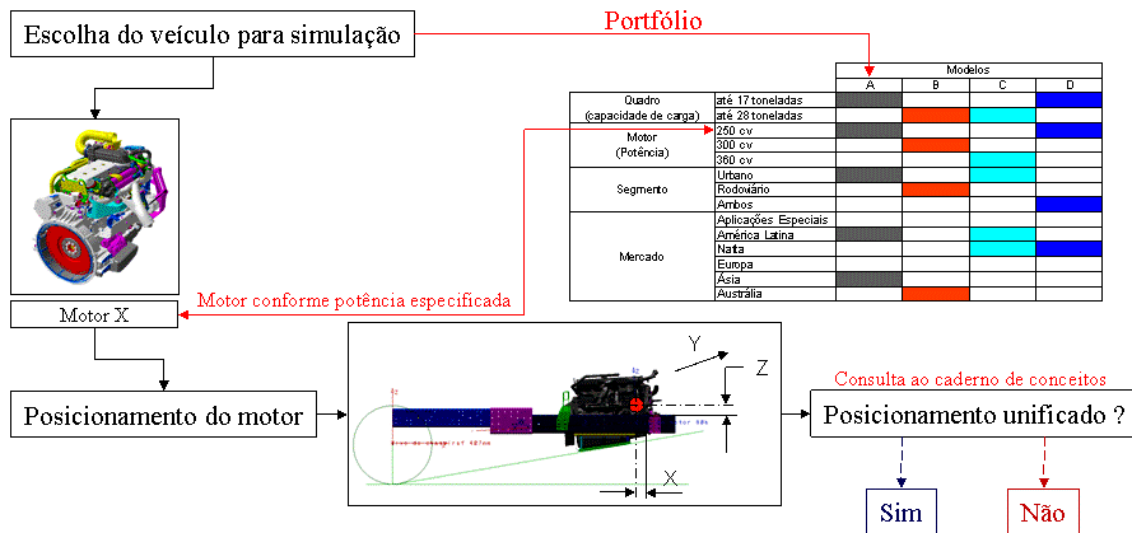


Figura 5.2.24: Fluxograma para avaliação da fase informacional.

A próxima avaliação é da fase de concepção, onde se inicia a análise modular do chassi-base, conforme figura 5.2.25.

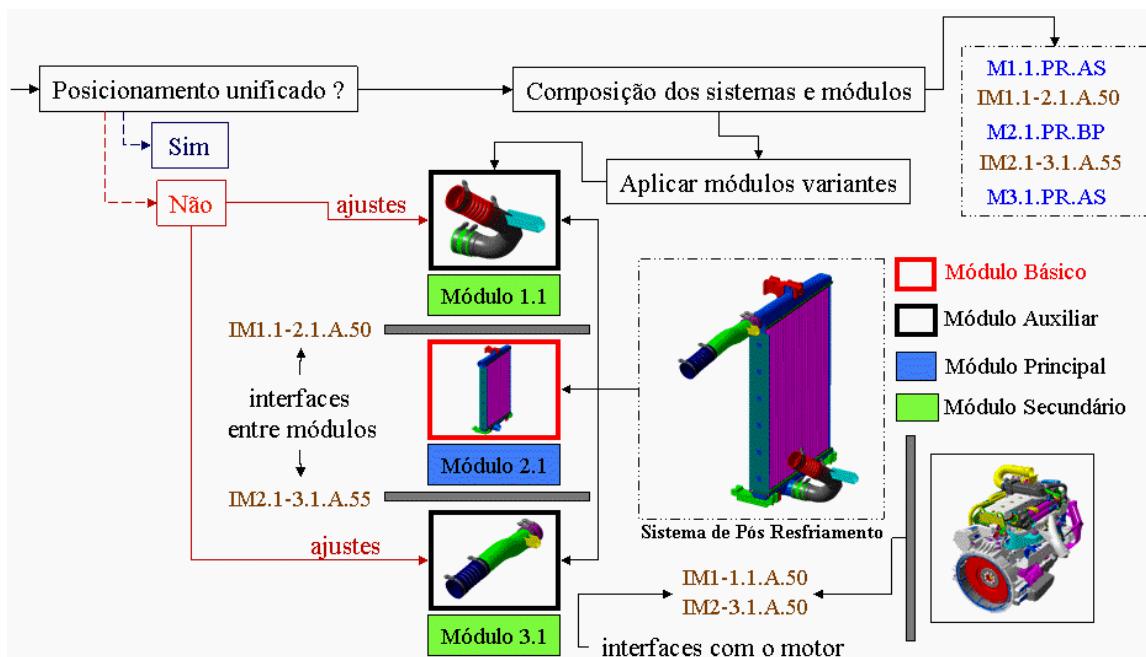


Figura 5.2.25: Fluxograma para avaliação da fase de concepção.

A última avaliação é da fase de avaliação, através da montagem das geometrias de cada módulo é possível compor os veículos virtualmente no CAD, o que melhora a qualidade das informações e permite uma análise mais profunda e real do novo veículo. Geralmente nessa simulação são identificados problemas que toda a análise anterior foi insuficiente para detectá-los. O fluxograma da figura 5.2.26 tem objetivo de tornar dinâmico o processo de solução direcionando os conflitos encontrados para a fase mais adequada de análise, isto é, se houver problemas com módulos deve-se retornar a fase de concepção e submetê-los as análises sugeridas para encontrar a solução.

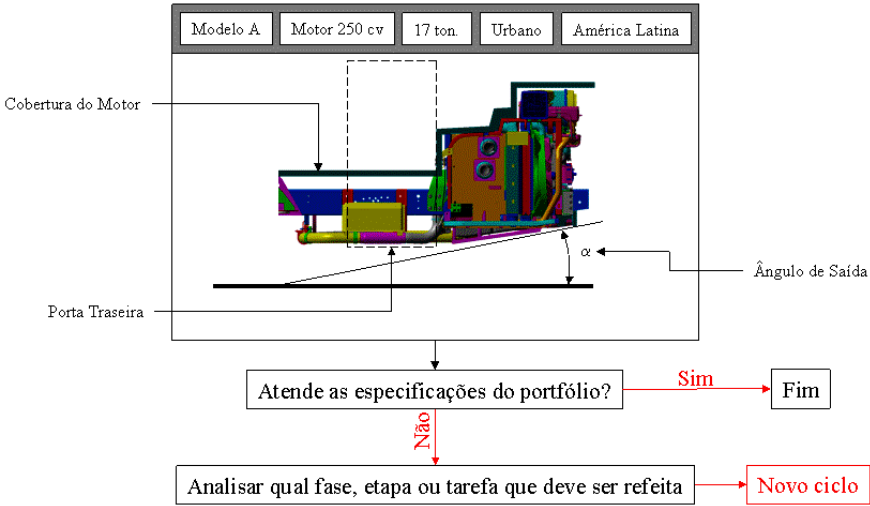


Figura 5.2.26: Fluxograma para avaliação da fase de avaliação.

O resultado final dessas etapas é a composição modular dos veículos do portfólio. A codificação utilizada é a explicada na figura 5.1.11, os novos veículos do portfólio serão compostos com a mesma divisão dos módulos do chassi-base. A figura 5.2.27 ilustra essa composição.

		Módulos								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modelos	A	M1.1.PR.AS	M2.1.PR.BP	M3.1.PR.AS	M4.1.A.AS	M5.1.A.BP	M6.1.A.AS	M7.1.A.BP	M8.1.A.AS	M9.1.A.AS
	B	M1.PR.AS	M2.PR.BP	M3.PR.AS	M4.A.AS	M5.A.BP	M6.A.AS	M7.A.BP	M8.A.AS	M9.1.A.AS
	C	M1.2.PR.AS	M2.2.PR.BP	M3.2.PR.AS	M4.2.A.AS	M5.2.A.BP	M6.2.A.AS	M7.2.A.BP	M8.2.A.AS	M9.2.A.AS
	D	M1.3.PR.AS	M2.3.PR.BP	M3.3.PR.AS	M4.3.A.AS	M5.3.A.BP	M6.3.A.AS	M7.1.A.BP	M8.1.A.AS	M9.1.A.AS

		Módulos					
		10	11	12	13	14	15
Modelos	A	M10.1.AA.AS	M11.1.AA.BP	M12.1.AA.AS	M13.1.E.AS	M14.1.E.AS	M15.1.E.BP
	B	M10.AA.AS	M11.AA.BP	M12.AA.AS	M13.E.AS	M14.E.AS	M15.E.BP
	C	M10.2.AA.AS	M11.2.AA.BP	M12.2.AA.AS	M13.2.E.AS	M14.2.E.AS	M15.2.E.BP
	D	M10.1.AA.AS	M11.1.AA.BP	M12.1.AA.AS	M13.1.E.AS	M14.1.E.AS	M15.1.E.BP

Figura 5.2.27: Composição modular final dos veículos.

Capítulo 6

Conclusão

A seguir aborda-se a conclusão do trabalho sob vários aspectos: atendimento dos objetivos, visão da teoria aplicada, contribuição e propostas futuras para pesquisas.

6.1 Atendimento dos objetivos

Quando se iniciou esse trabalho, foi traçado um objetivo: levantar o estado da arte da modularidade em desenvolvimento de produtos e identificar as técnicas e métodos que auxiliem na composição de módulos, padronização de interfaces e quantificação da modularidade. Avaliando sua exeqüibilidade técnica e selecionando-as para aplicá-las como ferramentas na estruturação de uma família de chassis de ônibus a partir de um chassi de referência.

A análise modular da periferia do motor do chassi-base permitiu criar um modelo de formação de novas periferias. O resultado foi a formação de quatro novas periferias do motor para novos chassis, identificadas neste trabalho como modelos A, B, C e D. Cada modelo estudado pertencia a segmentos e mercados singulares e possuía características técnicas, como capacidade de carga e potência do motor diferentes. Esses dados tornaram o estudo mais desafiador, pois conciliar todas as variantes exigiria a aplicação de ferramentas corretas, que permitissem conclusões, dosadas com a experiência de profissionais, inequívocas.

Os quatro novos modelos receberam periferias do motor com configurações similares ao do chassi-base, isto é, a mesma divisão dos sistemas, divisão e quantidade de módulos e os mesmos tipos de interfaces. A inserção de módulos variantes, que surgiram a cada nova periferia, mostrou

que é possível manter as principais características construtivas do módulo de referência desde que o módulo variante tenha o mesmo papel na arquitetura do produto. Baseado nesses fatos pode-se concluir que o modelo proposto obteve resultados satisfatórios.

Algumas mudanças foram necessárias, principalmente no novo módulo 9, durante a fase de protótipos e industrialização. A idéia inicial de se construir trilhos que permitissem ajustes para aplicação de radiadores com alturas diversas, foi substituída por tubos com as dimensões para cada altura de radiador. A razão é que devido ao alto volume de produção, haveria a necessidade de vários dispositivos de solda do mesmo módulo para atender a demanda, retirando os trilhos houve uma redução de custo no produto, mas em contrapartida criaram-se mais variantes desse módulo.

6.2 Visão da teoria aplicada

No desenvolvimento desse trabalho, o contato com os trabalhos sobre a modularidade fez com que os objetivos fossem mais bem compreendidos. O conhecimento de técnicas para compor módulos, padronizar interfaces não permite ter o controle dos parâmetros modulares de um projeto, mas representa apenas uma parte do processo. Quantificar a modularidade é necessário para se comparar soluções e decidir a respeito de sua modularidade, sem esquecer a perspectiva que se deseja avaliar, mas o que caracteriza a modularidade de um projeto é sua arquitetura que se fundamenta nas relações entre seus componentes e funções que executam.

O desafio da pesquisa passou a ser determinar quais os passos que conduziriam a identificação da arquitetura de um projeto existente, uma vez que a aplicação das técnicas visava tomar um chassi-base como referência. A metodologia de projetos foi fundamental para organização das idéias, através da revisão das principais metodologias, concluiu-se que seriam necessárias três fases: colher as informações, analisar a arquitetura existente e avaliar a extensão dessa arquitetura aos demais chassis.

A identificação da arquitetura do chassi-base proporcionou ao estudo o conhecimento dos parâmetros necessários para definição do que é modular no chassi e o que é integral. Isto permite saber antecipadamente o que implicará na mudança de um determinado módulo. As cadeias

funcionais e o mapeamento função/componente clarificaram o funcionamento dos sistemas e avaliou a importância de cada módulo.

Transferir essa modularidade para outro produto a partir da arquitetura conhecida é uma questão que não encontra uma resposta satisfatória pela teoria até agora discutida. É necessário fazer uma série de avaliações que são possíveis pelas matrizes de impacto, onde por tentativa e erro, estende-se a arquitetura de referência integralmente para o novo produto e mediante ao impacto das variações, ajusta-se ou conceitua-se os novos módulos. A substituição definitiva dos módulos de referência pelos módulos variantes é avaliada pela quantificação da modularidade, que se mostrou útil e orientativa, mas nunca deve ser usada sem levar em consideração a experiência profissional do pesquisador.

Concluindo, a modularidade deve ser tratada observando a arquitetura do produto, os conceitos modulares em projetos trarão melhores resultados quando conhecidos os parâmetros de formação da arquitetura do produto.

6.3 Contribuição

A contribuição desse trabalho pode ser observada no desenvolvimento de novos produtos já na Engenharia de Produtos. A divisão do projeto em sistemas e módulos facilitou e reduziu o tempo de desenvolvimento, pois, alguns módulos podem ter aplicações em vários veículos e outros módulos podem ser desenvolvidos em paralelo. O conceito de módulo variante derivado de um módulo de referência permitiu o desenvolvimento de produtos com grau de maturidade e confiabilidade superiores aos produtos que não se baseiam ou se baseiam desordenadamente em outros produtos. A padronização construtiva, isto é, funções semelhantes são executadas por módulos semelhantes.

Do ponto de vista do planejamento dos dispositivos que auxiliam a montagem, a contribuição desse trabalho poder ser mensurada pela redução da quantidade de dispositivos principais devido a projetos que possuem módulos e interfaces com alto grau de padronização. Estendendo-se o mesmo conceito para montagem, há uma redução dos dispositivos, refletindo favoravelmente no tempo de montagem.

6.4 Trabalhos futuros

No desenvolvimento desse trabalho algumas idéias surgiram, por exemplo:

Para se quantificar a modularidade, é necessário executar vários passos trabalhosos. Visando facilitar a execução e obter resultados mais rápidos, uma opção seria um programa computacional interativo, onde se pudessem elaborar as perspectivas da modularidade e a partir de questionários, gerar as matrizes e árvores automaticamente, sendo que o índice de modularidade seria calculado com opções de escolha da perspectiva.

Ampliar a extensão desse trabalho até a produção do produto, pesquisando sobre a modularidade na produção e avaliando a transição do projeto ao produto final.

E por último, pesquisar as relações entre equipes funcionais do projeto a vendas, procurando entender quais os fatores de conflitos, suas relações com o tipo de projeto e de gerenciamento. O problema da informação, levantar quais as barreiras que interferem no desempenho da equipe, o fator motivação, etc.

Referências Bibliográficas

- Alvarenga F. B. Uma Abordagem Metodológica para o Projeto de Produtos Inclusivos. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006, 237p. Tese (Doutorado).
- Andersson, S., Sellgren, U., Representation and use of Functional Surfaces. In: 7th Workshop on Product Structuring - Product Platform Development. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2004.
- Antonio, K. W. L., Yam, R. C. M., Tang, E. The impacts of product modularity on competitive capabilities and performance: An empirical study. *International Journal of Production Economics*, v. 105 (1), pp. 1-20, 2004.
- Arnheiter, E. D., Harren, H. Quality management in a modular world. *The TQM Magazine*, v.18, (1), pp.87-96, 2006.
- Asimow, M., *Introdução ao Projeto de Engenharia*, Mestre Jou, São Paulo, 1968.
- Back, N., *Metodologia de Projeto de Produtos Industriais*, Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 387 pp., 1983.
- Baldwin, C. Y., Clark, K. B. *Design Rules, vol.1: The Power of Modularity*, MIT Press, Cambridge MA, 2000.
- Blackenfelt, M., Sellgren, U. Design of robust interfaces in modular products. *Proceedings of the Design Engineering Technical Conferences*. Baltimore, Paper no. DETC00/DAC-14486, 2000.
- Blanchard, S. B., Fabricky, J.W. *Systems Engineering and Analysis*, Prentice Hall, 1981, 715 p.
- Bonsiepe, G. Teoría y práctica del diseño industrial - Elementos para una manualística crítica. Barcelona: Colección Comunicacion Visual., Editorial Gustavo Gili, 1978.

- Bryant, C. R., Sivaramakrishnan, K. L., Van Wie, M., Stone, R. B., McAdams, D.A. A Modular Design Approach to Support Sustainable Design, *Proceedings of DETC 2004*, ASME Design Engineering and Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conferences, 2004.
- Calcagno, M. Dynamics of Modularity. A critical approach. Stockholm: Working paper, 2nd EURAM Conference, 2001.
- Chakrabarti, A. Sharing in design—categories, importance, and issues. In: International Conference on Engineering Design (ICED) 01 Glasgow, 2001, pp. 21–23.
- David, H., Kusiak, A., Tseng, T.-L. Delayed product differentiation: a design and manufacturing perspective. *Computer-Aided Design*, v.30(2), pp. 105–113, 1998.
- Dedini, F.G. *Metodologia e sistemática de projeto*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Apostila, 2000, 128p.
- De Koninck, disponível em < <http://www.atom-a.com/modularfurniturehistory.html>>, acesso em 25 novembro 2007.
- Delgado, N. G., Uma Contribuição à Metodologia de Projeto para o Desenvolvimento de Brinquedos, Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Dissertação (Mestrado), 2005.
- Dobrescu, G., Reich, Y. *Progressive sharing of modules among product variants*. Computer-Aided Design Elsevier, v. 35, (9), p. 791-806, 2003.
- Du, X., Jiao, J., Tseng, M.M. Architecture of Product Family: Fundamentals and Methodology. *Concurrent Engineering*, v.9, pp. 309-325, 2001.
- Dunbar, C. S. Buses, Trolleys e Trams. London: Hamlyn, 1967.
- Erixon, G. *Modular Function Deployment - A method for Product Modularisation*. Stockholm: The Royal Institute of Technology, 1998, Doctoral Thesis.
- Erixon, G., Stake, R., Kenger, P. *Development of Modular Products*, Stockholm: KTH, Borlänge: Dalarna University, 2004.
- Ertas, A., Jones, J. C., *The Engineering Design Process*, New York: John Wiley and Sons, 624p., 1993.
- Ferreira, C.V., Metodologia para as Fases de Projeto Informacional e Conceitual de Componentes de Plástico Injetados Integrando os Processos de Projeto e Estimativa de Custos, Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Tese (Doutorado), 227 p., 2002.

- Filho, E.R. *Projeto do Produto*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Apostila, 2004, 143p.
- Fixson, S. K. The Multiple Faces of Modularity – A Literature Analysis of a Product Concept for Assembled Hardware Products. *Technical report. 03-05 Industrial & Operations engineering*, University of Michigan , 2003.
- Fourcade, F., Midler, C. Modularisation in the auto industry: can manufacturer's architectural strategies meet supplier's sustainable profit trajectories? *International Journal of Automotive Technology and Management*, v.4, (2/3), pp.240-260, 2004.
- Gershenson, J. K., Prasad, G. J., Allammani S. Modular Product Design: a life-cycle view. *Journal of Integrated Design and Process Science*, v. 3(4), pp. 13-26, 1999.
- Gonzalez, Z. J. P., Otto K.N., Baker, J.D., A Method for Architecting Product Platforms, *Research in Engineering Design*, v.12, pp. 61-72, 2000.
- Gu, P., Hashemian, M., Sosale, S. An integrated modular design methodology for life-cycle engineering, *Manufacturing Technology CIRP Annals*, v.46, pp.71-74, 1997.
- Halmann J. I. M., Hofer A. P., van Vuuren W. Platform-Driven Development of Product Families: Linking Theory with Practice. *Journal of Product Innovation Management*, v.20(2), pp.149-162, 2003.
- Hata, T., Kato S., Kimura, F. Design of Product Modularity for Life Cycle Management. In: 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2001, pp. 93.
- Hillström, F. On axiomatic design in modular product development, Göteborg: Chalmers University of Technology, 1994, Licentiate Thesis.
- Hsuan, J. Impacts of supplier-buyer relationships on modularization in new product development. *European Journal of Purchasing and Supply Management*, v. 5(3/4), pp.197-209, 1999.
- Holmqvist, T. K. P., Persson, M. L. Analysis and Improvement of Product Modularization Methods: Their Ability to Deal with Complex Products. *System Engineering*, 2003, v. 6 (3), pp.195-209.
- Höltä, K., Tang, V., S., Seering, W. P. Modularizing Product Architectures using Dendograms. In: International Conference on Engineering Design Iced. Stockholm, 2003.

- Jiao, J., Simpson, T. W., Siddique, Z. Product Family Design and Platform-Based Product Development: A State-of-the-Art Review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v.18, (1), pp.5-19, 2006.
- Kahlmeyer, M., Warnecke, H. J., Schneider, W. D. Fractal product design: Design for assembly and disassembly in fractal factory. *Proceedings of DFMA Conference*, 1994, v. 4, pp. 1-9.
- Lai, X., Gershenson, J. K. Representation of Similarity and Dependency for Assembly Modularity, Philadelphia. *Proceedings of the 2006 ASME Design Engineering Technical Conferences – 18th International Conference on Design Theory and Methodology*, 2006.
- Lahr, M. Product Platforms, Product Families and the importance to manage them in modern economy. In: Dalarna University, Sweden. *Proceedings from the 2nd seminar on Development of Modular Products*, pp. 139-144, 2004.
- Langerak, F., Peelen, E., Commandeur, H. Organizing for Effective New Product Development, an Exploratory Study of Dutch and Belgian Industrial Firms, *Industrial Marketing Management*, v.26, pp. 281-289, 1997.
- Leal, G. L. Inovações Automotivas e a necessidade de novos Combustíveis. In: Simea, 2005, pp. 1-2.
- Kimura, F., Kato, S., Hata, T., Masuda, T. Product Modularization for Parts Reuse in Inverse Manufacturing. *Annals of the CIRP*, 2001, v. 50, pp. 89-92.
- Kumar, C. S., Chandrasekharan, M. P. Group efficacy: a quantitative criterion of goodness of block diagonal forms of binary matrices in group technologie. *International Journal of Production Research*, v. 28, pp. 233–244, 1990.
- Kusiak, A., Huang, C-C. Development of Modular Products. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part A*, v. 19, (4), pp.523-538, 1996.
- Maribondo, J.F., *Desenvolvimento de uma metodologia de projeto de sistemas modulares, aplicada a unidades de processamento de resíduos sólidos domiciliares*, Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Tese (Doutorado), 277 p., 2000.
- Medeiros, E. N. Uma Proposta de Metodologia para o Desenvolvimento de Projeto de Produto. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 1981 Tese (Mestrado).
- Miguel, P. A. C. Modularity in product development: a literature review towards a research agenda. *Product: Management & Development*, v. 3, (2), pp.165-174, 2005.

- Mikkola, J. H. Modularization assessment of product architecture. In: Danish Research unit for Industrial Dynamics. Frederiksberg: Dept. of Industrial Economics and Strategy, Denmark. Working Paper No 00-4, 2000.
- Mikkola, J. H., Gassmann, O. Managing modularity of product architectures: Toward an integrated theory. *IEEE Transactions on Engineering Management*, v.50 (2), pp. 204–218, 2003.
- Miller, T. D., Elgard, P. Defining modules, modularity and modularization. In: Design for Integration in Manufacturing. *Proceedings of the 13th IPS Research Seminar*, Fugsloe, Aalborg University, 1998.
- Miller, T. D. Modular Engineering of Production Plants. *International Conference on Engineering Design (ICED)*, pp.1131-1134, 1999.
- Miño, A. V. P., Rados, G. J. V. *Sistêmica de projeto conceitual com abordagem modular - ambiental para desenvolvimento de produtos*. Florianópolis, 3º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produtos, 2001.
- Muffato, M. Introducing a platform strategy in product development. *International Journal of Production Economics*, v. 60-61, pp. 145-153, 1999.
- Mukhopadhyay, K. S., Setoputro, R. Optimal return policy and modular design for build-to-order products. *Journal of Operations Management*, v. 23 (5), pp. 496 - 498, 2004.
- Newcomb, P. J., Rosen, D. W., Bras, B. Life Cycle Modularity Metrics for Product Design Detection. *Proceedings of EcoDesign: Third International Symposium on Environmental Conscious Design and Inverse Manufacturing*, 2003, pp. 251- 258.
- O’Grady, P., Liang, W. An object oriented approach to design with modules. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, v.11, (4), pp.267-283, 1998.
- Ogliari, A. Sistematização da concepção de produtos auxiliada por computador com aplicações no domínio de componentes de plástico injetados. Santa Catarina: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1999. Tese (Doutorado).
- Onuwaje, O. P. Product, platforms and families. In: Dalarna University, Sweden. *Proceedings from the 2nd seminar on Development of Modular Products*, pp. 145-150, 2004.
- Otto, K. H., *Modular Product Platform Design*, Helsinki: Helsinki University of Technology, 2005, Ph.D. dissertation.

- Ovadia, M. 111 anos de Transporte. Porto Alegre: Secretaria Municipal de Transportes, 1979.
- Padamati, M. R. Methods for Modularization. In: Dalarna University, Sweden. *Proceedings from the 2nd seminar on Development of Modular Products*, 2004, pp. 121-126.
- Pahl, G., Beitz, W., *Engineering Design*. Original German Edition, 1st Edition, 1971.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K-H. *Projeto na Engenharia*. São Paulo: Edgard Blücher, 2005, 412p.
- Persson, D. Modules and interfaces. In: Dalarna University, Sweden. *Proceedings from the 2nd seminar on Development of Modular Products*, 2004, pp. 55-60.
- Pirrung, C. Comparison of different methods of modularisation and their best application. In: Dalarna University, Sweden. *Proceedings from the 2nd seminar on Development of Modular Products*, 2004, pp. 25-30.
- Qian, X., Zhang, H. C. Design for Environment: An Environmental Analysis Model for the Modular Design of Products. *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, pp. 114-119, 2003.
- Romano, L.N., *Modelo de Referência para o Processo de Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas*, Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Tese (Doutorado), 266p., 2003.
- Rozenfeld, H., Forcellini, A. F., Amaral, D. C., Toledo, J. C., Silva, S. L., Alliprandini, D. H., Scalise, R. K., *Gestão de Desenvolvimento de Produtos- Uma Referência para a Melhoria do Processo*, São Paulo: Editora Saraiva, 542p., 2006.
- Salhich, S. M., Kamrani, A. K. Macro level product development using design for modularity. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 15(4), pp. 319-329, 1999.
- Sanchez, R. Product and process architectures in the management of knowledge resources. In: Persson, M., 2004, *Managing the Modularization of Complex Products*. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2000. Doctoral Thesis.
- Scalice, R.G., *Desenvolvimento de uma Família de Produtos Modulares para o Cultivo e Beneficiamento de Mexilhões*, Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Tese (Doutorado), 252p., 2003.
- Sosa, M. E., Eppinger S. D., Rowles, C. M. Identifying Modular and Integrative Systems and Their Impact on Design Team. *Journal of Mechanical Design*, v.125, pp. 240-252, 2003.

- Starr, M. K. *Modular Production – A new Concept*. Harvard Business, v.43, (6), pp.131-142, 1965.
- Stiel, W. C. *História dos Transportes Coletivos em São Paulo*. São Paulo: McGraw Hill/Edusp, 1978.
- Stiel, W. C. *História do Transporte Urbano no Brasil*. São Paulo: Pini/EBTU, 1984.
- Stiel, W. C. *Ônibus: Uma História do Transporte Coletivo e do Desenvolvimento Urbano no Brasil*. São Paulo: Comdesenho Estúdio e Editora, 2001, 255 p.
- Suh, N.P. *The Principles of Design*. New York: Oxford University Press., 1990.
- Sundgren, N. *Product Platform Development-Managerial issues in manufacturing firms*. Göteborg: Department of Operations Management and Work Organization, Chalmers University of Technology Göteborg, 1998. Ph.D. thesis.
- Ullman, D. G., *The Mechanical Design Process*, Mc Graw-Hill, 1992.
- Ulrich, K., Tung, K. Fundamentals of Product Modularity. *Proceedings of ASME Winter Annual Meeting Symposium on Design and Manufacturing Integration*, 1991, pp.73-79.
- Ulrich, K., The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm, *Research Policy*, v. 24, pp. 419-440, 1995.
- Ulrich, T. K., Eppinger, S. D. *Product Design and Development*, New York: McGraw-Hill, 2000.
- Whitfield, R. I., Smith, J. S., Duffy, A. H. B. Identifying Component Modules. *Proceedings of the Seventh International Conference on Artificial Intelligence in Design*, 2002, pp. 571-592.
- Voss, C., Tsikriktsis, N., Frohlich, M. Case Research in Operations Management. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 22 (2), pp. 195-219, 2002.
- Yin, R. K. *Estudo de Caso – Planejamento e Métodos*.. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- Yoshikawa, H. Design Philosophy: The State of the Art. *Annals of the CIRP*. 1989, v.38 (2), pp.579-586.
- Zhang, Y. and Gershenson, J. Questioning the direct relationship between product modularity and retirement cost. *Journal of Sustainable Product Design*, v. 2, pp. 53-68, 2002.