



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUISTA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

César Coutinho Ramos

**ANÁLISE E APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE MODULARIZAÇÃO NO
DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO**

GUARATINGUETÁ

2016

CÉSAR COUTINHO RAMOS

**ANÁLISE E APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE
MODULARIZAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DO
PRODUTO**

Defesa de dissertação
apresentada à Faculdade de
Engenharia do Campus de
Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, como parte
do processo para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia
de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Wagner Forti
Sponsor: Rodrigo de Oliveira Chaves

GUARATINGUETÁ

2016

R175a	<p>Ramos, César Coutinho</p> <p>Análise e aplicação de métodos de modularização no desenvolvimento do produto / César Coutinho Ramos – Guaratinguetá, 2016.</p> <p>88 f. : il.</p> <p>Bibliografia: f. 85-88</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Prof. Dr. Antônio Wagner Forti</p> <p>1. Produção em massa 2. Veículos comerciais - Molas e suspensão</p> <p>3. Administração de produtos I. Título</p> <p>CDU 658.5 (043)</p>
-------	--

CESAR COUTINHO RAMOS

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO: MESTRADO PROFISSIONAL**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Jorge Muniz Junior
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ANTONIO WAGNER FORTI
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. BRUNO CHAVES FRANCO
UNESP-FEG


Prof. Dr. CARLOS ALBERTO CHAVES
UNITAU

Março 2016

DADOS CURRICULARES

César Coutinho Ramos

NASCIMENTO 07.10.1968 – PORCIÚNCULA / RJ

FILIAÇÃO Pedro Paulo de Cerqueira Ramos
Marília de Carvalho Coutinho Ramos

1982/1985 Curso Técnico
Mecânica - Escola Técnica Federal de Campos (ETFC)

1989/1994 Curso de Graduação
Engenharia Mecânica – Universidade Federal Fluminense (UFF)

2010/2011 Curso de Pós Graduação em Gestão de Negócios nível
lato sensu pela Fundação Dom Cabral (FDC)

“Dedico este trabalho à minha família, principalmente à minha esposa, que me suportou e amparou em todos os momentos durante os dois anos de desenvolvimento desta dissertação de mestrado.”

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Professor Doutor Antônio Wagner Forti pelo incentivo e paciência.

A aluna de graduação em Eng. Mecânica Bárbara Ijano Silva pelo apoio e dedicação nas atividades do projeto.

A equipe de engenharia de chassi da MAN Latin America pelos precisos e imprescindíveis comentários.

RAMOS, C. C. **Análise e Aplicação de Métodos de Modularização no Desenvolvimento do Produto**. 2016, 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

Este trabalho compara qualitativamente sete métodos de modularização, com o objetivo de escolher e aplicar aqueles que melhor se adaptam ao projeto piloto de modularização de uma suspensão traseira a ar para caminhões e ônibus. Dentre os métodos estudados, os métodos MFD (*Modular Function Deployment*) e DSM (*Design Structure Matrix*) foram escolhidos, basicamente em função de possuírem: aplicação prática, repetibilidade dos resultados, softwares disponíveis e facilidade de organização dos dados. O método DSM serviu de base para gerar os primeiros possíveis módulos e simplificar o problema dos iniciais 44 componentes para 26, simplesmente com uma visão funcional e técnica. O MFD foi utilizado principalmente para estruturar o processo de modularização e atender aos requisitos dos clientes e estratégias do negócio. Os resultados apresentados pelos dois métodos foram analisados de forma detalhada e indicaram a formação de sete módulos, que foram obtidos tanto diretamente dos métodos DSM e MFD, quanto da combinação de ambos. Ficou evidente, através dos resultados alcançados, que a utilização conjunta desses dois métodos, juntamente com a análise criteriosa dos resultados no desenvolvimento do produto aumentou consideravelmente a eficiência do processo de modularização.

PALAVRAS-CHAVE: Modularidade; Módulo; Arquitetura Modular do Produto; Plataforma do Produto; Família de Produtos; Customização em Massa; Variante do Produto.

RAMOS, C. C. **Analysis and Application of Modularization Methods on Product Development.** 2016, 88 p. Dissertation (Master Degree in Production Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

ABSTRACT

This work presents and compares qualitatively seven modularization methods, in order to choose and apply those that best suits for a rear air suspension modularization pilot project for trucks and buses. Among the methods studied, the MFD (Modular Function Deployment) and DSM (Design Structure Matrix) methods were mainly chosen on the basis that they present: practical application, repeatability, software availability and ease data organization. The DSM method was the basis to generate the first possible modules and simplify the problem from the initial 44 to 26 components, only with a functional and technical approach. The MFD was mainly used to structure the modularization process and meet the customer requirements and business strategies. The results shown by the two methods were analyzed in detail and resulted in the generation of seven modules, which were obtained either directly from DSM and MFD methods, or from the combination of both. It became evident, by the results achieved, that the combined use of these two methods, along with a careful analysis of the results on product development, greatly increased the modularization process efficiency.

KEY WORDS: Modularity; Module; Modular Product Architecture; Product Platform; Product Family; Mass Customization; Product Variant; Flexibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - 16 variantes com 3 dimensões de variedade.....	14
Figura 2 - Modularidade SCANIA	15
Figura 3 - Matriz Transversal Modular MQB da Volkswagen	16
Figura 4 - Forma simplificada da modularização de um produto único e existente.....	16
Figura 5 - Modelo de Mitroff <i>et al.</i> (1974).....	20
Figura 6 - Exemplo de mapeamento.....	23
Figura 7 - Interfaces desacopladas e acopladas	23
Figura 8 - Arquitetura modular e integral.....	24
Figura 9 - Tipos de arquitetura modular	24
Figura 10 - Níveis de funções, soluções técnicas e peças/componentes	25
Figura 11 - Módulo e modularidade em um sistema modular.....	27
Figura 12 - Tipos de Interface	28
Figura 13 - Tipos de funções e módulos em sistema modular e misto.....	29
Figura 14 - Relação entre sistema modular, plataforma e família de produtos	32
Figura 15 - Padronização x Modularização.....	34
Figura 16 - Processo de modularização.....	35
Figura 17 - Representação esquemática de uma PMM	40
Figura 18 - Dendograma representando o agrupamento nas matrizes DPM e MIM.....	41
Figura 19 - Representação esquemática da Matriz de Interface	42
Figura 20 - DSM mostrando sequência e módulos.....	44
Figura 21 - Matriz DSM antes e após a aplicação do algoritmo	44
Figura 22 - Heurísticas do FSH	46
Figura 23 - Heurísticas aplicadas a uma estrutura funcional de uma escova de dente.....	47
Figura 24 - Estrutura funcional da escova de dentes	49
Figura 25 - Matriz de Interação e de Adequação iniciais	50

Figura 26 - Matrizes após a triangularização.....	50
Figura 27 - Matrizes após a decomposição completa.....	51
Figura 28 - DSM Estratégico (E) e DSM Funcional (F)	53
Figura 29 - Representação da Matriz FS-DSM para agrupamento	53
Figura 30 - PMM e ePMM com propriedades de Convergência.....	55
Figura 31 - ePMM e DSM.....	56
Figura 32 - Suspensões pneumática e metálica	60
Figura 33 - Suspensão 4x2, 6x2 e 6x4.....	61
Figura 34 - Passos do MFD	63
Figura 35 - MFD combinado com DSM	63
Figura 36 - Matriz QFD.....	67
Figura 37 - DSM aplicado às 44 soluções técnicas	69
Figura 38 - Matriz DPM.....	71
Figura 39 - Proposta de compatibilidade entre direcionadores estratégicos	72
Figura 40 - Matriz MIM	73
Figura 41 - Dendograma da DPM e MIM	74
Figura 42 – Sugestões de agrupamentos obtidos com o DSM	77
Figura 43 - Matriz de Interface do conceito modular	79
Figura 44 - PMM do conceito modular	80
Figura 45 - Padrão proposto para especificação dos módulos.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - <i>Module Drivers</i> conforme MFD	39
Tabela 2 - <i>Modulo drivers</i> condensados para aplicação em FS-DSM.	52
Tabela 3 - Critérios para análise qualitativa	57
Tabela 4 - Qualificação dos métodos de modularização	58
Tabela 5 - Requisitos dos clientes com ponderação	65
Tabela 6 - Propriedades do produto.....	66
Tabela 7 - 44 soluções técnicas	68
Tabela 8 - 26 soluções técnicas obtidas do DSM	70
Tabela 9 - Sugestões de agrupamentos com as ramificações mais baixas	75
Tabela 10 - Sugestões de agrupamentos com as ramificações mais altas	76
Tabela 11 - Conceito modular proposto	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MFD	<i>Modular Function Deployment</i>
DSM	<i>Design Structure Matrix</i>
FSH	<i>Function Structure Heuristics</i>
DA	<i>Decomposition Approach</i>
FS-DSM	<i>Function-Strategy DSM</i>
IGTA	<i>Idicula-Gutierrez-Thebeau</i>
e-ISM	<i>Extended Implementation Structure Matrix</i>
B-FES	<i>Behavioral-Driven Function-Environment Structure</i>
DPM	<i>Design Property Matrix</i>
QFD	<i>Quality Function Deployment</i>
MIM	<i>Module Indication Matrix</i>
PMM	<i>Product Management Map</i>
MD	<i>Module Drivers</i>
CR	<i>Customer Requirements</i>
PP	<i>Product Properties</i>
TS	<i>Technical Solutions</i>
CPM	<i>Convergence Property Matrix</i>
QED	<i>Extended QFD</i>
ePMM	<i>Extended PMM</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVOS E DELIMITAÇÕES	17
1.2	CONTRIBUIÇÕES	18
1.3	METODOLOGIA DA PESQUISA.....	19
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	ARQUITETURA DO PRODUTO.....	22
2.2	MÓDULO, MODULARIZAÇÃO E MODULARIDADE	26
2.3	PLATAFORMA DO PRODUTO	31
2.4	MÉTODOS DE MODULARIZAÇÃO.....	35
2.4.1	<i>Modular Function Deployment (MFD)</i>	38
2.4.2	<i>Design Structure Matrix (DSM)</i>	43
2.4.3	<i>Functional Structure Heuristic (FSH)</i>	45
2.4.4	<i>Decomposition Approach (DA)</i>	48
2.4.5	<i>Function-Strategy DSM (FS-DSM)</i>	51
2.4.6	<i>MFD com Propriedade de Convergência</i>	54
2.4.7	<i>MFD com DSM</i>	55
3	ANÁLISE DOS MÉTODOS DE MODULARIZAÇÃO E ESCOLHA PARA APLICAÇÃO	57
4	APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE MODULARIZAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	60
4.1	DEFINIÇÃO DOS REQUISITOS DOS CLIENTES	64
4.2	SELEÇÃO DAS SOLUÇÕES TÉCNICAS.....	67
4.3	GERAÇÃO DO CONCEITO MODULAR	72
4.4	ANÁLISE DO CONCEITO MODULAR.....	79
4.5	APERFEIÇOAMENTO DOS MÓDULOS	81
5	COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES.....	82
	REFERÊNCIAS	85

1 INTRODUÇÃO

O Mercado de veículos comerciais é representado por grandes frotistas, vendas a varejo e nichos específicos (veículos especiais com volumes reduzidos). O desafio é satisfazer a todos com excelência em produtos, competitividade e lançamento com curto *time to market*.

Para atingir a este objetivo a maioria das empresas tem optado pela customização em massa, ou seja, fabricação de produtos específicos a custo de produtos padronizados sem comprometer a eficiência, qualidade ou entrega (ELMERAGHY *et al.*, 2013; HU, ZHU, WANG e KOREN, 2008; KOTABE, PARENTE e MURRAY, 2007; FUJITA, 2002).

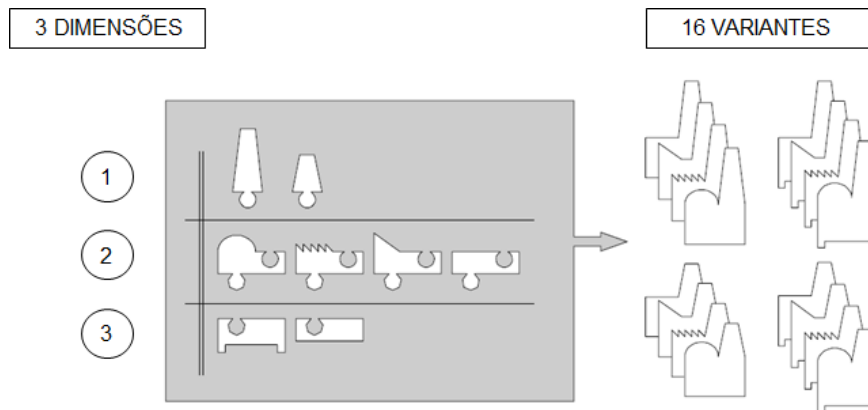
Com isto, as empresas estão experimentando uma série de desafios que mudam as condições do negócio. Primeiro, o foco nas necessidades do cliente leva a produtos personalizados, implicando em gerir maior variedade. Segundo, a concorrência impõe que sejam mais eficientes para reduzir custos, tempo de resposta e aumentar a qualidade. Finalmente, a evolução tecnológica implica em lidar com maiores complexidades e ambientes em constante mudança (ELMARAGHY *et al.*, 2013; MILLER, 2010).

Segundo Shamsuzzoha e Petri (2010) e Blackenfelt (2001) devido aos produtos com ciclo de vida mais curto e aumento da competitividade global, as empresas estão revendo e selecionando estratégias apropriadas para este ambiente de negócio, no qual as que possuem maior velocidade no desenvolvimento ou adaptação dos seus produtos às necessidades do mercado terão maiores chances de sucesso.

Verifica-se que para atender as crescentes exigências dos clientes, a variedade do produto tende a aumentar continuamente. Por isto, as empresas devem estar preparadas com flexibilidade e mantendo a gestão da complexidade com *phase out* adequado dos produtos substitutos. Assim sendo, portfólio de produtos deve ser planejado de tal maneira que cada potencial cliente possa encontrar o que precisa.

Segundo Blackenfelt (2001) a variedade é normalmente relacionada a produtos e componentes. Contudo, é importante separar variedade em produtos de variedade em componentes. O primeiro é variedade externa (maximizar) e o segundo interna (minimizar). Ulrich (1995) relaciona variedade do produto à diversidade de opções que o sistema de produção pode oferecer e que é percebida pelos clientes. Miller (1998) distingue variedade em dimensão e variante, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - 16 variantes com 3 dimensões de variedade



Fonte: Miller (1998)

- Dimensão de variedade é um aspecto do produto que pode ser variado. Exemplo: dimensões de variedade de rodas/pneus, molas e eixos.
- Uma variante descreve um produto com um valor definido dentro de uma dimensão da variedade. Exemplo: as suspensões que podem ser criadas variando rodas/pneus, molas e eixos.

As empresas que decidem pela customização em massa e que aumentam a variedade de seus produtos constantemente tornam os processos produtivos complexos. Logo, o fator determinante que torna os sistemas de manufatura dessas empresas e de sua cadeia de suprimentos complexos é a quantidade de peças e as possíveis combinações entre elas, ou seja, estão relacionados com a variedade interna (EFTHYMIOU *et al.*, 2012).

Uma forma de atuar na complexidade, gerada com o conceito de customização em massa, é através da padronização que otimiza a aplicação de componentes ou sistemas em diversos produtos, racionalizando a sua utilização. Outra forma é o desenvolvimento de arquitetura modular do produto, na qual uma ampla variedade de produtos ou família de produto pode ser produzida com a combinação de um número limitado de módulos contidos nas plataformas de produto, mantendo custo e complexidade baixos. Desta forma a modularidade consegue balancear padronização e racionalização, que é bom para a empresa, com personalização e flexibilidade, que é bom para os clientes (MILLER, 2010; EAGER, 2010; SHAMSUZZOHA e PETRI, 2010; JOSE e TOLLENAERE, 2005).

Blackenfelt (2001) alerta que modularização e padronização, que são frequentemente mencionados no contexto de variedade do produto, têm significados diferentes. Ele diferenciou os dois termos argumentando que modularização é feita ao nível do produto e

padronização ao nível de componentes. Padronização pode ter aspectos negativos no atendimento das necessidades dos clientes, pois normalmente não aumenta a variedade de produto, porém reduz custo, que é benéfico para a empresa.

Empresas como Scania e Volkswagen Automóveis implementaram o conceito de sistema modular. A Scania tomou a decisão ainda na década de 70, que resultou em uma nova plataforma modular aplicada aos caminhões de 16 a 36 toneladas. Hoje a Scania apresenta uma grande variedade de produtos com alta flexibilidade e com gestão da complexidade – Figura 2 (JOHNSON, 2013).

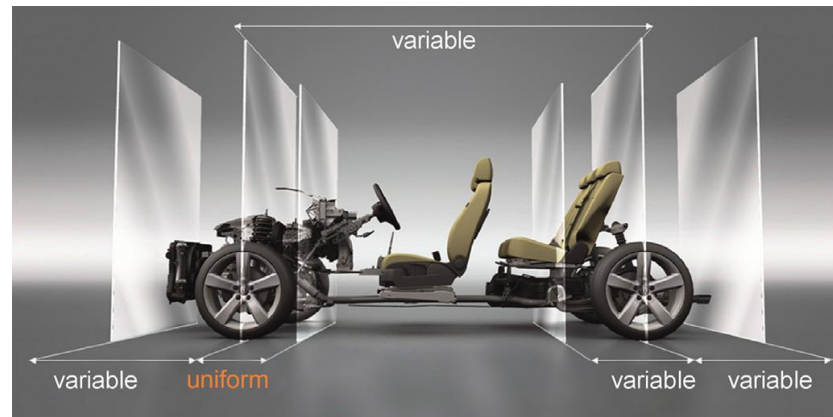
Figura 2 - Modularidade SCANIA



Fonte: Johnson (2013)

O desenvolvimento de plataforma modular na Volkswagen Automóveis iniciou por volta de 2007 e o resultado foi uma plataforma altamente flexível e sofisticada, denominada MQB, sigla em alemão que significa Matriz Transversal Modular – Figura 3 (ELMARAGHY *et al.*, 2013).

Figura 3 - Matriz Transversal Modular MQB da Volkswagen

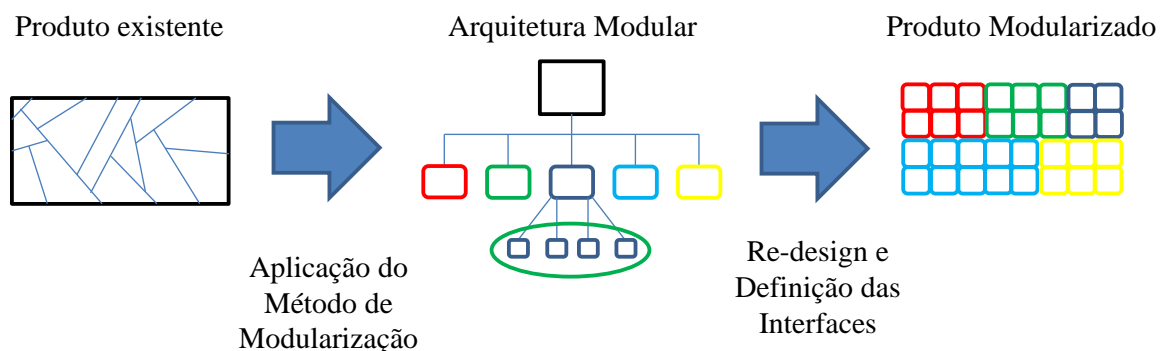


Fonte: Elmaraghy *et al* (2013)

Erixon (1998) define módulo como sendo um bloco de construção com interfaces padronizadas e selecionadas por razões específicas da empresa (estratégia). Ulrich e Eppinger (2008) relacionam os blocos de construção a “pedaços” (*chunk*) e funções. Eles argumentam que uma arquitetura modular tem as seguintes propriedades: (a) pedaços implementam um ou alguns elementos funcionais e (b) as interações entre os “pedaços” são bem definidas e fundamentais para as funções primárias do produto.

Modularização e modularidade têm significados diferentes. A modularização é o método estruturado através do qual um produto pode ser dividido em “pedaços” ou subsistemas menores com função e interfaces bem definidas e padronizadas, que são os módulos, para desenhar a sua arquitetura, neste caso, denominada arquitetura modular ao passo que modularidade é a combinação destes módulos em plataformas para gerar as famílias de produtos – Figura 4 (ULRICH, 1995; ULRICH e EPPINGER, 2008).

Figura 4 - Forma simplificada da modularização de um produto único e existente



Fonte: Adaptado de Ulrich (1995) e Ulrich e Eppinger (2008)

Existe um campo de pesquisa no qual, são estudados os métodos para a formação destes “pedaços” ou subsistemas menores com agrupamentos coerentes de componentes. Existem vários métodos de modularização sendo discutidos nas universidades e aplicados na indústria. Porém, não existe um consenso sobre qual deles é o melhor. Normalmente, a escolha do método está vinculada ao objetivo da modularização, produto inovador ou existe, cenário e a familiaridade do usuário com o método. Para todos eles, o *background* e uma equipe multifuncional são requeridos para a coleta de dados e análise dos resultados, que nem sempre são coerentes em função da criticidade das entradas, ou seja, dados inseridos nos métodos para relacionar os componentes e gerar os módulos.

1.1 OBJETIVOS E DELIMITAÇÕES

O objetivo geral deste trabalho é analisar e aplicar os princípios da modularização no desenvolvimento da arquitetura do produto para veículos comerciais. O objetivo específico é fazer uma análise criteriosa dos resultados alcançados na aplicação de um projeto piloto de uma suspensão traseira a ar e gerar uma lista de recomendações e apoio a trabalhos futuros de modularização.

A inspiração e motivação foram os trabalhos relacionados a métodos de modularização de vários autores, tais como: Gunnar Erixon, Fredrick Börjesson, Katja Höltta-Otto, Michael Blackenfelt e Karl Ulrich. Estes autores estudaram, compararam e aperfeiçoaram diversos métodos, analisando os seus potenciais em gerar candidatos a módulos coerentes com as necessidades da empresa em criar variedade e atender suas estratégias.

A investigação dos métodos de modularização é baseada em análises e observações comparativas publicadas por diversos autores em aplicações acadêmicas e em empresas reais. Todas feitas de forma qualitativa.

Os métodos de modularização selecionados (MFD combinado com DSM) são aplicados em um projeto piloto de suspensão traseira a ar no qual, as soluções técnicas mais importantes são definidas e conhecidas. Desenvolvimento de plataforma ou família de produtos, ou seja, a modularidade está relacionada a trabalhos futuros. Além disso, não está incluído projeto de componentes ou de interfaces bem como documentações pertinentes aos módulos obtidos.

Os módulos gerados com a metodologia são orientativos e devem ser analisados pela equipe de projeto para a definição da arquitetura do produto.

Mesmo que fundamental, os requisitos financeiros são discutidos apenas superficialmente.

1.2 CONTRIBUIÇÕES

Alinhado às características do mestrado profissional, este trabalho tem o objetivo de gerar contribuições tanto acadêmicas quanto organizacionais. Os resultados acadêmicos são indicados ao relacionar os temas arquitetura do produto, modularidade e plataforma do produto com criação de variedade, redução de complexidade e flexibilidade como oportunidades de pesquisas futuras identificadas na revisão teórica, a saber:

- Elmaraght et al. (2013) identificam que o número ótimo de variantes de um produto permanece um desafio. Indicam que ferramentas que orientem os clientes a configurar o produto de forma correta para atender, de forma otimizada, sua aplicação bem como, suportar o vendedor para esta sua orientação ainda precisam de muitas melhorias. Estas ferramentas serviriam para maximizar o valor para os clientes e também, para a empresa.
- Börjesson (2012) propõe que os métodos Modular Function Deployment (MFD) e Design Structure Matrix (DSM) sejam aplicados na modularização de produtos novos e seus resultados documentados e divulgados. Sugere que os cinco métodos discutidos neste trabalho sejam reavaliados por uma equipe multifuncional ao invés de uma única pessoa. Argumenta que os resultados podem modificar consideravelmente.
- Hölttä-Otto (2005) sugere a aplicação do método de desenvolvimento de plataforma modular em um contexto industrial e em empresas múltiplas.

No âmbito organizacional, os resultados esperados são:

- Elaborar uma documentação com lista de recomendações e boas práticas obtidas da aplicação dos métodos de modularização para ser utilizado nos desenvolvimentos futuros de arquitetura modular na MAN LA.

- Difundir o conhecimento adquirido nos estudos de arquitetura, plataforma e famílias de produtos relacionados à modularização e modularidade com treinamento dos engenheiros.
- Agregar valor aos desenvolvimentos correntes de modularidade do produto.

1.3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Segundo Silva e Menezes (2011) e Gil (2002) a metodologia de pesquisa utilizada pode ser descrita e classificada como de natureza aplicada, pois estrutura o conhecimento para uma aplicação prática da solução de um problema específico, com objetivos exploratórios, pois proporciona maior familiaridade com o problema, abordagem qualitativa e procedimentos técnicos experimental com modelamento e simulação da realidade.

Em uma pesquisa qualitativa, as questões são feitas de forma prática em termos de “como” e “por que” alguma coisa acontece. Neste trabalho as questões estão relacionadas à aplicação de métodos de modularização para gerar candidatos a módulos para a otimização da arquitetura do produto em veículos comerciais, tais como:

- Os métodos disponíveis podem ser aplicados na modularização de veículo comercial de forma coerente?
- Existe um método mais adequado a ser aplicado e uma forma de selecioná-lo?
- Métodos testados e avaliados academicamente apresentam bons resultados em quaisquer projetos reais?
- Qual a aderência de um modelo científico de simulação de modularização com a realidade da empresa?

No modelamento inicial, na fase de conceituação, é feito um levantamento bibliográfico sobre os temas, a saber, customização em massa, arquitetura do produto, módulos, plataforma do produto e métodos de modularização para capturar e mapear as características do problema real. Discussão com profissionais influentes e com grande experiência em desenvolvimento do produto também foi utilizada.

Vários modelos existentes foram analisados para selecionar aquele com maior aderência com o problema real na construção do modelo científico.

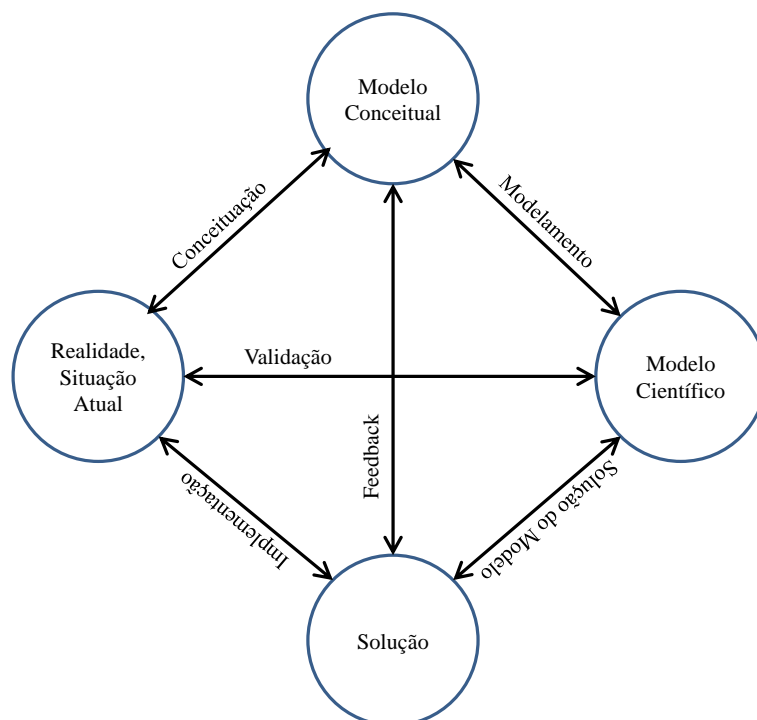
Após esta etapa foi definido um projeto piloto e os dados referentes ao produto, mercado, aplicação, clientes e empresa foram inseridos neste modelo. O projeto definido foi a modularização de uma suspensão traseira a ar. Esta decisão não levou em consideração somente os aspectos técnicos do projeto, mas também análise de benchmark, QFD e ser uma evolução tecnológica necessária para manter a competitividade. Outro ponto relevante foi a familiaridade com todos os sistemas envolvidos.

Os módulos gerados a partir da simulação foram analisados levando-se em consideração, funcionalidade, processo produtivo, capacidade de criar variedade do produto e estratégia da empresa. Tipicamente, são feitas várias interações no modelo para ajuste dos dados.

Uma vez que os resultados obtidos são satisfatórios o modelo é validado e aplicado.

A Figura 5 representa graficamente a metodologia de simulação aplicada.

Figura 5 - Modelo de Mitroff *et al.* (1974).



Fonte: Bertrand e Fransoo (2002)

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será apresentado em cinco capítulos. O capítulo 2 apresentará a revisão bibliográfica com o estado-da-arte em arquitetura do produto, definições de módulo, modularidade e modularização, plataforma do produto e os principais métodos de modularização. No capítulo 3 os métodos de modularização serão analisados e comparados de forma qualitativa identificando as suas vantagens e desvantagens na aplicação. Será definido o método a ser aplicado na modularização com as justificativas. No capítulo 4 o método definido será aplicado em um projeto piloto e os resultados serão apresentados e discutidos. Os comentários, conclusões e propostas de trabalhos futuros serão apresentadas no capítulo 5. Finalmente têm-se as referências bibliográficas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Todo o material coletado e discutido neste capítulo foi baseado em publicações de artigos e teses referentes a desenvolvimento do produto. Serão apresentados definições e conceitos fundamentais para aplicação dos métodos de modularização e os métodos propriamente ditos. Primeiro será apresentado o conceito de arquitetura do produto e em seguida os de módulo, modularidade e modularização, visto que estes conceitos estão entrelaçados e ainda são bastante debatidos. Além disso, o desenvolvimento do produto não se completa sem o entendimento de plataforma do produto no qual a variedade é criada com as famílias de produto.

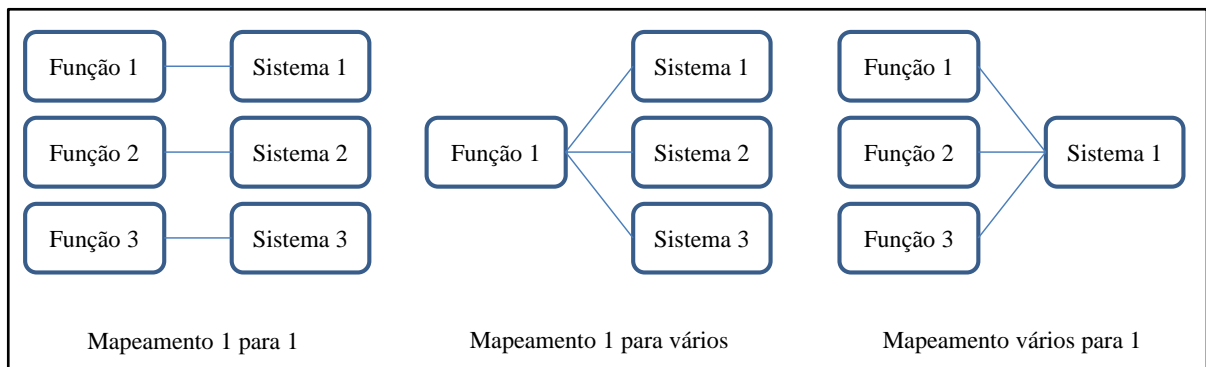
2.1 ARQUITETURA DO PRODUTO

A arquitetura relaciona a funcionalidade do produto aos seus componentes e subsistemas físicos e a maneira como estão conectados e mapeados. Uma boa definição de arquitetura afeta todo o ciclo de vida do produto, sua flexibilidade e seu potencial de customização em massa. O resultado dos métodos de modularização é o agrupamento dos componentes do produto a fim de gerar candidatos a módulos que devem compor uma arquitetura modular do produto.

Com um ponto de vista mais pragmático, Ulrich e Tung (1991) introduziram o conceito de arquitetura do produto, que foi definida como a forma pelo qual uma função é incorporada aos componentes físicos.

Segundo Ulrich (1995) elementos funcionais são algumas vezes chamados de requerimentos funcionais. O seu arranjo e suas relações são denominados estrutura funcional. Também define componente como uma parte ou sub-montagem física e pode ser pensado como qualquer região distinta do produto. Eles implementam os elementos funcionais do produto. O mapeamento entre os elementos funcionais e componentes podem ser: 1 para 1, vários para 1 ou 1 para vários conforme visto na Figura 6.

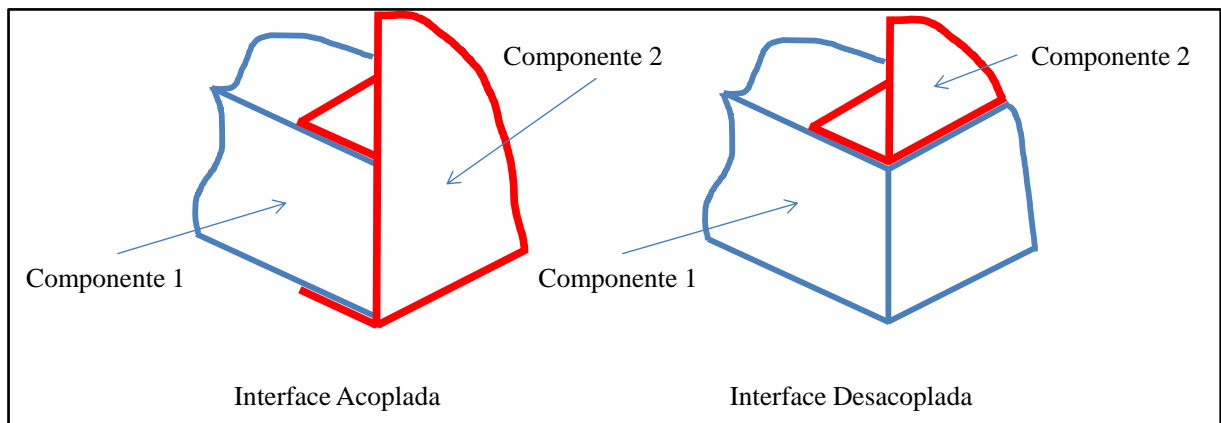
Figura 6 - Exemplo de mapeamento



Fonte: Adaptado de Ulrich (1995)

Para que o produto possa exercer a sua função, os componentes precisam ter interações. As interações dos componentes ocorrem por alguma interface física. Interfaces devem envolver conexão geométrica entre dois componentes e podem ser acopladas ou desacopladas. Dois componentes estão acoplados, se uma alteração feita a um componente exige uma mudança no outro para que o produto funcione corretamente de forma global. Para componentes desacoplados, não existe esta dependência – Figura 7 (ULRICH, 1995).

Figura 7 - Interfaces desacopladas e acopladas



Fonte: Adaptado de Ulrich (1995)

Utilizando as informações descritas, Ulrich (1995) define arquitetura do produto, mais precisamente em três estágios: (1) a disposição dos elementos funcionais; (2) o mapeamento dos elementos funcionais nos componentes físicos; (3) a especificação das interfaces entre as interações dos componentes físicos. Ele argumentou que muito da capacidade da flexibilidade de manufatura em produzir variedade não está relacionada aos equipamentos instalados, mas sim à arquitetura do produto. Por isto ele propôs a primeira tipologia para arquitetura como sendo modular e integral – Figura 8.

Figura 8 - Arquitetura modular e integral

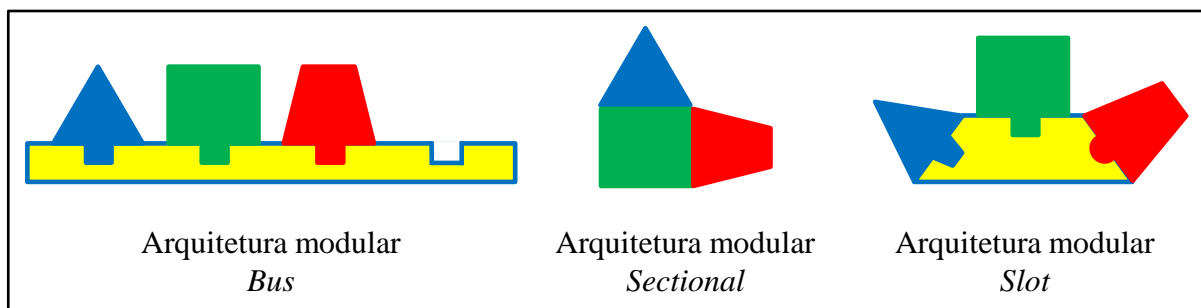
Arquitetura	Mapeamento	Interface	Definição	Variedade
Modular	1 para 1	Desacoplada	Conceituação do produto	Combinação de módulos
Integral	Mais de 1 para 1	Acoplada	Todo a fase do DP	Flexibilidade da instalação

Fonte: Adaptado de Ulrich (1995)

- **Arquitetura Modular** – A modificação em um componente não afeta os demais. Existe um mapeamento de 1 para 1 entre os elementos funcionais na estrutura funcional e os componentes físicos no produto. Especifica interfaces desacopladas entre os componentes. É definida na conceituação e não deve ser modificada durante o desenvolvimento do produto. A obtenção de variedade do produto não está relacionada aos equipamentos de produção.
- **Arquitetura Integral** – Tem foco na otimização das características (ou performance do produto). Modificações em um componente afeta os demais. Apresenta mapeamento complexo (não 1 para 1) entre os elementos funcionais na estrutura funcional e os componentes físicos no produto. As interfaces são normalmente acopladas entre os componentes. É modificada durante toda a fase de desenvolvimento do produto. A variedade do produto está relacionada à capacidade dos equipamentos instalados de serem flexíveis.

Ulrich (1995) complementa dividindo arquitetura modular em três tipos: *Bus*, *Sectional* e *Slot* – Figura 9.

Figura 9 - Tipos de arquitetura modular



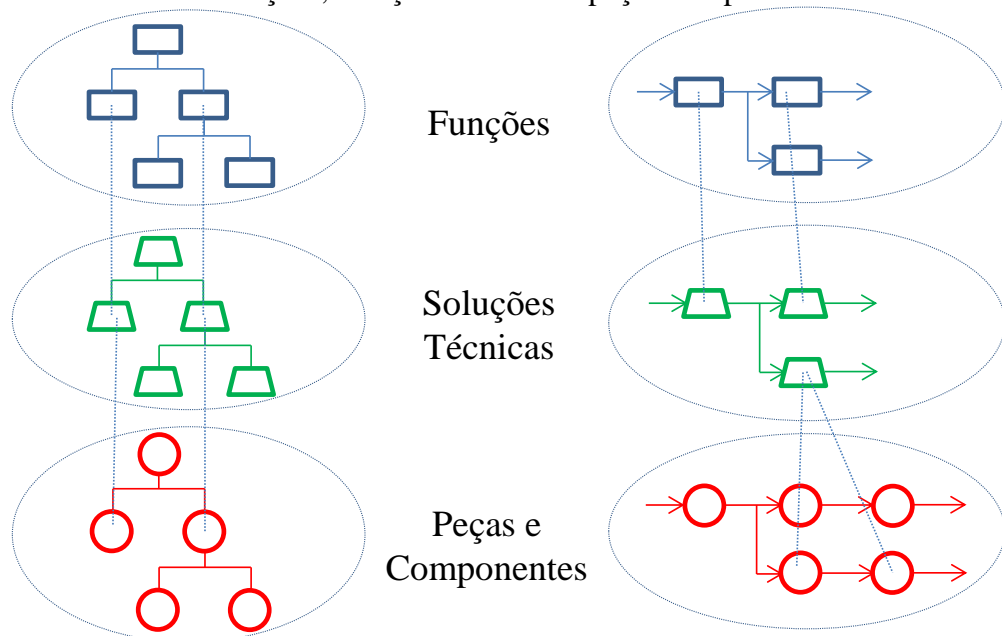
Fonte: Adaptada de Ulrich (1995)

- **Bus** - Existe um módulo central em que os vários componentes conectam utilizando o mesmo tipo de interface.
- **Sectional** - Todas as interfaces são do mesmo tipo porem, diferente da Bus, não existe um módulo comum no qual os vários componentes se conectam.
- **Slot** - Cada interface entre os componentes em uma arquitetura Slot é de tipo diferente das outras. Desta forma, os vários componentes não podem ser intercambiados.

Para Stone, Wood, e Crawford (2000), arquitetura do produto é, em sua essência, a transformação da função do produto em produto. Ela se baseia nas necessidades do cliente e seu mapeamento em um modelo funcional do produto.

Blackenfelt (2001) apresenta uma definição de Hubka e Eder (1988) relacionando arquitetura a um sistema técnico e com interação ao meio ambiente. Define arquitetura como o conjunto de elementos que são conectados internamente e ao meio ambiente, designado a cumprir uma transformação. E diz que os artefatos são descritos baseados em três tipos de elementos: funcionais, soluções técnicas e peças/componentes – Figura 10.

Figura 10 - Níveis de funções, soluções técnicas e peças/componentes



Dahmus, Gonzalez-Zugasti e Otto (2001) propõem uma arquitetura de portfólio de produtos. A proposta se baseia em desenvolver a estrutura funcional de cada produto, identificando as funções únicas e comuns e, após isto, aplicar regras para determinar candidatos a módulos e possibilidades de arquiteturas. Cada arquitetura é representada em uma matriz de **Funções x Produto** com as funções que são compartilhadas e únicas identificadas. A partir desta análise a melhor arquitetura de portfólio de produtos é definida.

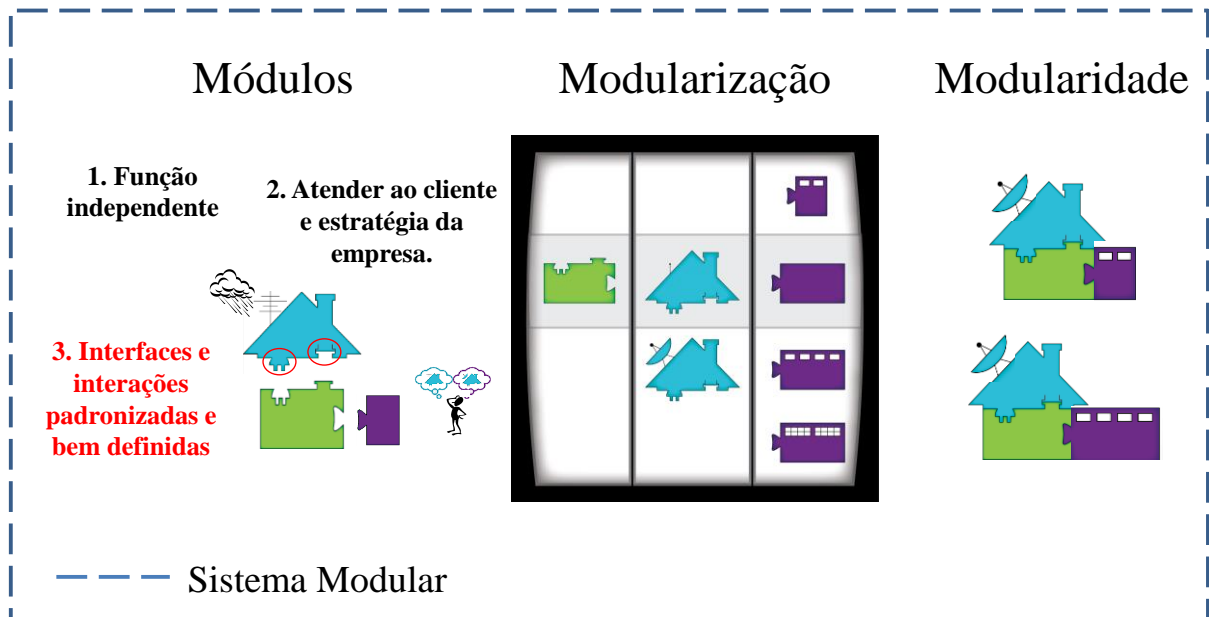
Hölttä-Otto (2005) relaciona arquitetura a um sistema com representação abstrata e adiciona entidades não físicas. A parte comum das definições é a disposição ou mapeamento dos elementos do produto. Mostra que existem várias maneiras de representar um produto, sistema ou arquitetura. Todas as representações concentram-se na decomposição física (componentes ou subsistemas) e funcional (funções do produto). Sua definição de arquitetura é: “A arquitetura de um sistema é uma descrição abstrata das entidades de um sistema e as relações entre essas entidades e o esquema pelo qual essas entidades são mapeadas em grandes subsistemas físicos ou não físicos de um sistema”.

2.2 MÓDULO, MODULARIZAÇÃO E MODULARIDADE

Neste item, serão analisadas as várias definições e relações entre módulo, modularização e modularidade sob o ponto de vista de vários autores. Apesar de serem muito usados na indústria, existem conflitos em seus significados e por isso devem ser analisados em relação a um sistema modular. Os conceitos serão relacionados a arquitetura e plataforma do produto, seus benefício e riscos.

Em um sistema modular, um módulo está normalmente relacionado a uma unidade funcional independente em relação ao propósito do produto do qual faz parte, ou seja, a função é realizada dentro do próprio módulo e limita-se a este e, além disso, deve atender às estratégias da empresa. Modularização é a atividade na qual a estruturação em módulos é adotada, ou seja, um sistema complexo é estruturado em vários subsistemas independentes (módulos). Modularidade é a capacidade de criar produtos complexos através da combinação de módulos relativamente simples, o que implica um padrão comum para interfaces e interações. Estes módulos são, normalmente organizados em plataforma de onde as famílias de produtos são geradas (MILLER, 1998; ERIXON, 1998). A Figura 11 ilustra estas relações.

Figura 11 - Módulo e modularidade em um sistema modular



Fonte: Modular Management

A Estratégia da modularização deve se estender à planta de produção. Quando o produto é modularizado, a fábrica deve ser adaptada adequadamente para permitir a melhor disposição e sequencia de montagem (ERIXON, 1998). Em um pensamento similar, Prieto e Miguel (2011) e Ulrich (1995) abordam que a terceirização também é um fator importante na modularização do produto. Argumentam que as empresas devem dividir a organização do desenvolvimento e da produção em grupos especializados com foco na modularidade. Esta estrutura, normalmente se estende para os principais fornecedores para ter sinergia e principalmente dividir os riscos.

Existem várias outras definições, todas muito próximas e relacionadas ao agrupamento de componentes, funcionalidade, interfaces/interações, independência/insensibilidade e estratégia da empresa.

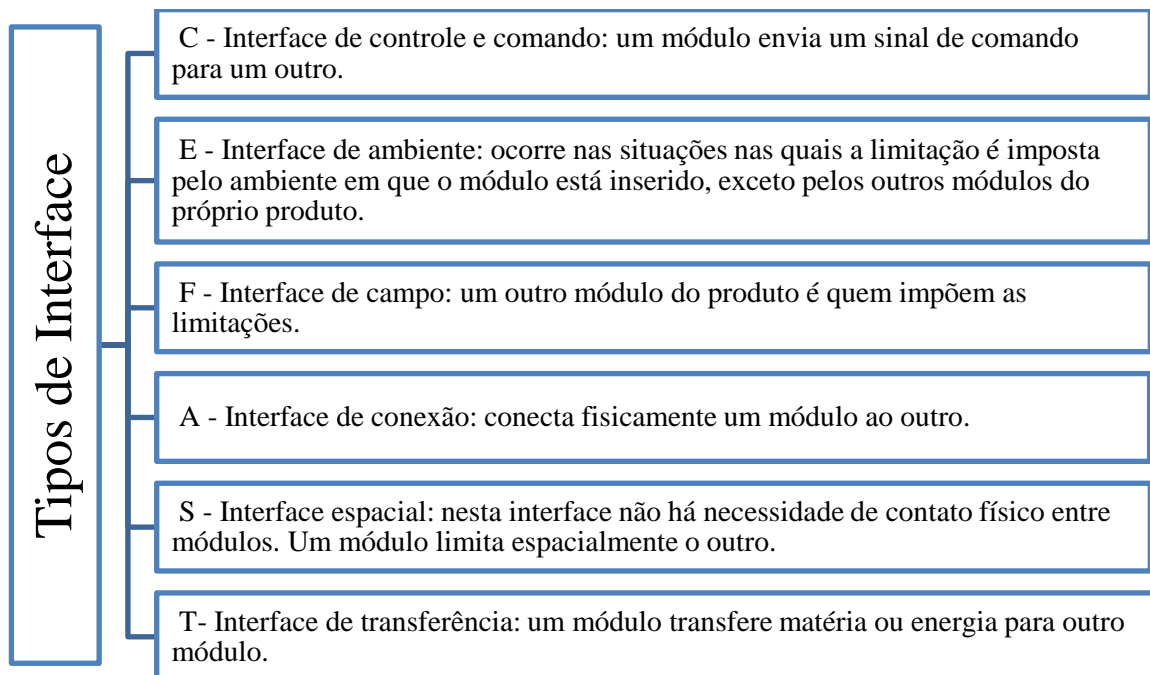
A intercambiabilidade dos módulos nem sempre é assegurada. Para Miller (1998), apesar de a maioria afirmar que módulos são intercambiáveis, módulos só podem ser intercambiáveis se possuírem interfaces e interações compatíveis e define estas duas entidades como:

- **Interfaces** são os limites dos módulos frente aos outros e alguns tipos relevantes são: 1) interfaces funcionais que seguem a atribuição de funcionalidade; 2) interfaces mecânicas, como conectores, tomadas de corrente, superfícies, etc; 3) interfaces elétricas, como a comunicação, sinais ou potência.

- **Interações** descrevem as relações de entrada/saída entre os módulos e estas relações precisam ser compatíveis. As relações podem ser dos seguintes tipos: 1) energia; 2) informação; 3) material e/ou 4) espacial.

Outra classificação de interface, bastante difundida na literatura, é proposta por Lange (2008) e está apresentada na Figura 12.

Figura 12 - Tipos de Interface



Fonte: Adaptado de Lange (2008) e Archer (2010)

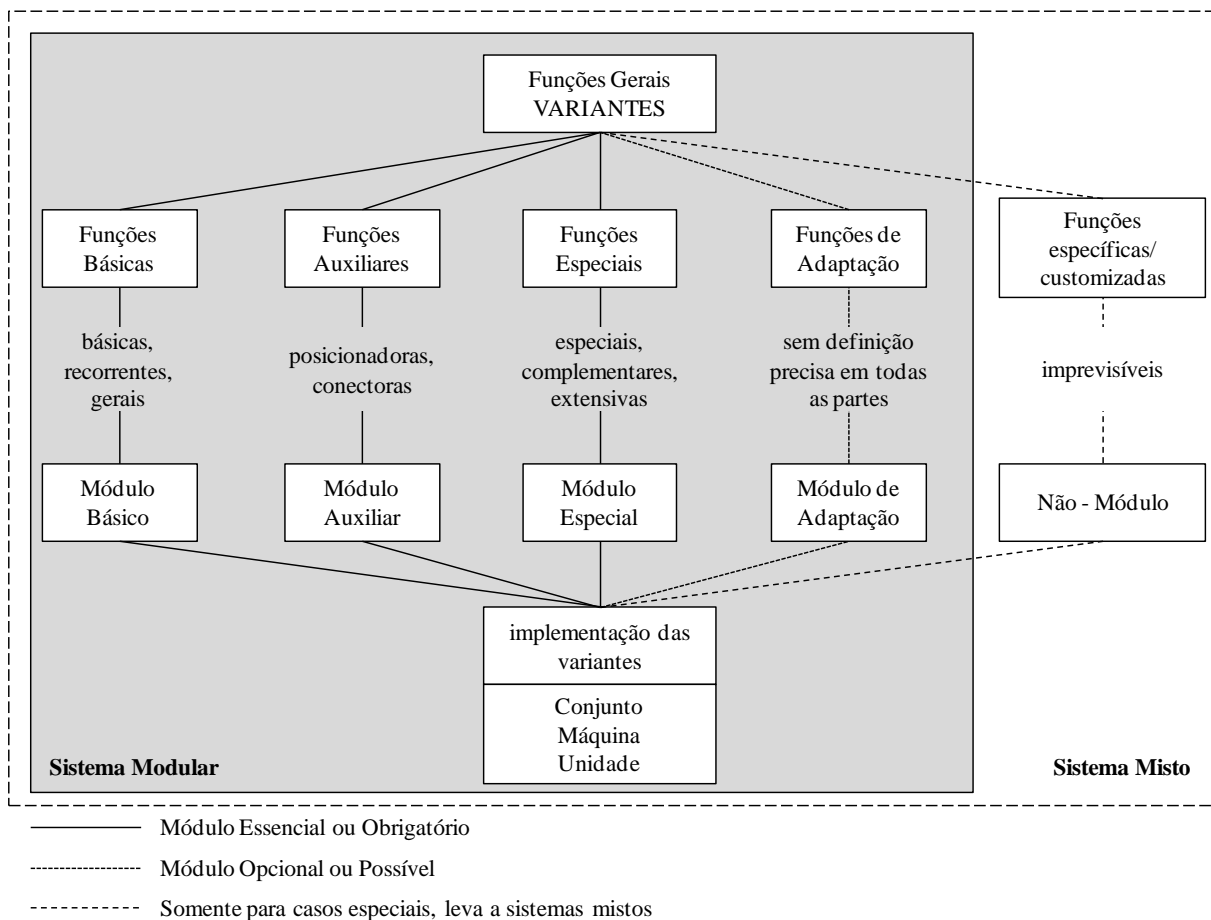
Blackenfelt (2001) introduziu os conceitos de independência e insensibilidade. E definiu estes conceitos como:

- **Conceito de independência:** significa que cada módulo pode ser trocado ou mesmo removido sem qualquer efeito funcional no resto do sistema.
- **Conceito de insensibilidade:** refere-se ao fato dos parâmetros de um módulo poderem ser trocados sem afetar o resto do sistema.

Um produto desenvolvido com arquitetura modular, geralmente não é formado apenas por módulos. Pahl e Beitz (1996) vinculam diretamente a definição de módulo a funcionalidade e mostram diferentes tipos de módulos baseado em uma série de funções (básica, auxiliar, especial e adaptativa). Consideram módulo a realização de uma função e mostram que um sistema misto engloba um sistema modular com a adição da função

específica/customizada para gerar variedade do produto. A Figura 13 ilustra estes tipos de módulos e não-módulos nos sistemas modular e misto.

Figura 13 - Tipos de funções e módulos em sistema modular e misto



Fonte: Pahl e Beitz (1996)

Muffato (1999) relaciona módulo a conjunto de componentes coerentes e descreve um módulo como um grande grupo de componentes que estão fisicamente coerentes como um subconjunto e que apresenta interfaces bem definidas e padronizadas.

Erixon (1998) e Blackenfelt (2001) relacionam produto modular e modularidade à estratégia da empresa. Define um produto modular como sendo composto de módulos com interfaces bem definidas onde os módulos são gerados baseados em razões e propósitos específicos ou estratégias.

Höltta-Otto (2005) diz que existe consenso de que um produto mais modular é um com mais módulos e que estão mais perto do “módulo ideal”, mas não existe acordo da definição de um “módulo ideal”. Ela define módulo como um bloco de construção independente de um

sistema maior, com função específica e interfaces bem definidas, podendo ser desenvolvido de forma simultânea com os demais módulos.

Börjesson (2012) relaciona módulo e modularidade no contexto da arquitetura do produto e soluções técnicas enfatizando que os módulos devem ser definidos como grupos de soluções técnicas que realizam uma ou várias funções e que têm uma interface padronizada com demais módulos ou produto e a modularidade implica padronizar as interfaces e definir a arquitetura modular.

Jose e Tollenaere (2005) relacionam modularidade ao processo de decomposição de sistemas complexos em partes mais simples. Shamsuzzoho e Petri (2010) definem modularidade como a oportunidade de misturar e combinar componentes mais simples num *design* de produto modular na qual as interfaces entre os componentes são padronizadas para permitir que os componentes possam ser substituídos na arquitetura do produto e criar variedade.

Para a criação dos módulos e desenvolvimento de arquitetura modular, as características mais importantes foram apresentadas por Ulrich e Tung (1991). Eles explicaram que modularidade surge a partir da divisão de um produto em componentes ou submontagens independentes, e modularização do produto é definida utilizando duas características:

- similaridade entre a arquitetura física e funcional do produto;
- minimização do grau de interação entre os componentes físicos.

São nestas características que se baseiam os processos de modularidade com adaptações em função de estratégias específicas da empresa.

Hölttä-Otto (2005) e Okudan e Gupta (2013) apresentam um conjunto de benefícios e riscos vinculados à aplicação de estratégias modulares.

Benefícios da estratégia modular:

- permite ao cliente combinar variedade de opções;
- permite projeto flexível ou seja, evolução do produto ao longo do ciclo de vida e menor custo da implementação de produtos derivados;
- permite desenvolvimento de caráter global mas que atende requisitos regionais;
- reduz o custo do *timing* de desenvolvimento (engenharia simultânea);

- facilita o upgrade do produto;
- gerenciamento de modificações, melhorias/ inovações e variedade;
- padronização de componentes do produto.

Riscos da estratégia modular:

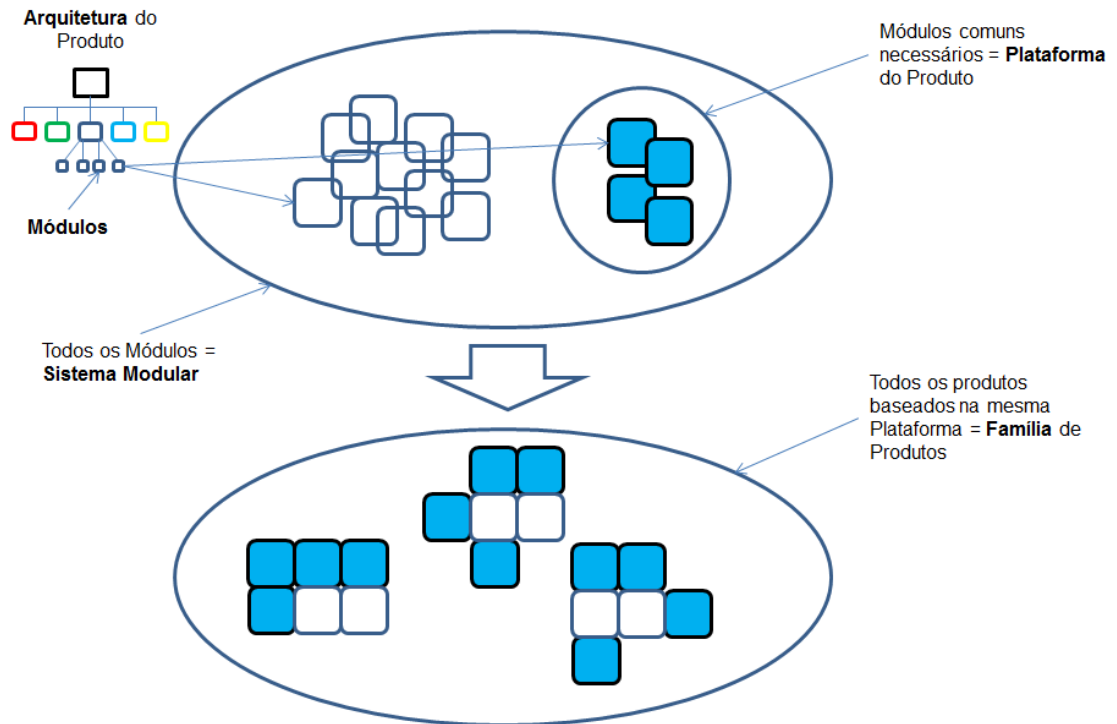
- pode levar a custos excessivo devido a *overdesign*;
- desempenho ineficiente - *trade off* desempenho x custo;
- muitos módulos comuns podem resultar em perda de identidade da marca;
- deve ser desenhado com redundância para poder ser utilizado em vários produtos compartilhando funções o que normalmente aumenta o custo;
- pode não ser desejado em projetos de alto desempenho. Quanto mais modular o projeto, maior a possibilidade de ser maior e mais pesado e menos eficiente em energia.

2.3 PLATAFORMA DO PRODUTO

Uma arquitetura modular do produto define um sistema modular e representa o mapeamento das funções dos módulos ao produto com suas interfaces e interações. A variedade do produto é gerada com as combinações destes módulos em famílias e o conjunto destes módulos é agrupado em plataformas do produto. O desenvolvimento de plataforma do produto não é objetivo desse trabalho, porém está relacionado a trabalhos futuros. Neste item, serão apresentadas as definições, os benefícios, tipos e classificação além de alguns métodos para desenvolvimento de plataformas.

Blackenfelt (2001) e Muffatto (1999) apresentam uma forma de entender melhor a interação entre sistema modular, plataforma do produto e família de produtos. O sistema modular inclui todos os módulos que são utilizados para criar todas as variantes do produto. Plataforma modular é visto como um conjunto de módulos comuns que são compartilhados entre os produtos. Família de produtos é o conjunto de produtos que compartilham tecnologia comum e relativamente a mesma aplicação no mercado, baseadas no sistema modular e na mesma plataforma. Deste modo, um sistema modular tem uma plataforma que resulta em uma família. Esta ilustração pode ser vista na Figura 14.

Figura 14 - Relação entre sistema modular, plataforma e família de produtos



Fonte: Adaptado de Blackenfelt (2001)

Robertson, Lane e Ulrich (1998) fazem uma definição genérica de plataforma de produto como sendo o conjunto de ativos que são compartilhados por um conjunto de produtos. Divide estes ativos em seis categorias: componentes, módulos, processo tecnológico, pessoas e relacionamento.

Quando estes ativos são módulos, Jose e Tollenaere (2005) dizem que a utilização de módulos compartilhados entre diferentes produtos é conhecida como plataforma modular.

Hölttä-Otto (2005) argumenta que arquitetura modular é a base para o desenvolvimento de plataforma modular e a define como o conjunto comum de módulos físicos ou não físicos a partir do qual vários produtos podem ser derivados.

Projetar variedade de produtos dentro de uma plataforma robusta reduz os custos de engenharia e *time to market*, aumenta o portfólio de produtos e a participação de mercado. A plataforma modular pode ser vista como um conjunto de módulos de uma arquitetura modular de produto que representa o núcleo base de uma família de produtos. A plataforma é adaptada com diferentes módulos adicionais para criar novas variantes do produto (ELMARAGHY *et al.*, 2013).

Existem vários métodos para desenhar e otimizar uma plataforma. A maioria deles apresentam fases de estudo de mercado com definição de funcionalidade, segmentação e da padronização de produtos. Hölttä-Otto (2005) cita existirem dois tipos e adiciona um outra distinção:

- Top-Down: mais orientada para o negócio.
- Botton-up: com maior orientação técnica.

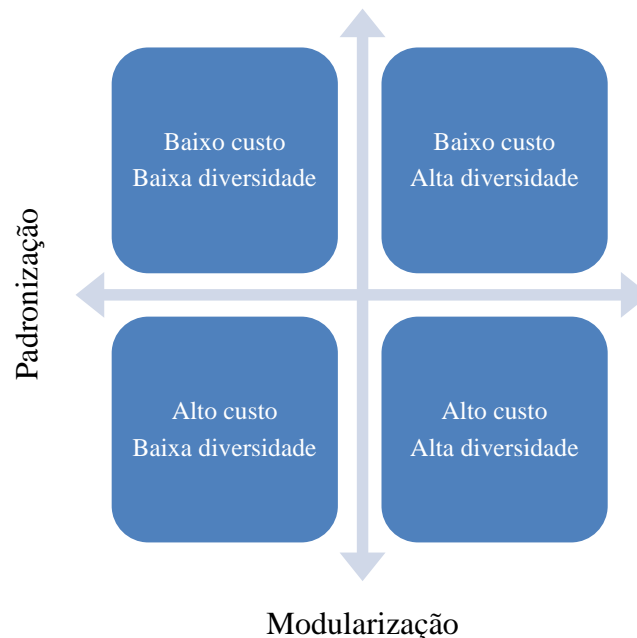
Outra forma seria distinguir entre plataforma baseada em escala e plataforma baseada em módulos.

- Baseada em escala: os produtos compartilham a funcionalidade, mas todos com diferentes níveis de desempenho. São definidas variáveis físicas ou de desempenho para gerar variedade de produto – Nayak et al. (2000) utilizam um método definido como VBPDM (*Variation-Based Plataform Design Methodology*) que tem como objetivo atender a uma grande range de requerimento em performance utilizando a menor quantidade de variantes do *design* do produto em uma família. Fellini (2000) também otimiza a plataforma baseado em desempenho. Propõe um método que utiliza uma formulação de problema com Pareto Multiobjetivo que captura *trade-offs* de desempenho que ocorrem quando os componentes são compartilhados.
- Baseada em módulos: os produtos compartilham módulos comuns, mas devem ou podem ter diferente funcionalidade. A variedade é definida com a diferente configuração dos módulos no produto – Hölttä-Otto, Tang e Otto (2008) e Holtta, Tang e Seering (2003) identificam os módulos comuns a serem compartilhados entre famílias de produtos utilizando um algoritmo quantitativo que compara diferentes módulos baseado na sua “distância aritmética“ entre *input e output* dos módulos candidatos. O agrupamento é feito baseado nesta distância. Utiliza dendograma para identificar os grupos de módulos similares em uma família de produtos na fase de *design* da arquitetura do produto.

Em um desenvolvimento de arquitetura modular, o foco é o desenvolvimento de plataformas baseadas em módulos. Wei e Liu (2015) argumentam que o principal desafio da plataforma baseada em módulo é definir quais componentes devem ser agrupados para gerar os módulos e quais módulos serão padrão ou diferenciadores.

A decisão de quais módulos e ativos devem ser único ou padrão entre os produtos obedece a uma análise de custos complexa e uma boa análise não deve considerar apenas a facilidade de adaptação da plataforma para desenvolver outros produtos ou redução de custo, mas também a maximização dos benefícios econômicos da redução do número do total de ativos diferentes. Segundo Jose e Tollenaere (2005), na seleção da plataforma, devem existir um balanço no número de módulos comuns e dos módulos de diferenciação. Argumentam que o foco deve ser conseguir o máximo de componentes padronizados sem afetar a capacidade de desenvolver os produtos necessários e atender a customização em massa. Esta relação pode ser vista na Figura 15.

Figura 15 - Padronização x Modularização



Fonte: Adaptado de Jose e Tollenaere (2005)

Os benefícios das plataformas são semelhantes aos de modularidade, pois os módulos são muitas vezes utilizados para criar plataformas modulares ou variantes do produto. Hölttä-Otto (2005), Muffato (1999) e Robertson, Lane e Ulrich (1998), listam os seguintes benefícios:

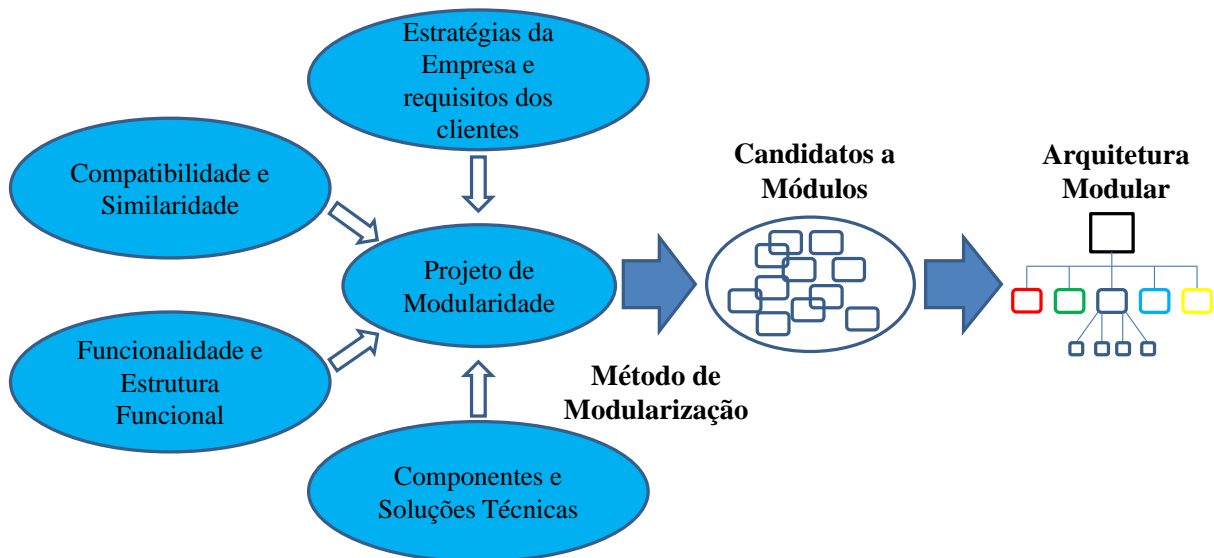
- maior capacidade de adaptar produtos às necessidades dos segmentos de mercado e clientes diferentes;
- redução no custo, tempo e risco de desenvolvimento;
- redução do investimento na produção e otimização/flexibilidade do uso de plantas;
- redução na complexidade sistêmica;

- redução de custos com recursos em escala mundial;
- redução do número de plataformas em função de estratégia global;
- melhor *serviceability*.

2.4 MÉTODOS DE MODULARIZAÇÃO

Arquitetura modular do produto é caracterizada pela existência de interfaces padronizadas entre os blocos de construção que possuem funções específicas e são definidos e selecionados para atender à estratégia da empresa, neste caso, os blocos de construção são denominados módulos. Modularização são os métodos estruturados que agrupam os componentes ou soluções técnicas e definem os candidatos a módulos utilizando informações do cliente, físicas ou geométricas, funcionais e estratégicas para desenhar ou otimizar/aperfeiçoar a arquitetura do produto (ERIXON, 1996; BLACKENFELT, 2001; BORJESSON, 2012). A Figura 16 representa este processo.

Figura 16 - Processo de modularização



Fonte: Adaptado de Erixon (1996) e Borjesson (2012)

Neste item serão analisados os principais métodos de modularização aplicados em empresas e academicamente para o desenvolvimento de arquitetura modular do produto. Os métodos abordados serão: (1) *Modular Function Deployment* (MFD), (2) *Design Structure Matrix* (DSM), (3) *Function Structure Heuristics* (FSH), (4) *Decomposition Approach* (DA),

(5) *Function-Strategy* DSM (FS-DSM), (6) MFD com adição de propriedades de convergência e (7) MFD aplicado ao mesmo tempo com DSM. Os três primeiros são considerados métodos fundamentais e seus conjuntos de vantagens e desvantagens serão explorados neste trabalho. Os quatro últimos são métodos híbridos dos três primeiros, ou seja, são obtidos da combinação dos métodos fundamentais ou do aperfeiçoamento destes.

Borjesso e Kajta Hölttä-Otto (2013) argumentam que, baseadas no formato dos dados, em geral, os métodos de modularização podem ser divididos em duas categorias:

- Métodos baseados em matrizes.
- Métodos baseados em estruturas gráficas de funções.

Quando se utiliza matriz, a geração dos módulos é feita com o auxílio de algoritmos computacionais, quando em formato de estrutura de funções, utilizam-se heurísticas pré-definidas. Independentemente do formato dos dados, os métodos podem ser divididos em métodos baseados em acoplamento ou similaridade, como indicado a seguir:

- **Métodos baseados em acoplamento** – agrupam os elementos em um módulo maximizando o acoplamento ou conectividade destes elementos dentro do módulo enquanto objetiva minimizar o acoplamento entre os módulos. O algoritmo Idicula-Gutierrez-Thebeau (IGTA) pode ser utilizado para o agrupamento. Ex.: DSM e DA.
- **Métodos baseados em similaridade** – definem o módulo baseado em similaridade ou dissimilaridade entre propriedades do produto e direcionadores de estratégia. Isolam elementos em um módulo se eles são diferentes dos demais, mas similar um com os outros. Normalmente utiliza algoritmos de agrupamento hierárquico e apresenta os resultados em forma de dendograma que é uma ordenação hierárquica gráfica em formato de árvore que mostra a similaridade dos componentes. Ex.: MFD.

Todos os métodos de modularização devem representar um modelo da realidade que capture os aspectos do produto que tenha implicação com a definição da sua arquitetura. Não existe consenso sobre qual método é o melhor, depende do produto, cenário, mercado, estratégia da empresa e da experiência da equipe em projeto em modularidade. Por este motivo, algumas publicações apenas comparam os métodos existentes, aperfeiçoam e indicam novas melhorias em trabalhos futuros.

Höltkä e Solonen (2003) comparam três métodos, FSH, MFD e DSM. A escolha destes métodos foi motivada por serem bem estabelecidos academicamente e com aplicação industrial. Um dos critérios utilizado foi a repetibilidade dos métodos utilizando os mesmos dados de entrada, porém aplicados por pessoas diversas. O resultado deste trabalho mostrou que a maior repetibilidade foi obtida aplicando FSH, porém faz algumas considerações sobre a dificuldade em desenhar uma estrutura funcional do produto de forma adequada.

Borjesson (2009) analisa a aplicação do método MFD e argumenta que muitas vezes os primeiros resultados simplesmente parecem não fazer sentido. Para melhorar esta condição, propõe a adição de propriedades de convergência ao método que são um grupo de dados que são inseridos no modelo e verificados durante o processo de agrupamento hierárquico. Com este aperfeiçoamento, a quantidade de interação manual e ajustes no modelo de modularização diminuem consideravelmente.

Os resultados de Höltkä-Otto e Solonen (2003) motivaram Borjesson (2010) a investigar se métodos híbridos podem apresentar resultados superiores aos métodos que os deram origem. Utiliza um conjunto de fatores para comparar qualitativamente cinco métodos de modularização, dois deles híbridos de DSM e MFD: FSH, DSM, MFD, FS-DSM (híbrido de DSM e MFD) e *Extended Implementation Structure Matrix* (e-ISM – híbrido de MFD). Na sua análise, conclui que os métodos híbridos apresentaram o mesmo conjunto de vantagens e desvantagens que os métodos que os deram origem e podem ser aplicados adequadamente na geração de candidatas a módulos.

Archer e Scalice (2010) também se basearam em Höltkä-Otto e Solonen (2003) para comparar os métodos MFD, DSM e FSH. Aplicaram e compararam os métodos no projeto de uma nova máquina de lavar roupas com foco em criar variedade e um produto ambientalmente amigável (*Design for Environment* - DfE). Os resultados corroboraram as observações de Höltkä-Otto e Solonen (2003).

Okudan e Gupta (2013) comparam três métodos: FSH, *Behavioral-driven Function-Environment Structure* (B-FES) e DA. Em que aplicaram os métodos no desenvolvimento de arquitetura modular de uma escova de dente eletrônica e uma bicicleta. Seus resultados mostraram que o método DA apresenta melhores resultados em *Design for Assembly* (DfA) que são projetos desenvolvidos focados em otimização do processo de montagem além de complexidade e *Design for Variety* (DfV) que engloba os projetos modulares focados no aumento da variedade do produto com gerenciamento da complexidade.

À medida que os métodos evoluem, os esforços computacionais para a solução do problema de geração dos módulos ficam maiores e novos algoritmos são criados ou aperfeiçoados. Borjesson e Katja Hölltä-Otto (2012) apresentaram uma evolução no algoritmo IGTA (Idicula-Gutierrez-Thebeau) utilizado no agrupamento de DSM para aumentar sua velocidade na execução.

Borjesson e Hölltä-Otto (2013) ainda propõem outro aprimoramento no método IGTA para poder agrupar, ao mesmo tempo, método baseado em acoplamento (DSM) e em similaridade (MFD). O método MFD, em função dos elementos de sua matriz terem uma relação de similaridade são agrupados utilizando métodos de agrupamento hierárquico. Estes métodos não conseguem agrupar os elementos da matriz DSM em função de sua relação de acoplamento.

2.4.1 *Modular Function Deployment (MFD)*

O método MFD foi apresentado por Erixon et al. (1996) e Erixon (1998) e posteriormente melhorado por Nilsson e Erixon (1998). O método foi baseado em pesquisas de modularização e modularidade realizadas na década de 1990.

Sugere uma série de critérios para agrupamento de componentes ou funções em um módulo. Estes critérios são denominados Direcionadores Estratégicos (*Module Drivers – MD*) e são exclusivos do MFD. Os *Module Drivers* são bastante genéricos e descrevem a intenção estratégica da empresa com a modularização abrangendo o produto em todo o seu ciclo de vida. Normalmente são em número de 12 podendo ser adaptado em função da realidade específica de cada empresa, como as estratégias de negócios, limitações financeiras e legislações locais. Veja na Tabela 1 a descrição dos MD.

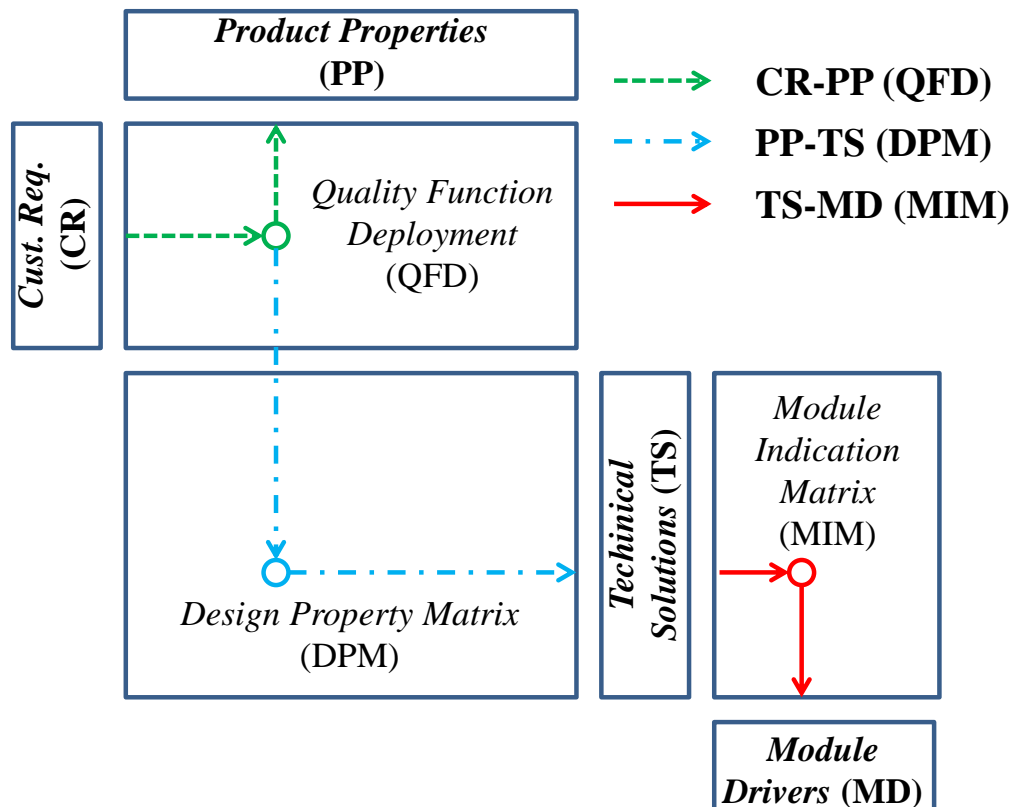
Tabela 1 - *Module Drivers* conforme MFD

CICLO DO PRODUTO	MODULE DRIVERS	CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS
Desenvolvimento do Produto	<i>Carry Over</i>	Uma função pode ser um módulo separado se a solução técnica atual pode ser levada para uma nova geração ou família de produtos. As soluções podem ser utilizadas nas gerações futuras
	Evolução Tecnológica	Uma função pode ser um módulo único se o mesmo possui uma tecnologia que irá ser superada durante seu ciclo de vida. Incorporação de novas tecnologias.
	Alterações Planejadas do Produto	Uma função pode ser um módulo separado se esta possuir características que serão alteradas de forma planejada.
Variedade	Diferentes Especificações Técnicas	Poderão ser concentradas alterações para se conseguir variantes em um módulo.
	Estilo	A função pode ser um módulo separado se esta é influenciada por tendências e modas de tal maneira que as formas e/ou as cores tenham de ser alteradas.
Fabricação	Unidade Comum (Plataforma)	Uma função pode ser separada em um módulo se a mesma possuir a mesma solução física em todos os produtos variantes.
	Organização e/ou Processo	Uma função pode ser separada em um módulo se ela protege os recursos escassos em desenvolvimento e processo, encaixa-se no conhecimento tecnológico da empresa ou tenha uma montagem diferenciada.
Qualidade	Testes em Separado	Uma função pode ser separada em um módulo quando puder ou houver necessidade de ser testada separadamente.
Aquisição	Fornecedores Estratégicos	Uma função pode ser desenvolvida e manufaturada com parceiros externos estratégicos e tratada como um <i>blackbox</i> .
Após Estar no Mercado	Manutenção e Manutenibilidade	Manutenções e reparos podem ser facilitados se uma função é separada em um módulo.
	Atualização / <i>Upgrading</i>	Uma função pode ser agrupada em um módulo se facilita que os os clientes melhorem a performance do produto após a compra.
	Reciclagem	Módulos podem ser vantajosos para concentrar materiais poluentes ou recicláveis em um mesmo módulo ou em módulos separados.

Fonte: Adaptado de Marcelo Bataglin (2012) e Erixon *et al.* (1996)

Este é um método matricial que utiliza três matrizes interligadas para integrar a voz do cliente (Requerimentos dos Clientes), a voz da engenharia (Propriedades do Produto e Soluções Técnicas) e a voz da empresa (Estratégias). Estas matrizes são o Desdobramento da Função Modular (*Quality Function Deployment – QFD*), Matriz de Propriedade do Produto (*Design Property Matrix – DPM*) e Matriz de Indicação de Módulos (*Module Indication Matrix – MIM*) que formam o Mapa de Gerenciamento do Produto (*Product Management Map – PMM*). A Figura 17 mostra uma representação esquemática da PMM.

Figura 17 - Representação esquemática de uma PMM



Fonte: Adaptada de Borjesson (2010)

A geração de candidatos a módulos utilizando o MFD consiste em cinco passos conforme descritos abaixo:

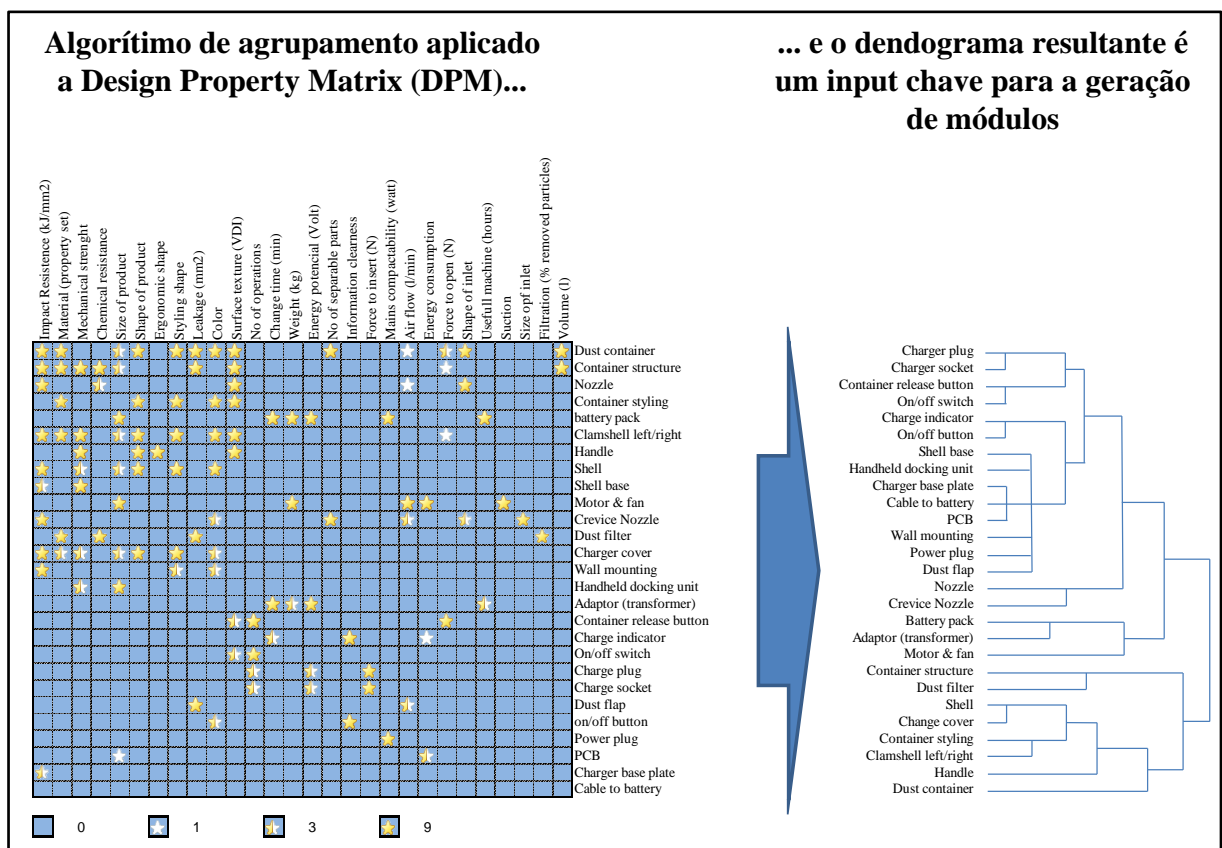
Primeiro passo – Definir os requisitos dos clientes: elaborar uma lista com os requerimentos dos clientes (CR) e definir propriedades do produto (PP) que sejam mensuráveis e controláveis para atender a estas exigências. Correlacionar os requerimentos dos clientes com as propriedades do produto utilizando a matriz QFD. Os elementos das matrizes são correlacionados com pontuação de 0, 1, 3 ou 9 dependendo de como a propriedade do produto impacta no requerimento do cliente.

Segundo passo – Selecionar as soluções técnicas: decompor o produto em soluções técnicas (TS) para atender às propriedades do produto (PP) e descrever como cada TS impacta no desempenho das PP em particular. Para esta correlação é utilizada a matriz DPM. Várias soluções técnicas podem ser propostas para uma mesma PP e nestes casos, devem ser utilizadas técnicas para decidir qual utilizar. Uma delas é a matriz de Pugh, na qual as vantagens e desvantagens das diferentes alternativas são pontuadas e ranqueadas. A correlação dos elementos na matriz DPM é similar a apresentada na matriz QFD.

Terceiro passo – Gerar o conceito modular: correlacionar as soluções técnicas (TS) com os objetivos ou intenção estratégica da empresa em modularização utilizando os direcionadores estratégicos (*Module Drivers* – MD). Esta correlação é feita utilizando a matriz MIM. Cada TS é analisada comparando com os direcionadores de modularização pontuando com 0, 1, 3 e 9. Direcionadores que suportam a mesma estratégia são ditos compatíveis. MFD propõe que um módulo só pode ser composto de soluções técnicas com MD compatíveis. Nesta fase, os candidatos a módulos são gerados e definidos aplicando software de clusterização hierárquica nas matrizes DPM e MIM. A visualização é feita através de dendogramas que não prescrevem o número de módulos. Estes devem ser interpretados pela equipe envolvida no projeto.

A Figura 18 mostra como fica a representação da matriz DPM e MIM com o agrupamento representado por dendograma.

Figura 18 - Dendograma representando o agrupamento nas matrizes DPM e MIM

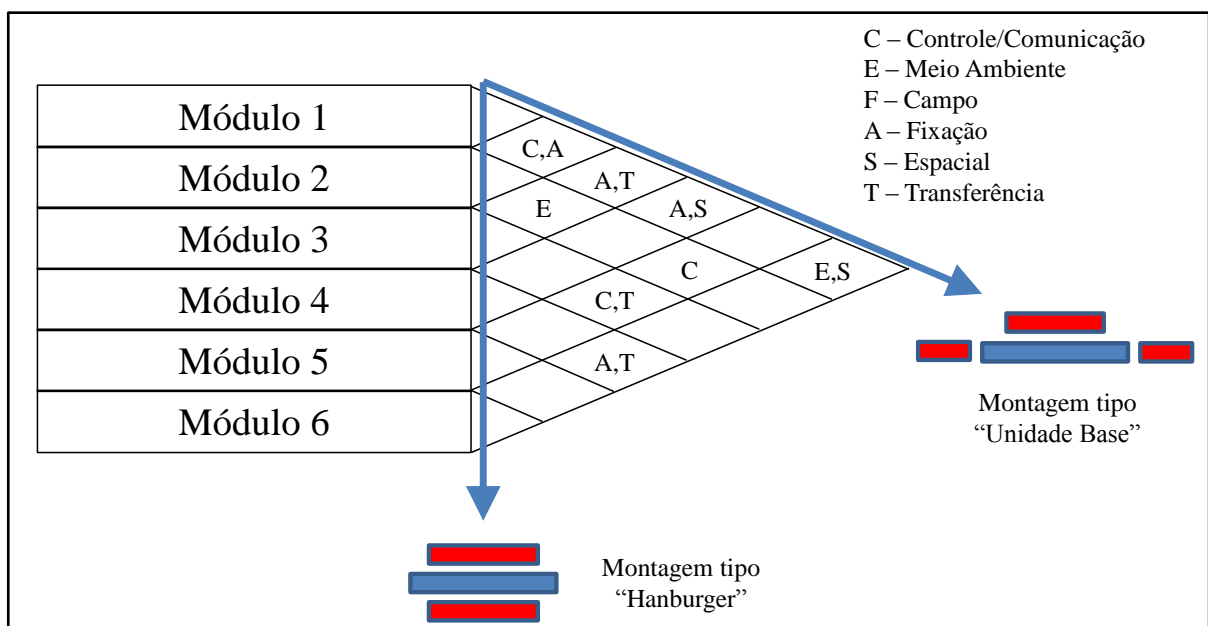


Fonte: Borjesson (2012)

Quarto passo – Analisar o conceito modular: definir a relação de interação e interface entre os módulos gerados. Módulos devem possuir interfaces e interações padronizadas. Estas definições são a condição para o sucesso do projeto de modularidade. Para esta análise é

utilizado a matriz de interface (*Interface Matriz – MI*), na qual os módulos obtidos são listados conforme sua sequência de montagem e correlacionados um contra o outro baseado na classificação das interfaces. Uma proposta é utilizar as 6 classes conforme Lange (2008). A representação também permite identificar o tipo de montagem ou conexão entre os módulos. Duas possibilidades podem ser encontradas: montagem do tipo hambúrguer (indicado para montagens automatizadas), os componentes são inseridos em uma sequência na qual um componente é depositado sobre o outro e do tipo unidade base (indicado para montagens manuais), utiliza um componente como peça base e encaixe, suportando os demais. Com as informações desta etapa é também gerado o PMM (Product Management Map) que possui toda a trajetória do processo de modularização. A Figura 19 mostra como é a matriz de interface.

Figura 19 - Representação esquemática da Matriz de Interface



Fonte: Adaptado de Erixon et al. (1996)

Quinto passo – Aperfeiçoar os módulos: nesta fase, todas as informações relevantes à formação dos módulos, tais como, requisitos do cliente, propriedade do produto, soluções técnicas, estratégias da empresa e tipo de interfaces são tabeladas para auxiliar no desenvolvimento e projeto dos módulos além de servir de documento de comunicação com as demais áreas da empresa. O PMM, dendograma e MI são utilizados na elaboração deste documento.

Todas estas informações devem ser planilhadas de forma a difundir as informações para as demais atividades do projeto e empresa. As informações são obtidas através da matriz PMM, MI e dendograma.

Machado e Maziero (2014) aplicaram o método MFD em um rachador de lenha com objetivo em manufatura e montagem. O dendograma foi analisado com estas estratégias para a definição dos módulos e várias propostas de módulos foram feitas focadas em decisões de produção interna ou compra de componentes ou subsistemas para a otimização da arquitetura.

2.4.2 Design Structure Matrix (DSM)

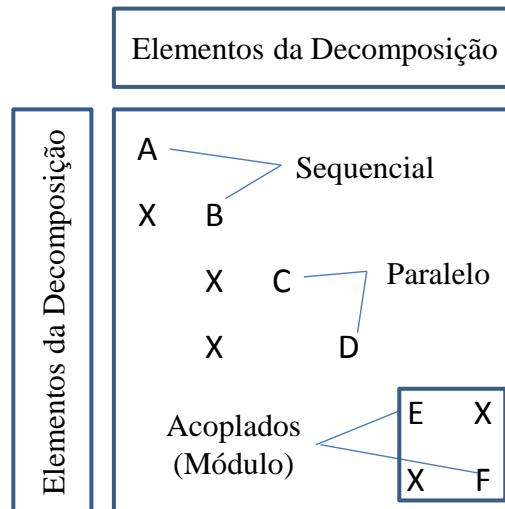
DSM utiliza uma matriz para analisar e correlacionar as dependências existentes entre componentes, funções ou soluções técnicas de um produto. O método se baseia em adicionar estes elementos, na mesma sequência, às linhas e colunas da matriz e analisar um contra o outro. Não leva em consideração os requerimentos dos clientes ou estratégia da empresa.

Pimmler e Eppinger (1994) introduziram uma representação, na qual as correlações são feitas em termos de energia (E), material (M), informação (I) ou relações espaciais (S) utilizando os coeficientes -2, -1, 0, 1 ou 2 dependendo da força da relação e se a relação é benéfica ou indesejada. Uma vez que a matriz é preenchida, um algoritmo é utilizado para agrupar os elementos de forma que as interações dentro do grupo sejam maximizadas e entre os grupos minimizadas. Estes grupos formados são candidatos a módulos.

Blackenfelt (2001) propôs pela primeira vez adicionar estratégia aos acoplamentos dos componentes utilizando duas matrizes DSM acopladas. As informações estratégicas foram obtidas dos *Module Drivers* (MD) do método MFD, porém combinando em 4 grupos em função de sua compatibilidade.

Segundo Hölttä-Otto (2005) e Borjesson (2010), DSM é um método tipicamente utilizado para definir a sequência ideal das atividades ou organizar equipes para minimizar interações desnecessárias no projeto durante o processo de desenvolvimento do produto, podendo também definir módulos em uma arquitetura quando os elementos da matriz são componentes do produto. Hölttä-Otto (2005) aplica o método utilizando apenas “0” ou “1” (podendo ser representado por um “X”) na matriz para correlacionar as dependências. A Figura 20 mostra como DSM pode ser analisado com estes dois pontos de vista.

Figura 20 - DSM mostrando sequência e módulos

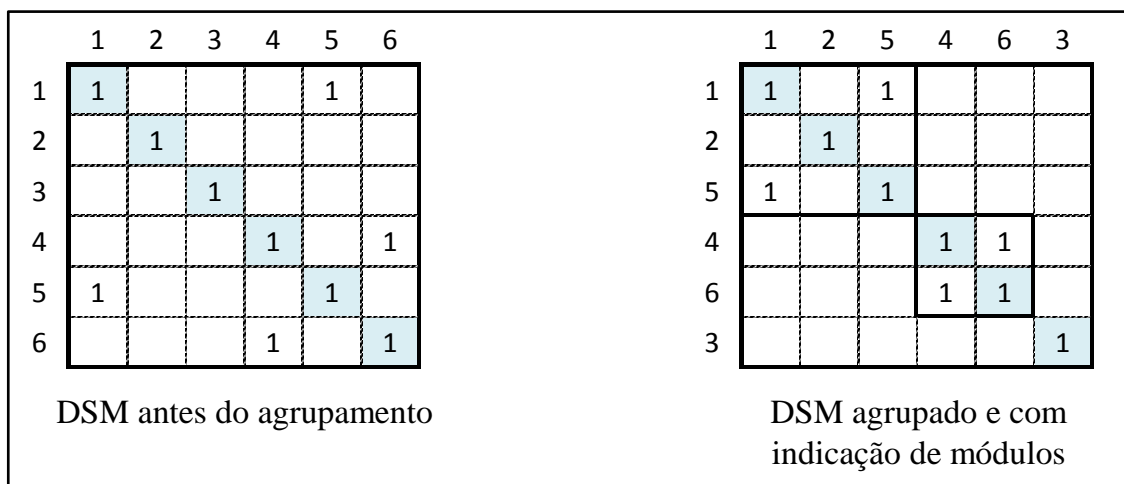


Fonte: Adaptado de Borjesson (2010) e Hölttä-Otto (2005)

Diferente do MFD, no qual o agrupamento é baseado em similaridade, no DSM é baseado apenas em acoplamento ou dependência e métodos de agrupamento hierárquico não podem ser utilizados (BORJESSON, 2012).

De uma forma simplificada, a estratégia do algoritmo em DSM é baseada em reordenar as linhas e colunas de forma que as marcas fiquem o mais próximo possível da diagonal ou que formem grupos com outras marcações. O algoritmo Idicula-Gutierrez-Thebeau (IGTA) pode ser utilizado para o agrupamento. A Figura 21 mostra uma representação simplificada do DSM antes e após a aplicação do algoritmo.

Figura 21 - Matriz DSM antes e após a aplicação do algoritmo



Fonte: Hölttä-Otto (2005)

Podem ocorrer sobreposições de elementos ou alguns ficarem fora dos grupos. Nestes casos, a equipe do projeto de modularização deve decidir como lidar com estas situações, podendo duplicar os elementos forçando a entrada em ambos os módulos ou em apenas um deles (HÖLTTÄ-OTTO, 2005).

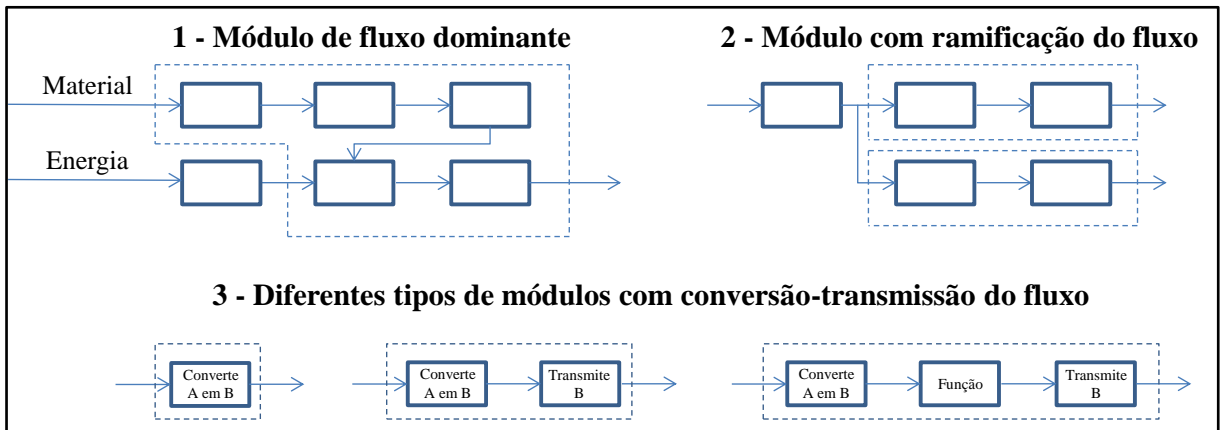
2.4.3 *Functional Structure Heuristic (FSH)*

Estruturas Funcionais Heurísticas (FSH) foram propostas por Stone, Wood e Crawford (2000). O primeiro passo deste método é representar o modelo funcional do produto, ou decomposição funcional, que é o processo de quebrar a função global do produto em funções menores e sub-funções. As sub-funções são relacionadas por fluxo de energia, matéria ou sinal passando através do produto de modo a formar um modelo, conhecido como estrutura funcional. O segundo passo é aplicar regras heurísticas pré-definidas a esta estrutura para definir os módulos.

As heurísticas foram baseadas em um conjunto de etapas de natureza empírica que foram formuladas após coleta e análise sistemática de dados e obtidas observando as possibilidades que o fluxo pode sofrer passando através do produto. Assim, as heurísticas são comprovadas seguindo um método científico (STONE, WOOD e CRAWFORD, 2000).

- 1) o fluxo pode passar através de um produto inalterado;
- 2) o fluxo pode ramificar, formando cadeias de funções independentes;
- 3) um fluxo pode ser convertido a outro tipo e transmitido, Figura 22.

Figura 22 - Heurísticas do FSH



Fonte: Adaptado de Stone, Wood e Crawford (2000)

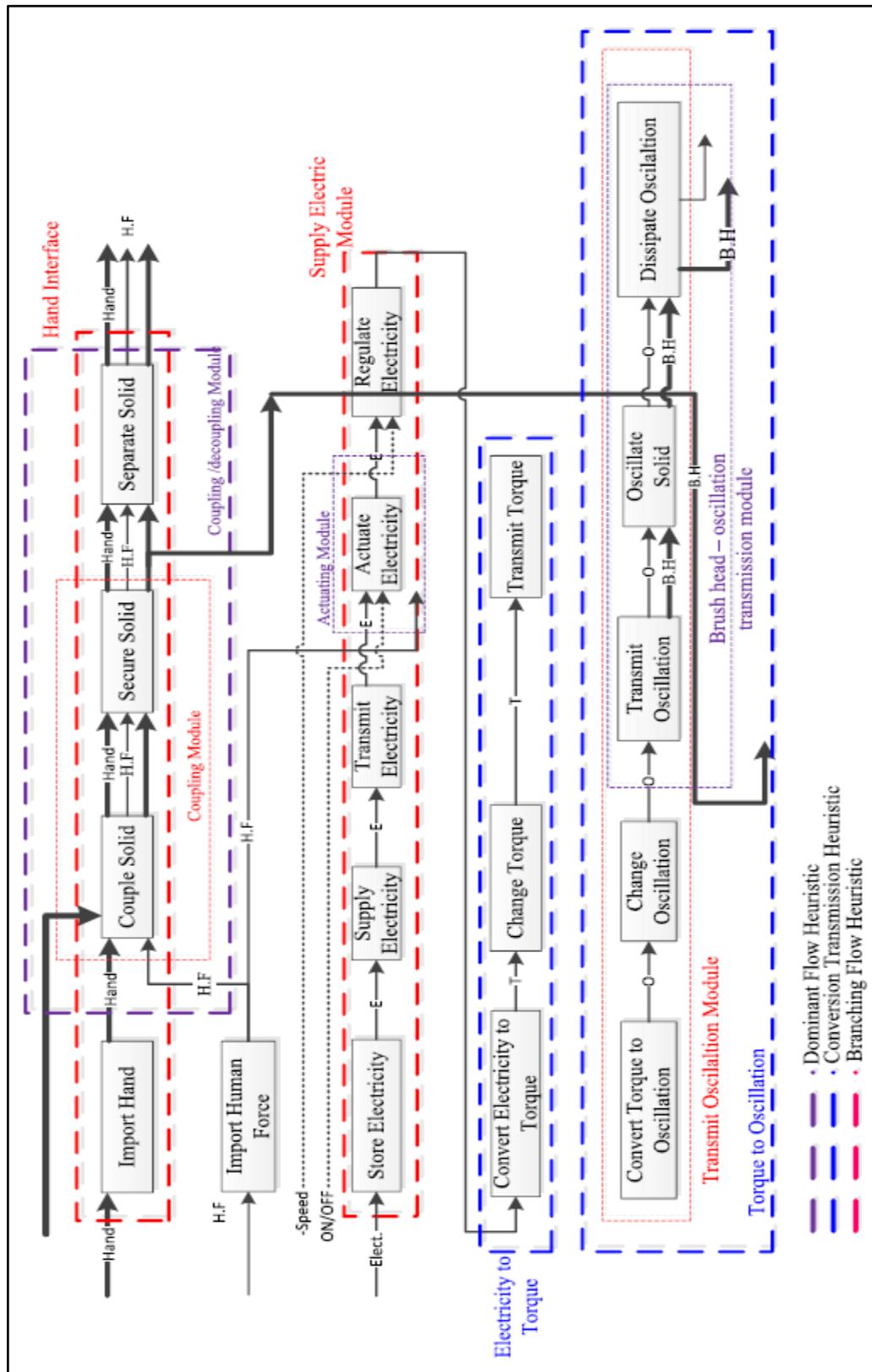
Heurística 1 - Fluxo Dominante: O conjunto de sub-funções em que um fluxo passa da entrada ou início do fluxo no sistema até a saída do sistema ou conversão do fluxo dentro do sistema define um módulo.

Heurística 2 - Ramificação do Fluxo: Os membros de uma cadeia de função paralela constituem módulos.

Heurística 3 - Conversão-transmissão de fluxo: Uma sub-função de conversão ou um par ou cadeia de sub-funções de conversão-transmissão constitui um módulo.

As possíveis alternativas de módulos são obtidas agrupando as funções da estrutura funcional do produto conforme as regras heurísticas. A Figura 23 mostra um exemplo de estrutura funcional com a aplicação das heurísticas para definição dos módulos.

Figura 23 - Heurísticas aplicadas a uma estrutura funcional de uma escova de dente



Fonte: Okudan e Gupta (2013)

2.4.4 *Decomposition Approach (DA)*

Huang e Kusiak (1998) propuseram um método matricial baseado em DSM que agrupa os elementos por acoplamento. Segundo eles, este método permite a identificação de módulos mesmo com pouca informação disponível. O modelo é representado com 2 matrizes. Uma matriz de adequação dos componentes (*Suitability Matrix*) e outra de interação (*Interaction Matrix*). A matriz de adequação representa a possibilidade/adequação de um componente para inclusão em um determinado módulo, por outro lado a de interação representa a interação ou acoplamento dos componentes.

Segundo Huang e Kusiak (1998), as matrizes de interação e adequação foram baseadas nas observações de Ulrich e Tung (1991) que diz que modularização é vista como sendo dependente de 2 características:

- similaridade entre arquitetura física e funcional - Matriz de interação;
- minimização das interações acidentais entre os componentes - Matriz de adequação.

A definição dos módulos e tipo de modularidade é feito por um processo denominado de decomposição aplicado em ambas as matrizes que são rearranjadas de modo a formar uma única matriz.

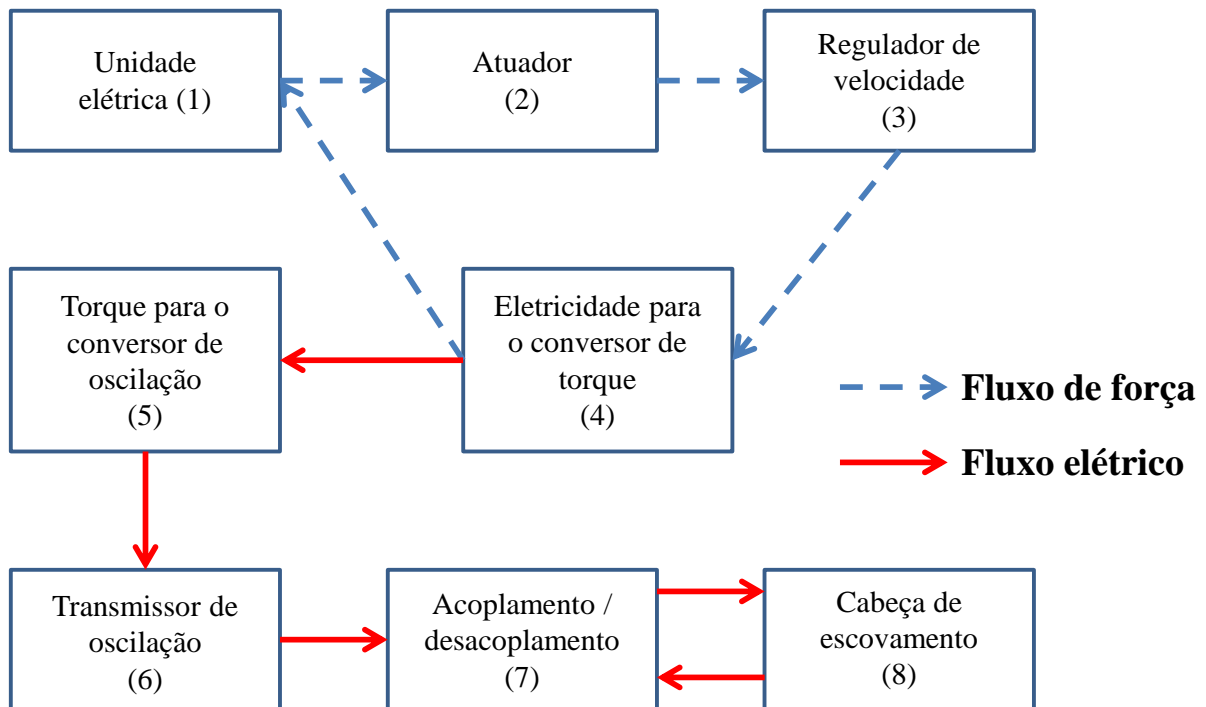
O processo de decomposição se inicia com a triangularização da matriz de interação rearranjando suas linhas e colunas. A triangularização é feita utilizando um algoritmo proposto por Kusiak *et al.* (1994). A matriz de adequação é também rearranjada para ficar com a mesma sequência de linhas e colunas da matriz de interação. Em cada fase da decomposição, a matriz de adequação é analisada para verificar o nível de coexistência entre dois elementos no mesmo módulo. Elementos são duplicados ou removidos dos módulos seguindo um conjunto de regras. Este *looping* acontece até não ser necessário mais rearranjo. Depois de concluído, definem-se os módulos e pode-se identificar e interpretar o tipo de modularidade existente entre os módulos e componentes.

A maneira de preencher a matriz de interação evolui à medida que o produto adquire maturidade no desenvolvimento, podendo as entradas ser representada pela quantidade de vezes que os elementos se interagem no produto ou aparecem na montagem. Este método não apresenta qualquer entrada referente à estratégia da modularidade (HUANG e KUSIAK, 1998).

Okudan e Gupta (2013) compararam o método proposto por Huang e Kusiak (1998) com FSH e B-FES (*Behavioral-driven Function-Environment Structure*). O processo de modularização foi aplicado a uma escova de dente elétrica considerando os parâmetros DfA (*Design for Assembly*) e DfV (*Design for Variety*). O resultado mostrou que dentre estes métodos e para o cenário analisado, a abordagem de Huang e Kusiak (1998) apresentou o melhor resultado.

Para aplicar o método de Huang e Kusiak em escova de dente elétrica, Okudan e Gupta (2013) primeiro desenharam a sua estrutura funcional representando as direções dos fluxos elétricos e de força entre suas várias funções/módulos. Esta representação pode ser vista na Figura 24.

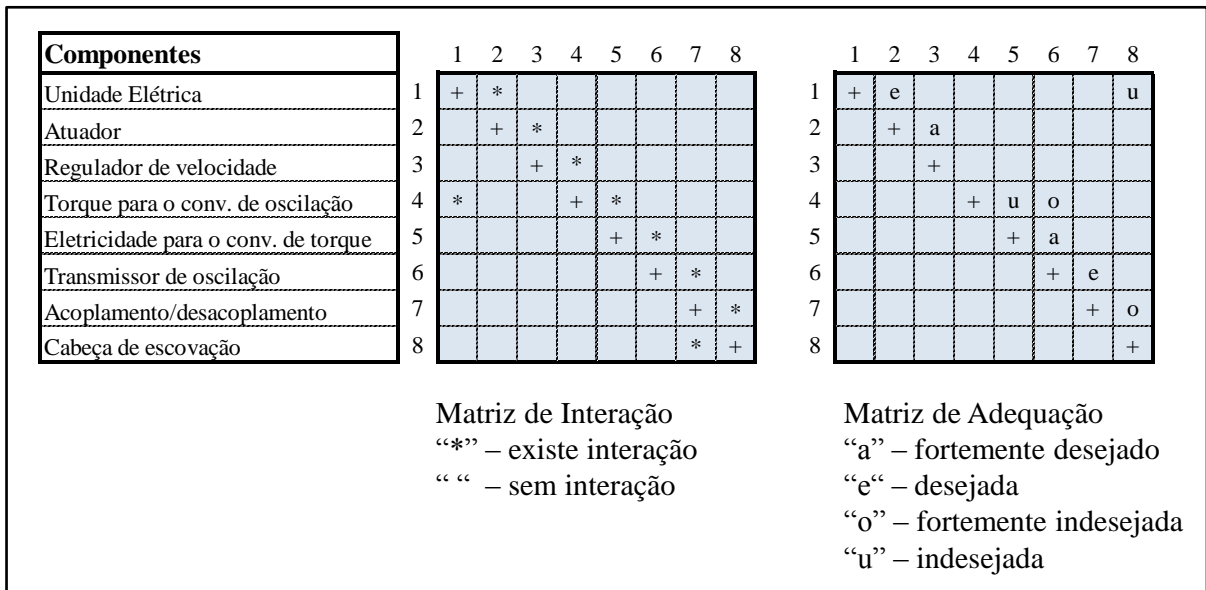
Figura 24 - Estrutura funcional da escova de dentes



Fonte: Adaptado de Okudan e Gupta (2013)

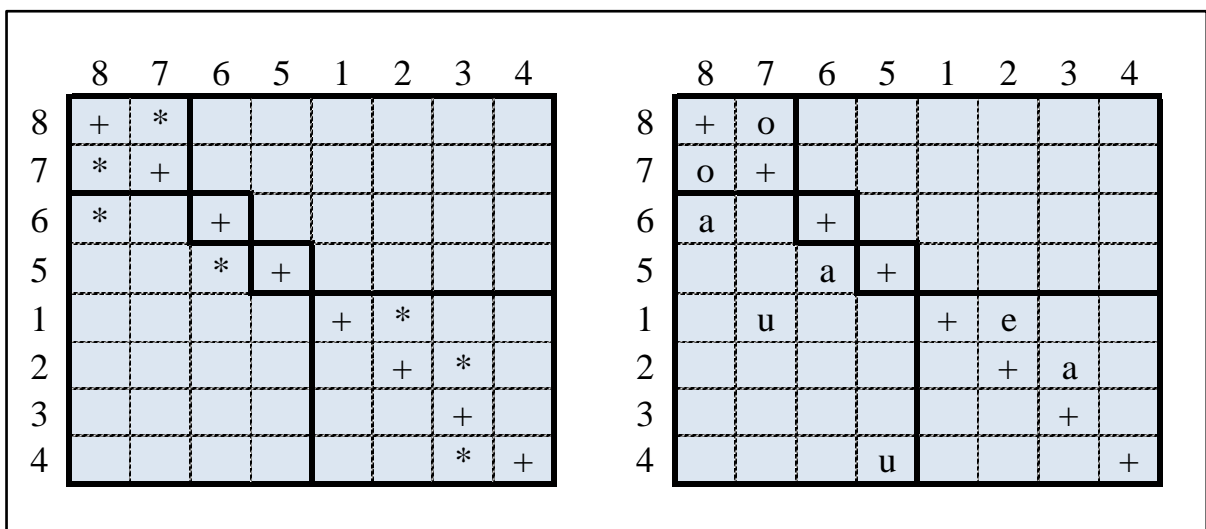
As Figuras 25 e 26 mostram, respectivamente, as matrizes de interação e adequação antes e após a triangularização. A conclusão do processo de decomposição com a representação dos módulos é mostrado na Figura 27.

Figura 25 - Matriz de Interação e de Adequação iniciais



Fonte: Okudan e Gupta (2013)

Figura 26 - Matrizes após a triangularização



Fonte: Okudan e Gupta (2013)

Figura 27 - Matrizes após a decomposição completa

	8	7	6	5	1	2	3	4
8	+	*						
7	*	+						
6	*		+					
5			*	+				
1					+	*		
2						+	*	
3							+	
4							*	+

	8	7	6	5	1	2	3	4
8	+	o						
7	o	+						
6	a		+					
5			a	+				
1		u			+	e		
2						+	a	
3							+	
4				u				+

Fonte: Okudan e Gupta (2013)

O processo indicou a formação de dois módulos principais:

- Módulo eletricidade/oscilação (1, 2, 3 e 4): unidade elétrica, atuador, regulador de velocidade, eletricidade para conversor de torque
- Módulo cabeça de escovação/oscilação transmissão (5, 6 e 7): gerador de oscilação, transmissor de oscilação, unidade de acoplamento/desacoplamento.

2.4.5 *Function-Strategy* DSM (FS-DSM)

FS-DSM (BLACKENFELT, 2001) pode ser considerado um método híbrido entre DSM, MFD e FSH. Do DSM utiliza o formato para descrever as dependências entre os elementos. Do MFD adiciona considerações estratégicas, porém não considera os doze direcionadores de estratégia que são originais do método, apenas a sua forma condensada de compatibilidade, conforme apresentado na Tabela 2. Do FSH acrescenta fluxo de matéria, informação e energia (BORJESSON, 2010).

Tabela 2 - *Modulo drivers* condensados para aplicação em FS-DSM.

<i>Module Drivers Condensados</i>	<i>12 Modules Drivers Originais</i>	
Comunalidade (C) Comunização x Variedade	Especificação Técnica, Estilo	Unidade Comum
Carry Over (CO) Carry Over x Modificação	Pressionado por Tecnologia, Modificação Planejada	Carry Over
Fazer ou Comprar (MB) Fazer x Comprar	Organização / Processo	Fornecedores Estratégicos
Ciclo de Vida (LC) Reuso x Desenvolvimento		Testado Independentemente, Serviço / Manutenção, Upgrading , Reciclagem

Fonte: Adaptado de Borjesson (2010)

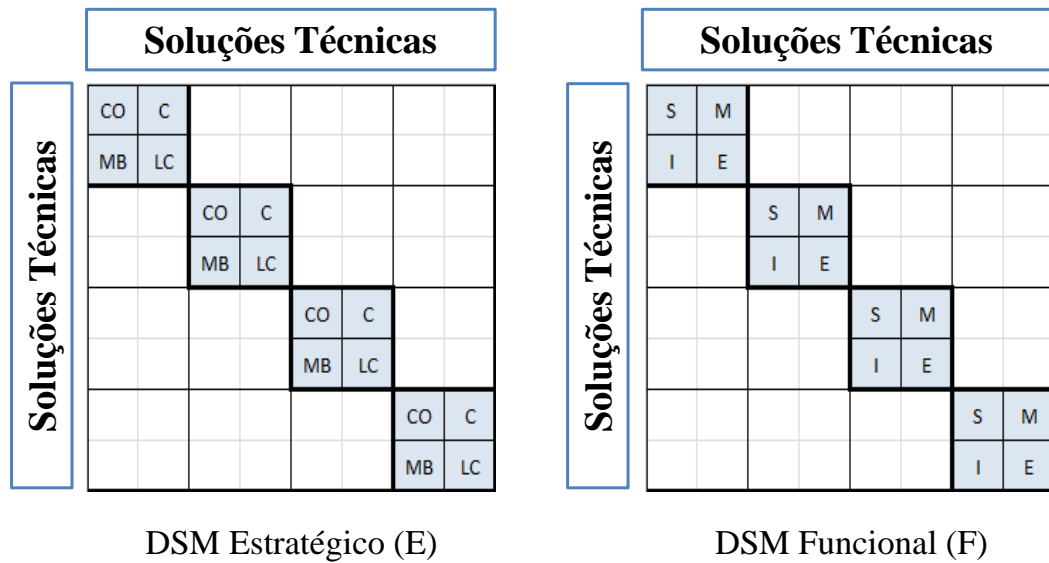
O método é apresentado com duas matrizes para representar os aspectos estratégicos e aspectos funcionais das relações entre os elementos funcionais, componentes ou soluções técnicas do produto.

Os aspectos estratégicos são derivados das relações existentes da matriz MIM do MFD considerando sua adaptação na matriz DSM conforme *Module Drivers* condensados ou conflitantes. A força das relações estratégicas conflitantes entre os componentes são pontuadas de -2 a 2, similar à pontuação das relações funcionais no DSM conforme apresentado por Pimmler e Eppinger (1994).

Os aspectos funcionais também são pontuados de forma similares aos apresentados por Pimmler e Eppinger (1994) considerando os fluxo de energia (E), material (M), informação (I) e espacial (S).

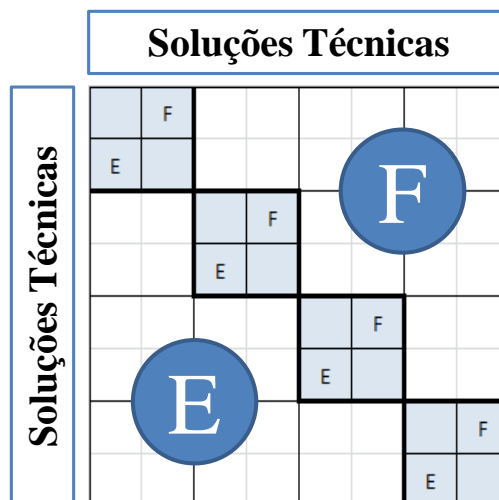
As matrizes DSM estratégica e funcional ficam simétricas e parte dela pode ser omitida. Uma representação destas matrizes pode ser vista na Figura 28. Ambas são agrupadas relacionadas pela diagonal com a parte superior considerando aspectos funcionais e a inferior os estratégicos conforme apresentado na Figura 29.

Figura 28 - DSM Estratégico (E) e DSM Funcional (F)



Fonte: Adaptado de Blackenfelt (2001)

Figura 29 - Representação da Matriz FS-DSM para agrupamento



Fonte: Adaptado de Blackenfelt (2001)

O processo de geração dos módulos é baseado em uma regra de três passos proposta por Blackenfelt (2001). Este processo tem pouco material acadêmico ou aplicação industrial e desta forma, não será discutido neste trabalho.

2.4.6 MFD com Propriedade de Convergência

Segundo Borjesson (2009), normalmente o algoritmo de agrupamento hierárquico não converge com resultado satisfatório em função, principalmente, dos dados de entrada do modelo de modularização e não do algoritmo propriamente dito. Os módulos gerados parecem não fazer sentido, apresentando conflitos de estratégia ou incompatibilidade geométrica e/ou funcional entre os componentes. Uma grande quantidade de ajuste manual e bom senso são necessários para adequar o modelo. Em função disto ele propôs um aperfeiçoamento no método MFD adicionando propriedades de convergência (*Convergence Properties*), que são um grupo de dados verificados durante o processo de agrupamento hierárquico para promover um *output* com melhor qualidade.

As propriedades de convergência foram definidas baseadas nas informações que os engenheiros recorriam para fazer os ajustes manuais no modelo em aplicações práticas do MFD que não estavam disponíveis nas matrizes ou no algoritmo.

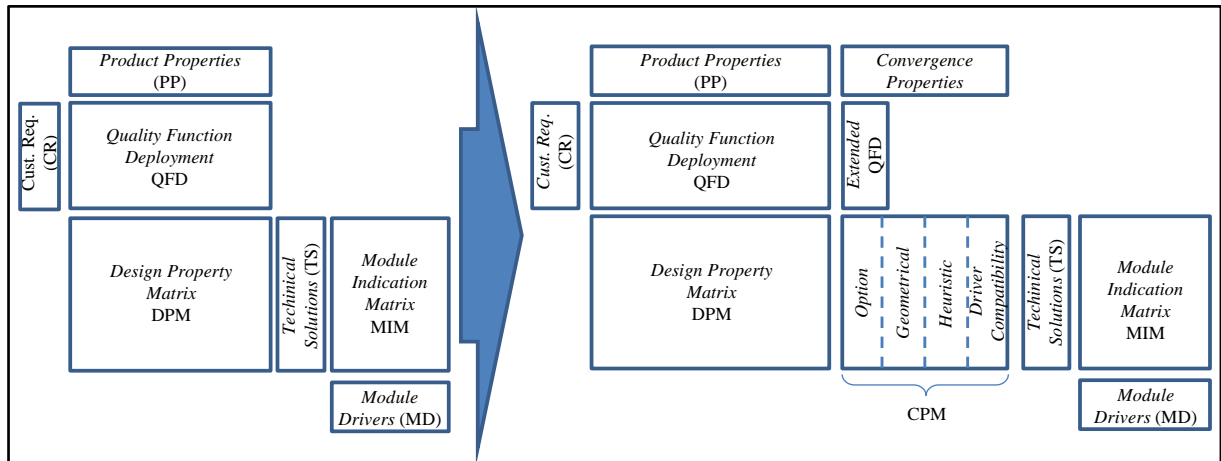
As propriedades de convergência propostas são:

- **Propriedades de Opção:** Determina se alguma opção do produto é permitida na configuração final do produto. Possui apenas resposta “sim” ou “não”.
- **Propriedades Geométricas:** Informações que refletem a provável configuração final do produto. Podem ser obtidas dividindo o produto em regiões pré-definidas e identificando as soluções técnicas que preferencialmente devem estar localizada em alguma região específica.
- **Propriedades Heurísticas:** São baseadas em uma estrutura funcional. As heurísticas baseada em fluxo descrevem como as funções interagem no produto. Estes fluxos podem ser de material, energia ou informação. As Heurísticas são: Fluxo dominante; Conversão-Transmissão; Ramificação-Combinação.
- **Compatibilidades de *Module Drivers*:** Devem ser utilizados para definir grupos de MD de tal maneira que os *drivers* dentro do módulo suportem a mesma estratégia. Adicionando as informações de compatibilidade, o risco de alocar soluções técnicas com *module drivers* incompatíveis dentro do mesmo módulo foi diminuído.

Para utilizar as propriedades de convergência no MFD, são adicionadas a Matriz de Propriedade de Convergência (*Convergence Property Matrix – CPM*) e QFD Extendido (*Extended QFD – QED*) ao PMM. A adição destas duas matrizes forma o PMM Extendido

(*Extended PMM – ePMM*) que continua mantendo o formato de matriz e capaz de utilizar ferramentas estatísticas para a geração de candidatos a módulos. A QED utiliza propriedades opcionais que possuem Sim/Não como resposta. O restante das propriedades de convergência não são baseadas nas necessidades dos clientes de modo que parte do QED é deixada em branco – Figura 30.

Figura 30 - PMM e ePMM com propriedades de Convergência



Fonte: Adaptado de Borjesson (2009)

O Método de agrupamento e os pontos positivos do MFD se mantiveram intactos, pois a adição das propriedades de convergência manteve a forma matricial, porém melhorou a capacidade de gerar módulos mais coerentes no primeiro agrupamento. Borjesson (2009) argumenta que o método foi testado em um sistema simples e obteve resultados muito bons, mas precisaria ser testado em projetos mais complexos.

2.4.7 MFD com DSM

Métodos MFD e DSM apresentam um grupo similar de pontos positivos e negativos. A dissociação está na característica mais estratégica do MFD e mais técnica no DSM. Devido à condição de agrupamento dos dois métodos, MFD similaridade e DSM interação/acoplamento dos elementos, os métodos de agrupamento não são adequados para tratar os dois métodos ao mesmo tempo.

Uma abordagem híbrida integrando os MD (Direcionadores de Estratégia) do MFD em uma matriz DSM foi proposto por Blackenfelt (2001), incluindo heurística de três passos para

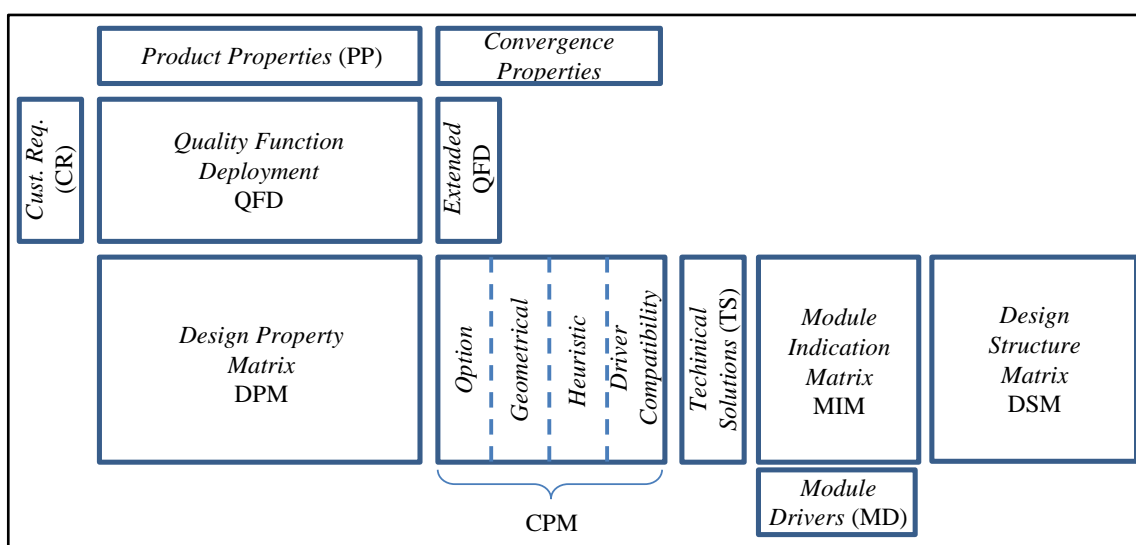
o agrupamento que nunca foi implementado como algoritmo. Outra abordagem matricial para integrar MFD e DSM foi proposta por Sellgren e Anderson (2005), mas o agrupamento não foi considerado.

Borjesson e Sellgren (2010) apresentaram os resultados obtidos com a adição de uma matriz DSM à matriz PMM do MFD. O método foi testado na modularização de uma máquina de corte e coleta de madeira com motor híbrido totalmente inovadora. Os módulos não foram gerados ao mesmo tempo nos dois métodos em função da inexistência de algoritmo apropriado.

A consequência prática de não poder fazer o agrupamento do MFD e DSM ao mesmo tempo é fazer sequencialmente, verificando os resultados intermediários do agrupamento. Os resultados devem ser julgados e os dados verificados de forma a gerar módulos que consigam balancear os requerimentos dos dois métodos (BORJESSON e HÖLTTÄ-OTTO, 2013).

Borjesson e Hölttä-Otto (2013) propuseram um algoritmo baseado no IGTA (*Idicula-Gutierrez-Thebeau*) para poder agrupar as duas matrizes ao mesmo tempo e ter as vantagens estratégicas e técnicas sem necessidade de rearranjar e checar resultados intermediários. IGTA-Plus balanceia as duas matrizes do MFD e DSM em um único agrupamento. Utilizando duas funções de otimização agrupadas em um único valor. Uma para o MFD e outra para o DSM. O método proposto integra a DPM e MIM do MFD em uma única matriz que captura similaridade técnica e estratégica e compartilha as linhas com os componentes da DSM – Figura 31.

Figura 31 - ePMM e DSM.



Fonte: Adaptado de Borjesson e Hölttä-Otto (2013)

3 ANÁLISE DOS MÉTODOS DE MODULARIZAÇÃO E ESCOLHA PARA APLICAÇÃO

Sete métodos de modularização foram analisados e confirmaram a observação feita por Okudan e Gupta (2013), de que não existe um melhor método. Cada método é desenvolvido para otimizar um determinado critério ou aplicação e, por esta razão, várias publicações são focadas em comparações de sua repetibilidade e coerência na geração de módulos.

O método sempre indicará candidatos a módulos. A equipe multidisciplinar responsável pelo desenvolvimento da modularização deve julgar a coerência dos agrupamentos obtidos, ou seja, a experiência faz parte do processo.

Borjesson e Hölttä-Otto (2013) argumentam que, em geral, baseado no formato dos dados, os métodos podem ser divididos em duas categorias, baseados em matrizes ou redes gráficas de funções. Independentemente do formato, os métodos podem ser divididos em baseados em acoplamento ou similaridade dos componentes ou soluções técnicas.

A publicação de Borjesson (2010) serviu de base na análise qualitativa para a escolha do método que será utilizado neste trabalho. Os critérios utilizados estão listados na Tabela 3.














































































Tabela 3 - Critérios para análise qualitativa

CRITÉRIO	DEFINIÇÃO
Organização dos dados	Maneira como os dados são organizados (matrizes ou gráficos)
Flexibilidade	Método é flexível, permite ajustes
Execução simultânea	Promove execução simultânea em grupos
Fácil de aprender e utilizar	Fácil de utilizar conceitos bem conhecidos
Suportado por <i>software</i>	Propício para aplicação de software, incluindo projetos grandes
<i>Design handover</i>	Simplifica a condução da fase de conceituação para o detalhamento
Repetibilidade	Repetibilidade dos resultados e permite iterações
Aplicação prática	Método aplicado com resultados satisfatórios em empresas
Desenvolvimento de plataforma ou família	Apresenta capacidade de ser aplicado em família de produtos ou plataforma
Específico para modularidade	Específico para gerar arquitetura modular
Descrição dos dados	Todos os dados, incluindo requerimento do cliente e intenção estratégica

Fonte: Adaptado de Borjesson (2010)

Aplicando a metodologia proposta por Borjesson (2010), tem-se a representação na Tabela 4.

Tabela 4 - Qualificação dos métodos de modularização

CRITÉRIOS	MFD	DSM	FSH	DA	FS-DSM	MFD+CP	MFD+DSM
Organização dos dados							
Flexibilidade							
Execução simultânea							
Fácil de aprender e utilizar							
Suportado por <i>software</i>							
<i>Design handover</i>							
Repetibilidade							
Aplicação prática							
Desenvolvimento de plataforma ou família							
Específico para modularidade							
Descreve os dados							

 Forte  Médio  Fraco

Fonte: Adaptado de Borjesso (2010)

Métodos baseados em matrizes são mais convenientes por pelo menos duas razões: 1) os dados podem ser manipulados facilmente utilizando *software* padrão como excel; 2) matrizes são úteis para produtos mais complexos onde diagramas de estrutura funcional são complicados de ser utilizados. Exceto FSH que utiliza estrutura funcional, todos os demais métodos utilizam matrizes no tratamento dos dados. DSM apresenta a forma mais simples de entrada de dados matricial, enquanto MFD o melhor *handover*.

Por outro lado, a força dos métodos baseados em estruturas funcionais é a facilidade em trabalhar com pouca informação disponível, esta característica torna o FSH mais adequado para ser aplicado no desenvolvimento de produtos inovadores na fase de conceituação.

Os métodos MFD e DSM tem forte suporte de *software* para o agrupamento. O MFD utiliza agrupamento hierárquico e o DSM pode ser solucionado utilizando algoritmo IGTA. MFD com Propriedade de Convergência e MFD com DSM também podem ser solucionados por *software*, porém com pouca aplicação, disponibilidade ou testes em projetos reais. Não foi encontrado informação de *software* para FSH e FS-DSM.

A simplicidade na entrada de dados, alinhado ao forte suporte de *software* torna o DSM um dos métodos de maior repetitividade. Os dados de entrada levam em consideração as relações internas existentes entre os elementos como, por exemplo, posição geométrica e funcionalidade.

O resultado do DSM é fortemente influenciado pelo conhecimento que a equipe tem do produto durante a entrada dos dados na matriz e pode ser utilizado como base para o início dos estudos de modularização em arquiteturas mais complexas para simplificar o processo de desenvolvimento (HÖLTTÄ OTTO e SOLONEN, 2003; ARCHER, 2010).

Os resultados de Okudan e Gupta (2013) mostraram que o método DA também apresenta boa repetibilidade. Contudo pouca disponibilidade de *software* e aplicação prática na indústria.

O método MFD e seus híbridos conseguem captar os requerimentos dos clientes e estratégia da empresa através do QFD e MD respectivamente. FS-DSM consegue captar a estratégia da empresa de uma forma simplificada baseada também nos MD do MFD. Os demais métodos não possuem esta capacidade.

Os métodos MFD, DSM e FSH são os mais estudados e aplicados nas empresas.

Os métodos MFD e DSM apresentam características similares como entrada de dados matricial e solução utilizando *software* disponível. Eles apresentam também características complementares. O MFD com forte influência das estratégias da empresa, abrangência de dados de entrada (voz do cliente, engenharia e empresa) e flexibilidade e o DSM com um relacionamento mais técnico e sua repetitividade.

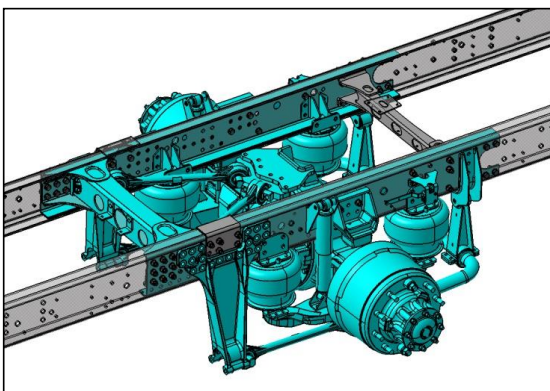
Portanto, a aplicação destes dois métodos de forma combinada pode tornar o processo de modularização do produto mais eficiente. Neste trabalho, serão utilizadas as ferramentas e sequencia do método MFD e o DSM como base para iniciar e simplificar as investigações de modularização durante a definição das soluções técnicas e geração dos módulos.

4 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE MODULARIZAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

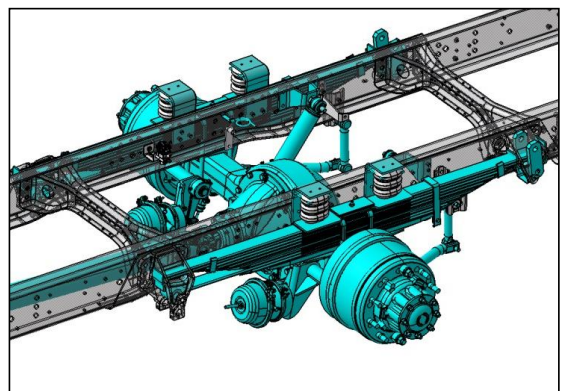
Na maioria dos casos, a decisão de modularização é justificada pela necessidade de se criar inúmeras variantes em um produto ou sistema originalmente desenvolvido para atender a uma aplicação específica. Por essa razão, depois de certo tempo, produtos já existentes no mercado são reprojetoados como um sistema modular. Este reprojeto deve atender às necessidades do mercado, possibilidades e restrições tecnológicas bem como às estratégias competitivas em produto e produção da empresa. Além disso, deve prever o acompanhamento do produto após o seu lançamento para que novas especificações possam ser incorporadas até a sua retirada do mercado.

Os fatores que culminaram na escolha do sistema de suspensão traseira a ar para o projeto piloto em modularização estão relacionados ao acompanhamento da evolução do mercado e ao atendimento de uma necessidade crescente dos clientes em desfrutar das vantagens proporcionadas por este tipo de suspensão. Mesmo sendo uma aplicação padrão em países desenvolvidos, no Brasil a demanda vem crescendo nos últimos cinco anos em aplicação a caminhões e já é um fator de decisão de compra para ônibus rodoviário. Vale ressaltar que, para caminhões e ônibus urbano, o mercado ainda é dominado por suspensões baseadas em molas com lâminas metálicas, principalmente devido à sua versatilidade, robustez e menor custo de aquisição. Uma visão simplificada destas suspensões pode ser vista na Figura 32.

Figura 32 - Suspensões pneumática e metálica



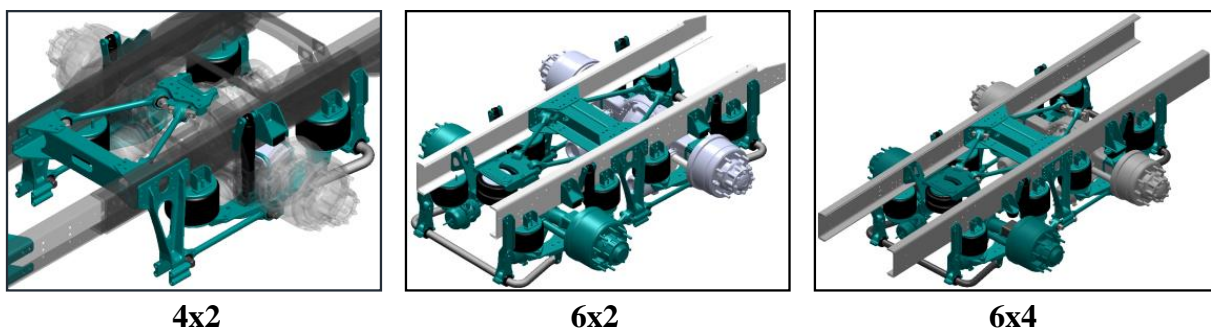
Suspensão pneumática



Suspensão metálica

As variantes básicas englobam caminhões nas configurações 4x2, 6x2 e 6x4 e ônibus 4x2 e 6x2. Porém, o desenvolvimento do projeto deve estar olhando para todas as possibilidades previstas na Portaria N° 63 do DENATRAN mesmo que muitas delas não possuam aplicação potencial devido, principalmente, a restrições de distribuição de carga e valor de revenda. Esta designação está relacionada a quantidade total de rodas do veículo e quais delas são direcionais, trativas e auxiliares. O modelo 4x2, por exemplo, possui quatro rodas sendo duas direcionais e duas trativas. Como o foco do nosso estudo é suspensão traseira, o importante aqui é a quantidade de eixos traseiros no qual, neste caso, tem-se: modelo 4x2 que possui um eixo traseiro trativo; modelo 6x2 que possui dois eixos traseiros sendo um trativo; modelo 6x4 que também possui dois eixos traseiros porém, ambos trativos. A Figura 33 mostra estas variantes.

Figura 33 - Suspensão 4x2, 6x2 e 6x4



Observe que os eixos traseiros completos, que são fabricados por terceiro, fazem parte do sistema a ser modularizado. O motivo é devido ao fato deste componente estar fortemente relacionado com a criação de variedade, tanto em capacidade de carga como desempenho de frenagem e muito impactado por inovação tecnológica. Existe também grande interesse em se investigar eixos traseiros devido ao seu potencial de modularização e a possíveis propostas de redução no custo. Prieto e Miguel (2011) e Ulrich (1995) abordam que a participação de empresas terceiras também é um fator importante na modularização do produto. Medeiros (2014) analisa a participação de fornecedores no desenvolvimento do produto e mostra que os principais fornecedores são responsáveis por grande parte do custo do produto final e, por isto, ela propõe que eles sejam nomeados para entrar no desenvolvimento do produto durante a etapa de conceituação.

Segundo Bataglin (2013) a escolha do método MFD em seu trabalho ocorreu, principalmente, devido ao fato de que muitas empresas, principalmente de pequeno e médio porte, ainda não possuem metodologias de projetos modulares, podendo este método,

portanto, auxiliar no desenvolvimento de seus projetos de forma clara e objetiva, sem custos elevados com aquisição de *softwares* de difícil compreensão e de difícil acesso. As matrizes resultantes deste método, além de sua relativa simplicidade, podem resultar em importantes informações a respeito da modularização do produto.

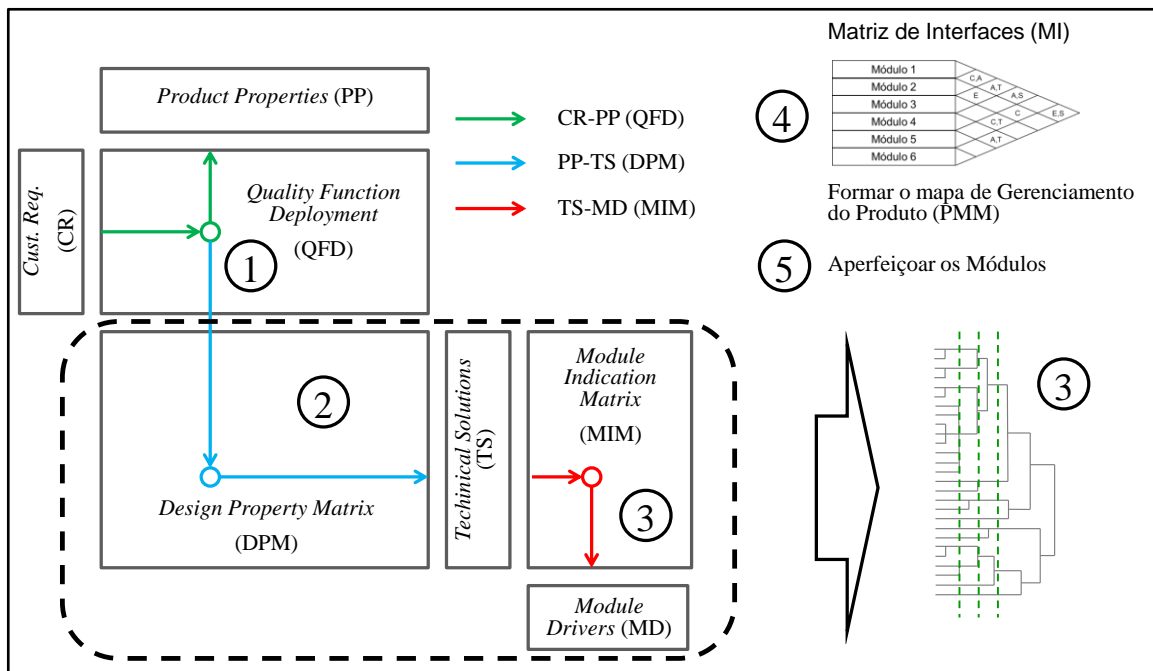
O método MFD foi pensado de forma a poder utilizar as informações referentes aos requerimentos dos clientes correlacionados com as propriedades do produto em uma matriz de desdobramento da função da qualidade (QFD), à engenharia com a elaboração das soluções técnicas para atender às propriedades do produto em uma matriz de propriedades do projeto (PMP) e à estratégia da empresa através da aplicação das diretrizes de modularização (MD) em uma matriz de indicação de módulos (MIM).

Erixon (1998) propõe a aplicação do método de modularização MFD a produtos considerando apenas um de cada vez. Esse trabalho tem por finalidade realizar a modularização de um produto individualmente e não a modularidade em si. Desta forma, o modelo de suspensão traseira para os veículos 4x2 foi selecionado para este projeto piloto, além disso, de uma forma simplificada, as suspensões 6x2 e 6x4 têm como base a 4x2.

Com o projeto piloto definido, pode-se iniciar a aplicação do método MFD que será conduzido em cinco passos conforme abaixo e Figura 34.

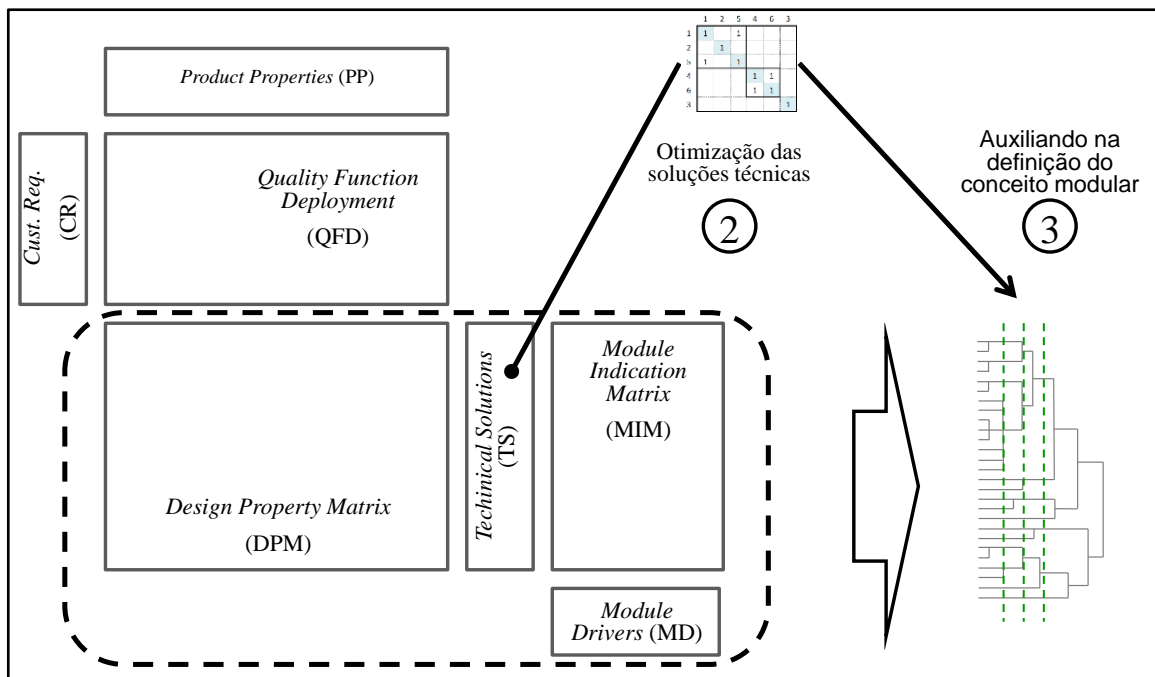
- Passo 1 – Definir os requisitos dos clientes.
- Passo 2 – Selecionar as soluções técnicas.
- Passo 3 – Gerar o conceito modular.
- Passo 4 – Analisar o conceito modular.
- Passo 5 – Aperfeiçoar os módulos.

Figura 34 - Passos do MFD



O DSM será inserido ao processo para otimizar as soluções técnicas e auxiliar na definição do conceito modular com uma visão técnica e funcional. Com isto, o MFD combinado com DSM será apresentado conforme Figura 35.

Figura 35 - MFD combinado com DSM



4.1 DEFINIÇÃO DOS REQUISITOS DOS CLIENTES

O levantamento dos requisitos dos clientes consiste na identificação de suas necessidades, desejos e expectativas. Os produtos devem ser desenvolvidos para atender e surpreender tais expectativas. Estas informações podem ser obtidas de várias formas e se iniciam com uma investigação pelo departamento de Vendas e Marketing. Para um produto novo ou inovador, uma das possibilidades é realizar levantamentos, pesquisas e estudos junto aos segmentos de mercado e elaborar uma lista do que o cliente final espera do novo produto. No caso de reprojeto em um produto ou sistema, podem-se utilizar informações existentes na empresa de desenvolvimentos similares.

Em seu trabalho de modularização, Bataglin (2013) utilizou uma equipe de projeto multidisciplinar para estudar e elaborar uma lista com os requisitos do cliente. Para priorizar estes requisitos, utilizou a metodologia de *brainstorming* que propõe soluções de problemas de maneira criativa com sugestões aleatórias e a técnica de *benchmarking* que posiciona o produto e práticas com os principais concorrentes. Os mesmos procedimentos foram utilizados por Machado e Maziero (2014).

Considerando que este trabalho é um refinamento de uma arquitetura de um produto existente, os requisitos dos clientes foram baseados em um material disponível e em diálogos com engenheiros e especialistas em marketing do produto. Segundo estas investigações, as principais necessidades dos clientes para veículos comerciais em geral são:

- Baixo custo operacional (TCO – *Total Cost of Ownership*).
- Conforto para o motorista e passageiro.
- Valor de revenda.
- Manutenção rápida, fácil e de baixo custo.
- Maior capacidade de carga líquida (*Pay Load*) e integridade da carga.
- Disponibilidade de rede e serviço.

Uma suspensão pneumática desenvolvida em um conceito modular pode oferecer os seguintes resultados:

- Baixo custo operacional – Menos manutenção em função da redução de acelerações e vibrações. Maior durabilidade do reboque e semi-reboque em caso de veículos tratores.
- Conforto para o motorista e passageiro – Maior tempo de exposição em relação aos veículos similares com suspensão metálica.
- Valor de revenda – Maior valor de revenda devido à melhor condição do veículo.

- Manutenção rápida, fácil e de baixo custo – Modularização com balanceamento de padronização racionalização com customização e flexibilidade. Módulos definidos utilizando estratégias corporativas.
- Carga líquida – Maior devido ao desenvolvimento de componentes otimizados.
- Integridade da carga – Menor dano à carga devido a menor aceleração e vibração.
- Disponibilidade de rede e serviço – Veículo modular com desenvolvimento em plataforma.

Baseado nestes resultados definiu-se os principais requisitos dos clientes para uma suspensão pneumática conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Requisitos dos clientes com ponderação

REQUISITO DO CLIENTE	IMPORTÂNCIA
Conforto para passageiros e integridade da carga	4
Estabilidade/Dirigibilidade	4
Baixo desgaste de pneus	5
Capacidade de transpor obstáculos	3
Possibilidade de regular a atitude da suspensão	3
Segurança na frenagem	5
Baixo nível de ruído	3
Capacidade de carga vertical e tração	4
Manutenção fácil e de baixo custo	5
Durabilidade/Confiabilidade dos componentes	5

As ponderações foram de 3, 4 e 5. O número 5 para os itens relacionados ao TCO e segurança, 4 aos relacionados à conforto e aplicação e 3 para desejos paralelos.

Com o intuito de entregar ao cliente o que ele quer, o produto deve possuir algumas características denominadas propriedades do produto. Essa é a tradução da engenharia aos requisitos dos clientes para criar o escopo do projeto. É a primeira vez que a voz da engenharia surge no MFD.

Propriedades do produto devem ser mensuráveis e controláveis. Uma forma de determinar isto é atribuindo a cada possível propriedade sua unidade de medida. Para um projeto real, são definidas metas que definem os objetivos da engenharia.

Segundo Archer (2010) e Oliveira (2010), uma forma eficiente de determinar estas propriedades do produto é utilizando técnicas de *brainstorming* com a equipe técnica e diagramas de Ishikawa (espinha de peixe).

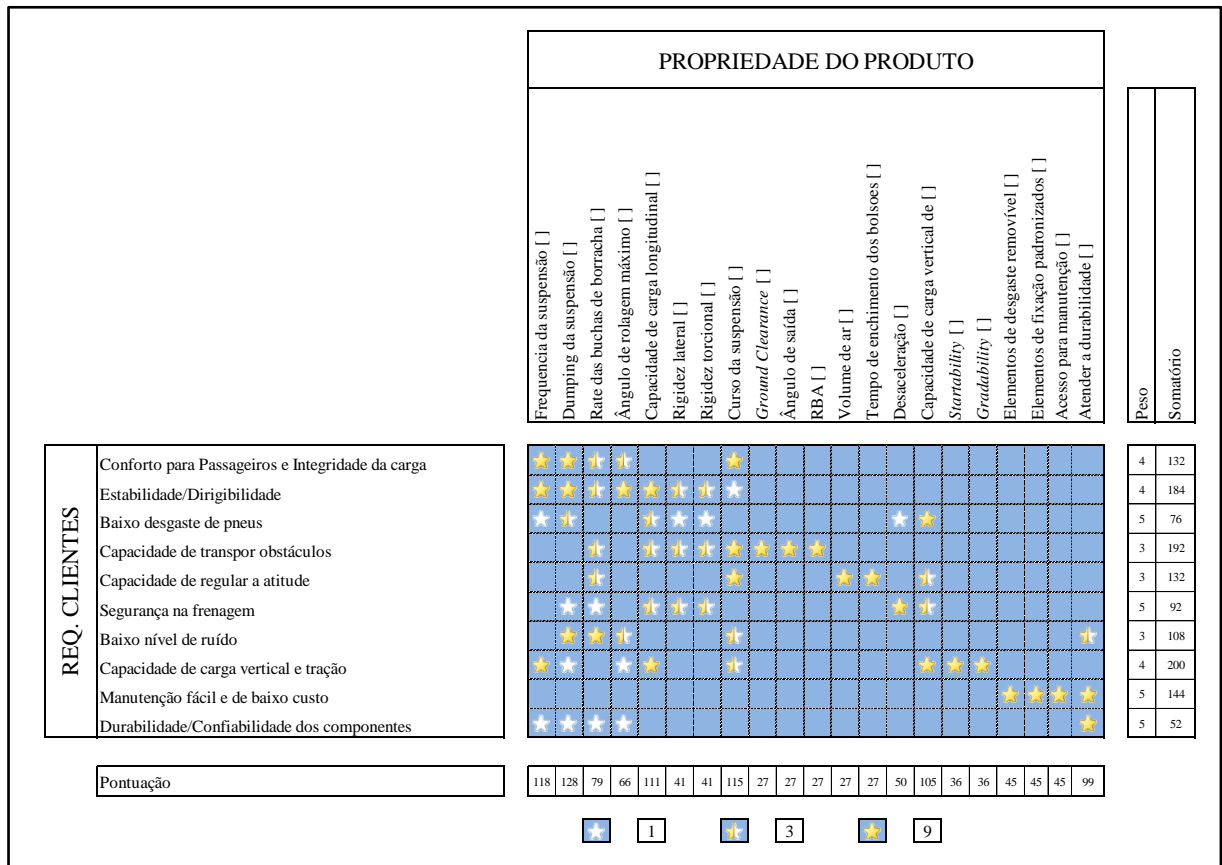
Para este projeto, as propriedades do produto estão descritas na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades do produto

1. Frequência da suspensão []
2. Dumping da suspensão []
3. Rate das buchas de borracha
4. Ângulo de rolagem máximo []
5. Capacidade de carga longitudinal []
6. Rigidez lateral []
7. Rigidez torcional []
8. Curso da suspensão []
9. *Ground Clearance* []
10. Ângulo de saída []
11. RBA []
12. Volume de ar []
13. Tempo de enchimento dos bolsões []
14. Desaceleração []
15. Capacidade de carga vertical de []
16. *Startability* []
17. *Gradability* []
18. Elementos de desgaste removível []
19. Elementos de fixação padronizados []
20. Acesso para manutenção []
21. Atender a durabilidade []

Os requisitos dos clientes precisam ser confrontados com as propriedades dos produtos utilizando a matriz de QFD. Os critérios utilizados foram: 9 para relação forte, 3 para relação média e 1 para relação fraca. Quando não existe relação fica sem pontuação ou em branco. A matriz QFD gerada está apresentada na Figura 36.

Figura 36 - Matriz QFD



4.2 SELEÇÃO DAS SOLUÇÕES TÉCNICAS

Nesta etapa do MFD, as propriedades do produto devem ser solucionadas para estarem contidas fisicamente no produto de forma a poderem ser percebidas pelo cliente. Estas são as soluções técnicas e a segunda vez que a voz da engenharia é inserida ao MFD.

Não existe uma técnica específica para a definição das soluções técnicas, por isso Erixon (1998) apresentou algumas considerações e recomendações. Argumentou que normalmente não existe uma única solução verdadeira, mas todas devem ser descritas e documentadas e que a decomposição do produto não deve chegar ao nível de parafusos, porcas e arruelas.

Lange (2008) propõe que a análise funcional para definição das soluções técnicas é feita essencialmente de duas formas: *Top-down* e *Bottom-up*. A análise *Top-down* (de cima para baixo), inicia descrevendo a função principal do produto e desdobrando esta função aos outros níveis até alcançar as funções que se quer atingir e as soluções técnicas para esta

função é definida. Na análise *Botton-up* (de baixo para cima), o ponto de partida é um produto existente sendo que todas as soluções técnicas são questionadas e novas propostas discutidas. A análise pode ser feita pela decomposição do produto em componentes.

Oliveira (2010) define as soluções técnicas através da metodologia *Botton-up*, argumentando que o produto a se modularizado já existe no mercado e apresenta as soluções técnicas como sendo uma lista de componentes do produto. Archer (2010) utiliza as duas metodologias para definir soluções técnicas: *Botton-up*, durante os estudos preliminares para conhecimento do produto nas fases de *teardown* e *benchmarking*, e a *Top-down* na definição das soluções técnicas propriamente ditas.

Neste projeto será utilizado a metodologia *Botton-up* por ser uma otimização da arquitetura de um produto já conceituado e por existir uma lista elaborada de componentes. Com o nível de decomposição feito, foram obtidas e propostas 44 soluções técnicas. Segue na Tabela 7 a lista com tais soluções técnicas.

Tabela 7 - 44 soluções técnicas

1. Carcaça do eixo	23. Viga "banana"
2. Semi eixo	24. Placa de torque superior
3. Carrier	25. Placa de interface
4. Yoke do carrier	26. Grampos
5. Fixação do Yoke	27. Suporte dos tirantes - eixo
6. Cubo de roda	28. Tirantes superiores
7. Rolamentos do cubo	29. Tirantes inferiores
8. Retentores do cubo	30. Travessa central
9. Prisioneiros do cubo	31. Suporte dos tirantes - chassi
10. Anel do ABS	32. Suporte superior dos amortecedores
11. Tambor de freio	33. Suporte da barra estabilizadora
12. Tubo de freio (suporte)	34. Tirante da barra estabilizadora
13. S came	35. Suporte mancal da barra estabilizadora
14. Ajustador	36. Bucha superior da barra estabilizadora
15. Câmara de freio	37. Bucha mancal da barra estabilizadora
16. Spider de freio	38. Barra estabilizadora
17. sapata + Lonas de freio	39. Suporte do bolsão de ar
18. Roletes	40. Reservatórios de ar
19. Molas de retenção e retorno	41. Válvulas niveladoras e chicote
20. Molas pneumáticas anteriores	42. Amortecedores
21. Molas Pneumáticas posteriores	43. Bucha dos amortecedores
22. Suporte centra da suspensão	44. Batente dos eixos

Conforme descrito por Hölttä-Otto e Solonen (2003) e confirmado por Archer (2010), o DSM é um método de modularização, porém, por ser fortemente influenciado pelo

inferiores), barra estabilizadora (tirantes, suporte mancal, bucha superior, bucha mancal e barra estabilizadora) e amortecedor (amortecedor e bucha). Os demais subconjuntos formados serão discutidos durante a geração do conceito modular no método MFD.

Com esta simplificação, a lista final de soluções técnicas tem 26 componentes conforme mostrado na Tabela 8. Os itens em amarelo são os subconjuntos aglutinados na análise do DSM.

Tabela 8 - 26 soluções técnicas obtidas do DSM

1. Carcaça do eixo
2. Semi eixo
3. Carrier
4. Cubo de rodas
5. Tambor de freio
6. Suporte de freio
7. Câmara de freio
8. Freio de rodas
9. Viga "banana"
10. Placa de torque superior
11. Placa de interface
12. Grampos
13. Suporte dos tirantes - eixo
14. Bolsão de ar
15. Suporte centra da suspensão
16. Travessa central
17. Suporte dos tirantes - chassi
18. Suporte dos amortecedores
19. Suporte da barra estabilizadora
20. Suporte do bolsão de ar
21. Batente do eixo
22. Tirantes
23. Barra estabilizadora
24. Reservatórios de ar
25. Válvulas niveladoras e chicote
26. Amortecedores

As propriedades dos produtos devem ser confrontadas com as soluções técnicas utilizando a matriz DPM (*Design Property Matrix*). Os critérios utilizados foram os mesmos do QFD com pontuação de 0, 1, 3 e 9 e devem ser feitos com uma equipe multidisciplinar e de maneira direta, focando nas relações mais fortes.

4.3 GERAÇÃO DO CONCEITO MODULAR

A última matriz a ser formada é a MIM ou Matriz de Indicação de Módulos (*Modulo Indication Matrix*). Esta matriz é utilizada para correlacionar as soluções técnicas com os direcionadores de modularidade que são estratégias da empresa para justificar a formação dos módulos. No MFD são em número de 12, porém esta ferramenta é muito flexível e os direcionadores podem ser adicionados ou removidos em função da empresa ou intenção da modularização. Alinhar a modularização às estratégias da empresa é uma grande vantagem deste método.

Erixon (1998) propõe que módulos devem possuir apenas direcionadores de estratégia compatíveis. Não faria sentido ter módulos que fossem fortemente influenciados pelos direcionadores *carry over* e evolução tecnológica ao mesmo tempo. Este tipo de análise deve ser feita durante a pontuação da MIM. Ele apresenta uma proposta de correlação de compatibilidade dos direcionadores estratégicos conforme Figura 39.

Figura 39 - Proposta de compatibilidade entre direcionadores estratégicos

<i>Carry Over</i>												
Evolução Tecnológica	-											
Alteração Planejada												
Espec. Técnicas	?	?		+	+							
Estilo	?	-	?	-								
Unidade Comum	-	?			?	?					+	
Org. e Processo	+	+									+	+
Testes em Separado	+	?										
Forn. Estratégicos	+	+										
Manutenção	?			+								
Atual./Upgrading	?											
Reciclagem	?											

Fonte: Erixon (1998)

Neste projeto piloto foram utilizados todos os 12 direcionadores propostos no MFD. Estilo e atualização/upgrading não foram pontuados na MIM e, portanto poderiam ser removidos da análise, porém foram mantidos para confirmar o potencial do método. Também, de forma similar à DPM, foi utilizado o dendograma para verificar a qualidade do preenchimento da MIM.

A MIM e a DPM são analisadas juntas para indicar quais soluções técnicas possuem maior similaridade e poderiam ser agrupadas em um mesmo módulo. A indicação dos melhores agrupamentos é feita utilizando método estatístico de clusterização hierárquica e a visualização, feita com dendograma. Para gerar o dendograma foi utilizado o software MINITAB com “linkage method” completo e distância Euclidiana. A Figura 40 mostra a matriz MIM pontuada e a Figura 41 mostra o dendograma obtido.

Figura 40 - Matriz MIM

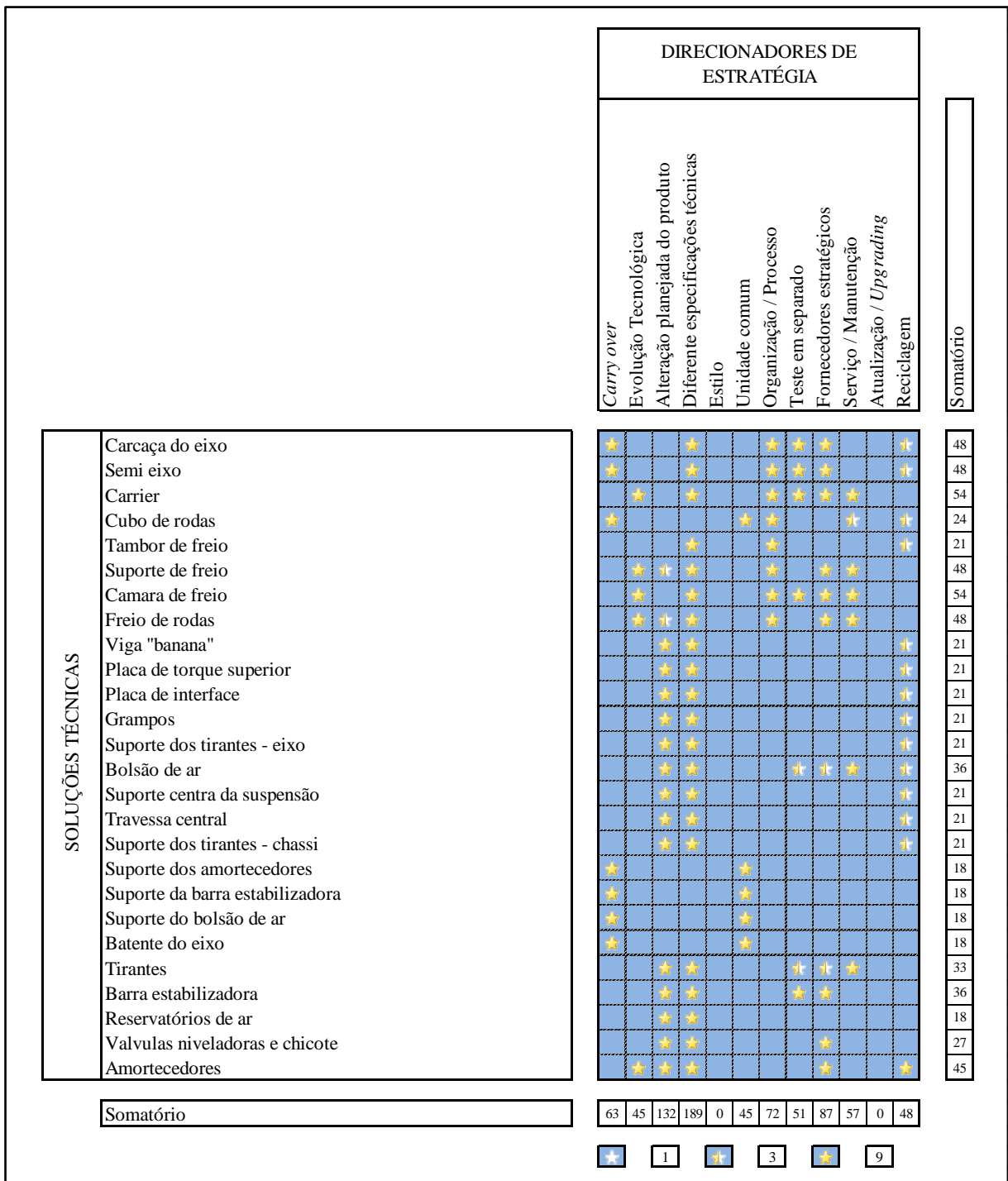
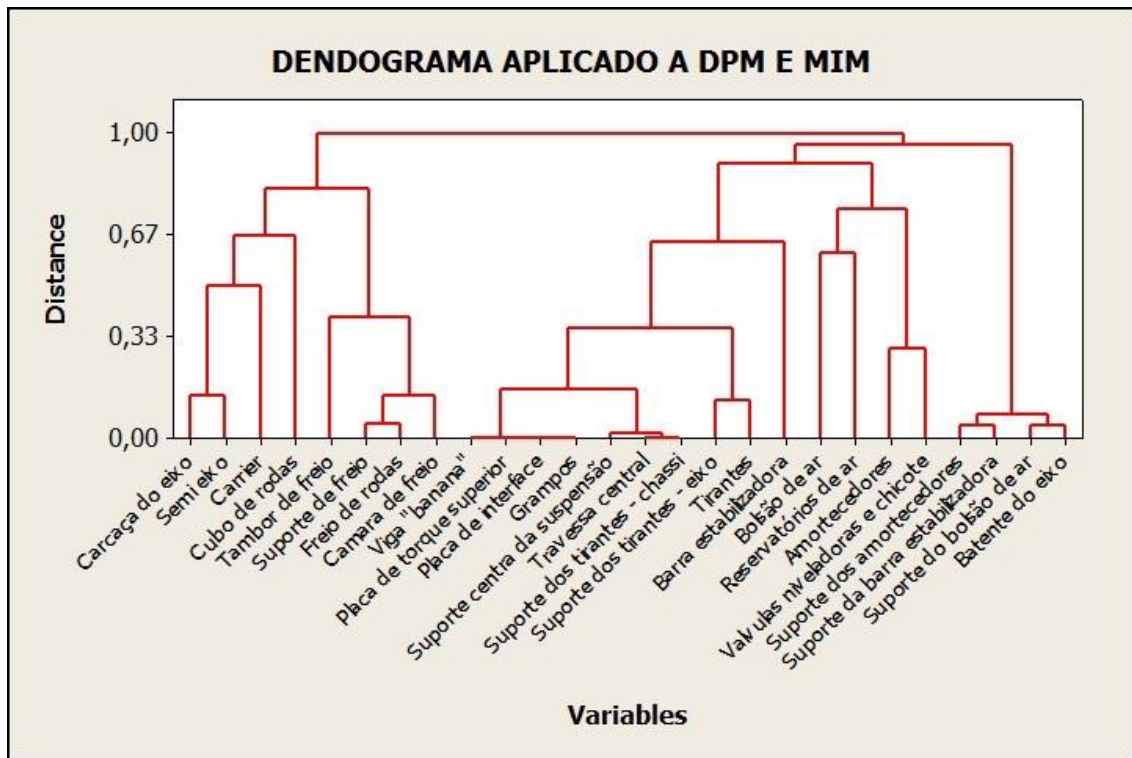


Figura 41 - Dendograma da DPM e MIM












Segundo Borjesson (2009), os dendogramas raramente podem ser utilizados conforme apresentados, não são soluções exatas. Os agrupamentos mostrados na representação hierárquica devem ser interpretados e analisados para decidir quais devem ser módulos ou não. Considera-se que esta é a fase mais importante do MFD, e a experiência da equipe de modularização é decisiva. Resultados muito discrepantes podem indicar que a pontuação da DPM e MIM não está adequada e deve ser revista. Também lista outras razões para suportar esta afirmação que estão mostradas abaixo:

- MFD não possui informações da geometria do produto.
- Propriedades críticas são analisadas superficialmente.
- Excesso de propriedades da engenharia na DPM.
- Sequência adequada de algumas soluções técnicas é ignorada.
- DPM normalmente muito maior que a MIM e pode formar módulos fortemente influenciados pelas propriedades do produto.
- Requerimentos importantes não são traduzidos corretamente para as propriedades do produto.
- Conceitos importantes são tratados como qualquer outro.

As análises do dendograma podem considerar as ramificações mais baixas, com maior similaridade, ou as mais altas, nas quais os elementos ainda possuem similaridade para


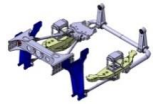


poderem ser agrupados. As ramificações mais baixas sugerem dez agrupamentos conforme mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 - Sugestões de agrupamentos com as ramificações mais baixas

	Agrupamento 1	Eixo fornecedor	Carcaça do eixo Semi eixo Carrier
	Agrupamento 2	Cubo de rodas	Cubo de rodas
	Agrupamento 3	Tambor	Tambor de freio
	Agrupamento 4	Freio	Suporte de freio Freio de rodas Câmara de freio
	Agrupamento 5	Viga banana	Vigas banana Placa de torque superior Placa de interface Grampos
	Agrupamento 6	Chassi interno	Suporte central da suspensão Travessa Central Suporte do tirantes - Chassi
	Agrupamento 7	Tirantes	Suporte dos tirantes - eixo Tirantes
	Agrupamento 8	Barra estabilizadora	Barra estabilizadora
	Agrupamento 9	Confortro e ar	Bolsão de ar Reservatórios de ar Válvula niveladora e chicote Amortecedores
	Agrupamento 10	Chassi externo	Suporte dos amortecedores Suporte da barra estabilizadora Suporte do bolsão de ar Batente do eixo

Com as ramificações mais altas, tem-se 4 grandes agrupamentos conforme mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Sugestões de agrupamentos com as ramificações mais altas

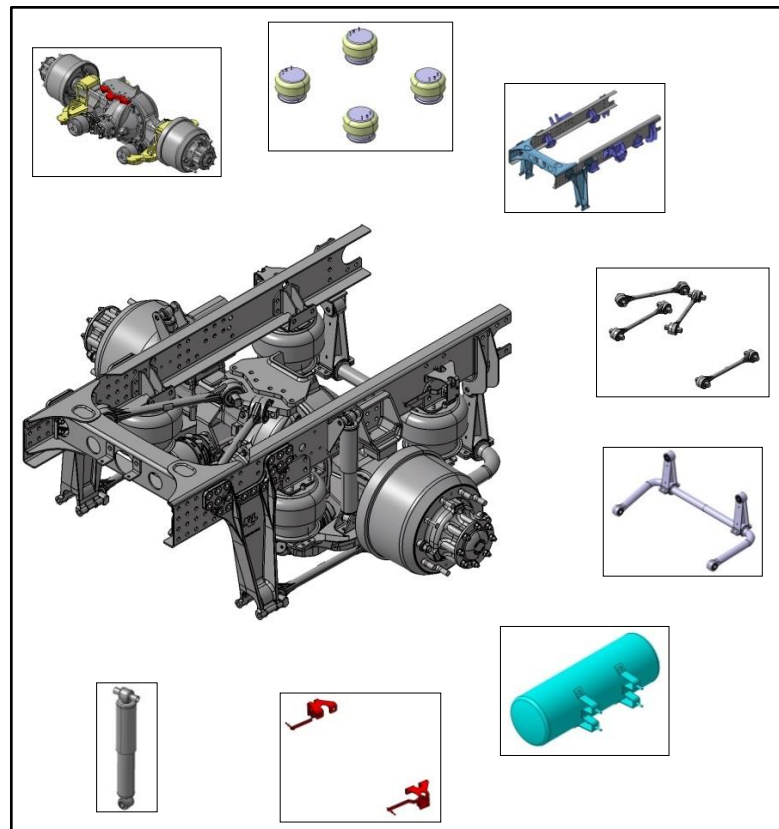
	Agrupamento 1	Eixo completo	Carcaça do eixo Semi eixo Carrier Cubo de rodas Tambor de freio Suporte de freio Freio de rodas Câmara de freio
	Agrupamento 2	Conexão eixo-chassi	Vigas banana Placa de torque superior Placa de interface Grampos Suporte central da suspensão Travessa Central Suporte do tirantes - Chassi Suporte dos tirantes - eixo Tirantes Barra estabilizadora
	Agrupamento 3	Conforto e ar	Bolsão de ar Reservatórios de ar Válvula niveladora e chicote Amortecedores
	Agrupamento 4	Chassi externo	Suporte dos amortecedores Suporte da barra estabilizadora Suporte do bolsão de ar Batente do eixo

Uma observação é que os agrupamentos chassi interno e chassi externo, ficaram distantes e separados entre si. O dendograma relacionou os elementos do chassi interno aos direcionadores alteração planejada do produto e diferente especificação técnica, o que faz sentido, apesar do processo produtivo não permitir tal separação.

Fazendo uma analogia com o resultado apresentado pelo DSM, conforme Figura 35, verifica-se que este método também propõe a formação de um agrupamento com eixo traseiro incluindo a viga banana com todas suas interfaces de fixação e o suporte dos tirantes-eixo. O método agrupa também todos os elementos de interface e de relação com o chassi. Mantêm

reservatórios de ar e válvulas niveladoras e chicotes separados. O motivo é que o DSM é fortemente influenciado pela visão da engenharia considerando o acoplamento, geometria e funcionalidade dos elementos. A Figura 42 mostra as oito sugestões de agrupamentos obtidos com o DSM.






Figura 42 – Sugestões de agrupamentos obtidos com o DSM



O dendograma propõe um agrupamento considerando eixo completo, porém mantém as vigas bananas e suas interfaces separadas. Os elementos dos eixos são fortemente influenciados pelos direcionadores organização/processo e fornecedores estratégicos já as vigas bananas e suas interfaces são influenciadas pelos direcionadores alteração planejadas do produto e diferentes especificações técnicas. Por isso o MFD recomenda que estes componentes sejam agrupados em módulos separados.

Os resultados apresentados pelos dois métodos foram analisados de forma detalhada e indicaram a formação de sete módulos, que foram obtidos tanto diretamente dos métodos DSM e MFD, quanto da combinação de ambos. Desta forma, com os devidos ajustes, a proposta para o conceito modular fica com sete módulos conforme Tabela 11.

Tabela 11 - Conceito modular proposto

	Módulo 1	Eixo completo	Carcaça do eixo Semi eixo Carrier
			Cubo de rodas
			Tambor de freio
			Suporte de freio Freio de rodas Câmara de freio
	Módulo 2	Carga	Vigas banana Placa de torque superior Placa de interface Grampos
	Módulo 3	Chassi	Suporte central da suspensão Travessa Central Suporte do tirantes - Chassi
			Suporte dos amortecedores Suporte da barra estabilizadora Suporte do bolsão de ar Batente do eixo
	Módulo 4	Tirantes	Suporte dos tirantes - eixo Tirantes
	Módulo 5	Conforto	Barra estabilizadora Bolsão de ar Amortecedores
	Módulo 6	Ar	Reservatórios de ar
	Módulo 7	Nível	Válvula niveladora e chicote

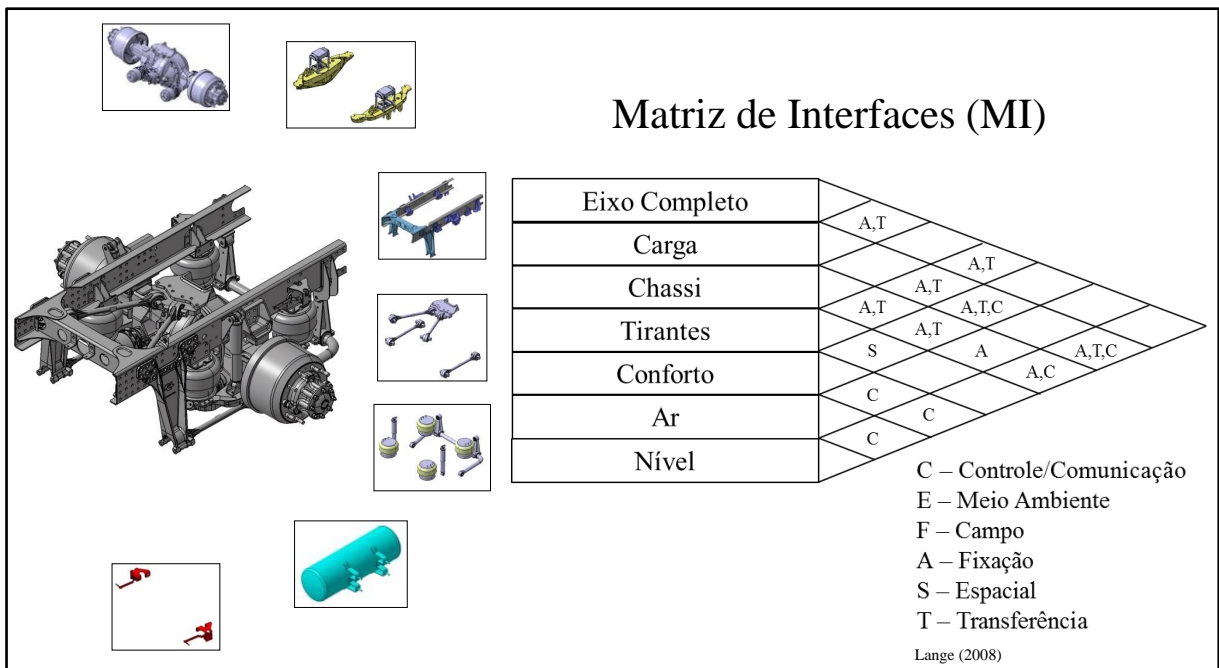
A decisão de qual conceito modular utilizar envolve uma análise financeira muito complexa e não é escopo deste trabalho. Porém, independente do conceito modular que seja definido para o projeto de suspensão a ar, é importante que todas as informações referentes

aos módulos sejam documentadas e difundidas para as demais áreas da empresa. Os itens 4.4 e 4.5 descrevem como estas informações são obtidas e documentadas.

4.4 ANALISE DO CONCEITO MODULAR

O método MFD prevê que os conceitos gerados sejam analisados com relação a suas interfaces e propõe a utilização da matriz de interface (MI). Esta matriz correlaciona um módulo com todos os outros baseados nas suas condições de interface. Será utilizada a classificação proposta por Lange (2008) conforme Figura 12 discutido no item 2.2 (MÓDULO, MODULARIZAÇÃO E MODULARIDADE): controle/comunicação (C); meio ambiente (E); campo (F); fixação (A); espacial (S); transferência (T). Pode haver mais de uma interface entre os módulos ou nenhuma interface. A Figura 43 mostra a matriz de interface obtida do conceito modular.

Figura 43 - Matriz de Interface do conceito modular

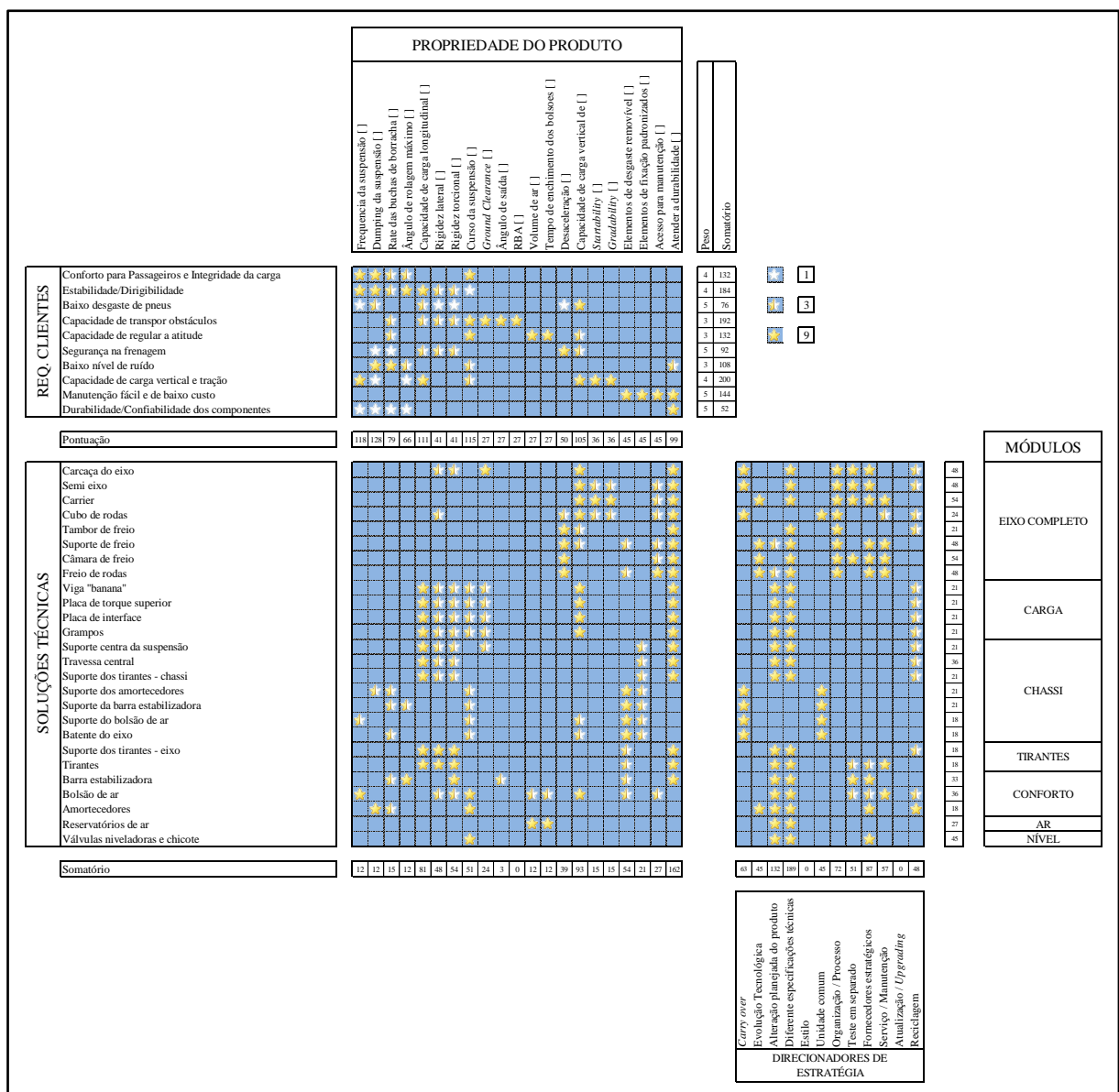


Nesta fase do processo, é montado o mapa de gerenciamento do produto (PMM). Este mapa é formado pelas 3 matrizes do MFD (QFD, DPM e MIM) mais a matriz de interfaces. O PMM mostra uma visão ampla de todo o desenvolvimento e quais requisitos dos clientes, propriedade do produto e estratégias da empresa influenciam no agrupamento em módulo das soluções técnicas. Mostra também o caminho percorrido durante o processo de modularização

e é um documento vivo que serve de recorrência durante todo o desenvolvimento do projeto caso algum conceito não se mostre viável e precise ser modificado. Neste caso, permite verificar quais propriedades do produto são impactadas e quais eventuais necessidades dos clientes que tem a possibilidade de não serem atendidas por esta modificação.

Segundo Bataglin (2013), o PMM não deve ser utilizado apenas pelos projetistas durante o desenvolvimento e detalhamento do produto, mas sim por todas as áreas envolvidas até a sua produção. O PMP deste projeto está mostrado na Figura 44.

Figura 44 - PMM do conceito modular



4.5 APERFEIÇOAMENTO DOS MÓDULOS

Segundo Erixon (1998) a fase final do método MFD consiste em documentar todas as etapas do processo de modularização especificando os módulos com suas interfaces, necessidades dos clientes atendidas, soluções técnicas agrupadas e estratégias de modularização. Tem a finalidade de auxiliar no detalhamento do projeto e planejar a implementação do conceito modular. Todas as informações devem ser descritas em um formato padronizado e divulgadas para as áreas envolvidas no projeto. A Figura 45 mostra uma proposta de formato deste documento com as recomendações e fontes de informação.

Figura 45 - Padrão proposto para especificação dos módulos

Responsável:	Nome do Módulo:
	Nome sugestivo com fácil link ao produto Adicionar a imagem do módulo
Objetivo:	Listar as estratégias que devem ser atendidas Informações da MIM
Soluções Técnicas:	Listar as soluções técnicas que compoem o módulo. Informações da PMP ou dendograma.
Interfaces com:	Listar os módulos que possuem interface e o tipo de interface. Informações da MI
Considerar:	Listar os requisitos do cliente afetados Informações da QFD

Fonte: Erixon (1998)

O objetivo deste trabalho é aplicar os princípios da modularização no desenvolvimento da arquitetura do produto. A fase cinco do MFD está relacionada com a geração de informações para o projeto dos componentes e das interfaces dos módulos a partir do conceito modular obtido. Como detalhamento do projeto é uma limitação deste trabalho, a documentação dos módulos não é pertinente.

5 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

A aplicação do MFD combinado com DSM no projeto piloto de uma suspensão traseira a ar em veículo comercial apresentou resultados muito bons. Os módulos finais foram obtidos a partir da análise dos resultados encontrados pelo MFD, pelo DSM e da pela combinação de ambos.

Foi observado que estes métodos apresentam características similares e complementares. São similares com relação a entrada de dados matricial e solução utilizando *software*. São completares, uma vez que o MFD apresenta forte influência das estratégias da empresa, abrangência de dados de entrada (voz do cliente, engenharia e empresa e flexibilidade), e o DSM com um relacionamento técnico e com maior repetibilidade. A aplicação destes dois métodos de forma combinada tornou o processo de modularização mais eficiente. O DSM simplificou a lista de soluções técnicas e auxiliou nas definições dos módulos na fase de geração do conceito modular.

A decisão de utilizar o sistema de suspensão traseira a ar como projeto piloto para simulação do processo de modularização permitiu avaliar o potencial do método MFD em lidar com vários atributos relacionados aos clientes, produto e empresa, além de componentes fabricados por terceiros. O MFD foi capaz de reconhecer todas estas características e recomendar os módulos adequadamente.

Por se tratar de um refinamento da arquitetura de um produto existente utilizando os conceitos da modularidade, os requisitos dos clientes e as propriedades do produto para entregar esses requisitos foram baseados em material disponível e discussão com engenheiros e especialistas em marketing do produto. A ferramenta QFD do MFD se mostrou adequada para fazer este mapeamento além de mostrar de forma sequenciada quais são mais importantes.

A definição das soluções técnicas foi obtida utilizando o processo *botton-up*, pois existia uma lista de componentes previamente elaborados. A decomposição do produto gerou, inicialmente, 44 elementos. Nesta fase, a utilização do DSM se mostrou muito adequada para iniciar e simplificar o processo de modularização, agrupando soluções técnicas que devem estar juntas para exercer adequadamente a função. O resultado foi uma redução da lista inicial de 44 para 26 elementos.

Durante a correlação das soluções técnicas com as propriedades do produto utilizando a matriz DPM, observou-se que a pontuação deve ser feita de forma direta e objetiva, focando nas relações mais fortes. O dendograma se mostrou adequado para verificar a qualidade desta pontuação, ramificação muito longa significa que as pontuações podem não estar adequadas e influenciar no resultado final.

A correlação das soluções técnicas com as estratégias da empresa foi feita utilizando todos os 12 direcionadores padrão do MFD. Durante a pontuação da MIM tomou-se o cuidado de não correlacionar estratégias incompatíveis na mesma solução técnica. A grande vantagem da ferramenta MIM foi sua flexibilidade de poder adaptar suas diretrizes a outras estratégias da empresa. Similar à DPM, o dendograma também foi importante para verificar a qualidade da pontuação da MIM.

A sugestão de módulos foi feita com a análise do dendograma que foi aplicado ao mesmo tempo nas matrizes DPM e MIM. Confirmou-se que a representação hierárquica e os agrupamentos gerados não podem ser utilizados conforme apresentado e devem ser discutidos pela equipe do projeto em modularização. Uma análise considerando as ramificações mais baixas (maior similaridade) e as ramificações mais altas (menor similaridades) mostrou-se adequada, pois apresentou uma visão mais abrangente das possibilidades de agrupamentos.

Alguns ajustes foram necessários para fazer a proposta do conceito modular. Estes ajustes foram feitos considerando inconsistência funcional, de manufatura e geométrica. Estas características não estão inseridas diretamente no MFD. Outra observação foi que um indicador financeiro poderia auxiliar nesta decisão. O MFD se beneficiaria destas melhorias. Nesta fase, a utilização do DSM foi muito importante, orientando com uma visão técnica quais elementos poderiam ser agrupados sem impacto funcional.

Por fim, considerando os resultados obtidos na aplicação do MFD combinado com DSM na modularização de um sistema de suspensão traseira a ar, conclui-se que esta proposta pode ser aplicada em novos projetos. As documentações obtidas durante todo o processo orientarão futuras adaptações neste sistema em função de evoluções tecnológicas e/ou novos requisitos dos clientes. Outra constatação é que o método em si não é suficiente, o conhecimento de uma equipe multifuncional é fundamental durante a pontuação das matrizes e decisivo na definição dos módulos. Também é razoável concluir que os resultados sejam similares quando aplicados em outros sistemas que tenham mesmas entradas de dados.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

A proposta de modularização foi aplicada a uma única variante de um sistema existente, apenas os dados do modelo 4x2 foram inseridos no MFD. Demais variantes foram sugeridas como possibilidade e consideradas na pontuação da MIM utilizando os direcionadores estratégicos: evolução tecnológica, alteração planejada do produto e diferentes especificações técnicas. Neste trabalho não pôde ser verificado o potencial do MFD aplicado na modularidade em si. Uma proposta de trabalho futuro seria aplicar todas as principais variantes de suspensão traseira a ar em uma única estrutura do MFD e estudar o seu potencial de criar famílias de produtos analisando a intercambiabilidade entre módulos. Isto aumentaria a versatilidade do método. Neste trabalho poderia ser utilizado o MFD com a propriedade de convergência de opcional.

Durante a fase de geração do conceito modular, a decisão de quais módulos utilizar foi bastante influenciada pela experiência da equipe do projeto. Alguns parâmetros poderiam ser mais fortes no método para melhorar o resultado tais como: geometria, processo de produção e indicador financeiro. Um estudo futuro seria adaptar o MFD para a inserção de dados referentes a estes parâmetros e a análise de quais ferramentas seriam impactadas ou se seria necessário desenvolver novas ferramentas. O estudo poderia ser qualitativo comparando os resultados de diversas propostas.

A repetibilidade dos métodos de modularização é bastante contestável. Repetir a modularização deste mesmo sistema utilizando outra equipe e permitindo a participação dos principais fornecedores iria enriquecer o procedimento para futuros projetos. Com este trabalho poderia ser estudado se a possibilidade da montagem do eixo traseiro dentro da empresa (no conceito modular) é vantajosa em relação a compra do eixo completo.

REFERÊNCIAS

- ARCHER, J. de A.; SCALICE, R. K. **Aplicação e Análise de uso de Três Metodologias de Projetos de Produtos Modulares.** In: XXX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – ENEGEP, 2010. 14 f.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. **Modelling and Simulation:** operations management research methodologies using quantitative modeling. In: International Journal of Operations and Production Management, v22, n.2, p. 241-264, 2002.
- BLACKENFELT, M. **Managing Complexity by Product Modularization:** Balancing the aspects of technology and business during the design process. 2001. 90 p. Doctoral Thesis – The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2001.
- BORJESSON, F. **Improved Output in Modular Function Deployment Using Heuristics.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN – ICED, 2009. Stanford, CA, USA. 12 p.
- BORJESSON, F. **A Systematic Qualitative Comparison of Five Approaches to Modularity.** In: INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE – DESIGN, 2010. Dubrovnik, Croatia, p. 147–156.
- BORJESSON, F. **Approaches to Modularity in Product Architecture.** 2012. 109 p. Doctoral Thesis – Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2012.
- BORJESSON, F.; HÖLTTÄ-OTTO, K. **A Module Generation Algorithm for Product Architecture Based on Component Interactions and Strategic Drivers.** Research in Engineering Design, v25, n.1, p. 31–51, 2014.
- BORJESSON, F.; HÖLTTÄ-OTTO, K. **Improved Clustering Algorithm for Design Structure Matrix.** In: International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference – IDETC/CIE, 2012. Chicago, IL, USA. 10 p.
- BORJESSON, F.; SELLGREN, U. **Modularization of Novel Machines:** Motives, means and opportunities. In: NORD DESIGN CONFERENCE, 2010. Göteborg, Sweden. 12 p.
- DAHMUS, J. B.; GONZALEZ-ZUGASTI, J. P.; OTTO, K. N. **Modular Product Architecture.** Design Studies, v.22, n.5, 409–424, 2001.
- EAGER, A.; ELSAM, K.; GUPTA, R.; VELINDER, M. **Modular Design Playbook:** guidelines for assessing the benefits and risks of modular design. Research & Technology Executive Council. The Corporate Executive Board Company, 2010.
- EFTHYMIU, K.; PAGOROPOULOS, A.; PAPAKOSTAS, N.; MOURTZIS, D.; CHRYSOLOURIS, G. **Manufacturing Systems Complexity Review:** challenges and outlook. In: Procedia CIRP – Conference on Manufacturing Systems, v. 3, p. 644–649, 2012.

ELMARAGHY, H.; SCHUH, G.; ELMARAGHY, W.; PILLER, F.; SCHÖNSLEBEN, P.; TSENG, M.; BERNARD, A. **Product Variety Management**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.62, n. 2, p. 629–652, 2013.

ERIXON, G. **Modular Function Deployment: a method for product modularisation**. 1998. 178 p. Doctoral Thesis – The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1998.

ERIXON, G.; YXKCILL, A.; ARNSTROM, A. **Modularity: The basis for product and factory reengineering**. CIRP Annals, v.45, n. 1, 1996.

FELLINI, R.; PAPALAMBROS, P.;WEBER, T. **Application of a Product Platform Design Process to Automotive Powertrains**. In: Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS & ASTRONAUTICS – AIAA, 2000. 9 p.

FUJITA, K. **Product variety optimization under modular architecture**. COMPUTER AIDED DESIGN – CAD, v. 34, n. 12, p. 953–965, 2002.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

HÖLTTÄ-OTTO, K.; SALONEN, M. **Comparing Three Different Modularity Methods**. In: DESIGN ENGINEERING TECHNICAL CONFERENCE – DETC, 2003, 11 p.

HÖLTTÄ-OTTO, K; TANG, V.; SEERING. W. P. **Modularizing product architectures using dendrograms**. In: Proceedings of International Conference on Engineering Design – ICED, 2003. Stockholm, Sweden.

HÖLTTÄ-OTTO, K. **Modular Product Platform Design**. 2005. 65 p. Doctoral Thesis – Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 2005.

HÖLTTÄ-OTTO, K; TANG, V.; OTTO, K. **Analyzing Module Commonality for Platform Design Using Dendrograms**. Research in Engineering Design, v.19, p. 127–141, 2008.

HU, S. J.; ZHU, X.; WANG, H.; KOREN, Y. **Product Variety and Manufacturing Complexity in Assembly Systems and Supply Chains**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.5, n.1, p. 45–48, 2008.

HUANG, C. C.; KUSIAK, A. **Modularity in Design of Products and Systems**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, v. 28, n. 1, p. 66–77, 1998.

MEDEIROS, J. G. **Análise da Participação dos Fornecedores no Processo de Desenvolvimento do Produto na MAN Latin America**. Trabalho de conclusão de curso – FGV (In Company). Resense, 2014.

JONHNSON, L. **Modularity : a growing management tool because it delivers real value**. Modular Management, 2013, Stockholm. www.modularmanagement.com

JOSE, A.; TOLLENAERE, M. **Modular and Platform Methods for Product Family Design**: literature analysis. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 16, n. 3, p. 371–390, 2005.

OLIVEIRA, J. E. **Proposta de um Procedimento Didático para o Estudo de Projetos Modulares**. Trabalho de conclusão de curso – UDESC. Joinville. 2010.

KOTABE, M.; PARENTE, R.; MURRAY, J. Y. **Antecedentes and Outcomes of Modular Production in the Brazilian Automobile Industry**: a ground theory approach. *Journal of International Business Studies*, v. 38, n.1, p. 84–106, 2007.

KRISHNAN, V.; ULRICH, K. T. **Product Development Decisions**: a review of the literature. *Management Science*, v. 47 n. 1, p. 1–21.

LANGE, M. W. **Modular Function Deployment**: Proficiency training. *Modular Management*, 2008, Stockholm. www.modularmanagement.com.

MACHADO, J.; MAZIERO, N. L. **Aplicação do método MFD para Projeto de Produto Modular com Enfoque na Manufatura e na Montagem**. *Revista CIATEC – UPF*, v. 6, n. 2, p. 1–14, 2014.

MILLER, T. D. **Defining Modules , Modularity and Modularization**: evolution of the concept in a historical perspective. *Proceedings of the 13th IPS Research Seminar*, p. 1–19, 1998.

MUFFATTO, M. **Introducing a Platform Strategy in Product Development**. *International Journal of Production Economics*, v. 60-61, p. 145–153, 1999.

NILSSON, P.; ERIXON, G. **The Chart of Modular Function Deployment**. *Proceedings of the 4th WDK Workshop on Product Structuring*, p. 147–154, 1998.

OKUDAN, K. G. E.; GUPTA, S. **Analysis of Modularity Implementation Methods from an Assembly and Variety Viewpoints**. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 66, p.1959–1976, 2013.

PAHL, G.; BEITZ, W. **Engineering design**: a systematic approach. 2nd Edition. Springer Verlag, London, U.K. 1996.

PIMMLER, T. U.; EPPINGER, S. D. **Integration Analysis of Product Decompositions**. In: *ASME International Design Engineering Technical Conferences & 6th Design Theory and Methodology Conference*, Minneapolis, USA, p. 343–351, 1994.

PRIETO, E.; MIGUEL, P. A. C. **Adoção da Estratégia Modular por Empresas do Setor Automotivo e as Implicações Relativas à Transferência de Atividades no Desenvolvimento de Produto**: um estudo de casos múltiplos. *Gestão & Produção, São Carlos*, v. 18, n. 2, p. 425–442, 2011.

ROBERTSON, D.; LANE, P.; ULRICH, K. **Platform Product Development**. To appear in *Sloan Management Review*, 33 p., 1998.

SELLGREN, U.; SÖREN, A. **The Concept of Functional Surfaces as Carriers of Interactive Properties.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN – ICED, 2005, 14 p., Melbourne, Australia.

SHAMSUZZOHA, A.; PETRI, T. H. **Modular Product Architecture:** the role of information exchange for customization. ed, G. Reiner, Rapid Modelling and Quick Response, p. 195–212, 2010.

STONE, R. B.; WOOD, K. L.; CRAWFORD, R. H. **A Heuristic Method for Identifying Modules for Product Architectures.** Design Studies, v. 21, p. 1–47, 2000.

ULRICH, K.; TUNG, K. **Fundamentals of Product Modularity.** Proceedings of ASME Winter Annual Meeting Symposium on Design and Manufacturing Integration, p.73-79, 1991.

ULRICH, K. **The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm.** Research Policy, v. 24, n. 3, p. 419–440, 1995.

WEI, W.; LIU, A. **A Multi-Principle Module Identification Method for Product Platform Design.** Journal of Zhejiang University Science A (Applied Physics & Engineering), v. 16, n. 1, p. 1–10, 2015.