

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Monique Sonogo

**MÉTODOS DE MODULARIZAÇÃO NO
PROJETO CONCEITUAL DE
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS**

Porto Alegre

2013

Monique Sonogo

Métodos de Modularização no Projeto Conceitual de Desenvolvimento de Produtos

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade acadêmica, na área de concentração em Sistemas da Qualidade.

Orientador: Márcia Elisa Soares Echeveste, Dr^a.

Porto Alegre

2013

Monique Sonogo

Métodos de Modularização no Projeto Conceitual de Desenvolvimento de Produtos

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Márcia Elisa Soares Echeveste

Orientador PPGEP/UFRGS

Prof. José Luis Duarte Ribeiro

Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professor Régis Kovacs Scalice, Dr. (DEPS/UDESC)

Professor Júlio Van Der Linden, Dr. (PGDESIGN/UFRGS)

Professor Flávio Sanson Fogliatto, Dr. (PPGEP/UFRGS)

RESUMO

A estratégia de modularização tem como objetivo desenvolver arquiteturas de produto que contenham unidades fisicamente destacáveis, denominados módulos, de forma a permitir que estas unidades sejam utilizadas em variações de um produto ou em linhas de produtos diferentes. Essa estratégia deve ser planejada no Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP), no qual são tomadas decisões que afetam todo o ciclo de vida do produto. Com esse propósito, métodos e técnicas de modularização foram criados para oferecer suporte às equipes de desenvolvimento. Estes métodos precisam ser adaptados às características de cada projeto, como a natureza do negócio, a complexidade e a novidade do produto desenvolvido. Para contribuir com esse tema de pesquisa, o objetivo geral desta dissertação é propor uma reestruturação de métodos de modularização para a criação e avaliação de conceitos, adaptados às particularidades de cada projeto. Inicialmente, foram identificados, através de revisão sistemática da literatura, seis diferentes métodos para o agrupamento de componentes do produto em módulos. Dentre os métodos estudados, o método *Modular Function Deployment (MFD)*, apresentou maior flexibilidade e abrangência nas atividades que compreendem o processo de modularização. Como resultado, propõe-se um método *Modular Function Deployment Adapted*, oferecendo as empresas uma orientação para configurar o MFD. Esta configuração proporciona uma aplicação do método customizada ao tipo de projeto desenvolvido pela empresa. O método é exemplificado para o caso de desenvolvimento de um equipamento estratégico em saúde, relacionado às atividades do Centro de Referência em Tecnologias de Equipamentos e Insumos Estratégicos para a Saúde CRETIES/UFRGS, visando favorecer a manutenção e a confiabilidade do equipamento por meio da modularização.

Palavras-chave: modularização, desenvolvimento de produtos, design de conceito.

ABSTRACT

Modularization strategies have as objective the development of product architectures containing physically detachable units, called modules, so that these units may be used in variations of a product or in different product lines. However, that strategy ought to be planned during the Product Development Process (PDP), in which decisions to be taken will affect the whole life cycle of the product. With such purpose in mind, methods and techniques of modularization were created to support development teams. Those methods need to be adapted to the characteristics of each project, such as the kind of business and, the complexity and novelty of the product under development. Aiming at contributing to this research matter, this dissertation's general objective is to propose a restructuring of the modularization methods, adapted to different projects for the creation and evaluation of product concepts. First, by means of systematic literature review, six different methods were identified for grouping product components in modules. Within the studied methods, the Modular Function Deployment (MFD) method presented the greatest flexibility and comprehensiveness in activities that comprise the modularization process. As a result, a Modular Function Deployment Adapted method is proposed, offering guidelines to companies to adapt the MFD. Such adaptation provides a customized application of the method for the type of project developed by the company. The method is exemplified in the case of the development of a health device, related to the activities of the Centro de Referência em Tecnologias de Equipamentos e Insumos Estratégicos para a Saúde, CRETIES / UFRGS, aiming to promote the maintenance and equipment reliability through modularization.

Keywords: modularization, product development, conceptual design.

LISTA DE FIGURAS

1. Introdução

Figura 1-1: Cinco estágios da Modularidade, adaptado de Kong <i>et al.</i> (2009).....	12
Figura 1-2: Categorias Bibliometria Modularidade e CM	14
Figura 1-3: Estrutura da dissertação	19

2. Artigo 1

Figura 2-1: Associação de conceitos relacionados a modularidade	27
Figura 2-2: Condução das buscas nas bases de dados	29
Figura 2-3: Métodos para modularização encontrados na literatura	31
Figura 2-4: Três Heurísticas, adaptado de Stone (1997)	33
Figura 2-5: Organização das matrizes do método HOME, adaptado de Sand, Gu, Watson (2002).....	35
Figura 2-6: Parâmetros de classificação de Daniilidis <i>et al.</i> (2011).....	36
Figura 2-7: Métodos para modularização segundo as 3 etapas críticas.....	38

3. Artigo 2

Figura 3-1: Processo de Desenvolvimento de Produtos de Ulrich e Eppinger (2000)	51
Figura 3-2: Variáveis para medição de complexidade e novidade no projeto de produtos	53
Figura 3-3: Principais contribuições dos especialistas	58
Figura 3-4: MFDA integrado a um modelo referencial de desenvolvimento de produtos	59
Figura 3-5: Etapa de definição dos requisitos dos clientes.....	60
Figura 3-6: Etapa de Seleção de Soluções Técnicas	61
Figura 3-7: Geração de Módulos para produtos de baixa e alta complexidade.....	62
Figura 3-8: Quatro diferentes configuração do MFDA, conforme complexidade e novidade	65

4. Artigo 3

Figura 4-1: Diretrizes para Modularização.....	80
Figura 4-2: Diretrizes relacionados aos objetivos estratégicos da modularização	81
Figura 4-3: Variáveis de medição de complexidade e novidade	85
Figura 4-4: Quatro configuração de método conforme complexidade e novidade	86
Figura 4-5: Sequência de aplicação do MFDA	87
Figura 4-6: Configuração indicada para a máquina de hemodiálise	89
Figura 4-7: Matriz MIM.....	90
Figura 4-8: Matriz MIM Máquina de hemodiálise.....	91
Figura 4-9: Dendrograma	92
Figura 4-10: Módulos da máquina indicados pelo dendrograma	93

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Terminologia e Conceitos	11
1.3 A Modularização na década de 2000.....	13
1.4 Tema e objetivos	14
1.5 Justificativa do tema e objetivos	15
1.6 Métodos de pesquisa	17
1.7 Delimitações do trabalho.....	18
1.8 Estrutura do trabalho	18
1.9 Referências Bibliográficas	19
2. SELEÇÃO DE MÉTODOS PARA MODULARIZAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS: REVISÃO SISTEMÁTICA	22
2.1 Introdução.....	23
2.2 Terminologia e Conceitos	25
2.3 Procedimentos Metodológicos	27
2.4 Métodos para Modularização	30
Design Structure Matrix	31
Modular Function Deployment	32
Método Heurístico.....	33
Design for Variety	33
House of Modular Enhancement	34
Fuzzy Logic Based	35
2.4.1 Parâmetros de Classificação.....	36
2.4.2 Decomposição dos métodos em etapas	37
2.5 Discussão.....	38
2.5.1 Fase de Decomposição.....	39
2.5.2. Fase de Integração.....	39
2.5.3 Fase de Avaliação	41
2.6 Considerações Finais.....	42
2.7 Referências Bibliográficas	43
3 MODULAR FUNCTION DEPLOYMENT ADAPTADO A TIPOLOGIA DE PROJETOS PARA A CRIAÇÃO DE CONCEITOS NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS MODULARES	47
3.1 Introdução.....	48
3.2 Referencial	50
3.2.1 O Processo de Desenvolvimento de Produtos e Tipologias de Projeto	50

3.2.2 <i>Modular Function Deployment</i>	53
3.3 Método de Pesquisa.....	56
3.4 Proposta <i>Modular Function Deployment Adapted</i>	58
3.4.1 <i>Definição de Requisitos</i>	59
3.4.2 <i>Definição de Soluções Técnicas</i>	61
3.4.3 <i>Agrupamento</i>	61
3.5 Discussão.....	62
3.6 Conclusão e pesquisas futuras	66
3.7 Referências Bibliográficas	67
3.8 Apêndices	71
4 APLICAÇÃO DO MÉTODO MODULAR FUNCTION DEPLOYMENT ADAPTED EM MÁQUINA DE HEMODIÁLISE	74
4.1 Introdução.....	75
4.2 Referencial	77
4.2.1 <i>Module Drivers - Diretrizes para a Modularização</i>	78
4.2.2 <i>Discussão de aplicabilidade de método de modularização</i>	81
4.3 O Método MFDA	84
4.4 Exemplo de aplicação.....	87
4.4.1 <i>Definição do produto</i>	88
4.4.2 <i>Definição de tipologia de projeto</i>	88
4.4.3 <i>Aplicação da configuração indicada</i>	89
4.5 Discussão.....	94
4.6 Conclusão	95
4.7 Referências Bibliográficas	96
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
5.1 Conclusões	100
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	102
APÊNDICE A	103

1. INTRODUÇÃO

A demanda por produtos com características diferenciadas atendendo a diferentes segmentos de mercado, e a necessidade de redução de custos reduzindo partes e componentes de um produto, impulsionou a estratégia de modularização, como forma de desenvolver diferentes conceitos ao mesmo tempo provendo melhorias no desempenho, manutenção e confiabilidade dos produtos. A modularização, primeiramente mencionada na literatura nos anos de 1960 (Starr, 1965) tem como objetivo desenvolver arquiteturas de produto que contenham unidades fisicamente destacáveis, de forma a permitir que estas possam ser utilizadas em variações de um produto ou em linhas de produtos diferentes (NEPAL; MONPLAISIR; SINGH, 2005).

Muitos são os benefícios associados à adoção da estratégia de modularização, e estes benefícios estão diretamente ligados aos motivos pelos quais as empresas adotam esta estratégia. Estes motivos podem ser agrupados em três categorias: variedade *versus* padronização, organização do desenvolvimento e manufatura, e pós-vendas (BLACKENFELT, 2001). Estas três categorias representam os motivos pelos quais as empresas buscam se utilizar da estratégia da modularização, podendo se beneficiar deles separadamente ou em conjunto, pois não são mutuamente exclusivos.

A questão da variedade é o motivo mais conhecido e mais discutido para a modularização. O aumento da demanda por variedade de produtos e serviços tem direcionado as empresas para a Customização em Massa (PINE, 1993). O principal objetivo da Customização em Massa consiste em produzir produtos que atendam aos requisitos individuais dos clientes com custos similares aos manufaturados (PILLER, 2004). Pine (1993) argumenta que a modularização é a chave para alcançar a customização em massa. Segundo Duray (2002) a modularidade é o aspecto principal para alcançar o volume de escala (*the 'mass'*), enquanto o envolvimento do consumidor gera a customização. O objetivo da modularização é primeiramente ganhar flexibilidade para a customização em massa através da construção de produtos de acordo com as especificações do cliente usando componentes modulares (DURAY, 2002). Segundo Kuderer (2006), a modularidade também auxilia a superar a complexidade que a customização traz aos sistemas de manufatura, atuando como uma ferramenta para decompor a estrutura do produto em unidades menores e mais facilmente administráveis.

No entanto, não é somente com relação à variedade que a modularização demonstra ser uma estratégia benéfica. Com relação ao desenvolvimento de produtos, a modularização traz a possibilidade de testar módulos separadamente, reutilizar módulos existentes em diferentes combinações formando novos produtos (MODULAR DESIGN PLAYBOOK, 2010), e a divisão de tarefas que podem ser trabalhadas em paralelo, economizando tempo e custos, por consequência (KEXIN, 2004; PIMMLER; EPPINGER, 1994). Com relação à manufatura, os módulos podem ser desenvolvidos com dependências mínimas sobre outros componentes do produto relacionados aos processos de fabricação (GERSHENSON; PRASAD, 1997). Além disso, a modularização permite à equipe de projeto controlar o nível em que as mudanças nos processos de manufatura afetam o *design* do produto (GERSHENSON; PRASAD, 1997). Outros aspectos como economia de escala, economia de custos com estoque e logística, flexibilidade na reutilização de componentes, redução do tempo de montagem e do tempo de produção, e fabricação de módulos em paralelo podem ser benefícios obtidos com a adoção da estratégia (JOSE; TOLLENAERE, 2005).

Com relação ao pós-vendas, a modularização traz a capacidade de lidar com questões como reuso, reciclagem, manutenção e atualização dos produtos. A modularização pode contribuir ainda com a extensão da vida útil dos produtos (SOARES; OKIMOTO, 2009). Em projetos modulares os defeitos geralmente não afetam todas as funções do produto, pois podem ser rastreados e resolvidos através de reparo e substituição de módulos defeituosos, sem a necessidade de revisão completa do produto (MODULAR DESIGN PLAYBOOK, 2010). Além disso, os serviços de manutenção são facilitados, assim como pode ser limitado o uso de materiais em cada módulo e agrupados os materiais ambientalmente hostis no mesmo módulo, facilitando a desmontagem e separação para reciclagem (KUDERER, 2006; HOLTZA-OTTO; de WECK, 2007). A modularização também oferece a possibilidade de renovação dos produtos, pois as partes cuja atualização é prevista podem ser módulos separados e substituídos pelos módulos das novas gerações do produto (ERIXON *et al.*, 1996; GERSHENSON; PRASAD; ZHANG, 2003).

Todavia, há algumas desvantagens relacionadas ao projeto modular. Entre elas pode-se citar o alto investimento inicial, aumento da complexidade de desenvolvimento, falta de foco no cliente e riscos com relação à propriedade intelectual (MODULAR DESIGN PLAYBOOK, 2010). Outra desvantagem consiste no desenvolvimento de produtos similares, devido à maior facilidade de cópia na reutilização de módulos (KONG *et al.*, 2010).

No entanto, agrupar os componentes de um produto em módulos não é simples, e a forma como esta tarefa é feita afeta significativamente os benefícios a serem alcançados pelas

empresas (HOLMQVIST; PERSSON, 2003). Para atingir os objetivos da modularização, existem métodos e ferramentas que conduzem o processo de modularização na concepção e seleção de conceitos no desenvolvimento de produtos. Todos os métodos para a modularização possuem o objetivo de agrupar componentes em módulos, porém cada método foi desenvolvido a partir de um ponto de vista e proveniente de diferentes áreas de aplicação (DANIILIDIS *et al.*, 2011). Estes métodos apresentam diferentes ferramentas e manipulações para a criação de módulos em produtos, mas, de uma forma geral, apresentam três fases genéricas: decomposição do produto em partes, integração dessas partes em módulos conforme similaridades e/ou critérios pré-estabelecidos, e avaliação do design resultante. Todos os métodos para modularização requerem uma quantidade significativa de informação de entrada, cálculo e manipulações para chegar ao resultado esperado (GERSHENSON; PRASAD; ZHANG, 2004), e assume-se que a natureza dessas informações, bem como as manipulações e cálculos necessários possam ser grandes influenciadores da escolha do método por uma determinada empresa.

1.1. Terminologia e Conceitos

Na área de design de produto não existe uma definição universalmente aceita para o conceito de módulo (GERSHENSON; PRASAD; ZHANG, 2004). Apesar de não ser um conceito novo, o conceito de modularização é fragmentado e apresenta uma variedade de ramificações, não pertencendo a uma única e coerente área do conhecimento (STARR, 2010). A seguir são apresentados alguns conceitos utilizados neste trabalho, a fim de facilitar o entendimento, provenientes de Miller e Elgard (1998).

Módulo: é uma unidade funcional essencial e auto-contida em relação ao produto do qual faz parte, possuindo interfaces padronizadas e interações que permitem, através de combinações, a composição de produtos.

Modularidade: é um atributo de um sistema relacionado com a sua estrutura e funcionalidade, um sistema que possui modularidade possui unidades funcionais auto-contidas com interfaces padronizadas.

Modularização: é a atividade em que a estruturação em módulos ocorre.

A literatura atual em modularização surgiu na década de 1960 e, no entanto, as aplicações de módulos ao longo da história abrangem mais de 5000 anos (KONG *et al.* 2009). Segundo Kong *et al.* (2009), a história da modularização pode ser definida em 5 grandes fases, definidas como fase da Modularidade Espontânea, fase da Modularidade Pré-Industrial, Fase da Modularidade Industrial, Era da Modularidade e Pan Modularidade, conforme descrito na Figura 1.1. Em seu trabalho “*Defining Modules, Modularity and Modularization*”, Miller e Elgard (1998) apresentam uma evolução do conceito através do tempo, trazendo contribuições pontuais ao entendimento dos cinco estágios da modularização.

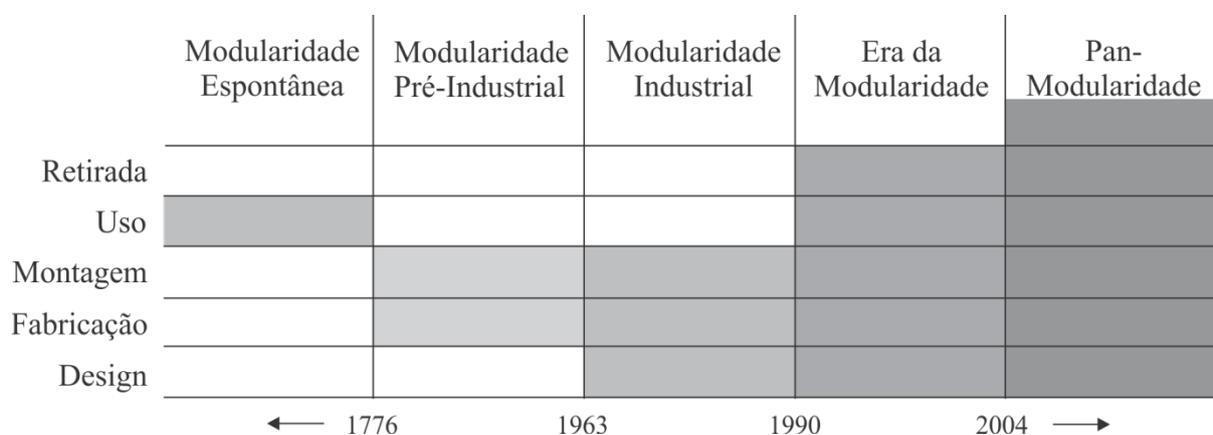


Figura 1-1: Cinco estágios da Modularidade, adaptado de Kong *et al.* (2009)

A fase da modularidade espontânea é caracterizada pela ausência de diretrizes teóricas, e os módulos eram utilizados por uma questão de praticidade. Nesta era, Vitruvius, em seu trabalho ‘Dez Livros sobre Arquitetura’, definiu módulo como sendo uma medida padrão para garantir as proporções corretas (MILLER; ELGARD, 1998).

Na modularidade Pré-Industrial os produtos eram separados em partes para a manufatura em massa. Durante a era da Bauhaus (1919-1933), Walter Gropius ligou o módulo ao conceito de blocos de construção sem ligação com funcionalidade (MILLER; ELGARD, 1998).

Na fase da Modularidade Industrial surgem as primeiras pesquisas práticas e teóricas, que variam desde aviões até pequenas chaves de fenda. Na década de 1960, Borowski descreveu a natureza de diferentes tipos de blocos de construção e atributos, incluindo diretrizes para o projeto de um sistema baseado em blocos de construção (MILLER; ELGARD, 1998). Segundo Borowski, o atributo básico de um bloco de construção é a habilidade de criar variedade através da combinação e troca de diferentes blocos.

Na Era da Modularidade, tanto indústrias quanto acadêmicos tiveram grandes progressos nas teorias e métodos relacionados à modularidade. Em 1991, Ulrich e Tung conectam a modularidade a funcionalidade, advogando que a modularidade exige similaridade entre a estrutura funcional e física, assim como gestão das interações entre módulos; em 1996, Pahl e Beitz definem módulo como a realização física de uma função e definem quatro diferentes tipos de módulos baseados em uma série de funções, sendo básico, auxiliar, especial e adaptativo (MILLER; ELGARD, 1998).

Na Pan Modularidade, o estudo a respeito de modularidade se expandiu para vários campos, envolvendo todo o ciclo de vida do produto e migrando para áreas como as de serviço e gestão de conhecimento. Miller e Elgard (1998) citam uma tendência que leva a um entendimento mais abstrato do conceito de modularidade, enfatizando que a modularidade, em um contexto industrial pode ser vista como uma reutilização de recursos de engenharia.

1.3 A Modularização na década de 2000

Como já citado anteriormente, a modularização tem ganho mais destaque na academia e na indústria devido à sua capacidade de gerar variedade, possibilitando a estratégia de customização em massa. Desta forma, muitos dos métodos propostos na literatura visam a criação da variedade, gerando plataformas e famílias de produtos, e alguns métodos ganham extensões para lidar com tais questões (DANILIDIS *et al.*, 2011).

Em estudo preliminar, foi analisada a relação entre a customização em massa e a modularização através de uma pesquisa bibliométrica, a fim de contextualizar o tema. A pesquisa teve como objetivo ilustrar o estado da arte no estudo destes dois temas durante a década de 2000, a fim de identificar trabalhos e autores influentes, periódicos e tendências de estudo, bem como lacunas de pesquisa.

Através deste estudo preliminar pode-se perceber a importância da modularização na adoção da estratégia de customização em massa, relacionando-a não somente com a geração da variedade, mas também com a organização da produção, o envolvimento com o consumidor e a organização da cadeia de suprimentos em ambientes de customização. A pesquisa bibliométrica também apontou artigos que discutem os benefícios da modularização, tipos e níveis de modularidade, assim como apresentam métodos para a modularização de produtos ainda nas fases iniciais de desenvolvimento. A Figura 1.2 apresenta os artigos analisados na bibliometria, divididos em sete diferentes categorias, conforme similaridade de assuntos e abordagens.

2009		• Kong <i>et al.</i>	• Brun, Zorzini	• ElMaraghy, Mahmoudi • Squire <i>et al.</i> • Qu <i>et al.</i>	• Agard, Penz • Agard, Da Cunha, Cheung • Song, Kusiak	• Gu, Xue, Nee • Voss, Hsuan • Moon <i>et al.</i>	
2008	• Li, Huang, Newman • Olivarez-Benitez, Gonzalez-Velarde	• Zhuo, San, Seng	•Rugtusanatham, Salvador		• Kuroda, Mihira	• Li, Xue, Gu	
2007	• Siddique, Ninan • Williams <i>et al.</i> • Van Wie <i>et al.</i>	• Galan, Racero, Eguia, Garcia • Meng, Jiang, Huang • Meehan, Duffy, Whitfield • Holttta-Otto, de Weck • Jacobs, Vickery, Droge • Mikkola • Gupta, Roth	• Kumar • Ro, Liker, Fixson • Yang, Qi, Lu, Gu	• Huang, Zhang, Lo • Howard, Squire	• Wang, Lin • Thomas, Warsing • Tu, Xie, Fung • Blecker, Abdelkafi	• Ming <i>et al.</i>	
2006	• Shao <i>et al.</i>	• Zhang, Thor, Britton	• Fredriksson		• Da Cunha, Agard, Kusiak • Dekkers		
2005	• Tang, Chen, Ji	• Yeh, Wu • Fixson • Jose, Tollenaere	• Mukhopadhyay, Setoputro				
2004	• Siddique, Boddu	• Jiao, Zhang, Prasanna • Zha, Sriram, Lu • Hofer, Halman	• Tu <i>et al.</i> • Germani, Mandorli	• Zangiacomi <i>et al.</i> • Partanen, Haapasalo • Lin • Duray	• Coronado <i>et al.</i> • Salvador, Rungtusanatham, Forza • Mikkola, Skjott Larssen	• Fung, Chong, Wang • Yang, Burns, Backhouse • Kumar	
2003	• Du, Jiao, Tseng	• Rai, Allada	• Akkermans <i>et al.</i>				
2002	• Du, Jiao, Tseng	• Salvador, Forza, Rungtusanatham					
2001	• Du, Jiao, Tseng						
2000	• Duray <i>et al.</i>						
	Consumidor	Arquitetura	Modularidade	Aplicação-casos	Suprimentos	Produção	Outros

Figura 1-2: Categorias Bibliometria Modularidade e CM

Entre todos os artigos analisados na bibliometria, que abordam diferentes assuntos relacionados a modularização e customização em massa, encontra-se o artigo de Jose e Tollenaere (2005), quinto artigo mais citado na bibliometria, e que apresenta uma revisão de métodos de modularização e geração de plataformas. O artigo completo, com a descrição do método completa e análise dos artigos encontra-se no Apêndice A.

1.4 Tema e objetivos

Diante da crescente importância da estratégia de modularização tanto na academia quanto nas empresas, o tema dessa dissertação é a utilização de métodos de modularização no desenvolvimento de conceitos de produtos. Estes métodos auxiliam o processo de criação de

módulos em produtos e, no entanto, as empresas apresentam dificuldades em escolher um método que melhor se ‘encaixe’ em sua situação específica, bem como apresentam dificuldades em implementar tais métodos.

O objetivo geral desta dissertação é propor uma reestruturação de métodos de modularização para a criação e avaliação de conceitos, adaptados as particularidades de cada projeto. Este estudo se inicia com a busca de métodos de modularização existentes na literatura, com o objetivo de identificar os procedimentos utilizados por cada um destes métodos para a obtenção da modularização. Após estabelecer uma visão geral da situação atual, a segunda parte da dissertação prossegue com o estudo de um destes métodos, escolhido entre todos os estudados na primeira fase, com o intuito de adaptá-lo e propor melhorias que objetivam uma mais fácil implementação. A terceira parte visa testar a eficácia das melhorias e adaptações propostas na segunda parte, testando o método em um produto real e avaliando a qualidade do resultado proveniente da aplicação. Esta dissertação é dividida em 3 artigos científicos, que correspondem as 3 fases da pesquisa.

Os objetivos específicos deste trabalho são aqueles desenvolvidos em cada um dos três artigos constituintes da dissertação e são listados abaixo:

- Realizar um levantamento dos métodos existentes, classificá-los conforme área de aplicação, visando facilitar o processo de tomada de decisão a respeito de que métodos e abordagens são mais adequados para as empresas.
- Apresentar uma proposta de adaptação de método para modularização, considerando diferentes tipos de projetos, propondo melhorias e adaptações para facilitar a implementação.
- Testar a eficácia do método proposto em um produto, configurando-o de forma a suprir as necessidades do projeto e os objetivos da aplicação.

1.5 Justificativa do tema e objetivos

A implementação da modularização é um empreendimento complexo e vasto, com implicações que se configuram como um desafio para muitas empresas (MODULAR DESIGN PLAYBOOK, 2010). Para alcançar os benefícios da modularização, as empresas precisam definir novas prioridades e adotar novas práticas em seus processos de criação de produtos (SANCHEZ; COLLINS, 2001). Estudos mostram que a implementação de métodos formais de identificação e geração de módulos traz economia significativa de tempo e recursos quando comparada à utilização de conhecimento e ‘instinto natural’ das equipes de

desenvolvimento (STEWART; YAN, 2008). No entanto, a literatura indica uma falta de estudos mais detalhados e revisões sistemáticas abordando essas novas práticas de auxílio à adoção do design modular (GERSHENSON; PRASAD; ZHANG, 2004; DANIILIDIS *et al.*, 2011).

Apesar dos benefícios relacionados à utilização de métodos de modularização formalizados na literatura, verifica-se uma baixa aderência destes métodos e ferramentas aos processos de desenvolvimento das empresas. Esta característica é resultado da dificuldade em aplicar estas práticas para a realidade do desenvolvimento de produto das empresas (KAHN *et al.*, 2012). A principal justificativa para o tema proposto está na identificação da importância da utilização de métodos desenvolvidos para a modularização de produtos, ao mesmo passo em que se constata dificuldades por partes das empresas em escolher e implementar estes métodos. Lau (2011), em estudo dirigido com empresas de manufatura que utilizam a estratégia de modularização, relata que as empresas não utilizam métodos específicos para a modularização de seus produtos. Os motivos relatados pelos gestores destas empresas são a dificuldade de implementação e o entendimento dos métodos, além da constatação de que um método estruturado consome tempo de desenvolvimento, um tempo que é cada vez mais reduzido nas empresas. O projeto modular demanda maior esforço inicial, que é recompensado em médio a longo prazo pela geração de produtos variantes, porém, em empresas sem uma visão de lucro a longo prazo esses benefícios não são considerados.

Neste contexto, um método para modularização mais flexível, cuja dificuldade de implementação seja compatível com o grau de dificuldade de cada projeto pode ser útil, apresentando uma forma mais simples e mais rápida para modularizar conforme as particularidades dos projetos pertencentes ao portfólio da empresa. Segundo Shenhar *et al.* (2005), um dos maiores equívocos relacionados a gestão de projetos no processo de desenvolvimento de produtos é considerar que todos os projetos são iguais, e assim sendo, podem ser geridos com a mesma gama de métodos e técnicas. Sendo assim, a seleção e o emprego de métodos para a modularização também deve obedecer a critérios de diferenciação dos projetos, pois as empresas passam por um processo de seleção e implementação de métodos adequados a sua situação específica.

1.6 Métodos de pesquisa

Esta pesquisa é de natureza aplicada, de abordagem qualitativa, com objetivos de caráter exploratório e que adotou os seguintes procedimentos metodológicos: bibliometria, revisão sistemática, pesquisa bibliográfica e entrevistas com especialistas.

A bibliometria, realizada em uma fase preliminar da dissertação, teve como objetivo contextualizar o tema perante uma determinada área do conhecimento, reconhecendo sua pertinência e sua evolução com o tempo. Esta bibliometria é apresentada no artigo '*Mass customization and Modularity: a theoretical position in the past decade*', no Apêndice A.

A revisão sistemática, por sua vez, visou levantar o estado da arte, fornecendo uma visão geral dos métodos existentes para a modularização de produtos e da sistemática de funcionamento destes métodos. A revisão sistemática corresponde ao artigo 1 desta dissertação, fornecendo uma visão geral do estudo de métodos de modularização.

No artigo 2 foi realizada pesquisa bibliográfica e entrevista com especialistas. As entrevistas com especialistas envolveram a participação de um especialista acadêmico e dois especialistas profissionais de empresa multinacional, com o objetivo de conferir a relevância das questões teóricas identificadas na literatura, bem como suscitar novas questões, nascidas no campo prático, e importantes para o desenvolvimento da pesquisa. Os dados coletados nestas entrevistas ajudaram a compor o método adaptado proposto no segundo artigo, assim como foram importantes para levantar questões mais abrangentes relacionadas à aplicabilidade do método, apresentadas no artigo 3, corroborando a ideia de que a implementação transcende as questões inerentes ao método, e envolve toda a questão cultural e organizacional de uma empresa.

No artigo 3, onde o método adaptado é aplicado, foi realizada pesquisa bibliográfica, bem como a aplicação do método com a participação de 3 técnicos especialistas em máquinas de hemodiálise, que auxiliaram a aplicação do método fornecendo o conhecimento específico a respeito da máquina, seu funcionamento e manutenção. A máquina de hemodiálise é um equipamento estratégico em saúde, tanto pelo seu caráter técnico quanto de mercado, uma vez que não existem empresas nacionais fabricantes. Além disso, é um equipamento crítico de terapia relacionado às pesquisas do Centro de Referência em Tecnologias de Equipamentos e Insumos Estratégicos para a Saúde - CRETIES/UFRGS, uma iniciativa do Ministério da Saúde.

1.7 Delimitações do trabalho

Os métodos para modularização de produtos podem ser divididos em métodos para produtos individuais, para famílias e para portfólios (DANIILIDIS *et al.*, 2011). Neste trabalho foram abordados métodos para a modularização de produtos individuais, delimitando o espaço de análise e garantindo que as comparações sejam feitas entre métodos que trabalham o problema da modularização em um mesmo nível de detalhe. Essa escolha parte do pressuposto de que a geração de variedade é somente um dos objetivos que podem ser alcançados com a modularização, e não o único.

Além da amplitude de aplicação, outros temas permeiam o estudo de métodos para modularização. Segundo Ulrich (1995), as arquiteturas modulares podem ser categorizadas conforme a organização do sistema modular (*sectional, slot e bus*). Além de variar conforme a organização de sua arquitetura, o nível de modularidade de um produto também pode variar. Um produto pode apresentar uma arquitetura mais modular do que outro, e encontram-se na literatura formas de mensurar o grau de modularidade que um produto possui (MIKKOLA, 2006). Estes temas, apesar de relevantes no estudo da modularização, não foram abordados por este trabalho. Ressalta-se que os métodos discutidos neste artigo são voltados para utilização por empresas de manufatura.

1.8 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos:

O capítulo 1 é um capítulo introdutório que conta com comentários iniciais, conceituação e perspectiva história de evolução do tema, temas e objetivos, justificativa do tema e objetivos, métodos adotados na dissertação, delimitações e estrutura do trabalho.

O capítulo 2 apresenta o primeiro artigo, intitulado “Seleção de Métodos para Modularização no desenvolvimento de Produtos: revisão sistemática” submetido ao periódico *Produção*.

O capítulo 3 apresenta o segundo artigo, intitulado ‘Adaptação do *ModularFunction Deployment* para o desenvolvimento de conceitos no processo de desenvolvimento de produto’, e sua versão em inglês tem submissão prevista para o periódico *Design Studies*.

O capítulo 4 apresenta o terceiro artigo, intitulado ‘Aplicação do *Modular Function Deployment Adapted* em máquina de hemodiálise’. Pretende-se submetê-lo para o periódico *Design Studies*.

O capítulo 5 é composto pelas considerações finais, divididas em conclusões a respeito do trabalho realizado e lacunas para futuras pesquisas.

A Figura 1.3 apresenta a estrutura desta dissertação de forma gráfica, explicitando as informações contidas no capítulo 1, como questões de pesquisa, objetivos e métodos de cada um dos artigos que compõem este trabalho.

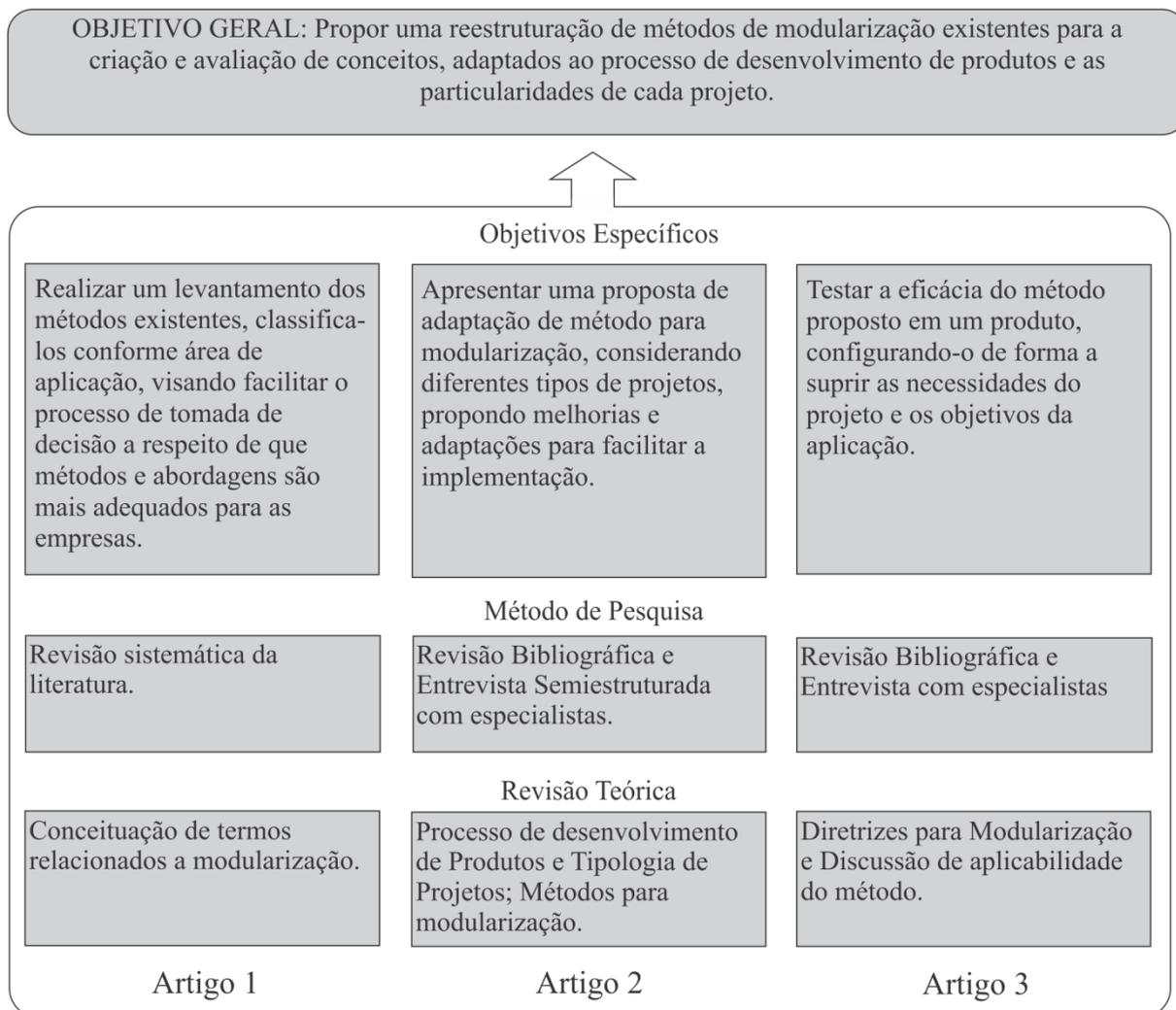


Figura 1-3: Estrutura da dissertação

1.9 Referências Bibliográficas

BLACKENFELT, M. Managing complexity by product modularization: balancing the aspects of technology and business during the design process. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2001.

DANIILIDIS, C.; ENBLIN, V.; EBEN, K.; LINDEMANN, U.. A Classification framework for product modularization methods. Proceedings of the International Conference on Engineering Design, Dinamarca, 2011.

DURAY, R. Mass customization origins: mass or custom manufacturing? *International Journal of Operations & Production Management*, v. 22, p. 314-328, 2002.

ERIXON, G.; VON YXKULL, A.; ARNSTROM, A.. Modularity – the basis for product and Factory Reengineering. *Annals of the CIRP* 45, 1-6, 1996.

GERSHENSON J.K.; PRASAD G.J.; ZHANG Y.. Product modularity: measures and design methods. *Journal of Engineering Design* v.15, p. 33-51, 2004.

GERSHENSON, J.K.; PRASAD, G.J. Modularity in product design for manufacturability. *International Journal of Agile Manufacturing*, vol 1, 1997.

GERSHENSON, J.K.; PRASAD, G.J.; ZHANG, Y..Product modularity: definitions and benefits. *Journal Engineering Design* v. 14, p. 295-313, 2003.

HOLMQVIST, T.K.P.; PERSSON, M.L..Analysis and Improvement of Product Modularization Methods: Their Ability to Deal with Complex Products. *Systems Engineering* v. 6, p. 195-209, 2003.

HOLTTA-OTTO, K.; DE WECK, O..Degree of modularity in engineering systems and products with technical and business constraints. *Concurrent Engineering-Research and Applications* v. 15, p. 113-126, 2007.

JOSE, A.; TOLLENAERE, M.. Modular and platform methods for product family design: literature analysis. *Journal of Intelligent Manufacturing* v. 16, p. 371-390, 2005.

KAHN, K.B.; BARCZAK, G.; NICHOLAS, J.; LEDWITH, A.; PERKS, H..An Examination of New Product Development Best Practice. *Journal of Production Innovation Management* v. 29, p. 180-192, 2012.

KEXIN, H..Advantages and disadvantages of modularity.Proceedings from the 2nd seminar on development of modular products. Dalarna University, Suécia, 2004.

KONG, F.B.; MING, X.G.; WANG, L.; WANG, X.H.; WANG, P.P..On Modular Products Development. *Concurrent Engineering, Research and Applications* v. 17, p. 291-300, 2010.

KUDERER, K. Benefits of Modularity.The 4th student conference on Development of Modular Products, 74-81; 2006.

LAU, A.K.W. Critical success factors in managing modular production design: Six company case studies in Hong Kong, China and Singapore. *Journal Engineering and Technology Management* v. 28, p. 168-183, 2011.

MIKKOLA, J. H. Capturing the degree of Modularity Embedded in Product Architectures. *Journal of Product Innovation Management* v. 23, p. 128-146, 2006.

MILLER, T.D.; ELGARD, P.. Defining Modules, Modularity and Modularization : Evolution of the concept in a Historical Perspective. Proceeding of the 13th IPS Research Seminar, Dinamarca, 1998.

MODULAR DESIGN PLAYBOOK..Guidelines for assessing the Benefits and Risks of Modular Design.The Corporate Executive Board Company, 2010.

NEPAL, B., MONPLAISIR, L.; SINGH, N..Integrated fuzzy logic-based model for product modularization during concept development phase. *International Journal of Production Economics* v. 96, p. 157-174, 2005.

PILLER, Frank T. Mass customization: reflections on the state of the concept. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 16, n. 4, p. 313-334, October 2004

PIMMLER, T.U.; EPPINGER, S.D..Integration analysis of product decompositions. ASME Design Theory and Methodology Conference, Minneapolis, 1994.

PINE II, B. Joseph. *Mass Customization: the new frontier in busines competition*. Boston: Harvard Business School Press, 1993.

SANCHEZ, R.; COLLINS, R.P..Competing – and Learning – in Modular Markets. *Long Range Planning* v.34, p. 645-667, 2001.

SHENHAR *et al.*. Toward a NASA-Specific Project Management Framework. *Engineering Management Journal* v.17, p.8-17, 2005.

SOARES, M. A. T.; OKIMOTO, M. L. L. R. Modularidade e flexibilidade de uso de mobiliário infantil. Anais do 5º Congresso Internacional de Pesquisa em Design. Out. 2009

STARR, M.K.“Modular production – a new concept”, Harvard Business Review, v. 3, p. 131-142, 1965.

STARR, M.K. Modular Production: a 45 year old concept. *International Journal of Operation and Production Management* v.30, p. 7-19, 2010.

STEWART, B.; YAN, X..Modular Product Family Development within a SME. In: Global design to gain a competitive edge: an holistic and collaborative design approach based on computational tools, 21-30, 2008.

ULRICH, K.T..Design: Creation of artifacts in society. Published by the University of Pennsylvania, 2005.

2. SELEÇÃO DE MÉTODOS PARA MODULARIZAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS: REVISÃO SISTEMÁTICA

Monique Sonogo (PPGEP/UFRGS)

moniqueds@producao.ufrgs.br

Márcia Elisa Soares Echeveste, Dra. (PPGEP/UFRGS)

echeveste@producao.ufrgs.br

Resumo:

A estratégia de modularização em produtos é mencionada como razão de diversos benefícios para as empresas. O objetivo deste artigo é identificar na literatura os métodos para desenvolvimento da modularização em produtos, com o intuito de avaliar sua aplicabilidade e ferramentas utilizadas, visando facilitar a escolha do método mais adequado para cada empresa. Para atingir estes objetivos foi realizada uma revisão sistemática, de acordo com a repetibilidade e importância indicada nos artigos. Como resultado foram identificados seis diferentes métodos para modularização de produtos. Como contribuição do artigo destaca-se a análise dos métodos com relação às etapas para formação dos módulos (decomposição, integração e avaliação), bem como análise com relação a parâmetros de classificação quanto a área de atuação de cada método (variedade, geração e ciclo de vida). Por fim, este estudo oferece um guia para as empresas, contextualizando ambientes de aplicação e relacionando conhecimentos necessários para aplicação dos métodos.

Palavras Chave: módulos, desenvolvimento de produto, design de produto e desenvolvimento, metodologia de design de produto.

Abstract: The strategy of product modularization is seen as a reason for several benefits for companies. The objective of this paper is to identify in the literature methods for developing modularization in products, in order to assess their applicability and tools used, aiming at favoring the choice of the most suitable method for each company. In order to achieve these objectives, a systematic review was carried out according to the repeatability and importance shown in the papers. As a result, six different methods were identified for product modularization. This paper contributes with an analysis of methods in relation to the module formation steps (decomposition, integration and evaluation), as well as with an analysis related to classification parameters regarding the field of each method (variety, generation and

life cycle). Finally, this study offers guidelines for companies, putting application environments into context and relating necessary knowledge for applying those methods.

Keywords: modules, product development, product design and development, product design methodology.

2.1 Introdução

Muitas empresas estão diante do problema de proporcionar uma maior variedade de produtos para o mercado, mas ao mesmo tempo mantendo a menor variedade possível entre os produtos de modo a manter economia de escala (BI; ZHANG, 2001). Em um mercado global mais competitivo e segmentado, a necessidade de diversificar é emergente (EGGEN, 2003). Desta forma, a complexidade interna no desenvolvimento de novos produtos e serviços nas empresas tem crescido para satisfazer a variedade externa, necessária para sobreviver no mercado (DANIILIDIS; BAUER; LINDEMANN, 2012). Esta situação traz à tona a necessidade de estratégias para lidar com o aumento da variedade para o mercado, que traz aumento de complexidade no desenvolvimento de produtos.

A estratégia de configuração de produtos denominada modularização foi primeiramente mencionada na literatura nos anos 60 (STARR, 1965). Desde então, a modularização tem ganho destaque tanto na área acadêmica quanto na indústria. Segundo Stake (2000) as razões para modularizar produtos podem ser agrupadas em três áreas estratégicas: gestão da variedade, gestão do desenvolvimento e manufatura de produtos, e questões relacionadas ao pós venda.

Entre os benefícios alcançados pela modularização pode-se citar o desenvolvimento mais rápido de produtos, a redução do custo de desenvolvimento de produtos futuros (STONE; WOOD; CRAWFORD, 2000) e a utilização do mesmo módulo em múltiplos produtos permitindo variedade (HOLT TA OTTO; de WECK, 2007). Além de outros aspectos como economia de escala, economia de custos com estoque e logística, flexibilidade na reutilização de componentes, redução do tempo de montagem e do tempo de produção e fabricação de módulos em paralelo (JOSE; TOLLENAERE, 2005). Bi e Zhang (2001) também citam a dissociação de tarefas e a facilidade de aprimorar, manter, reparar e descartar o produto como benefícios da modularização. Além de todos estes benefícios, a modularização também facilita a introdução de novas tecnologias, permitindo atualização dos produtos (GERSHENSON; PRASAD; ZHANG, 2003). Algumas das desvantagens relacionadas ao projeto modular são alto investimento inicial, aumento da complexidade de

desenvolvimento, falta de foco no cliente, riscos com relação à propriedade intelectual (MODULAR DESIGN PLAYBOOK, 2010), assim como o desenvolvimento de produtos similares, devido a maior facilidade de cópia na reutilização de módulos (KONG *et al.*, 2010).

Da mesma forma que o interesse pelo estudo do desenvolvimento de produtos modulares, a atividade de pesquisa e desenvolvimento de métodos e métricas para a modularização também tem crescido (GERSHENSON; PRASAD; ZHANG, 2004). O desenvolvimento de produtos modulares requer maior comprometimento da equipe envolvida, uma vez que necessita de mais experiência, coordenação, esforço, tempo, e é mais caro que o design de produtos tradicionais, pois considera a concepção de diversos produtos ao mesmo tempo (JOSE; TOLLENAERE, 2005). Conforme mencionado, a modularização tem o potencial de trazer grandes benefícios às empresas, porém a divisão de produtos em módulos não é uma tarefa simples (HOLMQVIST; PERSSON, 2003).

A forma como a divisão dos produtos em módulos é feita e a extensão em que o produto é modularizado influenciam muito os benefícios que a empresa poderá obter (HOLMQVIST; PERSSON, 2003). Para isso, métodos e ferramentas são propostos para auxiliar o processo de modularização de produtos. Todos os métodos para a modularização têm o objetivo de agrupar componentes em módulos, porém cada método foi desenvolvido a partir de um ponto de vista diferente e proveniente de diferentes áreas de aplicação (DANIILIDIS *et al.*, 2011). No entanto, verifica-se na uma baixa aderência destes métodos e ferramentas aos processos das empresas. Esta característica é resultado da dificuldade em aplicar estas práticas na realidade do desenvolvimento de produto das empresas (KAHN *et al.*, 2012). Tendo em vista a diversidade de métodos encontrados na literatura, o objetivo deste trabalho é fazer um levantamento dos métodos existentes, através de revisão sistemática da literatura, com o intuito de entender e classificá-los, visando facilitar o processo de tomada de decisão a respeito de que métodos e abordagens são mais adequados conforme a área de aplicação.

Após a introdução o artigo apresenta uma seção de terminologia e conceitos, na qual são explicitados conceitos pertinentes ao entendimento do trabalho, bem como são feitas relações entre estes conceitos. Em seguida, é apresentado o método de pesquisa para a revisão sistemática. Após a aplicação dos passos constituintes da revisão sistemática, vinte artigos foram encontrados apresentando métodos para a modularização de produtos, e os mesmos são analisados conforme parâmetros de classificação encontrados na literatura. Após, os métodos são apresentados de forma breve e decompostos em etapas. Na seção subsequente, de discussão sobre o tema, os métodos são abordados conforme as etapas para obtenção da

modularização. Por fim, são tecidas as considerações finais a respeito do trabalho e apresentação de lacunas de pesquisa.

2.2 Terminologia e Conceitos

O termo “módulo” é amplamente utilizado em contextos diferentes. Associado a este conceito foram encontrados na literatura demais termos chave importantes para o entendimento desta estratégia, como interface, arquitetura de produto, plataforma de produto, família de produto e customização em massa. Estes conceitos são fundamentais para o leitor no entendimento das publicações e linguagem relacionados à área de modularização de produtos. Na área de design de produto não existe uma definição universalmente aceita para o conceito de módulo (GERSHENSON; PRASAD; ZHANG, 2004). Segundo Miller e Elgard (1998) módulo é uma unidade funcional essencial e auto-contida em relação ao produto do qual faz parte, possuindo interfaces padronizadas e interações que permitem, através de combinações, a composição de produtos. Para os mesmos autores, modularidade é um atributo de um sistema relacionado com a sua estrutura e funcionalidade (um sistema que possui modularidade possui unidades funcionais auto-contidas com interfaces padronizadas); e modularização é a atividade em que a estruturação em módulos ocorre. O termo auto-contido, utilizado pelos autores, refere-se a uma função realizada dentro do módulo e limitada a ele.

Complementariamente, interfaces são as superfícies de contato entre os módulos e podem ser funcionais, mecânicas (conectores, plugs), e elétricas (sinais, força); interações descrevem relações de entrada e saída entre módulos e podem ser relações de energia, de informações, materiais ou espaciais (MILLER; ELGARD, 1998).

Nepal, Monplaisir e Singh (2005) defendem que a modularização tem por objetivo desenvolver arquiteturas de produto que contenham unidades fisicamente destacáveis, de forma a permitir que estas possam ser utilizadas em variações de um produto ou em linhas de produtos diferentes, o que se dá por meio da padronização das interfaces. Segundo Stewart e Yan (2008) independente da variedade de conceitos diferentes a respeito do tema, é possível dizer que as características principais relacionadas à modularidade são: independência estrutural, independência funcional, minimização de interfaces e interações com outros módulos ou influências externas.

Arquitetura de produto é o esquema pelo qual a função de um produto é atribuída aos componentes físicos (ULRICH, 1995). A arquitetura de um produto pode ser dividida em dois

tipos: integral e modular. A escolha da arquitetura do produto tem amplas implicações para o desempenho, mudanças, variedade e fabricação de produtos, sendo fortemente associada às capacidades da empresa e a sua estratégia (PIMMLER; EPPINGER, 1994). Arquitetura integral é definida como estrutura física onde os elementos funcionais são ligados a um único, ou a um pequeno número, de elementos físicos. Enquanto que arquiteturas modulares possuem subestruturas que tem correspondência de um-para-um com um subconjunto de um modelo funcional de produto (STONE; WOOD; CRAWFORD, 2000).

Outro conceito que permeia o estudo da modularidade é o conceito de plataforma de produto. Plataforma de produto é um conjunto de características, componentes ou subsistemas que permanecem constantes de produto para produto dentro de uma determinada família de produtos (MOON; SIMPSON; KUMARA, 2010). Um conjunto comum de módulos compartilhados entre produtos formam a plataforma de produto, que é utilizado em todos os variantes de uma mesma família (ZHANG; THOR; BRITTON, 2006; JOSE, TOLLENAERE, 2005).

Por sua vez, uma família de produtos é um conjunto de produtos relacionados e derivados de uma plataforma comum para atingir alta variedade externa com o mínimo de variedade interna (ZHANG; THOR; BRITTON, 2006). O desenvolvimento de família de produtos tem sido reconhecido como um meio efetivo para alcançar a economia de escala a fim de acomodar uma maior variedade de produtos em diferentes nichos de mercado (DU; JIAO; TSENG, 2001).

Um dos objetivos mais pertinentes com relação à adoção da modularidade e ao desenvolvimento de famílias de produtos é a customização em massa, isto é, a habilidade de prover produtos customizados por um valor similar aos produzidos em larga escala. Pine (1993) argumenta que a modularidade é chave para alcançar a customização em massa. Segundo Duray (2002) a modularidade é o aspecto chave para alcançar o volume de escala (the 'mass'), enquanto o envolvimento do consumidor gera a customização. Da Silveira *et al.* (2001) defendem que produtos provenientes da customização em massa devem ser modulares, versáteis e constantemente renovados.

Sendo assim, a transição recente da produção em massa para a customização em massa tem forçado as empresas a desenvolverem famílias de produtos com uma plataforma comum para aumentar a variedade do design, diminuir o time-to-market e reduzir os custos dos produtos (ZHANG; THOR; BRITTON, 2006).

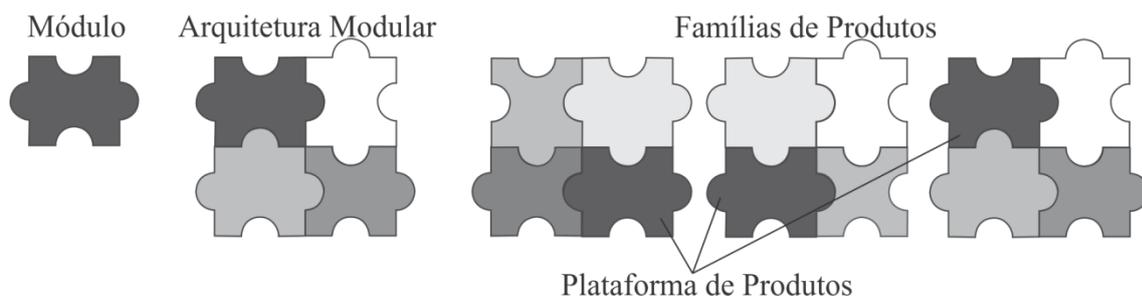


Figura 2-1: Associação de conceitos relacionados a modularidade

Na Figura 2.1 são apresentados os conceitos discutidos nesta seção de forma gráfica, como um quebra cabeças. O módulo é uma peça, que unida a outras peças forma o produto. Uma família de produtos é um conjunto de produtos formados por peças que se repetem de um produto para o outro, sendo que a peça presente em todas as variantes é a plataforma de produto.

2.3 Procedimentos Metodológicos

Para o levantamento qualitativo dos métodos existentes para a modularização no desenvolvimento do conceito do produto foi utilizado o método de revisão sistemática da literatura proposto por Kitchenham (2004). A revisão sistemática consiste em identificar, avaliar e interpretar as pesquisas relevantes relacionadas a um específico problema, tópico, área ou fenômeno de interesse. A seguir, são explicitadas as etapas componentes da revisão sistemática segundo Kitchenham (2004).

Questão de pesquisa: A questão formulada para guiar este estudo é: Quais são os métodos existentes para identificar, selecionar e avaliar conceitos em projetos modulares no desenvolvimento de produtos? Neste trabalho adotou-se a definição de método de Holmqvist e Persson (2003), como uma ferramenta de suporte para alcançar os objetivos estipulados da modularização.

Desenvolvimento de um protocolo de busca: O desenvolvimento de um protocolo de busca se inicia pela definição das palavras chave. Assim como descrito por Kitchenham (2004), foi conduzida uma busca preliminar com o intuito de avaliar a quantidade de artigos relevantes, testar termos derivados da questão de pesquisa e revisar resultados de pesquisas já desenvolvidas. Nesta etapa, foi verificado que a busca pelo termo ‘*modularization methods*’ traz poucos resultados gerais e poucos estudos relevantes. Seguiu-se uma rodada de testes, onde foi verificado que os melhores resultados advinham da busca por termos relacionados a área de desenvolvimento de produto, como o termo ‘arquitetura de produto’ e termos que

ligavam a modularidade a seus objetivos, como a customização em massa, a geração de famílias e plataformas. Estes termos que permeiam o estudo da modularização possibilitaram a criação de um algoritmo de pesquisa amplo que não só permitiu o acesso aos métodos, como também a artigos que deles fazem uso com vista a diferentes objetivos. Após a leitura dos artigos, considerou-se a inclusão de dois artigos à revisão sistemática. O artigo de Pimmler e Eppinger (1994) foi incluso por ser amplamente citado e utilizado entre os trabalhos encontrados na revisão, e sentiu-se a necessidade de recorrer ao artigo original para melhor descrever o método. Também foi incluso o método de Erixon (1998), referenciado por diversos trabalhos (ALIZON; SHOOTER; SIMPSON, 2007; HOLTA OTTO; OTTO, 2005; NEPAL; MONPLAISIR; SINGH, 2005; SCHUH; LENDERS; ARNOSCHT, 2009; SAND; GU; WATSON, 2002; PARK *et al.*, 2008; MEEHAN; DUFFY; WHITFIELD, 2007; JIANG; ALLADA, 2005; ZHANG; TOR; BRITTON, 2006; HOLTTA OTTO; TANG; OTTO, 2008; HOLTTA OTTO; WECK, 2007; KONG *et al.*, 2009; ARCHER; SCALICE; 2010;), mas que não foi encontrado pela busca nas bases de dados pois foi publicado em forma de livro e tese de doutorado.

Protocolo de Busca - Março de 2012		
Quais são os métodos existentes para identificar, selecionar e avaliar conceitos em projetos modulares no desenvolvimento de produtos?		
	Science Direct	Web of Science
((“mass customization” OR “product platform” OR “product family” OR “product architecture”) AND modul*) em títulos, resumos e palavras-chave (sem restrição quanto a data de publicação)	62	565
Somente artigos de periódicos	62	292
Língua inglesa	—	291
Áreas de conhecimento: Operations Research Management Science, Eng. Manufacturing, Eng. Industrial, Management, Computer Science Interdisciplinary Applications, Business, Eng. Multidisciplinary e Planning Development.	—	232
Total de artigos:	294	
Remoção dos artigos duplicados	(-19) = 275	
Inclusão de literatura cinzenta:	(+2) = 277	

Figura 2-2: Condução das buscas nas bases de dados

Critérios para a seleção de artigos: A avaliação dos artigos se deu por meio de um processo de triagem baseado em duas etapas, conforme descrito em Brereton *et al.* (2007). Na primeira etapa foram lidos títulos, resumos e palavras chave e eliminados os artigos que claramente não tratavam da questão de pesquisa. Artigos cujo resumo e título não deixavam claro o escopo do trabalho, foram mantidos para leitura na segunda etapa. Na segunda etapa os textos foram lidos por completo e foram considerados para o escopo desta pesquisa artigos que estavam de acordo com os critérios de inclusão e exclusão estabelecidos.

Foram inclusos os trabalhos que apresentam métodos para a modularização de produtos individuais, isto é, através de uma sequência de etapas agrupam os componentes de um produto em módulos. Foram excluídos os trabalhos que apresentam método para modularização de famílias e plataformas de produtos.

Neste trabalho, optou-se por analisar os métodos para modularização de forma mais restrita, considerando somente os métodos aplicáveis a arquiteturas individuais, pois respondem diretamente a questão de pesquisa. Assim como no trabalho de Gershenson, Prasad, Zhang (2004), os métodos para geração de famílias e plataformas, mesmo que possam ser utilizados para a modularização de produtos únicos, não foram considerados neste trabalho. Desta forma, o espaço de análise é delimitado, garantindo que as comparações sejam feitas entre métodos que trabalham o problema da modularização em um mesmo nível de detalhe.

Avaliação da qualidade dos estudos: Foram estabelecidos como critérios para o acesso da qualidade dos estudos a apresentação de etapa de decomposição da arquitetura e integração de componentes em módulos com suficiente detalhe, esclarecendo toda a sequência de atividades utilizada para se obter a modularização.

Estes critérios visam avaliar os artigos com relação à integralidade da informação, excluindo os artigos que apresentavam resultados questionáveis ou incompletos (BRERETON *et al.*, 2007). Nesta etapa foram excluídos os artigos que não apresentavam com detalhe o processo de modularização, como por exemplo, Huang e Hsu (2011). Após a avaliação de qualidade, restaram seis métodos que atenderam a todos os requisitos estabelecidos na revisão, e que serão analisados neste artigo.

Extração de dados: A extração de dados tem o objetivo de coletar todas as informações necessárias para responder a questão e aos critérios de qualidade do estudo e precisa ser tabulada de maneira consistente com a questão de pesquisa, para realçar as similaridades e diferenças entre os estudos (KITCHENHAMM, 2004).

Os métodos foram analisados com relação ao framework proposto por Daniilidis *et al.* (2011), com relação a parâmetros de variedade, geração e ciclo de vida. Também foram analisados conforme a divisão proposta por Holmqvist e Persson (2003), que consideram três fases críticas para a modularização: a fase de decomposição, integração e avaliação. Estas três fases correspondem aos conceitos identificar, selecionar e avaliar utilizados na questão de pesquisa da revisão sistemática, e são melhor discutidos na continuidade deste artigo.

2.4 Métodos para Modularização

Diferentes técnicas e metodologias já foram propostas na literatura para ajudar às empresas a desenvolver produtos modulares. Estudos mostram que a implementação de métodos formais de identificação e geração de módulos traz economia significativa de tempo

e recursos se comparada à utilização de conhecimento e ‘instinto natural’ das equipes de desenvolvimento (STEWART; YAN, 2008). Os seis métodos resultantes da revisão sistemática são apresentados na Figura 2.3. A primeira coluna apresenta os métodos e as abreviações pelas quais os mesmos são referidos no restante do trabalho. Na última coluna, nomeada Artigos, são apresentados os artigos que se utilizam daquele método encontrados na revisão sistemática, e em negrito o artigo primário (seminal), na qual o método foi proposto.

Método	Objetivos	Artigos
Design Structure Matrix - DSM	Documentar as interações entre os elementos de um produto, que podem ser espaciais, de energia, de informação ou de material, e identificar potenciais agrupamentos com base em critérios pré-estabelecidos pela equipe	Pimmler e Eppinger, 1994; Helmer, Yassine, Meyer, 2010; Alizon, Shooter, Simpson, 2007; Holtta Otto, de Weck, 2007; Yu, Yassine, Goldberg, 2007; Holtta Otto, Otto, 2005; Meehan, Duffy, Whitfield, 2007; Park et al., 2008; Sered, Reich, 2006.
Modular Function Deployment - MFD	Modularizar com vista a objetivos estratégicos da empresa	Erixon, 1998
Método Heurístico - 2000	Identificar módulos de acordo com fluxos importantes em uma estrutura funcional.	Stone, Wood, Crawford, 2000; Zhuo, San, Seng, 2008; Zha, Sriram, 2006; Chandrasekaram, Stone, McAdams, 2004; Stone, McAdams, Kayyalethekkel, 2004; Dahmus, Gonzales-Zugasti, Otto, 2001; Stone, Wood, Crawford, 2000.
Design for Variety - DfV	Incorporar padronização e modularização para redução de custos futuros e de esforços de projeto.	Martin e Ishii, 2002
House of modular Enhancement - HOME	Adicionar questões relacionadas ao ciclo de vida do produto ainda na fase de projeto, através do redesign de produtos.	Sand, Gu, Watson 2002
Fuzzy Logic Based - FLB	Otimizar a arquitetura do produto com vista aos custos, mas também com relação a qualidade, confiabilidade e manufaturabilidade.	Nepal, Monplaisir e Singh, 2005

Figura 2-3: Métodos para modularização encontrados na literatura

Design Structure Matrix

Segundo Thebeau (2001), o DSM é uma ferramenta útil para representar as relações entre elementos diferentes, que podem ser componentes físicos, sistemas, parâmetros ou qualquer outro item onde possa ocorrer interação e interface. O DSM é uma matriz na qual os

componentes do produto são registrados nas linhas e nas colunas. Para cada cruzamento de linha e coluna, a equipe assinala se um grupo de componentes é fisicamente conectado a outro, e assume-se que é melhor que fiquem em um mesmo módulo do que separados. O DSM é construído, basicamente, em três passos: (i) decomposição do sistema em elementos; (ii) análise das interações físicas e funcionais entre os elementos; e (iii) identificação dos potenciais agrupamentos (PIMMLER; EPPINGER, 1994).

A decomposição do sistema em elementos consiste na descrição do conceito do produto em termos de elementos físicos e funcionais que permitam atingir as funções do produto. A análise das interações físicas e funcionais entre os elementos visa documentar as interações entre os elementos, que podem ser espaciais, de energia, de informação ou de material (PIMMLER; EPPINGER, 1994). A identificação dos potenciais agrupamentos visa agrupar os elementos em blocos com base em critérios pré-estabelecidos pela equipe. Esses blocos definem a arquitetura do produto.

Modular Function Deployment

Modular Function Deployment (ERIXON, 1998) é um método que considera parâmetros de gestão mais estratégicos e abstratos no desenvolvimento do projeto modular. É um método estruturado com o objetivo de encontrar o projeto de produto modular ideal levando em consideração as necessidades específicas das empresas (ERICSSON; ERIXON, 1999). O MFD é composto de cinco etapas, iniciando pelos requisitos dos clientes, escolha de soluções técnicas, modularização, análise de interfaces e aprimoramentos intra-módulos.

A modularização do produto é feita na matriz MIM, uma matriz em que as soluções técnicas dos produtos são acessadas contra as diretrizes de modularização, que são diferentes critérios para realizar a modularização durante todo o ciclo de vida do produto. A matriz é preenchida de forma similar a uma matriz de QFD, e quando existem fortes motivos para que uma solução se transforme em um módulo, pontua-se com 9, para um motivo de força média pontua-se com 3, fraco motivo pontua-se com 1, e a inexistência de motivos figura como zero. Após o preenchimento da matriz, são somadas as pontuações adquiridas pelas soluções, e as soluções com maior pontuação são candidatas a tornarem-se módulos. As soluções com baixa pontuação não apresentam fortes motivos para tornarem-se módulos sozinhas e, portanto, podem ser integradas às demais soluções conforme indicações de similaridade apontadas na própria MIM.

Método Heurístico

Stone, Wood e Crawford (2000) introduziram uma abordagem sistemática para identificar os módulos de um produto em uma base funcional, na qual os módulos são identificados de acordo com os fluxos importantes na estrutura funcional. Na fase de concepção de produtos, grupos de subfunções relacionados por fluxos são observados para formar subsistemas ou módulos do produto.

O método proposto pelos autores consiste em três diferentes estratégias para a identificação dos módulos: fluxo dominante, fluxo ramificado e fluxo conversão-transmissão. O fluxo dominante examina cada fluxo não ramificado de uma estrutura funcional e agrupa as subfunções por onde o fluxo percorre até que ele saia do sistema ou se transforme em outro fluxo. Portanto, o conjunto de subfunções por onde um fluxo passa a partir da entrada deste fluxo até sua saída do sistema ou sua conversão, define um módulo. O fluxo ramificado considera que um fluxo pode se ramificar formando cadeias de funções independentes, exigindo identificação de fluxos associados a cadeias de funções paralelas. Cada galho de uma função paralela define um módulo potencial. Cada um destes módulos interage com o resto do produto através do fluxo no ponto de ramificação. Por fim, o fluxo de *conversão-transmissão* refere-se a um fluxo que pode ser convertido em outro. Subfunções de conversão aceitam um fluxo de material ou energia e o convertem em outra forma de fluxo de material ou energia. Uma subfunção de conversão-transmissão, ou uma cadeia adequada de subfunções constituem um módulo.

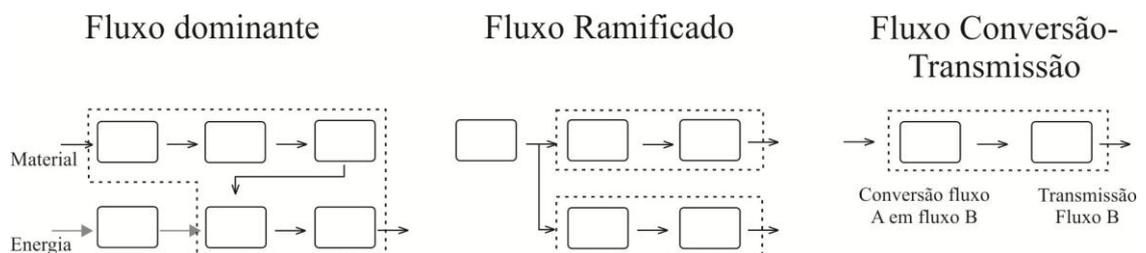


Figura 2-4: Três Heurísticas, adaptado de Stone (1997)

Design for Variety

Em 2002, Martin e Ishii propuseram um método para incorporar padronização e modularização com o objetivo de reduzir futuros custos e esforços de projeto. Seu método é composto de quatro etapas, e se inicia com a geração do GVI (*generational variety index*) e CI (*coupling index*). GVI é um indicador da quantidade esperada de redesenho necessário

para que um componente satisfaça as exigências do mercado no futuro, este valor é atribuído pela equipe e baseado em fatores como as necessidades dos consumidores, confiabilidade de componentes e custos; CI é um indicador da probabilidade de que a alteração em um componente exigirá redesenho de outros componentes. Em seguida, os componentes são ordenados do maior para o menor conforme seu GVI, e juntamente com o CI, são determinados os componentes com maiores chances de serem trocados e como esta troca irá se propagar no restante da estrutura. Com o GVI e o CI, a equipe de projeto pode começar a fazer modificações na arquitetura dos produtos e desenvolver uma plataforma de produto mais facilmente aplicada as gerações futuras do produto. No terceiro passo, é necessário decidir quais partes do produto serão modularizadas e quais serão padronizadas. A modularização tem relação direta com o CI, pois quando o CI é zero os componentes podem ser trocados para atender às expectativas dos clientes sem a necessidade de que outros componentes também sejam trocados. Por fim, é aplicada uma abordagem prescritiva para aperfeiçoar a arquitetura do produto, ajudando nas decisões de como arranjar os componentes e como definir interfaces.

House of Modular Enhancement

A metodologia Home (*House of Modular Enhancement*) visa adicionar questões relacionadas ao ciclo de vida do produto ainda na fase de projeto, através do redesign de produtos existentes para o aprimoramento da modularidade (SAND; GU; WATSON, 2002). Para atingir os objetivos relacionados ao ciclo de vida através da modularidade deve se estabelecer relações entre os objetivos e os módulos. Uma matriz de informação do design modular é gerada, incluindo três tipos de informações principais: objetivos do ciclo de vida (manutenção, reuso, reciclagem), informação de arquitetura do produto e requerimentos funcionais, gerando nove matrizes. Estas matrizes são combinadas para formar a *Modular Information Matrix (MIM)*, que provê informações das relações diretas entre os componentes. A matriz MIM é transformada através da utilização de método de eixo radial (*Radial Axis Method- RAM*), gerando a matriz EMIM, na qual um algoritmo de agrupamento é aplicado para integrar os componentes em módulos do produto. Segundo os autores, a metodologia identifica fatores relacionados aos objetivos, relaciona estes fatores aos componentes através de análise de interações, e agrupa estes componentes em módulos.

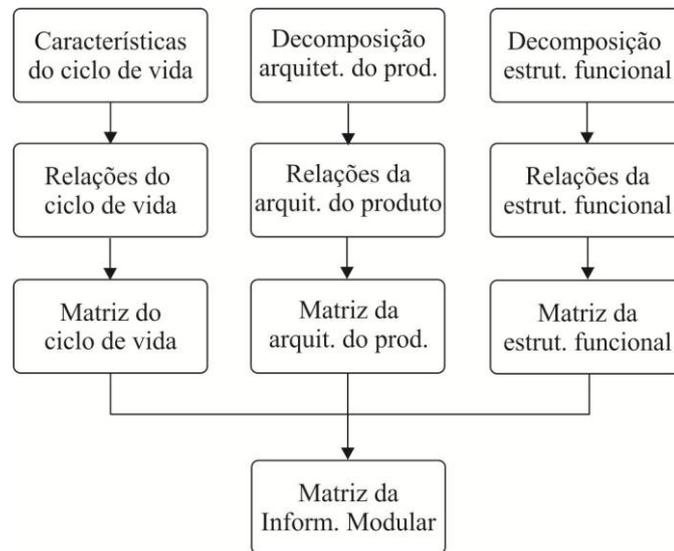


Figura 2-5: Organização das matrizes do método HOME, adaptado de Sand, Gu, Watson (2002)

A matriz do ciclo de vida relaciona os componentes com componentes com relação a aspectos do ciclo de vida, como reuso e reciclagem. A matriz da arquitetura do produto analisa as relações físicas entre os componentes dos produtos, e a matriz da estrutura funcional apresenta informações a respeito das relações funcionais entre os componentes. A matriz MIM é uma combinação destas três matrizes.

Fuzzy Logic Based

O método proposto por Nepal, Monplaisir e Singh (2004), utiliza-se de método baseado na lógica *Fuzzy* para lidar com o conhecimento vago e impreciso nos estágios iniciais de desenvolvimento de produto. Seu objetivo é otimizar a arquitetura do produto com vista aos custos, mas também com relação a qualidade, confiabilidade e manufaturabilidade. O método proposto inicia com a aquisição do conhecimento, na qual é realizada uma análise do produto, identificação das variáveis linguísticas e desenvolvimento de regras “Se-Então”, formando um número de potenciais módulos, utilizando-se as variáveis linguísticas para representar o custo destes módulos. A principal função das variáveis linguísticas é fornecer uma maneira sistemática para caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos (TANSCHKEIT, 2003). Neste caso, o conhecimento vago e impreciso característico das fases iniciais de desenvolvimento. Na sequência, ocorre um processo de inferência *fuzzy*, e o processo de modularização do produto é feito através de um modelo matemático baseado em um algoritmo de tecnologia de grupo, visando a minimização do custo de modularização de uma arquitetura de produto.

2.4.1 Parâmetros de Classificação

Daniilidis *et al.* (2011) propõem um framework para classificação de métodos de modularização baseado em três parâmetros de diferenciação: variedade, geração e ciclo de vida. Com relação a variedade, os métodos são classificados em métodos para a arquitetura de produto individual, famílias de produto ou portfolios de produto. Com relação a geração, os métodos podem ser divididos em métodos para o desenvolvimento de novos produtos, ou métodos para redesign de produtos já existentes. Por fim, os métodos são classificados conforme aspectos do ciclo de vida por eles abordados, incluindo design, manufatura, uso e reciclagem. Estes três parâmetros são utilizados para caracterizar a área de aplicação de cada método e seus objetivos. Esta classificação é baseada na descrição dos métodos feita pelos próprios autores, bem como da análise da aplicação dos métodos encontradas na revisão sistemática.

Variedade	Geração	Ciclo de vida
Produtos Individuais	Redesign	Design
Famílias de Produtos	Desenvolvimento de um novo produto	Manufatura
Portfolio de Produtos		Uso
		Reciclagem

DSM (1994) - FLB (2005)
 DfV (2002) - Heurístico (2000)
 MFD - 1998
 HOME - 2002

Figura 2-6: Parâmetros de classificação de Daniilidis *et al.* (2011)

Com relação ao primeiro parâmetro não houve diferenciação, pois foram escolhidos somente métodos que abordam produtos individuais para a análise. Com relação à fase de geração, todos os métodos analisados levam em conta a pré-existência de uma arquitetura, a partir da qual será feito o redesign do produto com vista a modularização. Com relação a este parâmetro, nenhum trabalho foi encontrado para lidar com a modularização no desenvolvimento de novos produtos.

O último parâmetro analisado foi o ciclo de vida, no qual os métodos foram classificados conforme a atenção a quatro diferentes aspectos: design, uso, manufatura e reciclagem. Dentre os quatro métodos, somente dois abordam todos estes aspectos: *Modular Function Deployment* (ERIXON, 1998) e *House of Modular Enhancement* (SAND; GU; WATSON, 2002). Estes métodos permitem que o resultado esteja em sintonia com os objetivos que guiam o processo de modularização.

A classificação demonstrou similaridades entre os métodos avaliados, sendo que somente um dos parâmetros apresentou diferenças entre os métodos. Desta forma, a análise dos métodos com relação às fases, assim como procedimentos adotados em cada fase, pode ser um diferencial na escolha do método por uma empresa. As particularidades de cada método, como decomposição funcional ou estrutural, uso de técnicas quantitativas ou qualitativas, entre outros, podem servir de guia para a escolha do método conforme as características do produto a ser modularizado.

2.4.2 Decomposição dos métodos em etapas

Os métodos para a modularização de produtos individuais possuem semelhanças, e por isso, podem ser analisados conforme etapas comuns para a obtenção do projeto modular. Holmqvist e Persson (2003) apresentam três etapas, consideradas críticas, para a obtenção da modularidade: decomposição dos produtos em partes, integração dessas partes em módulos e avaliação do design resultante.

Na Figura 2.5, os métodos (linhas) são analisados conforme as três fases críticas propostas por Holmqvist e Persson (2003) e adotada neste trabalho: decomposição, integração e avaliação (colunas).

	Decomposição	Integração	Avaliação
DSM Pimpler e Eppinger 1994)	Decomposição do sistema em elementos	Análise de interações físicas e funcionais entre elementos	
		Identificação de potenciais agrupamentos	
MFD Erixon, 1998	Definição dos requisitos do cliente.	Geração de Conceitos - Matriz MIM	Avaliação dos conceitos - Matriz de Interfaces.
	Seleção das Soluções Técnicas		Aprimoramento dos módulos.
Método Heurístico Stone, Wood, Crawford, 2000	Decomposição funcional	Aplicação de três heurísticas (Fluxo dominante, fluxo ramificado, e fluxo de conversão-transmissão)	
DfV Martin e Ishii, 2002	Geração dos índices GVI e CI	Ordenar componentes	
		Determinar onde modularizar (CI) e onde padronizar (GVI)	
		Desenvolver arquitetura (componentes-funções/interfaces)	
Home Sand, Gu, Watson, 2002	Matriz de informação do design modular - Ciclo de vida, arquitetura e requisitos funcionais	Matriz EMIM - Algoritmo de Agrupamento	Análise do design modular
FLB Nepal, Monplaisir e Singh, 2005	Processo de aquisição do conhecimento (análise geral do produto - identificação das variáveis linguísticas...)	Inferência Fuzzy	
		Modelo matemático baseado em algoritmo de tecnologia de grupo	

Figura 2-7: Métodos para modularização segundo as 3 etapas críticas

2.5 Discussão

Como já citado por Gershenson, Prasad e Zhang (2004), todos os métodos para modularização requerem uma quantidade significativa de informação de entrada, cálculo e manipulações para chegar ao resultado esperado. Assume-se que a natureza dessas informações, bem como as manipulações e cálculos necessários possam ser grandes influenciadores da escolha do método por uma determinada empresa.

A seção de discussão deste trabalho será feita baseada nas três fases críticas para a modularização: a decomposição, a integração e a avaliação. Todos os métodos passam pelo processo de decompor e integrar, porém, utilizando-se de ferramentas e estratégias diferentes para fazê-los. A etapa de avaliação, apesar de importante, não é encontrada em todos os métodos.

2.5.1 Fase de Decomposição

Uma das abordagens mais encontradas entre os métodos é a decomposição funcional de produtos, também chamada de modelagem funcional. Decomposição funcional é o processo de quebrar a função global do produto em funções menores, em subfunções mais fáceis de resolver (STONE; WOOD; CRAWFORD, 2000). Estas subfunções fornecem uma descrição detalhada do que o produto deve fazer. Um dos aspectos mais importantes percebidos na análise dos métodos com relação à fase de decomposição é a existência de diferentes níveis de decomposição. Erixon (1998), em seu método **MFD**, decompõe o produto em soluções técnicas.

O **DSM**, o **DFV**, o **FLB** e o **HOME** fazem a decomposição e a integração com relação a componentes, portanto, em um nível de decomposição mais apurado que o **MFD**. Quanto maior o nível de decomposição mais fácil encontrar as relações de um-para-um entre funções e partes físicas, mas também mais difícil é integrar essas partes, devido a maior quantidade de elementos a serem analisados (HOLMQVIST; PERSSON, 2003). Já o método **Heurístico** parte de outra perspectiva para a decomposição do produto. Enquanto os outros métodos lidam com a decomposição estrutural do produto, o Método Heurístico faz uma decomposição funcional, decompondo o produto em subfunções e agrupando-as conforme as interações de fluxo. Pimmler e Eppinger (1994) sugerem que decomposição de produto seja feita em um nível de detalhe similar ao desejado para a arquitetura do produto.

2.5.2. Fase de Integração

É nesta fase que o processo de modularização propriamente dito ocorre. Nesta fase, os elementos identificados na fase de decomposição precisam ser agrupados para formar os módulos. Uma das formas mais recorrentes na literatura para trabalhar a fase de integração são as matrizes, que representam as relações entre os componentes, dispondo-os em linha e coluna e marcando interações que são utilizadas para definir os agrupamentos. Existem vários algoritmos que podem ser utilizados para agrupar os elementos da matriz **DSM** (HOLMQVIST; PERSSON, 2003; DANIILIDIS *et al.*, 2011).

No método **MFD**, proposto por Erixon (1998), a modularização é feita na matriz **MIM** (*Module Identification Matrix*), na qual cada solução técnica do produto é pontuada com relação às diretrizes de modularização, semelhante ao preenchimento do **QFD** (*Quality Function Deployment*), com pontuação 9 para forte relação, 3 para média relação, 1 para fraca

relação e 0 quando a relação é inexistente. As diretrizes de modularização são motivos pelos quais as empresas desejam modularizar seus produtos (atualização, reciclagem, variedade, manutenção). Após o preenchimento da matriz, são somadas as pontuações adquiridas pelas soluções, e as soluções com maior pontuação são candidatas a tornarem-se módulos. As soluções com baixa pontuação não apresentam fortes motivos para tornarem-se módulos sozinhas e, portanto, podem ser integradas às demais soluções conforme indicações de similaridade apontadas na própria MIM. Outra abordagem para a formação de módulos a partir da matriz MIM é a utilização de algoritmos de agrupamento (BORJESSION, 2009), assim como na matriz DSM.

No método **HOME** a integração também é conduzida através de aplicação de um algoritmo de agrupamento a uma matriz, a matriz EMIM. A matriz EMIM é resultado da junção de 9 matrizes, sendo 3 relacionadas ao ciclo de vida, 3 à arquitetura do produto e 3 à estrutura funcional do produto.

O método **Heurístico**, assim como na fase de decomposição, também lida com a questão da integração de uma forma diferente dos demais métodos. A modularização é feita a partir de três diferentes estratégias, chamadas heurísticas, que identificam fluxos no produto e agrupam subfunções de acordo com as relações definidas por estes fluxos. As heurísticas de módulo são um método de análise onde o designer se utiliza de uma série de passos, de natureza empírica, para identificar módulos em design (STONE; WOOD; CRAWFORD, 2000). As três heurísticas propostas são: fluxo dominante examina cada fluxo não ramificado de uma estrutura funcional e agrupa as subfunções por onde o fluxo percorre até que ele saia do sistema ou se transforme em outro fluxo; fluxo ramificado considera que um fluxo pode se ramificar formando cadeias de funções independentes, exigindo identificação de fluxos associados a cadeias de funções paralelas, na qual cada galho de uma função paralela define um módulo potencial; fluxo de conversão-transmissão refere-se a um fluxo que pode ser convertido em outro, uma subfunção de conversão-transmissão, ou uma cadeia adequada de subfunções constituem um módulo.

No método **DfV**, a modularização do produto tem relação direta com o índice CI (*coupling index*), que indica a força de acoplamento entre dois componentes, onde quanto mais forte for a relação de acoplamento, maior será a chance de a mudança em um componente requerer a mudança no outro. Dessa forma, analisando as relações entre os componentes, é possível agrupá-los em um mesmo módulo, de forma que a sua mudança no futuro (para atender a novas necessidades -relacionado ao GVI – *generational variety index*, indicador da quantidade esperada de redesenho necessário para que um componente satisfaça

as exigências do mercado no futuro) não afete todo o resto do produto. GVI e CI são valores atribuídos pela equipe e baseados em fatores como as necessidades dos consumidores, confiabilidade de componentes e custos.

O método **FLB**, de Nepal, Monplaisir e Singh (2005) utiliza-se de um processo de inferência fuzzy e um modelo matemático. Os conceitos de lógica *fuzzy* podem ser utilizados para traduzir em termos matemáticos informações expressas por um conjunto de regras linguísticas. Este método visa preencher uma lacuna de pesquisa apontada por Gershenson, Prasad e Zhang (2004), que citam que os métodos para a modularização requerem informações que nem sempre estão disponíveis, principalmente nos estágios em que considerações a respeito do projeto modular são mais efetivas, isso é, nas fases iniciais do desenvolvimento.

2.5.3 Fase de Avaliação

Tanto métodos para modularizar produtos quando métodos mais amplos, que incluem a fase de modularização, envolvem a avaliação do design, que pode ser realizada com vista a diferentes perspectivas: função, flexibilidade, custos, complexidade (BI; ZHANG, 2001). Isso porque a saída do método para modularização pode não ser um design factível. A avaliação precisa levar em conta todos os outros aspectos da realização do produto. Muitas vezes o processo de integração utilizado no método leve a um design teoricamente adequado, mas que se apresente inviável quando confrontado a um processo de produção completo.

Entre os métodos estudados, o único método que apresenta uma etapa de avaliação bem estruturada é o **MFD** de Erixon (1998). O método MFD é composto de cinco etapas, e as duas últimas etapas (análise de interfaces e aprimoramento intra-módulos) são relacionadas à análise do design modular. A etapa número quatro diz respeito à análise de interfaces entre os módulos, que além de clarificar as relações entre os módulos identificados na matriz MIM, serve de indicativo para o melhor sistema de montagem para o produto como um todo. A quinta etapa diz respeito à otimização intra-módulo. Ericsson e Erixon (1999) exemplificam a quinta etapa citando que se um módulo foi escolhido devido as suas fortes relações com manutenção e serviços, o mesmo deve ser fabricado visando fácil desmontagem.

O método **HOME** (SAND; GU; WATSON, 2002) também apresenta uma fase de avaliação do design modular, porém não é apresentado procedimento formal para que a

mesma seja feita. Os módulos são analisados com relação aos componentes agrupados, de forma a verificar a viabilidade dos agrupamentos.

2.6 Considerações Finais

Este trabalho realizou o levantamento de métodos para modularização existentes na literatura, com o objetivo de esclarecer os métodos e classificá-los, facilitando o entendimento dos mesmos e a escolha por parte das empresas de que método é mais adequado para seu caso específico. Para fazer o levantamento dos métodos para modularização existentes na literatura foi utilizado o método de revisão sistemática da literatura. Após os refinamentos necessários a pesquisa e da análise dos artigos, foram extraídos seis métodos para modularização de produtos individuais, posteriormente analisados.

Os métodos foram classificados conforme parâmetros descritos na literatura, bem como analisados com vista a diferentes etapas genéricas. A análise com relação a etapas genéricas e a classificação dos métodos segundo os parâmetros de variedade, geração e ciclo de vida, tem por objetivo auxiliar as empresas na escolha de qual método é mais adequado para casos específicos. Os parâmetros guiam a escolha através da contextualização do ambiente de aplicação de cada método, enquanto a análise das fases guia a empresa com relação a competências e conhecimentos necessários para a aplicação do método.

O trabalho, como esclarecido no método, limitou-se a estudar os métodos para a modularização de produtos individuais, com a intenção de garantir uma análise comparativa entre ferramentas que tratam de um problema através de um mesmo nível de detalhe. Assim como o trabalho também limitou-se a apresentar os métodos de acordo com seus autores, não tendo sido feitas aplicações dos mesmos para a avaliação.

Como questões para pesquisas futuras citam-se a necessidade de integração dos métodos para modularização a um modelo de processo de desenvolvimento de produtos, questão não abordada em nenhum dos trabalhos estudados. Bem como analisar, de forma mais aprofundada, quais as dificuldades encontradas pelas empresas na implementação dos métodos, e aprimoramentos que podem ser feitos para que eles se tornem mais facilmente aplicáveis, ao mesmo tempo em que se mantém a qualidade do resultado. Outro ponto que necessita de maior atenção é o estudo dos métodos frente a produtos de diferentes complexidades, fator que pode gerar modificações tanto no método em si quanto na forma de aplicação.

2.7 Referências Bibliográficas

ALIZON, F.; SHOOTER, S.B.; SIMPSON, T.W. Improving an existing product family based on commonality/diversity, modularity, and cost. *Design Studies* v. 28, p.387-409, 2007.

ARCHER, J.A.; SCALICE, R.K. Aplicação e Análise de Uso de Três Metodologias de Projeto de Produtos Modulares. XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. São Paulo, Brasil, 2010.

BI, Z.M.; ZHANG, W.J..Modularity Technology in Manufacturing: Taxonomy and Issues. *International Journal of advanced Manufacturing Technology* v 18, p. 381-390, 2001.

BRERETON, P.; KITCHENHAM, B.A.; BUDGEN, D.; TURNER, M.; KHALIL, M..Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. *The Journal of Systems and Software* v. 80, p. 571-583, 2007.

BORJESSON, F. Improved Output In Modular Function Deployment Using Heuristics. *Proceedings of the International Conference on Engineering Design*, 2009, Estados Unidos: iCED 2009.

CHANDRASEKARAN, B.; STONE, R. B.; MCADAMS, D.A.. Developing Design Templates for Product Platform Focused Design. *Journal of Engineering Design* v. 15, p. 209-228, 2004.

DA SILVEIRA, G.; BORENSTEIN, D.; FOGLIATTO, F.S.. Mass customization: literature review and research directions. *International Journal of Production Economics* v. 72, p. 1-13, 2001.

DAHMUS, J.B.; GONZALES-ZUGASTI, J.P.; OTTO, K.N.. Modular product architecture. *Design Studies* v. 22, p. 409-424, 2001.

DANIILIDIS, C.; ENBLIN, V.; EBEN, K.; LINDEMANN, U.. A Classification framework for product modularization methods. *Proceedings of the International Conference on Engineering Design*, Dinamarca, 2011.

DANIILIDIS, H.; BAUER, W.; LINDEMANN, U..Compendium for modular and platform based architecting. *Procedia Computer Science* v. 8, p. 220-225, 2012.

DU, X.;JIAO, J.; TSENG..M.M.. Architecture of Product Family: Fundamentals and Methodology. *Concurrent Engineering, Research and Applications* v. 9, p. 309-325, 2001.

DURAY, R..Mass customization origins: mass or custom manufacturing? *International Journal of Operations & Production Management* v. 22, p. 314-328, 2002.

EGGEN, O..Modular product development.Department of Product Design Norwegian University of Science and Technology, 2003.

ERICSSON, A.; ERIXON, G., *Controlling Design Variants: Modular Product Platforms*, Dearborn, MI: ASME Press, 1999.

- ERIXON, G.. “Modular Function Deployment – a method for product modularization”. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1998.
- GERSHENSON, J.K.; PRASAD, G.J.; ZHANG, Y..Product modularity: definitions and benefits. *Journal Engineering Design* v. 14, p. 295-313, 2003.
- GERSHENSON J.K.; PRASAD G.J.; ZHANG Y..Product modularity: measures and design methods. *Journal of Engineering Design* v.15, p. 33-51, 2004.
- HELMER, R.; YASSINE, A.; MEYER, C.. Systematic module and interface definition using component design structure matrix. *Journal of Engineering Design* v. 21, p. 647-675, 2010.
- HOLMQVIST, T.K.P.; PERSSON, M.L.. Analysis and Improvement of Product Modularization Methods: Their Ability to Deal with Complex Products. *Systems Engineering* v. 6, p. 195-209, 2003.
- HOLTTA-OTTO, K.; DE WECK, O..Degree of modularity in engineering systems and products with technical and business constraints. *Concurrent Engineering-Research and Applications* v. 15, p. 113-126, 2007.
- HOLTTA-OTTO, K. M.M.; OTTO, K. N.. Incorporating design effort complexity measures in product architectural design and assessment. *Design Studies* v. 26, p. 463-485, 2005.
- HOLTA-OTTO, K.; TANG, V.; OTTO, K. Analyzing module commonality for platform design using dendrograms. *Research Engineering Design* v. 19, p. 127-141, 2008.
- HUANG, M.S.; HSU, M.K.. Modular design applied to beverage-container injection molds. *International Journal Advanced Manufacturing Technology* v. 53, p. 1-10, 2011.
- JIANG, L.; ALLADA, V. Robust Modular product family design using a modified Taguchi Method. *Journal of Engineering Design* v. 16, p. 443-458, 2005.
- JOSE, A.; TOLLENAERE, M.. Modular and platform methods for product family design: literature analysis. *Journal of Intelligent Manufacturing* v. 16, p. 371-390, 2005.
- KAHN, K.B.; BARCZAK, G.; NICHOLAS, J.; LEDWITH, A.; PERKS, H..An Examination of New Product Development Best Practice. *Journal of Production Innovation Management* v. 29, p. 180-192, 2012.
- KITCHENHAM, B..Procedures for Performing Systematic Reviews.Technical report, Keele University and NICTA, 2004.
- KONG, F.B.; MING, X.G.; WANG, L.; WANG, X.H.; WANG, P.P..On Modular Products Development. *Concurrent Engineering, Research and Applications* v. 17, p. 291-300, 2010.
- MARTIN, M.V.; ISHII, K.. Design for variety: developing standardized and modularized product platform architectures. *Research in Engineering Design* v. 13, p. 213–235, 2002.
- MEEHAN, J.S.; DUFFY, A.H.B.; WHITFIELD, R.I..Supporting ‘Design for Re-use’ with Modular Design. *Concurrent Engineering: Research and Applications* v.15, p. 141-155, 2007.

MILLER, T.D.; ELGARD, P..Defining Modules, Modularity and Modularization : Evolution of the concept in a Historical Perspective. Proceeding of the 13th IPS Research Seminar, Dinamarca, 1998.

MODULAR DESIGN PLAYBOOK. Guidelines for assessing the Benefits and Risks of Modular Design. The Corporate Executive Board Company, 2010.

MOON, S. K.; SIMPSON, T. W.; KUMARA, S. R. T.. A methodology for knowledge discovery to support. *Annals of Operations Research* 174, 201–218, 2010.

NEPAL, B., MONPLAISIR, L.; SINGH, N.. Integrated fuzzy logic-based model for product modularization during concept development phase. *International Journal of Production Economics* v.96, p. 157-174, 2005.

PARK, J.; SHIN, D.; INSUN, P.; HYEMI, H. (2008).A product platform concept development method. *Journal of Engineering Design* v.19, p. 515-532, 2008.

PIMMLER, T.U.; EPPINGER, S.D..Integration analysis of product decompositions. ASME Design Theory and Methodology Conference, Minneapolis, 1994.

PINE, B.J..*Mass customization: the new frontier in business competition*. Boston: Harvard Business School Press, 1993.

SAND, J.C.; GU, P.; WATSON, G..HOME: House Of Modular Enhancement— a Tool for Modular Product Redesign. *Concurrent Engineering: Research and Applications* v.10, p. 153-164, 2002.

SCHUH, G.; LENDERS, M.; ARNOSCHT, J. Focussing product innovation and fostering economies of scale based on adaptative product platforms. *CIRP Annals, Manufacturing Technology* v 58, p. 131-134, 2009.

SERED, Y.; REICH, Y..Standardization and modularization driven by minimizing overall process effort. *Computer-Aided Design* v. 38,p. 405–416, 2006.

STAKE, R.B..On conceptual development of modular products. Doctoral thesis, Division of Assembly Systems, Department of Production Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2000.

STEWART, B.; YAN, X..Modular Product Family Development within a SME. In: *Global design to gain a competitive edge: an holistic and collaborative design approach based on computational tools*, 21-30, 2008.

STARR, M.K.“Modular production – a new concept”, *Harvard Business Review*, v. 3, p. 131-142, 1965.

STONE, R.B.; WOOD, K. L.; CRAWFORD, R.H.. A heuristic method for identifying modules for product architectures. *Design Studies* v.21, p. 5-31, 2000.

STONE, R. B.; MCADAMS, D.A.; KAYYALETHEKKEL, V.J..A product architecture-based conceptual DFA technique. *Design Studies* v. 25, p. 301-325, 2004.

STONE, R.B.; WOOD, K. L.; CRAWFORD, R.H. (2000). Using quantitative functional models to develop product architectures. *Design Studies* v. 21, p. 239-260, 2000.

TANSCHKEIT, R.. Sistemas Fuzzy. In: VI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Bauru, São Paulo, 2003.

THEBEAU, R.B..Master of Science Thesis, Knowledge Management of Systems Interfaces and Interactions for Product Development Processes, MIT, 2001.

ULRICH, K..The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm. *Research Policy* v.24, p. 419-449, 1995.

YU, T. L.; YASSINE, A. A. ; GOLDBERG, D. E.. An information theoretic method for developing modular architectures using genetic algorithms. *Research In Engineering Design* v. 18, p. 91-109, 2007.

ZHA, X.F.; SRIRAM, R.D..Platform-based product design and development: A knowledge-intensive support approach. *Knowledge-Based Systems* v.19, p. 524–543, 2006.

ZHANG, W. Y.; TOR, S. Y.; BRITTON, G. A..Managing modularity in product family design with functional modeling. *International Journal of advanced manufacturing Technology* v. 30, p.579-588, 2006.

ZHUO, L; SAN, W.Y.; SENG, L. K..Integrated approach to modularize the conceptual product family architecture. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* v. 36, p. 83-96, 2008.

3 MODULAR FUNCTION DEPLOYMENT ADAPTADO A TIPOLOGIA DE PROJETOS PARA A CRIAÇÃO DE CONCEITOS NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS MODULARES

Monique Sonogo (PPGEP/ UFRGS)

moniqueds@producao.ufrgs.br

Márcia Elisa Soares Echeveste (PPGEP/UFRGS)

echeveste@producao.ufrgs.br

Resumo:

A estratégia de modularização deve ser planejada ao longo do ciclo de vida do produto, uma vez que a forma como os módulos são desenvolvidos afeta o desempenho do produto. A literatura apresenta métodos e ferramentas para criação e avaliação dos módulos. Um dos métodos mais conhecidos que considera diferentes estágios do ciclo de vida do produto é o *Modular Function Deployment* (erixon, 1998). No entanto, este método não está diretamente vinculado às características de diferentes projetos de desenvolvimento. Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar uma proposta de adaptação do método MFD a diferentes níveis de complexidade e novidade de cada projeto. Para isso, foi realizada uma revisão sistemática e foram consultados especialistas acadêmicos e profissionais. Como contribuição do artigo destaca-se a proposição de um método adaptado, denominado *Modular Function Deployment Adapted*, o qual oferece às empresas a possibilidade de escolher uma configuração de etapas e ferramentas que melhor se adapte às diferentes combinações de níveis de complexidade e novidade de seus projetos, tornando a aplicação customizada ao tipo de projeto.

Palavras chave: modularização, desenvolvimento de produto, complexidade, novidade, design de conceito, Modular Function Deployment.

Abstract: Modularization strategies should be planned along the life cycle of a product, since the way the modules are developed affects the performance of such product. The literature presents methods and tools for creating and evaluating modules. *Modular Function Deployment* (erixon, 1998) is one of the most well-known methods considering different stages of the life cycle of a product. However, that method is not directly linked to particularities of different development projects. Thus, the objective of this paper is to present a proposal for adaptation of the MFD method to different levels of complexity and novelty of each project. In order to achieve that, a systematic review was carried out and professionals

and academics were consulted. This paper contributes with a proposal of an adapted method called *Modular Function Deployment Adapted*, which provides companies the possibility of choosing the setting of stages and tools that best fits different combinations of complexity and novelty levels of their projects, customizing the application to the type of project.

Keywords: modularity; product development, complexity, novelty, conceptual design, Modular Function Deployment.

3.1 Introdução

A modularização tem o potencial de trazer grandes benefícios, contudo, é uma tarefa que deve ser planejada ao longo do ciclo de vida do produto, uma vez que a forma com a qual a divisão do produto em módulos é projetada influencia os benefícios alcançados no desempenho do produto e, conseqüentemente, para a empresa (HOLMQVIST; PERSSON, 2003). Através da modularização é possível reduzir a variedade e a complexidade interna (DANIILIDIS; BAUER; LINDEMANN, 2012), oferecendo grande variedade externa para satisfazer diferentes segmentos de mercado (JOSE; TOLLENAERE, 2005), reduzindo lead time e custos, aumentando a qualidade e facilitando o redesign (DANIILIDIS *et al.*, 2011).

Para atingir os objetivos da modularização, existem métodos e ferramentas que conduzem o processo de modularização na concepção e seleção de conceitos no desenvolvimento de produtos. Os métodos para modularização tem o objetivo de agrupar componentes/subfunções em módulos conforme similaridades (GERSHENSON *et al.*, 2004). Um dos métodos mais discutidos na literatura é o *Modular Function Deployment - MFD*, proposto por Erixon (1998) (ALIZON; SHOOTER; SIMPSON, 2007; HOLTAA OTTO; OTTO, 2005; NEPAL; MONPLAISIR; SINGH, 2005; SCHUH; LENDERS; ARNOSCHT, 2009; SAND; GU; WATSON, 2002; PARK *et al.*, 2008; MEEHAN; DUFFY; WHITFIELD, 2007; JIANG; ALLADA, 2005; ZHANG; TOR; BRITTON, 2006; HOLTAA OTTO; TANG; OTTO, 2008; HOLTAA OTTO; WECK, 2007; KONG *et al.*, 2009; ARCHER; SCALICE; 2010; DANIILIDIS ET AL, 2011; BORJESSON, 2009; BI; ZHANG, 2001; BLACKENFELT, 2001; HOLMQVIST ; PERSSON, 2003). O MFD é um método que se baseia nos objetivos estratégicos da empresa para realizar a modularização, através de uma sequência de cinco etapas, que compreende desde o levantamento dos requisitos do cliente até a avaliação do design resultante. Porém o MFD foi desenvolvido para a modularização de produtos já existentes, e não está no contexto de desenvolvimento de novos produtos.

No entanto, verifica-se uma baixa aderência de métodos e ferramentas aos modelos de referência utilizados pelas empresas para gerenciar seus processos de desenvolvimento de novos produtos. Esta característica é resultado da dificuldade em aplicar novas práticas na realidade do desenvolvimento de produto das empresas (KAHN *et al.*, 2012). Em estudo dirigido com empresas que se utilizam da estratégia de modularização, Lau (2011) relata que os motivos apontados pelos gestores para a não utilização de métodos formais de modularização são a dificuldade de implementação e entendimento dos métodos, além da constatação de que um método formal consome tempo de desenvolvimento, um tempo que é cada vez mais reduzido nas empresas. Neste contexto, um método flexível, cuja dificuldade de implementação seja compatível com o grau de dificuldade de projeto pode ser útil, apresentando uma forma mais simples e mais rápida para modularizar conforme as particularidades de cada projeto do portfólio da empresa.

Os processos de desenvolvimento de novos produtos (PDP) são estruturados por meio de uma série de atividades organizadas em etapas e fases que abrangem desde a descoberta de uma oportunidade de negócio até o fim de vida na descontinuidade do produto (ULRICH; EPPINGER, 2000). O processo de desenvolvimento contempla um conjunto de projetos desenvolvidos de forma simultânea, dependentes da capacidade da empresa, constituindo o portfólio de projetos da empresa. Estes projetos podem ter diferentes características e diferentes graus de complexidade e novidade. Na fase de planejamento, múltiplos produtos viáveis são considerados, e aqueles aprovados são gerenciados por meio de projetos, cada qual com suas características, especificações, equipe de desenvolvimento e objetivos distintos.

Segundo Shenhar *et al.* (2005), um dos maiores equívocos relacionados a gestão de projetos no processo de desenvolvimento de produtos é considerar que todos os projetos são iguais, e assim sendo, podem ser geridos com a mesma gama de métodos e técnicas. Os projetos de produto de uma empresa podem variar conforme a sua complexidade, bem como com relação ao grau de novidade que aquele projeto representa para a empresa, dentre outras características. Adaptar a abordagem do método para cada tipo de projeto é um fator crítico para o sucesso do mesmo (SHENHAR *et al.*, 2005).

Sendo assim, a seleção e o emprego de métodos para modularização também deve obedecer a critérios de diferenciação dos projetos, pois as empresas passam por um processo de seleção e implementação de métodos adequados a sua situação específica. Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar uma proposta de adaptação do método MFD (ERIXON, 1998), considerando projetos que apresentem diferentes níveis de complexidade e novidade. Esta adaptação visa auxiliar as empresas a escolherem a configuração do método

que melhor se adapte às particularidades de seus projetos de desenvolvimento de produtos, auxiliando-as a aplicar o método MFD de acordo com o tipo de projeto e ao processo de desenvolvimento de produto adotado pela empresa.

O artigo apresenta seção de referencial teórico, na qual são abordados os temas processo de desenvolvimento de produtos e tipologia de projetos, bem como métodos para modularização de produtos. Após, apresenta seção de método, na qual são explicitados os meios para a construção deste artigo. Na seção seguinte, é apresentada proposta de adaptação do método MFD. Finalizando, discussões a respeito das adaptações e melhorias propostas e conclusão a respeito dos principais achados desta pesquisa.

3.2 Referencial

3.2.1 O Processo de Desenvolvimento de Produtos e Tipologias de Projeto

Segundo Blackenfelt (2001) a modularização demanda uma abordagem integrada de desenvolvimento de produto porque inicia no desenvolvimento da estrutura, ou plataforma, e afeta todas as atividades subsequentes. Para contextualizar os métodos para modularização no desenvolvimento de produtos, é preciso integrá-los a um modelo referencial de desenvolvimento. Modelos de referência são uma coleção de melhores práticas sobre gestão e desenvolvimento de produtos, estruturados em fases e atividades (ROZENFELD *et al.*, 2006). Estes modelos são denominados referência, pois não existe um modelo único para todo o projeto. Os modelos representam um repositório de atividades, ferramentas e técnicas que são selecionadas de acordo com as especificidades de cada projeto.

Um exemplo de modelo amplamente difundido na literatura é o modelo referencial de produtos de Ulrich e Eppinger (2000), composto de seis macro-fases, resumidas conforme Figura 3.1.

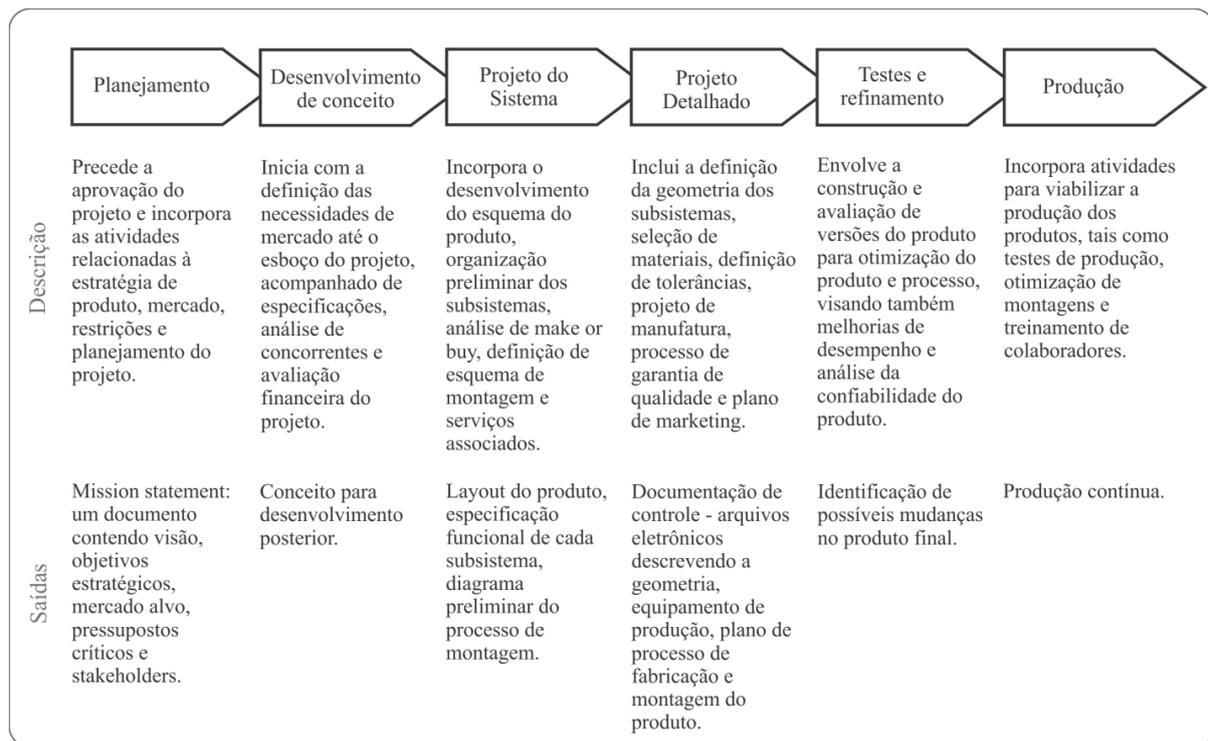


Figura 3-1: Processo de Desenvolvimento de Produtos de Ulrich e Eppinger (2000)

O escopo deste artigo é a segunda fase, a fase de desenvolvimento de conceito. Nesta fase, a partir das necessidades do mercado identificadas nas fases anteriores, são geradas alternativas de produtos, que são posteriormente avaliadas, e um ou mais conceitos são selecionados para desenvolvimento e testes (ULRICH; EPPINGER, 2000). A fase de desenvolvimento do conceito pode ser desdobrada em atividades, que são: identificação das necessidades dos consumidores, estabelecimento das especificações de mercado, geração de conceitos, seleção de conceitos, testes, especificações finais, modelagem e prototipagem. É na fase de desenvolvimento do conceito do produto que este artigo propõe integrar métodos para modularização ao projeto de desenvolvimento.

O PDP contempla vários projetos, cuja quantidade e simultaneidade dependem da capacidade de cada empresa. Projetos são esforços temporários empreendidos para a criação de um produto, serviço ou resultado exclusivo (PMBOK, 2008). Na fase de planejamento, as ideias consideradas mais promissoras são escolhidas para execução, configurando projetos de desenvolvimento específicos que juntos constituem o mix de projetos da empresa. Segundo Tatikonda (1999), diferentes tipos de projeto têm diferentes características e, por isso, requerem diferentes planejamentos de projeto e abordagens de execução. Os projetos diferem em muitos aspectos, e poucas organizações têm reconhecido isso de maneira formal, buscando distinguir seus projetos ou então selecionar a abordagem correta para cada projeto

(SHENHAR *et al.*, 2005). Neste trabalho, serão consideradas dimensões diferenciadoras de projetos, como a complexidade e a novidade do produto (CLARK; FUJIMOTO, 1992). Essas dimensões podem prover um bom entendimento das características e auxiliar na adaptação da gestão ao tipo específico de projeto (Figura 3.2).

A modularização de produtos pode ser vista como uma solução para vários problemas que podem aumentar a complexidade do produto e do negócio (BLACKENFELT, 2001). A complexidade em produtos pode ser definida pela quantidade de componentes e pelo número de conexões entre estes elementos (BLACKENFELT, 2001; EL MARAGHY *et al.*, 2012). Quanto mais complexo um sistema, mais partes e componentes ele terá e mais conexões entre essas partes e componentes existirão. Muitos produtos oferecidos pelas empresas atualmente podem ser classificados como complexos, pois possuem muitas variações (famílias de produtos), se utilizam de um mix de diferentes tecnologias, e podem apresentar diferentes soluções para uma mesma função (HOLMQVIST; PERSSON, 2003). A complexidade, portanto, não é uma propriedade dicotômica, sendo o produto complexo ou não. Produtos podem apresentar diferentes níveis de complexidade, sendo mais ou menos complexos e, conseqüentemente, isto reflete nas atividades, métodos e ferramentas de seus respectivos projetos de desenvolvimento.

Holmqvist e Persson (2003) analisam seis métodos para a modularização com vista a sua capacidade para lidar com produtos de maior complexidade. Como resultado, os autores defendem que os métodos estudados (entre eles o MFD) não são capazes de lidar com produtos complexos. Em contrapartida, Lau (2011) questiona se a modularização é uma estratégia exclusiva para lidar com produtos de grandes complexidades, enfatizando que a maior parte da literatura a respeito de modularização é focada em exemplos de grandes empresas.

Na aplicação de métodos de modularização é importante considerar o tipo de desenvolvimento, se é um design inovador, uma melhoria ou um design derivativo (BLACKENFELT, 2001). Além da complexidade, a novidade também é uma dimensão que influencia a tipologia de projetos, pois um projeto de produto pode ser desde uma simples melhoria em produtos existentes, até produtos ‘novos para o mundo’ (TIDD; BODLEY, 2002). Yoon e Lilien (1995) propõem duas tipologias de produto: original e reformulados. Produtos originais são avanços tecnológicos, e freqüentemente dependem de tecnologias nunca utilizadas antes na indústria, e podem ser referidos como novas linhas de produto, ou então como produtos novos para o mundo. Produtos reformulados são extensões de linhas existentes ou modificações. Essas modificações podem reduzir custos ou aumentar

possibilidades de uso, e podem ser chamadas de melhorias ou adições. A novidade de um produto pode ser acessada conforme os três níveis descritos por Shenhar e Dvir (2004), que são similares aos de Pahl *et al.* (2007).

	Variáveis	Autores
Complexidade	<p>Variação de tamanho: podem existir diferenças de tamanho entre componentes entre as variações de produtos construído sobre uma mesma lógica (mais variação - mais complexidade)</p> <p>Número de partes: quanto mais partes, mais complexo é um produto.</p> <p>Tecnologias: um produto pode se utilizar de uma ou mais tecnologias (mais tecnologias, mais complexidade).</p> <p>Número de variantes: variantes são diferentes combinações de componentes que podem ser substituídos para criar produtos finais (mais variantes - mais complexidade)</p> <p>Solução / função: podem existir diferentes soluções técnicas para uma mesma função (diferentes soluções - mais complexidade)</p> <p>Arquitetura: diz respeito a forma como as funções estão alocadas em módulos (integral - mais complexidade / ou modular - menos complexidade)</p>	Holmqvist e Persson (2003)
Novidade	<p>Derivativo / Adaptativo: corresponde a uma melhoria feita a um produto existente.</p> <p>Plataforma/ Variante: corresponde a uma nova geração de uma linha de produtos existentes.</p> <p>Inovação/ Original: corresponde a um produto novo para o mundo (ou, nesse caso, para a empresa).</p>	Shenhar e Dvir (2004); Pahl <i>et al.</i> (2007)

Figura 3-2: Variáveis para medição de complexidade e novidade no projeto de produtos

3.2.2 Modular Function Deployment

Para Seliger e Zettl (2008) existem duas abordagens gerais para a modularização de produtos: a primeira é baseada em funções e sub-funções suportadas por métodos heurísticos, que levam em conta informações, material, relações geométricas e fluxos de energia. A segunda abordagem é suportada pelo uso de critérios e diretrizes para modularização, que são objetivos estratégicos para agrupar soluções em módulos. Como exemplos de métodos pertencentes à primeira categoria, pode-se citar o *Design Structure Matrix* (PIMMLER; EPPINGER, 1994) e o método Heurístico (STONE *et al.*, 2000), pois levam em conta funções

e sub-funções do produto e as analisam com relação à geometria e fluxos para a definição de módulos.

O MFD é um exemplo da segunda categoria, na qual os métodos se utilizam de diretrizes baseadas nos objetivos estratégicos da empresa, para a condução da modularização. O MFD é suportado por várias ferramentas, tornando o método um processo auto documentado. Alguns pontos fortes relacionados ao MFD são: possibilidade de alto grau de paralelismo no desenvolvimento do conceito, possibilidade de uso de abordagens estatísticas para interpretação das matrizes, incorporação da visão do cliente, da visão da engenharia e de questões estratégicas (BORJESSON, 2009). Alguns dos pontos fracos relacionados ao método são: dependência da experiência da equipe que conduz o trabalho e dependência de um sistema de pontuação consistente (BORJESSON, 2009). De acordo com Archer e Scalice (2010) alguns benefícios relacionados ao MFD são: a adaptação do método a diferentes empresas, dado o caráter genérico de suas diretrizes de modularização; a aplicação prática e simples; orientação para as decisões de compra-fabricação; o alinhamento com a estratégia da empresa; e a abordagem de questões relativas ao ciclo de vida do produto.

O método original de Erixon (1998) consiste em cinco etapas. Na primeira etapa do método, denominada definição dos requisitos do consumidor, é utilizada a matriz da qualidade do *Quality Function Deployment* (AKAO, 1990), com base na definição dos requisitos dos clientes. Esta matriz tem o intuito de garantir que os requisitos sejam transformados em características e especificações do projeto do produto. O preenchimento é feito através da análise das relações entre os requisitos dos clientes e propriedades do produto com base na seguinte avaliação: 9 para forte relação; 3 para relação intermediária; 1 para relação fraca; e 0 para sinalizar inexistência de relações. Essa análise de relações ajuda a identificar quais as propriedades do produto precisam ser ajustadas para atender demandas específicas dos clientes (ERICSSON; ERIXON, 1999).

Na segunda etapa, chamada definição das soluções técnicas, são identificadas as funções e subfunções que cumprem as demandas estabelecidas na primeira etapa e suas correspondentes soluções técnicas. Posteriormente, as soluções técnicas que correspondem às propriedades dos produtos são encontradas através de decomposição funcional, também chamada modelagem funcional. A modelagem funcional é um meio de descrever os produtos em um nível abstrato, representando-os por meio de suas funcionalidades (PAHL; BEITZ, 1996; ROOZENBURG; EEKELS, 1995). Através da modelagem funcional estabelece-se a estrutura funcional do produto, que representa de forma hierárquica a lista de funções que o produto deve possuir para atender aos requisitos do cliente (ROZENFELD *et al.*, 2006). Após

a definição da estrutura funcional do produto, atribui-se a cada função um ou mais princípios de solução. Quando duas ou mais soluções técnicas podem cumprir uma determinada função do produto, pode-se escolher a mais adequada através da Matriz de Pugh.

Na terceira etapa do método, geração de conceitos, é possível agrupar as soluções técnicas de acordo com critérios pré-estabelecidos, formando módulos. As soluções técnicas são avaliadas com relação a uma série de diretrizes e são pontuadas as suas relações, clarificando razões para a formação de módulos. A matriz de formação dos módulos é denominada MIM (*Module Identification Matrix*). A terceira etapa é considerada etapa chave do MFD, pois é onde o processo de modularização ocorre. As soluções técnicas identificadas na etapa anterior são confrontadas com as diretrizes de modularização na matriz MIM. Através desta análise de relações, que é feita da mesma forma que na matriz de QFD e DPM, com pontuação 9,3,1 e 0, pode-se perceber os motivos, e quão fortes são estes motivos, para que as soluções técnicas se tornem módulos sozinhas ou agrupadas com demais soluções. Erixon (1998) propõe uma série de 12 diretrizes para a modularização. A essas diretrizes podem ser adicionadas outras diferentes, que refletem objetivos e estratégias específicos da empresa.

Na quarta etapa do método é utilizada a matriz de interfaces para explicitar as relações entre os módulos e avaliá-las, apontando interfaces críticas e passíveis de melhorias. Através do preenchimento de relações de cada módulo com os demais módulos do produto, é possível perceber qual o esquema de montagem mais adequado. Todas as marcações feitas fora da linha principal representam interfaces que precisam ser analisadas com atenção e possivelmente melhoradas. Nesta fase também podem ser aplicadas ferramentas relacionadas às questões econômicas, como estimativas do custo de cada módulo e seu impacto no custo total (ERICSSON; ERIXON, 1999). Erixon (1998) propõe uma série de métricas e regras pelas quais vários aspectos do conceito modular podem ser analisados, como por exemplo, qualidade, custos e *lead time*. A própria empresa pode avaliar esses conceitos através de ferramentas já incorporadas em seu processo de desenvolvimento, de forma a prever e avaliar o impacto da arquitetura modular.

Na última etapa, aprimoramento de módulos, os módulos são otimizados com a ajuda de metodologias como o *Design for Assembly*, por exemplo, para garantir a qualidade do resultado final, e uma ficha de especificações técnicas do módulo é gerada com informações advindas de todas as etapas do método. Essa etapa é realizada em um nível intra-módulo, garantindo a eficácia do resultado final. Neste ponto é importante retornar a MIM e conferir os motivos pelos quais as soluções foram integradas em módulos, de forma a orientar a sua

composição pelos objetivos da empresa. Neste ponto, ferramentas podem ser aplicadas ao desenvolvimento individual de módulos, evitando que falhas em módulos compartilhados por dois ou mais produtos possam se propagar causando grandes prejuízos. Um cartão de especificações para cada módulo é preenchido com as informações advindas de todas as etapas do método, como os requisitos do cliente atendidos pelo módulo, funções atendidas, diretrizes de modularização utilizadas, interfaces com outros módulos, soluções técnicas e outras informações necessárias para documentar o processo e facilitar o desenvolvimento de melhorias e novos produtos.

Outras abordagens foram sugeridas para modularizar com o método MFD. Uma delas é proposta por Borjesson (2009). O autor inclui uma matriz na segunda etapa do método chamada DPM (*Design Property Matrix*) na etapa de definição das soluções técnicas, relacionando propriedades do produto com as soluções técnicas. Porém, a maior diferença para a abordagem original é a utilização de um algoritmo de agrupamento na matriz MIM para a formação dos módulos. A pontuação dada nas matrizes DPM e MIM são analisadas em um software estatístico, gerando um dendrograma que agrupa os componentes e partes de acordo com critérios pré-definidos. Assim como no método original, o dendrograma não é conclusivo para revelar os módulos constituintes do produto, exigindo então uma análise por parte da equipe de projeto para corrigir inconsistências e validar agrupamentos.

3.3 Método de Pesquisa

Essa pesquisa percorreu três etapas: revisão sistemática da literatura; revisão de literatura; e entrevista com especialistas.

Revisão sistemática: a revisão sistemática segundo Kitchenham (2004) objetivou o levantamento dos métodos para modularização existentes na literatura, com o intuito de entender e classificar os mesmos, visando facilitar o processo de tomada de decisão a respeito de que métodos e abordagens são mais adequados conforme a área de aplicação. Foram utilizadas as bases de dados: *Web of Science* e *Science Direct*, com as seguintes palavras chave: *modul**, *product platform*, *product architecture*, *product family* e *mass customization*. Os artigos encontrados foram analisados conforme critérios para a identificação dos métodos (detalhamento da revisão sistemática no Apêndice A). Os métodos encontrados foram pareados de acordo com as etapas comuns, possibilitando análise e comparação entre os mesmos. As etapas contemplam desde a decomposição estrutural do produto até a avaliação da arquitetura modular (Apêndice B). Foram encontrados seis métodos que possuíam estas

especificações. O estudo dos seis métodos sustentou a escolha de um método para análise mais detalhado. O *Modular Function Deployment* (ERIXON, 1998) foi selecionado como o mais abrangente, envolvendo maior número de etapas com relação a avaliação e aprimoramento da arquitetura modular. Igualmente, destaca-se a flexibilidade do MFD na adaptação a situações específicas de cada empresa (diferentes projetos), bem como sua capacidade de lidar com todos os aspectos do ciclo de vida de um produto, devido à natureza de suas diretrizes. Além disso, o MFD tem uma estrutura de matrizes amplamente conhecida, similar a ferramenta QFD.

Revisão de literatura: Tendo em vista a escolha do método, seguiu-se com uma pesquisa exploratória, visando aprofundar o conhecimento sobre o método escolhido. O objetivo desta etapa é esclarecer todas as atividades e encontrar pontos na qual o método possa ser aprimorado com vista a facilitar a aplicação nas empresas. Nesta etapa foram realizados levantamento de dados bibliográficos com relação ao MFD e sua aplicação, como artigos de periódicos, congressos, dissertações e teses. Com o levantamento bibliográfico a respeito do MFD pode-se verificar estudos com aplicações do método, assim como sugestões e críticas feitas ao mesmo. Foram investigadas diferentes abordagens para aprimorar a qualidade do processo de modularização. Com base na literatura, delineou-se a seguinte hipótese de pesquisa: H1-o método MFD pode ser utilizado de diferentes maneiras conforme o grau de complexidade do produto a ser modularizado e o grau de novidade do projeto/produto para a empresa.

Entrevista com especialistas: O levantamento de experiências com especialistas visou abordar alguns pontos e questões levantadas na literatura. O levantamento com especialistas foi realizado na forma de uma entrevista semi-estruturada, e baseada nos conhecimentos prévios adquiridos com o levantamento bibliográfico. A primeira entrevista, com professor especialista, buscou identificar a pertinência das questões relacionadas ao método dispostas na literatura, bem como descobrir novas questões que podem ser úteis na proposição de melhorias. A segunda entrevista foi realizada com dois funcionários de uma empresa multinacional de grande porte, fabricante de eletrodomésticos da linha branca que utiliza o MFD há sete anos, e visou confrontar os dados e questões relacionados ao MFD levantados na literatura com relação a sua pertinência na aplicação em casos reais. As questões das entrevistas são apresentadas no apêndice C.

Principais contribuições dos especialistas

- Aplicação do MFD transcende questões inerentes ao método, relacionando-se com questões organizacionais e culturais
- Empresas podem encontrar em sua cultura corporativa empecilhos para implementação do design modular (MODULAR DESIGN PLAYBOOK, 2010)
- Necessidade de alto investimento inicial com retorno a longo prazo.
- MFD deve ser aplicado por equipe multidisciplinar para um preenchimento de matrizes equilibrado.
- Equipe precisa ter profundo conhecimento sobre o produto e os processos, pois esse conhecimento influencia a arquitetura do produto (Kexin, 2004).
- A adaptação do método à realidade da empresa também precisa considerar a escolha das diretrizes.
- Dificuldade em definir complexidade de projetos, visto que a decomposição dos produtos pode ser feita de diferentes formas.
- Necessidade de conferir o nível de novidade que um produto representa para a empresa.
- As partes relacionadas as funções básicas dos produtos são mais duradouras, enquanto a parte externa pode variar para acompanhar tendências.

Figura 3-3: Principais contribuições dos especialistas

Levantadas estas questões, sob as perspectivas teórica, acadêmica e prática, propôs-se um método adaptado, que visa facilitar a implementação nas empresas. O Método proposto foi chamado de *Modular Function Deployment Adapted* - MFDA.

O método MFDA pode ser classificado como um método prescritivo, pois representações prescritivas tendem a ser focadas em problemas e baseadas em sugestões de melhores práticas, proporcionando uma sequência detalhada e sistemática de atividades para o praticante seguir, caso julgue necessário, e são frequentemente representados por uma progressão linear, às vezes com loops de feedback ou sobreposição de estágios para indicar iteração (Pugh, 1996 apud Moultrie, 2007).

3.4 Proposta *Modular Function Deployment Adapted*

Com base na análise do método MFD, bem como de melhorias propostas por outros autores, pode-se chegar a uma proposta de método adaptado, denominado *Modular Function Deployment Adapted* - MFDA. Um método fornece um guia para a realização de um conjunto de atividades, com foco em como um conjunto relacionado de técnicas podem ser integradas e fornecendo orientações sobre seu uso (NUSEIBEH; EASTERBROOK, 2000).

O método proposto é alinhado as atividades do PDP, na concepção de produtos. Optou-se por manter as macro etapas originais do método, fazendo adaptações e melhorias nas ferramentas e procedimentos utilizados. Quanto à organização do método, optou-se por seguir a organização proposta por Borjesson (2009), que se assemelha a estruturação tradicional do método QFD. A Figura 3.3 apresenta o MFDA, integrado ao modelo de desenvolvimento de produto de Ulrich e Eppinger (2000). As etapas destacadas em negrito são as etapas na qual são sugeridas modificações às abordagens tradicionais. As demais etapas, etapas 4 e 5, seguem as abordagens de Erixon (1998) e a etapa 2 segue a abordagem sugerida por Borjesson (2009).

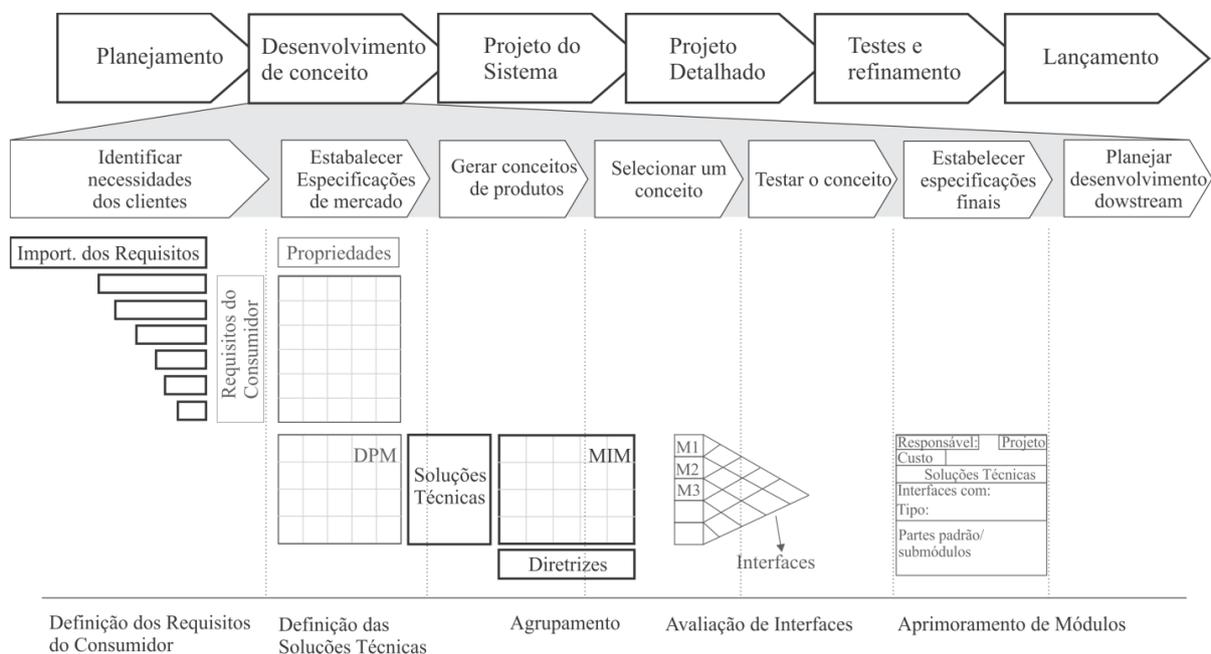


Figura 3-4: MFDA integrado a um modelo referencial de desenvolvimento de produtos

Conforme a Figura 3.3, demonstra-se o PDP de Ulrich e Eppinger (2000), cuja fase de desenvolvimento do conceito, escopo deste artigo, é detalhada contendo sete etapas, e o MFDA é apresentado como suporte a estas etapas destacadas na figura. Na seqüência, as etapas 1 e 3 do método que sofreram alterações na proposta são detalhadas. Da mesma forma é apresentada a etapa 2, que apesar de não apresentar nenhuma alteração com relação a abordagem de Borjesson (2009), é considerada fundamental para o entendimento do método.

3.4.1 Definição de Requisitos

A etapa inicial, de definição dos requisitos do cliente, é dividida em duas atividades principais. A primeira atividade visa fornecer informações a respeito da geração de variedade, é um aprimoramento proposto ao método. A segunda atividade se utiliza da matriz do QFD, é oriunda da proposta original de Erixon (1998).

Na primeira atividade, os requisitos são tratados de forma a identificar o que é visto pelos clientes como diferenciador do produto e o que é visto como básico. Os requisitos vistos pelos clientes como itens diferenciadores indicam quais soluções/componentes do produto devem ser trabalhados para entregar ao cliente variedade, de acordo com suas necessidades. Esta identificação pode ser feita através de um questionário quantitativo, no qual os consumidores atribuem uma importância a cada requisito demandado do produto. Um gráfico de barras ordenado (Figura 3.4) ilustrando a importância das demandas dos clientes pode ser utilizado como apoio ao preenchimento da matriz MIM. Esta fase trata do detalhamento e consolidação dos requisitos, uma vez que a equipe de projeto parte do plano do projeto que contem informações a respeito dos segmentos que o produto deve atingir e quais são os requisitos associados a cada segmento. Esta abordagem segue a descrita por Jiao e Tseng (1999), na qual os requisitos funcionais do produto são categorizados em diferentes agrupamentos, caracterizando grupos específicos de consumidores, e um gráfico é empregado para ilustrar os requisitos chave desses grupos. Esta análise permite quantificar a importância relativa de cada requisito, discriminando-os em dois grupos: os que dependem do segmento, itens julgados com alta importância e percebidos com maior valor pelo consumidor, e itens que podem ser replicados em todas as variantes do produto – considerados de baixa importância pelo consumidor (JIAO; TSENG, 1999). A abordagem proposta pelo MFDA segue a abordagem de Ye e Gershenson (2008) para especificação de atributos, na qual é necessário segmentar o mercado, analisar as necessidades dos clientes e identificar quais requisitos do produto satisfazem a estas necessidades.

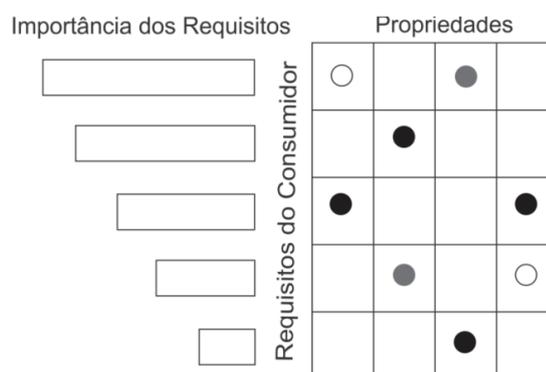


Figura 3-5: Etapa de definição dos requisitos dos clientes

3.4.2 Definição de Soluções Técnicas

Nesta etapa, utiliza-se a matriz DPM relacionando as soluções técnicas com as propriedades do produto. As soluções técnicas são encontradas através de decomposição funcional (PAHL; BEITZ, 1996; ROOZENBURG; EEKELS, 1995), ilustrada na Figura 3.5. Quando duas ou mais soluções técnicas podem cumprir uma determinada função do produto, pode-se escolher a mais adequada através da Matriz de Pugh (PUGH, 1991).

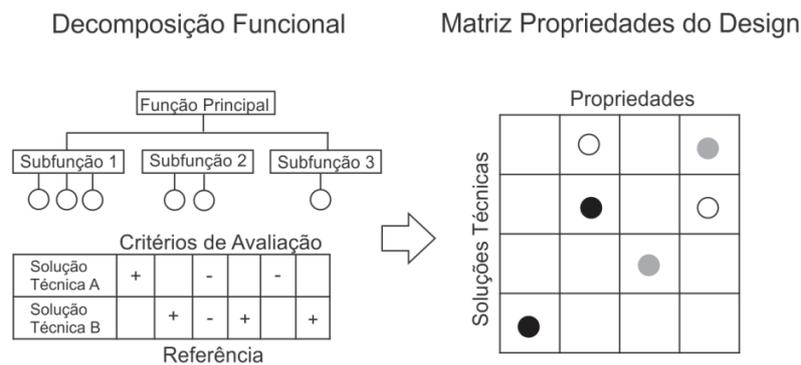


Figura 3-6: Etapa de Seleção de Soluções Técnicas

A matriz DPM (Figura 3.5) visa quantificar a importância das soluções técnicas propostas e é preenchida de forma similar a matriz da qualidade utilizada na primeira etapa.

3.4.3 Agrupamento

Esta etapa é considerada chave do MFD, pois é onde o processo de agrupamento das soluções técnicas em módulos ocorre. Nesta etapa, propõem-se duas diferentes abordagens: para produtos de baixa e alta complexidade.

Para produtos de baixa complexidade, sugere-se: utilização da abordagem tradicional de Erixon (1998), onde as soluções técnicas de maior pontuação são transformadas em módulos e as soluções de menor pontuação são integradas aos módulos conforme relações de similaridade apontadas na matriz MIM, através de soma simples das pontuações dadas às relações das soluções técnicas com cada uma das diretrizes (Figura 3.6). Uma melhoria proposta neste artigo é a priorização das diretrizes conforme estratégia da empresa. As diretrizes de modularização são os objetivos estratégicos pelos quais uma empresa busca modularizar seus produtos. Nem todas as diretrizes para a modularização apontam para uma mesma solução estrutural, e é necessário que a equipe de desenvolvimento reavalie as soluções analisando situações de conflito dentre os requisitos. Priorizando as diretrizes através

de uma atribuição de pesos, é possível conduzir a modularização dando ênfase aos aspectos mais importantes para cada caso específico. Esta priorização dos requisitos está em consonância com a abordagem de Seliger e Zettl (2008), na qual se assume que algumas diretrizes são mais importantes que outras no processo de modularização.

Para produtos de alta complexidade sugere-se: utilização da análise de agrupamento e geração de dendrograma utilizada por Borjesson (2009). Para produtos com grande número de componentes, pode tornar-se dispendioso o processo de análise das soluções técnicas conforme a simples pontuação dada pelo preenchimento da MIM. Neste caso, considera-se a análise de agrupamentos, evitando assim a possibilidade de falhas que podem ser geradas pela grande quantidade de soluções a serem analisadas (Figura 3.6). Em projetos que envolvem grande número de dados, por razões práticas a modularização pode ser feita através de métodos estatísticos (BORJESSON, 2009). A Figura 3.6 apresenta um comparativo entre as duas abordagens.

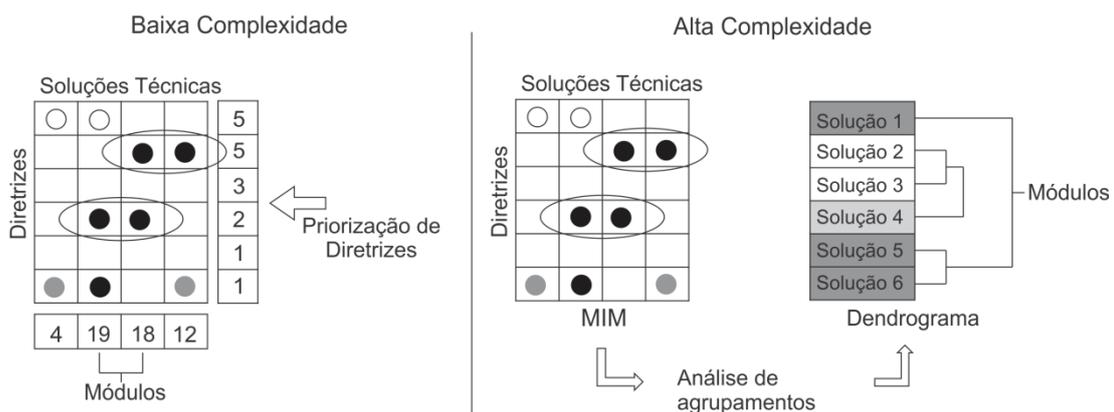


Figura 3-7: Geração de Módulos para produtos de baixa e alta complexidade

3.5 Discussão

A adaptação do método foi realizada para duas dimensões de diferenciação, a complexidade e a novidade (Figura 3.7). A complexidade diz respeito, principalmente, a forma de trabalhar com as informações na matriz MIM. Para produtos mais complexos, isto é, com maior número de componentes (entre outras características) a interpretação da MIM torna-se mais prática se auxiliada por análise de agrupamentos. Análise de clusters ou agrupamentos é uma técnica estatística cujo objetivo é encontrar similaridade entre um conjunto de objetos de acordo com critérios previamente estabelecidos (HAIR *et al.*, 2005). Neste caso, os critérios são as diretrizes e os objetos são os componentes ou partes que serão

agrupados por similaridade e formarão grupos, os indicativos dos possíveis módulos. A análise de agrupamentos possibilita o agrupamento dos módulos de acordo com a similaridade destes em relação às variáveis classificatórias, que neste caso são as diretrizes de modularização. Quando da entrada de poucos dados, produtos mais simples e com menor número de componentes, o método original de soma simples apresenta-se como um meio mais rápido de interpretação da MIM.

Com relação ao critério novidade, a variação está na seleção das atividades/etapas do método. Para projetos com alto grau de novidade para a empresa, faz-se necessária a utilização do método completo, com todas as etapas, o qual guia a empresa no desenvolvimento do conceito do produto desde o recolhimento dos requisitos do cliente até a avaliação da arquitetura modular. Em casos de melhorias em projetos já existentes, na qual os requisitos do cliente são conhecidos e as soluções técnicas já estabelecidas, não se faz necessário passar pelas duas primeiras etapas do método, 'Definição de Requisitos' e 'Definição de Soluções Técnicas' pois o conhecimento fornecido por elas já é de domínio da empresa. Porém, a decisão de excluir estas duas etapas deve ser avaliada pela empresa, pois em situações especiais de projetos de baixa novidade pode ser necessário rever os requisitos do cliente.

A proposição de um método adaptado, que leva em conta a existência de projetos simples e de baixa novidade, pode ser útil, auxiliando a empresa a modularizar estes produtos sem exigir grande uso de recursos e tampouco de tempo para sua aplicação. Conforme citado por Lau (2011), gestores de empresas de pequeno porte não utilizam métodos para a modularização de seus produtos, alegando que os mesmos são difíceis de entender e de implementar.

Por outro lado, a adaptação considerando produtos complexos e de grande novidade para a empresa, é válida ao passo em que apresenta uma configuração de método mais robusta para lidar com essas características. O MFD tradicional visa à criação de variedade (diretrizes de variedade), mas nenhum passo anterior no método explicita a obtenção do conhecimento do que é visto como diferenciador do produto. Por isso, a configuração de método mais completo apresenta um aprimoramento na primeira etapa, com a intenção de auxiliar a empresa a reconhecer o que é visto pelos seus clientes como diferenciador do produto e caracterizador de diferentes nichos de mercado.

Na Figura 3.7, a matriz representa os diferentes níveis de complexidade e novidade que os projetos de uma empresa podem assumir. Os limites de cada quadrante podem ser aferidos conforme as dimensões e variáveis anteriormente citadas e apresentadas na Figura

3.2. Como demonstra a Figura 3.7, a equipe seleciona o quadrante de acordo com as características de cada projeto. Com base no quadrante, o MFDA apresenta diferentes configurações adaptadas às necessidades específicas desses projetos. Cada configuração do método considera, portanto, diferentes graus de complexidade do produto e o grau de novidade, apresentando um diferente arranjo na sequência das ferramentas, ou a utilização de mais ou menos etapas, conforme as necessidades identificadas pela empresa.

O MFDA é proposto para pontos âncora da escala, de alta e baixa novidade e complexidade. O nível intermediário depende de muitas outras variáveis, como nível de maturidade da empresa, entre outros, e não é abordado neste trabalho.

Outro aprimoramento feito ao método tem relação com a solução de divergências na interpretação da matriz MIM quando feita através de soma simples. Conforme citado por outros autores (SELIGER; ZETTL, 2008), nem todas as diretrizes tem o mesmo peso, a mesma importância. No método original, todas as diretrizes possuem a mesma importância. Com a priorização de diretrizes, garante-se que os objetivos maiores da empresa com relação a modularização serão atingidos.

Uma questão relacionada ao uso do MFD é sua baixa repetibilidade, devido às características relacionadas ao preenchimento da MIM. Tanto as pontuações dadas na matriz, quanto a interpretação feita pela equipe na geração dos módulos, afetam a repetibilidade do método. A utilização de um dendrograma para o agrupamento das soluções da matriz MIM pode resolver parcialmente esta questão, uma vez que a pontuação dada as soluções técnicas ainda é dependente do conhecimento da equipe. O dendrograma é uma forma de garantir que a interpretação da matriz, dado que ela esteja consolidada, seja feita sempre de forma semelhante. O dendrograma também precisa ser ajustado pela equipe, pois pode fornecer agrupamentos inviáveis e é necessário ajustá-lo. Desta forma, percebe-se que o dendrograma atua muito mais com relação à praticidade, principalmente em situações de análise de muitas soluções, do que com relação à qualidade e repetibilidade do método.

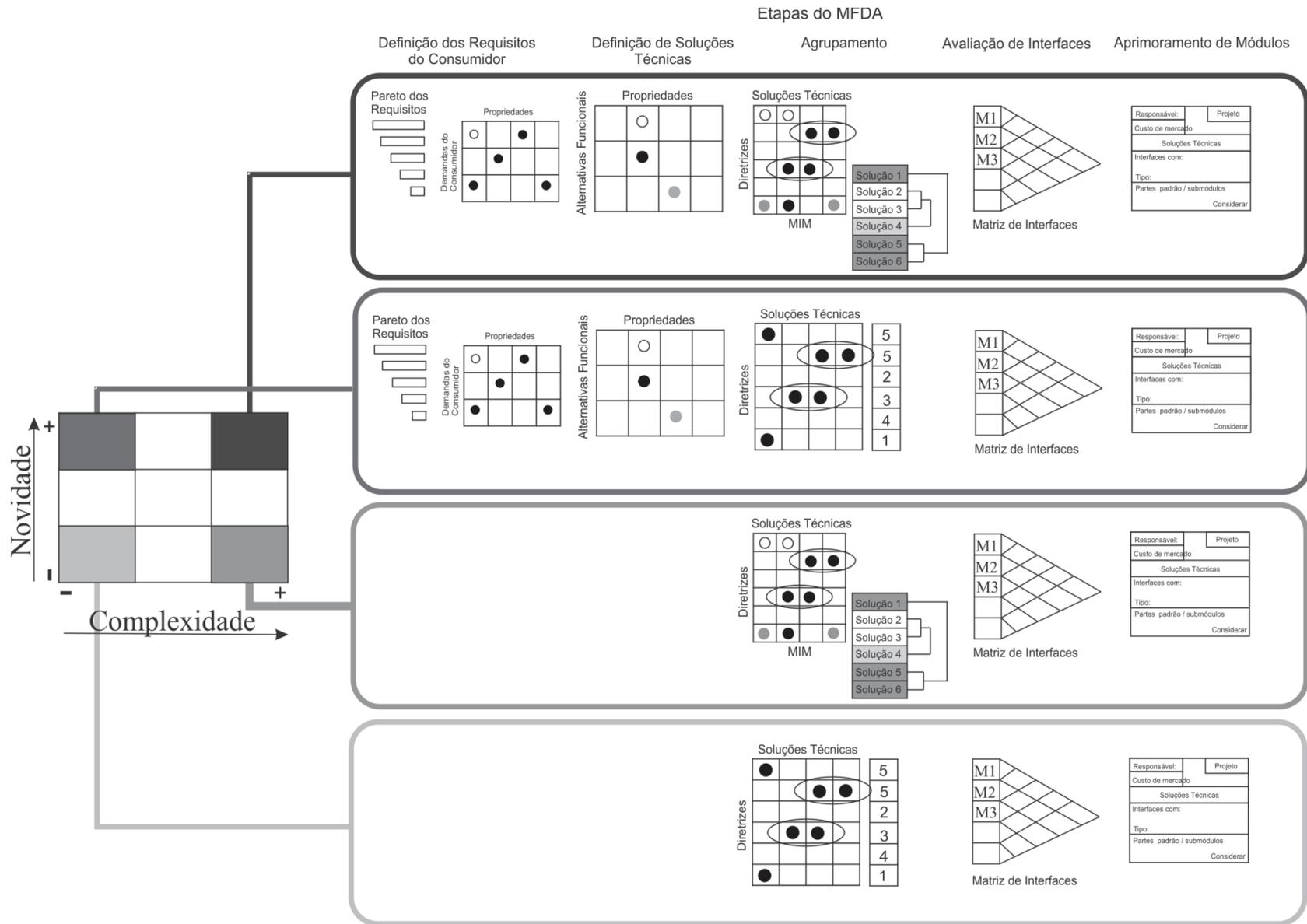


Figura 3-8: Quatro diferentes configuração do MFDA, conforme complexidade e novidade

O método original de Erixon (1998) não propõe uma ferramenta ou método específico para o aprimoramento dos módulos finais, ou seja, a última etapa. Neste trabalho, também não é apresentado uma ferramenta específica, pois as empresas podem optar por utilizar ferramentas já incorporadas em seu processo de desenvolvimento.

Acredita-se que o método MFDA seja de fácil incorporação ao PDP de uma empresa, pois já traz em suas etapas atividades características da fase de desenvolvimento de conceito e reconhecidas como melhores práticas, como o QFD e a matriz de Pugh. Desta forma, uma empresa já familiarizada com um processo de desenvolvimento e com melhores práticas, detém um conhecimento prévio para a implementação do método, facilitando a sua aceitação nas empresas.

3.6 Conclusão e pesquisas futuras

O objetivo deste trabalho é apresentar uma proposta de adaptação do método MFD (ERIXON, 1998), considerando projetos que apresentem diferentes níveis de complexidade e novidade. Esta adaptação visa facilitar a implementação do método, pois as empresas podem escolher uma configuração do método que melhor se ajusta as suas necessidades específicas.

A proposta do método adaptado surgiu de uma pesquisa realizada em três etapas: uma revisão sistemática, que objetivou analisar métodos para modularização propostos na literatura, sustentando a escolha de um método; revisão de literatura a respeito do método escolhido, aplicações, benefícios, aprimoramentos sugeridos por outros autores; e entrevistas semi estruturadas com professor especialista e profissionais de empresa de eletrodomésticos da linha branca, para levantamento de informações a respeito do método nascidas no campo prático.

As fontes consultadas suportaram as modificações propostas ao método MFD, gerando o método MFDA. Além da adaptação a diferentes tipos de projeto, o MFDA também traz algumas proposições de melhorias em duas etapas do método, visando incluir a questão da variedade na modularização de produtos, bem como facilitar a interpretação da matriz MIM, a matriz onde o processo de modularização ocorre. Desta forma, o MFDA se apresenta como uma solução para a questão levantada na hipótese, demonstrando que é possível selecionar diferentes configurações do método, indicadas para diferentes necessidades e tipos de projeto.

A proposta de um método adaptado traz a necessidade de teste do mesmo, para conferir a viabilidade de sua utilização. Apresenta-se também como uma lacuna o estudo das

diretrizes de modularização, pois a qualidade do processo depende fortemente das diretrizes escolhidas para a empresa para guiar o agrupamento em módulos.

3.7 Referências Bibliográficas

ALIZON, F.; SHOOTER, S.B.; SIMPSON, T.W. Improving an existing product family based on commonality/diversity, modularity, and cost. *Design Studies* v. 28, p. 387-409, 2007.

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

ARCHER, J.A.; SCALICE, R.K. Aplicação e Análise de Uso de Três Metodologias de Projeto de Produtos Modulares. XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. São Paulo, Brasil, 2010.

BI, Z.M.; ZHANG, W.J..Modularity Technology in Manufacturing: Taxonomy and Issues. *International Journal of advanced Manufacturing Technology* v 18, p. 381-390, 2001.

BLACKENFELT, M. Managing complexity by product modularization: balancing the aspects of technology and business during the design process. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2001

BORJESSON, F. Improved Output In Modular Function Deployment Using Heuristics. International Conference on engineering design, ICED 2009. Estados Unidos, 2009.

CHANDRASEKARAN, B.; STONE, R. B.; MCADAMS, D.A. Developing Design Templates for Product Platform Focused Design. *Journal of Engineering Design* v. 15, p. 209-228, 2004.

CLARK, K.B.; FUJIMOTO, T. Product Development and Competitiveness. *Journal of the Japanese and International Economies* v.6, p.101-143, 1992.

DAHMUS, J.B.; GONZALES-ZUGASTI, J.P.; OTTO, K.N. Modular product architecture. *Design Studies* v.22, p. 409-424, 2001.

DANIILIDIS, C.; ENBLIN, V.; EBEN, K.; LINDEMANN, U.A Classification framework for product modularization methods. *Proceedings of International Conference on Engineering Design*. Dinamarca, 2011.

DANIILIDIS, H.; BAUER, W.; LINDEMANN, U. Compendium for modular and platform based architecting. *Procedia Computer Science* v. 8, p. 220-225, 2012.

ELMARAGHY, W.; ELMARAGHY, H.; TOMIYAMA, T.; MONOSTORI, L. Complexity in engineering design and manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2012.

ERIXON, G. “Modular Function Deployment – a method for product modularization”. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technnology, Stockholm, 1998.

GERSHENSON J.K.; PRASAD G.J.; ZHANG Y. Product modularity: measures and design methods. *Journal of Engineering Design* v. 15, p. 33-51, 2004.

- HAIR, J.F. *e tal. Análise Multivariada de dados*. 5º ed. Porto Alegre: Bookmann, 2005.
- HELMER, R.; YASSINE, A.; MEYER, C. Systematic module and interface definition using component design structure matrix. *Journal of Engineering Design* v.21, p. 647-675, 2010.
- HOLMQVIST, T.K.P.; PERSSON, M.L. Analysis and Improvement of Product Modularization Methods: Their Ability to Deal with Complex Products. *Systems Engineering* v.6, p. 195-209, 2003.
- HOLTTA, K. M.M.; OTTO, K. N. Incorporating design effort complexity measures in product architectural design and assessment. *Design Studies* v. 26, p. 463-485, 2005.
- HOLTTA-OTTO, K.; de WECK, O. Degree of modularity in engineering systems and products with technical and business constraints. *Concurrent Engineering-Research and Applications* v.15, p.113-126, 2007.
- HOLTA-OTTO, K.; TANG, V.; OTTO, K. Analyzing module commonality for platform design using dendrograms. *Research Engineering Design* v. 19, p. 127-141, 2008.
- JIANG, L.; ALLADA, V. Robust Modular product family design using a modified Taguchi Method. *Journal of Engineering Design* v. 16, p. 443-458, 2005.
- JIAO, J.; TSENG, M.M. A methodology of developing product family architecture for mass customization. *Journal of Intelligent Manufacturing* v. 10, p. 3-20, 1999.
- JOSE, A.; TOLLENAERE, M. Modular and platform methods for product family design: literature analysis. *Journal of Intelligent Manufacturing* v.16, p. 371-390, 2005.
- KAHN, K.B.; BARCZAK, G.; NICHOLAS, J.; LEDWITH, A.; PERKS, H.. An Examination of New Product Development Best Practice. *Journal of Production Innovation Management* v. 29, p. 180-192, 2012.
- KEXIN, H..Advantages and disadvantages of modularity. Proceedings from the 2nd seminar on development of modular products. Dalarna University, Suécia, 2004.
- KITCHENHAM, B. Procedures for Performing Systematic Reviews. Technical report, Keele University and NICTA, 2004.
- KONG, F.B.; MING, X.G.; WANG, L.; WANG, X.H.; WANG, P.P..On Modular Products Development. *Concurrent Engineering, Research and Applications* v. 17, p. 291-300, 2010.
- LAU, A.K.W. Critical success factors in managing modular production design: Six company case studies in Hong Kong, China and Singapore. *Journal Engineering and Technology Management* v.28, p.168-183, 2011.
- MARTIN, M.V.; ISHII, K. Design for variety: developing standardized and modularized product platform architectures. *Research in Engineering Design* v.13, p.213–235, 2002.
- MEEHAN, J.S.; DUFFY, A.H.B.; WHITFIELD, R.I. Supporting ‘Design for Re-use’ with Modular Design. *Concurrent Engineering: Research and Applications* v.15, p.141-155, 2007.

- MOULTRIE, J., CLARKSON, P. J., & PROBERT, D. Development of a Design Audit Tool for SMEs. *Development*, (1987), 335-368, 2007.
- NEPAL, B., MONPLAISIR, L.; SINGH, N. Integrated fuzzy logic-based model for product modularization during concept development phase. *International Journal of Production Economics* v.96, p.157-174, 2005.
- NUSEIBEH, B.; EASTERBROOK, S. Requirements Engineering: A Roadmap. *Proceedings of International Conference on Software Engineering*, Limerick, Ireland, ACM Press, 2000.
- PAHL, G.; BEITZ, W. *Engineering design. A systematic Approach*. London: Springer-Verlag London, 1996.
- PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.H. *Engineering Design: A Systematic Approach*, Third Edition. London: Springer-Verlag, 2007.
- PARK, J.; SHIN, D.; INSUN, P.; HYEMI, H. A product platform concept development method. *Journal of Engineering Design* v.19, p.515-532, 2008.
- PIMMLER, T.U.; EPPINGER, S.D. Integration analysis of product decompositions. ASME Design Theory and Methodology Conference. Minneapolis, 1994.
- PMBOK. Um Guia do Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos (Guia PMBOK®) Quarta Edição 2008 Project Management Institute, EUA.
- PUGH, S. *Total Design Integrated Methods for Successful Product Engineering*. Adison Wesley Publishing Company, 1991.
- ROZENFELD, H; FORCELLINI, FA.; AMARAL, DC.; TOLEDO, J.C.; SILVA, S.L.; ALLIPRANDINI, D.H., SCALICE, R.K. *Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo*. São Paulo: Saraiva, 2006.
- ROOZENBURG, N.F.M.; EEKELS, J. *Product Design: Fundamentals and Methods*, John Wiley & Sons Ltd, England, 1996.
- SAND, J.C.; GU, P.; WATSON, G. HOME: House Of Modular Enhancement— a Tool for Modular Product Redesign. *Concurrent Engineering: Research and Applications* v.10, p.153-164, 2002.
- SCHUH, G.; LENDERS, M.; ARNOSCHT, J. Focussing product innovation and fostering economies of scale based on adaptative product platforms. *CIRP Annals, Manufacturing Technology* v 58, p. 131-134, 2009.
- SELIGER, G.; ZETTL.M. Modularization as an enabler for cycle economy. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* v.57, p.133-136, 2008.
- SERED, Y.; REICH, Y. Standardization and modularization driven by minimizing overall process effort. *Computer-Aided Design* v. 38, p. 405–416, 2006.
- SHENHAR *et al.* Toward a NASA-Specific Project Management Framework. *Engineering Management Journal* v.17, p.8-17, 2005.

- SHENHAR, A.J., DVIR, D. "How Projects Differ, and What to Do About It," in *The Wiley Guide to Managing Projects*, Wiley & Sons, p.1265–86, 2004.
- STONE, R. B.; MCADAMS, D.A.; KAYYALETHEKKEL, V.J.A product architecture-based conceptual DFA technique. *Design Studies* v.25, p.301-325, 2004.
- STONE, R.B.; WOOD, K. L.; CRAWFORD, R.H.A heuristic method for identifying modules for product architectures. *Design Studies* v.21, p.5-31, 2000.
- STONE, R.B.; WOOD, K. L.; CRAWFORD, R.H. Using quantitative functional models to develop product architectures. *Design Studies* v.21, p.239-260, 2000.
- TATIKONDA, M.. An empirical study of platform and derivative product development projects. *Journal of Production Innovation Management* v.16, p.3-26, 1999.
- TIDD, J.; BODLEY, K.. The influence of project novelty on the new product development process. *R&D Management* v.32,p.127-138, 2002.
- ULRICH, K.; EPPINGER, S.D. *Product design and development*. The McGraw-Hill Companies, 2nd ed, 2000.
- ZHA, X.F.; SRIRAM, R.D. Platform-based product design and development: A knowledge-intensive support approach. *Knowledge-Based Systems*v.19, p.524–543, 2006.
- ZHANG, W. Y.; TOR, S. Y.; BRITTON, G. A..Managing modularity in product family design with functional modeling. *International Journal of advanced manufacturing Technology* v. 30, p.579-588, 2006.
- ZHUO, L; SAN, W.Y.; SENG, L. K. Integrated approach to modularize the conceptual product family architecture. *International Journal of advanced Manufacturing Technology* v.36, p.83-96, 2008.
- YE, X.; GERSHENSON, J.K.. Attribute-based clustering methodology for product family design. *Journal of Engineering Design* v.19, p.571-586, 2008.
- YOON, E.; LILIEN, G.L. New industrial product performance: the effects of market characteristics and strategy. *Journal Production Innovation Management* v.3, p.134-144, 1995.
- YU, T. L.; YASSINE, A. A. ; GOLDBERG, D. E.. An information theoretic method for developing modular architectures using genetic algorithms. *Research In Engineering Design* v.18, p.91-109, 2007.

3.8. Apêndices

Apêndice A

Protocolo de Busca - Março de 2012		
Quais são os métodos existentes para identificar, selecionar e avaliar conceitos em projetos modulares no desenvolvimento de produtos?		
	Science Direct	Web of Science
((“mass customization” OR “product platform” OR “product family” OR “product architecture”) AND modul*) em títulos, resumos e palavras-chave (sem restrição quanto a data de publicação)	62	565
Somente artigos de periódicos	62	292
Língua inglesa	—	291
Áreas de conhecimento: Operations Research Management Science, Eng. Manufacturing, Eng. Industrial, Management, Computer Science Interdisciplinary Applications, Business, Eng. Multidisciplinary e Planning Development.	—	232
Total de artigos:	294 artigos	
Remoção dos artigos duplicados	(-19) = 275 artigos	
Inclusão de literatura cinzenta: (Erixon, 1998; Pimmler e Eppinger, 1994):	(+2) = 277 artigos	
Seleção de artigos: 1º triagem: exclusão dos artigos que claramente não tratavam do escopo da pesquisa	(277 - 197) = 80 artigos	
Seleção de Artigos: 2º triagem: artigos que apresentem métodos para a modularização de arquiteturas individuais	20 artigos	
Seleção de Artigos: 3º triagem: exclusão dos métodos repetidos (consideração da fonte primária)	6 métodos	
Extração de dados: Parâmetros de classificação (Daniilidis <i>et al.</i> , 2011); análise conforme as três fases críticas (Holmqvist e Persson, 2003)	6 métodos	

Figura A.1: Protocolo de Busca Revisão Sistemática

Apêndice B

Método	Objetivos	Decomposição	Integração	Avaliação	Artigos
Design Structure Matrix - DSM	Documentar as interações entre os elementos de um produto, que podem ser espaciais, de energia, de informação ou de material, e identificar potenciais agrupamentos com base em critérios pré-estabelecidos pela equipe	Decomposição do sistema em elementos	Análise de interações físicas e funcionais entre elementos Identificação de potenciais agrupamentos		Pimmler e Eppinger, 1994; Helmer, Yassine, Meyer, 2010; Alizon, Shooter, Simpson, 2007; Holttä Otto, de Weck, 2007; Yu, Yassine, Goldberg, 2007; Holttä Otto, Otto, 2005; Meehan, Duffy, Whitfield, 2007; Park et al., 2008; Sered, Reich, 2006.
Modular Function Deployment - MFD	Modularizar com vista a objetivos estratégicos da empresa	Definição dos requisitos do cliente. Seleção das Soluções Técnicas	Geração de Conceitos - Matriz MIM	Avaliação dos conceitos - Matriz de Interfaces. Aprimoramento dos módulos.	Erixon, 1998
Método Heurístico - 2000	Identificar módulos de acordo com fluxos importantes em uma estrutura funcional.	Decomposição funcional	Aplicação de três heurísticas (Fluxo dominante, fluxo ramificado, e fluxo de conversão-transmissão)		Stone, Wood, Crawford, 2000; Zhuo, San, Seng, 2008; Zha, Sriram, 2006; Chandrasekaram, Stone, McAdams, 2004; Stone, McAdams, Kayyalethekkel, 2004; Dahmus, Gonzales-Zugasti, Otto, 2001; Stone, Wood, Crawford, 2000.
Design for Variety - DfV	Incorporar padronização e modularização para redução de custos futuros e de esforços de	Geração dos índices GVI e CI	Ordenar componentes Determinar onde modularizar (CI) e onde padronizar (GVI) Desenvolver arquitetura (componentes-funções/ interfaces)		Martin e Ishii, 2002
House of modular Enhancement - HOME	Adicionar questões relacionadas ao ciclo de vida do produto ainda na fase de projeto, através do redesign de produtos.	Matriz de informação do design modular - Ciclo de vida, arquitetura e requisitos funcionais.	Matriz EMIM - Algoritmo de Agrupamento	Análise do design modular	Sand, Gu, Watson 2002
Fuzzy Logic Based - FLB	Otimizar a arquitetura do produto com vista aos custos, mas também com relação a qualidade, confiabilidade e manufaturabilidade.	Processo de aquisição do conhecimento (análise geral do produto - identificação das variáveis linguísticas...)	Inferência Fuzzy Modelo matemático baseado em algoritmo de tecnologia de grupo.		Nepal, Monplaisir e Singh, 2005

Figura B1: Métodos para modularização

Apêndice C

Entrevista com especialista acadêmico:

Existe uma divisão entre métodos para modularização de produtos individuais, família e para portfólio?

Classificação conforme parâmetros e divisão conforme 3 fases críticas?

O problema maior é: falta de métodos ou dificuldade em implementar os métodos que já existem?

É justificável pensar em adequar o método para lidar com produtos de diferentes características, como complexidade e novidade?

É justificável fazer aprimoramentos no método MFD ?

Faz sentido priorizar as diretrizes? Tendo em vista que nem todos tem a mesma importância para a empresa.

A integração do método em um modelo de PDP é válido?

Qual sua opinião a respeito da qualidade do resultados do MFD.

Figura C.1: Entrevista com especialista acadêmico

Entrevista com profissionais especialistas:

Como a empresa lida com a geração e seleção de conceitos em produtos modulares?

Acham que existe escassez de métodos ou dificuldade em implementar os que já existem?

Quais as características e background da equipe?

Já utilizaram da forma tradicional (sem dendrograma)?

Consideram o resultado satisfatório?

Acham que a utilização do método gasta muito tempo?

Acreditam que fica muito a encargo da equipe? (resolução de trade-offs)

Aplicam as fases finais? Usam quais ferramentas?

Acreditam que todas as diretrizes tem o mesmo peso na hora da modularização?

A empresa incluiu no MFD diretrizes específicas?

Dificuldades encontradas atualmente?

O que vocês sugerem como melhoria pro método?

Acreditam que o método é adequado para produtos de todas as complexidades?

Tem sugestões ? (livres).

Figura C.2: Entrevista com profissionais especialistas

4 APLICAÇÃO DO MÉTODO MODULAR FUNCTION DEPLOYMENT ADAPTED EM MÁQUINA DE HEMODIÁLISE

Monique Sonego (PPGEP/UFRGS)

moniqueds@producao.ufrgs.br

Márcia Elisa Soares Echeveste (PPGEP/UFRGS)

echeveste@producao.ufrgs.br

Patrícia Flores Magnago (PPGEP/UFRGS)

patriciafm@producao.ufrgs.br

Resumo:

A adoção da estratégia de modularização requer das empresas a implementação de novos processos para a criação e a realização de seus produtos. Na literatura são propostos diferentes métodos que auxiliam a modularização de produtos, conduzindo o processo com vista a diferentes objetivos, como melhoria de desempenho, confiabilidade, segurança e aspectos ambientais. No entanto, estes métodos apresentam uma sequência de atividades únicas, e não consideram a aplicação em projetos de produtos com diferentes características. Para suporte à modularização, encontra-se na literatura o método MFD (*Modular Function Deployment*). Esta pesquisa propõe uma adaptação ao método denominada de MFD-A (*MFD_Adapted*) para cada projeto com diferentes níveis de complexidade e novidade. O objetivo desta pesquisa é aplicar uma parte do método MFDA em um equipamento médico, a máquina de hemodiálise. Para sustentar o teste de aplicação do MFDA, foi realizada uma revisão de literatura, e levantamento de experiências com especialistas para aplicação do método com o conhecimento de técnicos especializados. Como contribuição desta pesquisa destaca-se a aplicação detalhada do método proposto, podendo ser replicado em projetos de desenvolvimento de equipamentos que utilizem a estratégia de modularidade.

Palavras chave: modularização, Modular Function Deployment, complexidade, novidade, máquina de hemodiálise.

Abstract: Adopting a modularization strategy demands from companies the implementation of new processes for creation and accomplishment of their products. Different methods are proposed in the literature to support product modularization, leading the process with different objectives, such as improvement of performance, reliability, safety and environmental aspects. However, those methods present a sequence of unique activities, and they do not

consider the application in product projects with distinct characteristics. To support modularization, the literature suggests the MFD (*Modular Function Deployment*) method. This research proposes a method adaptation called MFD-A (*MFD_Adapted*) aimed at projects with various complexity and novelty levels. The objective of this research is to apply part of the MFD-A method to a medical device, a hemodialysis machine. To support the MFDA application test, a literature review was carried out, as well as an experience survey with experts to apply the method with the knowledge of specialists. The detailed application of the proposed method is among the contributions of this research, and such method can be used in development projects of devices that rely on a modularity strategy.

Keywords: modularization, Modular Function Deployment, Complexity, Novelty, Hemodialysis equipment

4.1 Introdução

A modularização consiste no agrupamento de componentes de um produto em módulos e a definição de interfaces entre estes módulos (HOLMQVIST; PERSSON, 2003). Esta estratégia é indicada para lidar com a rápida mudança de requisitos dos clientes e também com a crescente complexidade técnica dos produtos (KUDERER, 2006). Os benefícios da modularização são a geração de variedade, a redução de custos, a diminuição do *time to market*, e a habilidade para lidar com a complexidade do produto (JOSE; TOLLENAERE, 2005; ULRICH, 2005). Autores consideram a modularização como uma forma de oferecer uma estrutura de gestão do conhecimento, alavancando conhecimentos estratégicos da empresa (SANCHEZ; COLLINS, 2001), bem como pode promover a sustentabilidade (ZETTL *et al.*, 2006). A implementação da modularização consiste em um empreendimento complexo e com impacto em diversos setores da empresa, com implicações que se configuram como um desafio para muitas empresas (MODULAR DESIGN PLAYBOOK, 2010)

Para alcançar os benefícios da modularização, as empresas precisam definir prioridades e adotar novas práticas em seus processos de criação de produtos (SANCHEZ; COLLINS, 2001). O sucesso na adoção da estratégia de modularização requer novos processos para a criação e a realização de produtos (SANCHEZ; COLLINS, 2011). Como forma de promover esses processos, são propostos na literatura métodos e ferramentas para

facilitar a tomada de decisão e a gestão da modularização (HOLMQVIST; PERSSON, 2003; DANIILIDIS *et al.*, 2011).

Existem diferentes métodos que trabalham com a questão da modularização, utilizando-se de diferentes ferramentas. Um dos métodos mais mencionados na literatura é o MFD – *Modular Function Deployment* (ERIXON, 1998) (ALIZON; SHOOTER; SIMPSON, 2007; HOLTAA OTTO; OTTO, 2005; NEPAL; MONPLAISIR; SINGH, 2005; SCHUH; LENDERS; ARNOSCHT, 2009; SAND; GU; WATSON, 2002; PARK *et al.*, 2008; MEEHAN; DUFFY; WHITFIELD, 2007; JIANG; ALLADA, 2005; ZHANG; TOR; BRITTON, 2006; HOLTAA OTTO; TANG; OTTO, 2008; HOLTAA OTTO; WECK, 2007; KONG *et al.*, 2009; ZETTL; SELIGER; BILGEN, 2006; ARCHER; SCALICE; 2010; DANIILIDIS *et al.*, 2011; BORJESSON, 2009; BI; ZHANG, 2001; BLACKENFELT, 2001; HOLMQVIST; PERSSON, 2003), que modulariza produtos com vista a objetivos estratégicos da empresa, traduzidos no método em forma de diretrizes para a modularização. O MFD é composto de cinco etapas, (i) definição dos requisitos do cliente, (ii) definição das soluções técnicas (partes dos produtos), (iii) agrupamento de soluções em módulos, (iv) a avaliação de interfaces e a (v) avaliação do design resultante. O agrupamento de soluções técnicas em módulos é realizado por meio de uma matriz, em que as soluções são confrontadas com as diretrizes (objetivos) com relação as suas razões para a formação de módulos.

No entanto, os métodos para a modularização, entre eles o MFD, não estão associados às atividades relativas ao processo de desenvolvimento de produtos – PDP. O PDP consiste em uma série de atividades que abrangem desde a descoberta de uma oportunidade de negócio até a descontinuidade do produto (ULRICH; EPPINGER, 2000). O PDP de uma empresa gerencia um conjunto de projetos em diferentes estágios de desenvolvimento, constituindo o portfólio de projetos da empresa. Cada projeto é único e apresenta diferentes características. Segundo Shenhar *et al.* (2005), um dos maiores equívocos relacionados a gestão de projetos no processo de desenvolvimento de produtos é considerar que todos os projetos são iguais, e assim sendo, podem ser geridos com a mesma gama de métodos e técnicas. Duas características que diferenciam projetos são a complexidade e a novidade (CLARK; FUJIMOTO, 1992).

Os métodos para modularização encontrados na literatura apresentam configurações únicas, que *a priori* devem servir para todos os tipos de projetos. Um método adaptado, que visa à aplicação em projetos com diferentes características, oferece a empresa a possibilidade de escolher qual a configuração de método que melhor atende a uma situação específica, facilitando a sua implementação. Esta premissa vai ao encontro da afirmação de Shenhar *et*

al.(2005), em que adaptar a abordagem do método a diferentes tipos de projeto é fator chave para o sucesso. Este método adaptado também pode diminuir o tempo e o grau de dificuldade da implementação (LAU, 2011), fatores que ‘desencorajam’ as empresas a utilizarem de tais métodos. Desta constatação surge o *Modular Function Deployment Adapted*, uma adaptação do método MFD para a modularização de produtos de diferentes complexidades e grau de novidade.

Através do método MFD também é possível priorizar a escolha estratégica da empresa para a modularização, através da seleção de diretrizes para realizar a modularização. Erixon (1998) propõe 12 diretrizes, relacionadas a aspectos como o desenvolvimento de produtos, variação, produção, qualidade, aquisição e pós-vendas. Outros autores também propõem diretrizes de modularização (SELIGER; ZETTL, 2008; GU; SOSALE, 1999), criando uma variedade de diretrizes que podem ser selecionadas para compor o método conforme os objetivos e necessidades específicos de cada empresa ou projeto. Através da escolha das diretrizes é possível conduzir a modularização com vista a diferentes fins, como a customização e a sustentabilidade.

O objetivo deste trabalho é aplicar o método MFDA em um caso de produto, realizando a escolha da melhor configuração de método assim como das diretrizes norteadoras do processo.

Na seção de referencial teórico deste trabalho são discutidas as diretrizes para modularização, assim como a aplicabilidade do método MFD. A seguir, é apresentado o método MFDA, uma adaptação do MFD, que visa oferecer uma configuração de método customizada conforme as características específicas de cada projeto. O método MFDA é aplicado a um equipamento hospitalar, e são apresentadas as diretrizes escolhidas para o projeto, à seleção da melhor configuração do MFDA. O resultado é uma proposta de configuração de módulos para o equipamento. Após, discussão a respeito da aplicação e conclusões desta pesquisa.

4.2 Referencial

Na seção de referencial serão abordados os temas diretrizes para modularização e aplicabilidade do método.

4.2.1 Module Drivers - Diretrizes para a Modularização

Segundo Erixon (1998), os efeitos positivos da modularização são o motivo pelo qual as empresas desejam modularizar seus produtos, porém, não é fácil traduzir estes objetivos em diretrizes para o projeto de produtos. O autor propõe 12 diferentes ‘forças motrizes’ para a modularização, que são os objetivos estratégicos da empresa para agrupar soluções técnicas em módulos. Estas diretrizes contemplam todo o ciclo de vida do produto e, por serem genéricas, podem ser complementadas com outras diretrizes conforme estratégias específicas da empresa (ERIXON; Von YXKULL; ARNSTROM, 1996). As 12 diretrizes propostas por Erixon são divididas em seis macro objetivos: desenvolvimento, variedade, fabricação, qualidade, aquisição e pós vendas.

Assim como Erixon, outros autores propõem diretrizes para a modularização (SELIGER; ZETTL, 2008; GU; SOSALE, 1999). Conforme o cenário desenhado pela empresa algumas diretrizes são mais relevantes que outras, enfatizando que a seleção e aplicação das diretrizes têm influência direta na estrutura modular resultante (SELIGER; ZETTL, 2008). Diferentes objetivos levam a uma diferente formação de módulos e, conseqüentemente, conflitos podem ocorrer dando espaço a decisões de projeto (GU; SOSALE, 1999). A Figura 4.1 apresenta um resumo das diretrizes identificadas na literatura, divididas em 12 categorias: tecnologia, montagem e fabricação, reciclagem, serviços e manutenção, atualização/reconfiguração/modificação, padronização, variedade e customização, *time to market*, intensidade de uso, desenvolvimento paralelo, qualidade/testes, compra de produtos prontos.

As diretrizes são utilizadas na matriz MIM – *Module Identification Matrix*. Esta matriz associa as soluções técnicas, dispostas nas colunas, com as diretrizes de modularização, dispostas nas linhas. O relacionamento entre soluções e diretrizes é preenchido com base na seguinte questão, exemplificada com a diretriz de testes: Quão forte é a razão para que uma solução técnica seja um módulo sozinha porque pode ser testada separadamente?

Através da análise Figura 4.1 é possível perceber que existem muitas diretrizes comuns entre as propostas dos três diferentes trabalhos. Tanto Gu e Sosale (1999), Erixon (1998) e Seliger e Zettl (2008) apresentam ao menos uma diretriz relacionada a questões de produção, reciclagem, serviços e manutenção, atualização e/ou modificações e variedade/customização.

As categorias com maior número de diretrizes correspondem aos objetivos mais enfatizados quando se trata de modularização, que são a possibilidade de oferecer maior variedade, a possibilidade de adaptação e modificação dos produtos existentes e as questões relacionadas à produção, como diminuição de custos produtivos e de lead-time.

Seliger e Zettl (2008) também apresentam duas diretrizes inovadoras, que consideram o tempo de desenvolvimento e a intensidade e relações de uso. As relações de uso visam aumentar a taxa de utilização do produto através de estratégias como a servitização. Gu e Sosale (1999) apresentam igualmente duas diretrizes ‘inovadoras’, que levam em consideração a padronização de módulos utilizados em variantes do produto e a possibilidade de conduzir tarefas em paralelo quando do desenvolvimento de produtos complexos.

Uma compilação de diretrizes propostas por diversos autores é apresentada por Kreng e Lee (2004), que se utilizam dos trabalhos de Ericsson e Erixon (1999), Gu e Sosale (1999), Ulrich e Eppinger (2000) e Duray *et al.* (2000) para a proposição de 14 diretrizes voltadas ao ciclo de vida do produto. Seu trabalho não foi incluso na Figura de diretrizes por não apresentar nenhuma diretriz diferente, cuja correspondência não possa ser encontrada nos trabalhos por eles referenciados.

<u>Diretrizes para modularização</u>	
Tecnologia	<ul style="list-style-type: none"> · Partes ou subsistemas que podem ser utilizadas em uma nova geração ou família de produtos (Erixon, 1998). · Partes ou subsistemas que serão ultrapassados em seu ciclo de vida (Erixon, 1998).
Montagem e Fabricação	<ul style="list-style-type: none"> · Módulos devem ser manufaturados separadamente e em diferentes locações, otimizando equipamento e expertise (Gu e Sosale, 1999). · Parte que tenha uma tarefa específica num grupo, encaixe-se no conhecimento da empresa, possua montagem pedagógica ou tenha tempo de montagem extremamente diferente dos outros (Erixon, 1998). · Montagem e configuração: Energia, material, informação, intensidade de fluxo (Seliger, Zettl, 2008). · Competência central: locação da produção (Seliger, Zettl, 2008)
Reciclagem	<ul style="list-style-type: none"> · Duração de vida dos componentes e materiais (Gu e Sosale, 1999) · Concentração de materiais poluentes (ou recicláveis, conforme o caso) (Erixon, 1998). · Remanufatura, reciclagem, descarte (Seliger, Zettl, 2008).
Serviços e Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> · Componentes tem diferentes frequências de manutenção e equipamentos de reparo (Gu e Sosale, 1999) · Partes com manutenção e reparos semelhantes são agrupados em um mesmo módulo (Erixon, 1998) · Ciclo de manutenção (Seliger, Zettl, 2008)
Atualização, Reconfiguração, Modificação	<ul style="list-style-type: none"> · Facilitar a entrada de um novo produto no mercado através da utilização do design e processos já existentes com pequenas modificações (Gu e Sosale, 1999). · Quando duas funções são similares, uma pode converter-se na outra com pequenas modificações de arranjo ou adição de módulos (Gu e Sosale, 1999). · Partes ou subsistemas que possuem características que serão alteradas segundo um plano (Erixon, 1998) · Função a ser atualizada é um módulo separado (Erixon, 1998). · Modificação/adaptação: ciclo de inovação (Seliger, Zettl, 2008).
Padronização	<ul style="list-style-type: none"> · Funções comuns a vários modelos de produtos devem formar módulos padronizados e produzidos em larga escala (Gu e Sosale, 1999)
Variedade e Customização	<ul style="list-style-type: none"> · Proporcionar aos consumidores diferentes modelos para escolha conforme arranjo de módulos opcionais (Gu e Sosale, 1999) · Concentrar alterações para conseguir variantes em um módulo (Erixon, 1998) · Partes influenciadas por tendências e moda (Erixon, 1998) · Funções que possuem a mesma solução física em variantes do produto (Erixon, 1998). · Úso múltiplo de soluções funcionais: variantes, gerações (Seliger, Zettl, 2008) · Variedade de Produtos: variantes de um produto (Seliger, Zettl, 2008).
Time to Market	<ul style="list-style-type: none"> · Tempo de desenvolvimento (Seliger e Zettl, 2008)
Intensidade de uso	<ul style="list-style-type: none"> · Relações de uso (Seliger, Zettl, 2008)
Desenvolvimento Paralelo	<ul style="list-style-type: none"> · Produtos complexos podem ser divididos em tarefas de desenvolvimento e entregues a equipes que as desenvolverão em paralelo (Gu e Sosale, 2008)
Qualidade - Testes	<ul style="list-style-type: none"> · Função que pode ser testada separadamente pode constituir um módulo sozinha (Erixon, 1998).
Compra de produtos prontos	<ul style="list-style-type: none"> · Função que pode ser tratada como uma caixa preta causa redução de custos logísticos (Erixon, 1998)

Figura 4-1: Diretrizes para Modularização

Stake (2001) cita três razões estratégicas para modularizar produtos: gestão da variedade, gestão do desenvolvimento e manufatura de produtos, e questões relacionados ao pós venda. As diretrizes para modularização podem ser agrupadas conforme estas três áreas estratégicas (Figura 4.2). Este agrupamento auxilia a empresa a identificar as diretrizes que melhor atendem a seus objetivos estratégicos.

Áreas Estratégicas	Diretrizes relacionadas
Variedade	Tecnologia, Atualização, Reconfiguração, Modificação, Padronização, Variedade e Customização
Desenvolvimento e Manufatura	Montagem e Fabricação, Time to Market, Desenvolvimento Paralelo, Qualidade e Testes, Compra de Produtos Prontos
Pós-Vendas	Reciclagem, Serviços e Manutenção, Intensidade de uso.

Figura 4-2: Diretrizes relacionados aos objetivos estratégicos da modularização

Segundo Seliger e Zettl (2008), algumas diretrizes são mais importantes que outras no processo de modularização. Desta forma, entre todos os objetivos relacionados à modularização de produtos, dependendo do tipo de produto, as diretrizes podem ter pesos diferenciados. A divisão das diretrizes em diferentes objetivos estratégicos pode auxiliar nessa priorização, demonstrando quais as diretrizes são compatíveis com um objetivo comum.

4.2.2 Discussão de aplicabilidade de método de modularização

O método original de Erixon (1998) é composto por cinco etapas: (i) definição dos requisitos do consumidor: consiste na matriz da qualidade do *Quality Function Deployment* (AKAO, 1990), com base na definição dos requisitos dos clientes. Esta matriz tem o intuito de garantir que os requisitos sejam transformados em características e especificações do projeto do produtos. Na etapa de (ii) definição das soluções técnicas, são identificadas as funções e subfunções que cumprem as demandas estabelecidas na primeira etapa e suas correspondentes soluções técnicas. Na terceira etapa do método, (iii) é possível agrupar as soluções técnicas de acordo com critérios pré-estabelecidos, formando módulos. As soluções técnicas são avaliadas com relação a uma série de diretrizes e são pontuadas as suas relações, clarificando

razões para a formação de módulos. A matriz de formação dos módulos é denominada MIM (*Module Identification Matrix*). A quarta etapa do método, (iv) avaliação de interfaces, visa avaliar os conceitos obtidos com a matriz MIM, avaliando interfaces entre módulos, apontando interfaces críticas e princípios de montagem preferenciais. Na última etapa, (v) aprimoramento de módulos, os módulos são otimizados com a ajuda de metodologias como o *Design for Assembly*, por exemplo, para garantir a qualidade do resultado final, e uma ficha de especificações técnicas do módulo é gerada com informações advindas de todas as etapas do método.

A aplicação do MFD transcende as questões inerentes ao método, e relaciona-se com questões organizacionais e culturais. Empresas que possuem uma longa história de uso do design integral podem encontrar na cultura corporativa uma grande barreira para a implementação do design modular (MODULAR DESIGN PLAYBOOK, 2010). Nas empresas estão presentes outras questões relacionadas à dificuldade aplicar o método MFD: a cultura organizacional, a importância atribuída ao desenvolvimento de produtos e a capacidade de conhecimento dos benefícios em longo prazo. Isso porque o desenvolvimento de variedade em produtos é custoso, complexo e demanda tempo (PERSSON, 2004). Igualmente, a modularização traz a necessidade de alto investimento inicial com retorno em longo prazo, o que demanda das empresas uma cultura de planejamento futuro. Estes altos investimentos iniciais provêm da reorganização da estrutura do produto, de pesquisas a respeito de que partes devem ser redesenhadas, da reorganização do processo de manufatura e dos procedimentos padrão (BERONIUS, 2004; MODULAR DESIGN PLAYBOOK, 2010). Contudo, todo o investimento inicial é amortizado durante o ciclo de vida do produto, enquanto o mesmo for produzido. O lucro em longo prazo provém do desenvolvimento mais rápido dos produtos derivativos do design modular (JOSE; TOLLENAERE, 2005).

Apesar da variedade, a diversidade e a complexidade dos produtos aumentar, é necessário uma redução do *time to market*, devido a condições impostas pela manufatura, pela economia, pelas inovações e pela concorrência internacional (PIRRUNG, 2004). A implementação do método MFD exige dedicação e esforço e, por conseguinte, consome tempo de desenvolvimento, um tempo que é cada vez mais curto para atender prontamente as necessidades dos clientes (LAU, 2011). Com a necessidade de desenvolver produtos mais rapidamente, as empresas encontram-se em um impasse: buscam os benefícios da modularização e não tem tempo suficiente para se dedicar a execução desta tarefa.

Como forma de aprimorar a aplicação do método MFD, a mesma deve ser feita por uma equipe multidisciplinar, com representantes de todas as áreas envolvidas com o projeto,

visando um preenchimento de matrizes equilibrado, evitando conflitos de interesse entre setores e considerando o projeto sob a perspectiva de diferentes áreas. Além disso, os representantes da equipe precisam ter conhecimento suficiente sobre o produto, os processos e os objetivos estratégicos da empresa. Este conhecimento influencia a configuração da arquitetura final do produto. Esta constatação é corroborada por Kexin (2004), na qual o desenvolvimento de produtos modulares exige alto conhecimento sobre o funcionamento interno do produto e uma visão mais sistêmica de todo o projeto de desenvolvimento.

A implementação do método pode ser feita por meio de uma consultoria especializada, na qual um agente externo adapta o método às necessidades da empresa. Além disso, esse agente orienta o entendimento e a execução do método. Esta adaptação do método conforme a realidade da empresa também considera a seleção das diretrizes para modularização que serão utilizadas. Além das diretrizes encontradas na literatura, outras podem ser sugeridas de acordo com os objetivos específicos da empresa.

Um método adaptado para lidar com diferentes complexidades de produto pode acelerar o processo de desenvolvimento bem como facilitar a aplicação. Porém, existe uma dificuldade em definir a complexidade de produtos. Uma das medidas para acessar a complexidade de um produto é a quantidade de partes, porém, a quantidade de partes de um produto é dependente do nível de decomposição aplicado. Pode-se utilizar análise funcional (PAHL; BEITZ, 1996; ROOZENBURG; EEKELS, 1995) para garantir que todos os projetos sejam decompostos de uma mesma forma, mas ainda assim podem ocorrer diferenças de interpretação. Uma grande questão levantada pela empresa é a necessidade de um guia para decomposição dos produtos. Mais do que um nível de decomposição padrão, é preciso um procedimento padrão para que o resultado seja sempre uniforme.

Outra questão relacionada à modularização de produtos diz respeito à preparação da arquitetura para lidar com uma variedade futura que pode não acontecer. Isso porque as partes relacionadas às funções básicas do produto, geralmente sua parte interna, podem não ser alteradas por muitos anos. Assim, uma vez definida a arquitetura do produto a mesma pode permanecer sem alterações por muitos anos, o que requer um conhecimento profundo do funcionamento do produto (MEYER; LEHNARD, 1997). Já a parte externa do produto é mais percebida pelos consumidores, podendo ser trocada para acompanhar tendências. Ressalta-se que o importante é definir com cuidado as interfaces quando da definição da arquitetura de um produto, pois com interfaces bem feitas é possível fazer as atualizações e modificações exigidas sem modificar toda a estrutura. Assim, como o comportamento dos consumidores é

imprevisível, as empresas podem reconfigurar seus produtos rapidamente para reagir às novas necessidades (MODULAR DESIGN PLAYBOOK, 2010).

4.3 O Método MFDA

O *Modular Function Deployment Adapted* é uma proposta de adaptação do método MFD, com vista à aplicação em diferentes tipos de projeto. As duas dimensões escolhidas para diferenciar os projetos são a novidade que o mesmo representa para a empresa e o grau de complexidade do produto (CLARK; FUJIMOTO, 1992). Esta adaptação visa facilitar a implementação do método, pois as empresas podem escolher uma configuração do método que melhor se ajusta às suas necessidades específicas. O método MFDA segue as cinco etapas propostas por Erixon (1998), em seu método original, porém as organiza conforme a proposição de Borjesson (2009), incluindo uma matriz na segunda etapa, a *Design Property Matrix* (DPM), relacionando as propriedades do produto com as soluções técnicas. A organização de Borjesson (2009) se assemelha a aplicação do QFD (AKAO,1990), onde a saída de uma matriz é a entrada da matriz seguinte.

A novidade é medida pela escala de Shenhar e Dvir (2004), que a classifica em três níveis: derivativo, plataforma e inovação, compatíveis com os níveis de Pahl *et al.*, (2007), e a complexidade é medida por seis indicadores propostos por Holmqvist e Persson (2003), voltados à concepção de produtos modulares (Figura 4.3).

	Variáveis	Autores
Complexidade	<p>Variação de tamanho: podem existir diferenças de tamanho entre componentes entre as variações de produtos construído sobre uma mesma lógica (mais variação - mais complexidade)</p> <p>Número de partes: quanto mais partes, mais complexo é um produto.</p> <p>Tecnologias: um produto pode se utilizar de uma ou mais tecnologias (mais tecnologias, mais complexidade).</p> <p>Número de variantes: variantes são diferentes combinações de componentes que podem ser substituídos para criar produtos finais (mais variantes - mais complexidade)</p> <p>Solução / função: podem existir diferentes soluções técnicas para uma mesma função (diferentes soluções - mais complexidade)</p> <p>Arquitetura: diz respeito a forma como as funções estão alocadas em módulos (integral - mais complexidade / ou modular - menos complexidade)</p>	Holmqvist e Persson (2003)
Novidade	<p>Derivativo / Adaptativo: corresponde a uma melhoria feita a um produto existente.</p> <p>Plataforma/ Variante: corresponde a uma nova geração de uma linha de produtos existentes.</p> <p>Inovação/ Original: corresponde a um produto novo para o mundo (ou, nesse caso, para a empresa).</p>	Shenhar e Dvir (2004); Pahl <i>et al.</i> (2007)

Figura 4-3: Variáveis de medição de complexidade e novidade

Na Figura 4.4, a matriz representa os diferentes níveis de complexidade e novidade que os projetos de uma empresa podem assumir. Os limites de cada quadrante podem ser aferidos conforme as dimensões e variáveis apresentadas na Figura 4.3. Como demonstra a Figura 4.4, a equipe seleciona o quadrante de acordo com as características de cada projeto. Com base no quadrante selecionado, o MFDA apresenta diferentes configurações adaptadas às necessidades específicas desses projetos. Cada configuração do método considera, portanto, combinações de diferentes graus de complexidade do produto e grau de novidade, apresentando um diferente arranjo na seqüência das ferramentas, ou a utilização de mais ou menos etapas, conforme as necessidades identificadas pelas empresas para aquele projeto específico.

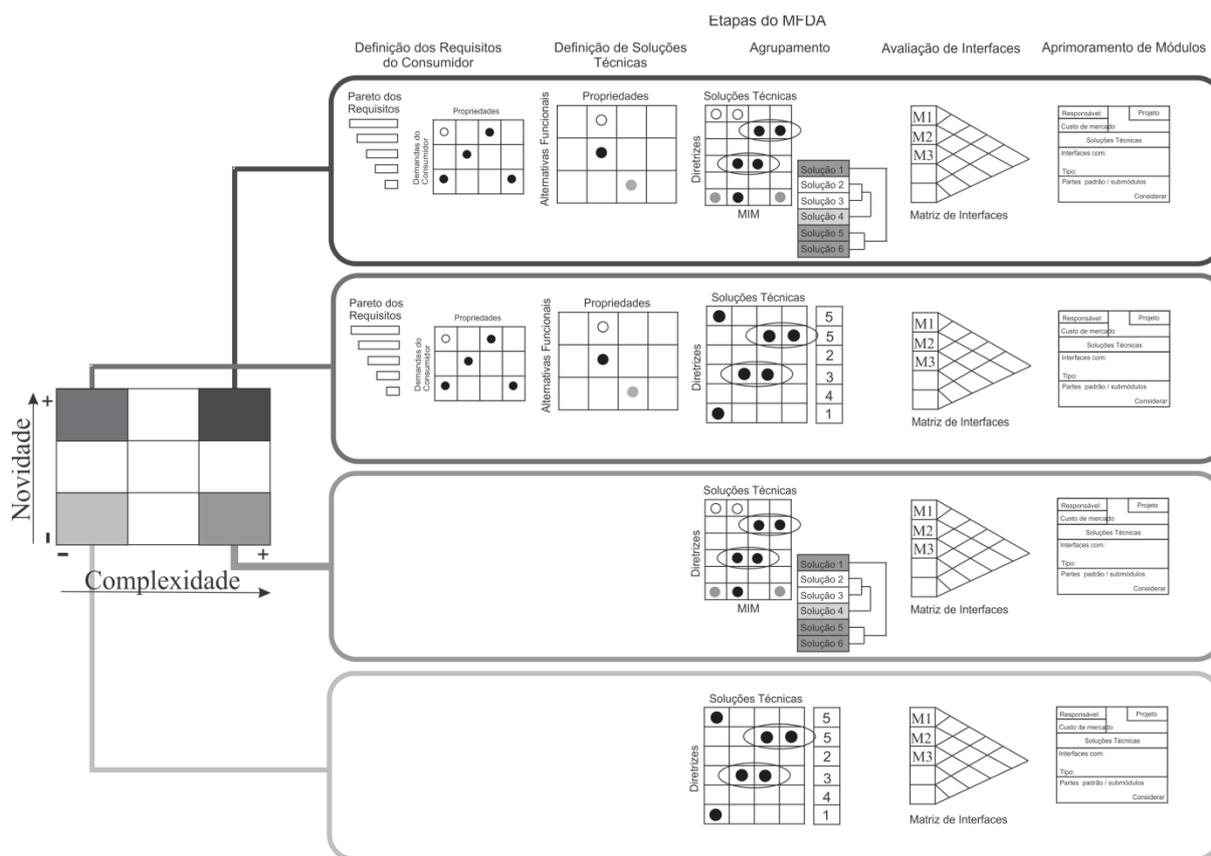


Figura 4-4: Quatro configuração de método conforme complexidade e novidade

Com relação à novidade, o MFDA apresenta a possibilidade de aplicação do método com todas as etapas, ou de forma mais resumida. Para projetos com alto grau de novidade para a empresa, faz-se necessária a utilização do método completo, que guia a empresa no desenvolvimento do conceito do produto desde o recolhimento dos requisitos do cliente até a avaliação da arquitetura modular. Em casos de melhorias em projetos já existentes, na qual os requisitos do cliente são conhecidos e as soluções técnicas já estabelecidas, não é necessário passar pelas duas primeiras etapas do método (Definição dos Requisitos e Definição das Soluções Técnicas), pois o conhecimento fornecido por elas já é de domínio da empresa.

A complexidade diz respeito, principalmente, a forma de tratar as informações provenientes da matriz MIM. Para produtos mais complexos, isto é, com maior número de componentes (entre outras características), a interpretação da MIM torna-se mais prática se auxiliada por métodos estatísticos, que facilitam a análise de maior número de dados. Quando da entrada de poucos dados, produtos mais simples e com menor número de componentes, o método original de soma simples apresenta-se como um meio mais rápido de interpretação da MIM.

Além da adaptação conforme tipologia de projetos, o método também traz uma adição à etapa inicial, na qual é feito um gráfico ordenado de acordo com a importância dos requisitos dada por cada segmento de mercado. Esta abordagem segue a descrita por Jiao e Tseng (1999), na qual os requisitos funcionais do produto são categorizados em diferentes ‘sets’, caracterizando grupos específicos de consumidores, e um gráfico de barras ordenado é empregado para ilustrar a extração dos requisitos chave destes grupos. A utilização do gráfico visa fornecer informações sobre o que gera a variedade no momento do preenchimento da matriz MIM.

4.4 Exemplo de aplicação

O método MFDA apresenta diferentes configurações de etapas e ferramentas conforme as características dos projetos. Por isso, exige uma sequência de etapas para definir qual a configuração adequada ao projeto em questão, apresentadas na Figura 4.5. Desta forma, o MFDA apresenta uma primeira fase, anterior ao método de modularização propriamente dito, utilizada para determinar a configuração de método mais adequada.

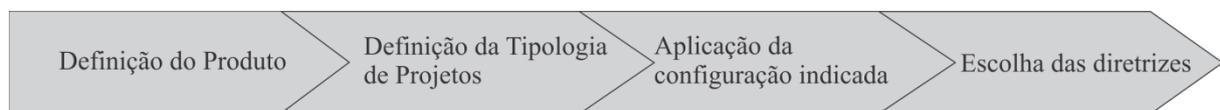


Figura 4-5: Sequência de aplicação do MFDA

Esse processo, que se inicia na definição do produto a ser modularizado e na atenção às suas especificidades, prossegue com a definição das características do projeto. Nesta etapa, é necessário analisar o produto com relação a sua situação no mercado e seu grau de novidade. Além disso, é preciso atentar para o número de partes e quantidade de tecnologias utilizadas, dimensões que podem definir a complexidade do produto. Medidas para auxiliar a definição da tipologia de projetos são apresentadas na Figura 4.3. A tipologia do projeto a ser modularizado determina a configuração mais indicada. Independente da configuração escolhida, é necessário definir os objetivos da aplicação, que irão se traduzir no método na forma de diretrizes de modularização, presentes da matriz MIM.

Estas etapas são genéricas e presentes em todas as aplicações do método MFDA, pois são estas etapas que indicam a configuração do método mais adequada ao projeto em questão. Depois de escolhida a configuração, pode-se prosseguir com a utilização do método,

conforme ferramentas e arranjo de etapas específicos, expostas na Figura 4.4. As etapas serão explicadas concomitantemente à aplicação do caso na máquina de hemodiálise.

4.4.1 Definição do produto

Com o intuito de testar o método MFDA proposto, foi realizada a aplicação em uma máquina de hemodiálise. A hemodiálise é um processo artificial de filtração do sangue, feito por meio de uma máquina que o bombeia por um circuito extra corporal, em que o sangue passa por um dialisador (rim artificial) para que haja as trocas necessárias a purificação do sangue (SILVA, 2012). A terapia é dependente de equipamentos dedicados e com capacidade de atendimento de um único paciente por vez, que filtram o sangue de maneira artificial por meio de uma membrana semipermeável e estão instalados em clínicas e hospitais habilitados para o serviço e que chegam a operar em até três turnos (BARROS *et al.*, 1999).

De acordo com os dados da Sociedade Brasileira de Nefrologia – SBN (SBN, 2013), existem hoje cerca de 92 mil pacientes em diálise no Brasil. Nos últimos dez anos, esse número cresceu 115% e deve aumentar em uma proporção de 500 casos por milhão de habitantes a cada ano. Este crescimento afeta diretamente a demanda por novos equipamentos nos próximos anos, sendo o atual parque nacional instalado de aproximadamente 20 mil equipamentos (DATASUS, 2012).

Nesse contexto, os problemas relacionados à máquina de hemodiálise significam máquinas inoperantes, altos custos de manutenção, baixa durabilidade da máquina e investimentos desperdiçados. Através da modularização é possível restringir as falhas aos módulos, impedindo que as mesmas afetem toda a máquina. Assim como podem ser feitas substituições de módulos com defeitos sem prejudicar o funcionamento da máquina como um todo.

A máquina de hemodiálise é um equipamento estratégico em saúde, tanto pelo seu caráter técnico quanto de mercado, uma vez que não existem empresas nacionais fabricantes. Além disso, é um equipamento crítico de terapia relacionado às pesquisas do Centro de Referência em Tecnologias de Equipamentos e Insumos Estratégicos para a Saúde-CRETIES/UFRGS, uma iniciativa do Ministério da Saúde.

4.4.2 Definição de tipologia de projeto

O desenvolvimento de um projeto para um novo equipamento de hemodiálise não apresenta muita variação entre os produtos concorrentes no mercado, seus requisitos são de

domínio das empresas fabricantes e as soluções técnicas já estão estabelecidas. No entanto, algumas máquinas apresentam arquitetura mais integral, dificultando o processo de manutenção e reparos.

Com relação à complexidade, a máquina de hemodiálise apresenta diversas soluções técnicas, bem como de tecnologias utilizadas. A complexidade se deve a função geral da máquina, a quantidade de tecnologias utilizadas e a quantidade de componentes. Desta forma, a configuração escolhida para modularizar a máquina de hemodiálise é a configuração para produtos de baixa novidade, porém alta complexidade (Figura 4.6).

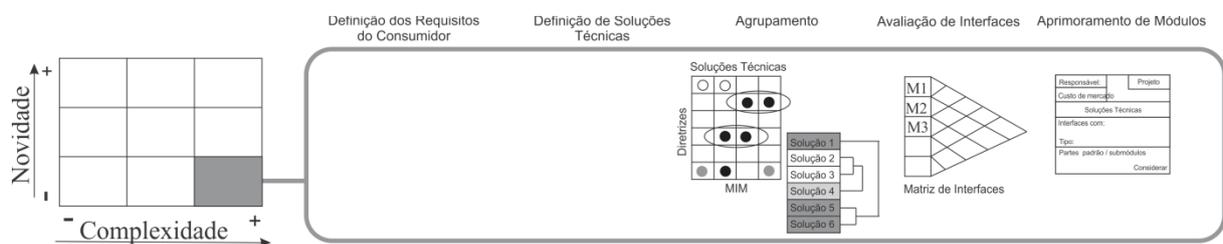


Figura 4-6: Configuração indicada para a máquina de hemodiálise

Conforme esta configuração do MFDA, não é necessário aplicar as duas etapas iniciais do método (Definição de Requisitos e Definição de Soluções Técnicas), pois os requisitos da máquina já estão consolidados, bem como as soluções técnicas.

4.4.3 Aplicação da configuração indicada

A configuração de método indicada se inicia já na matriz MIM, onde as soluções técnicas da máquina de hemodiálise são acessadas contra diferentes diretrizes de modularização (Figura 4.7). A máquina foi decomposta em 23 soluções técnicas diretamente relacionadas às funções do produto. Para a decomposição do produto a equipe de desenvolvimento do MFDA obteve ajuda de técnicos especialistas em máquina de hemodiálise de um grande hospital ligado a universidade.

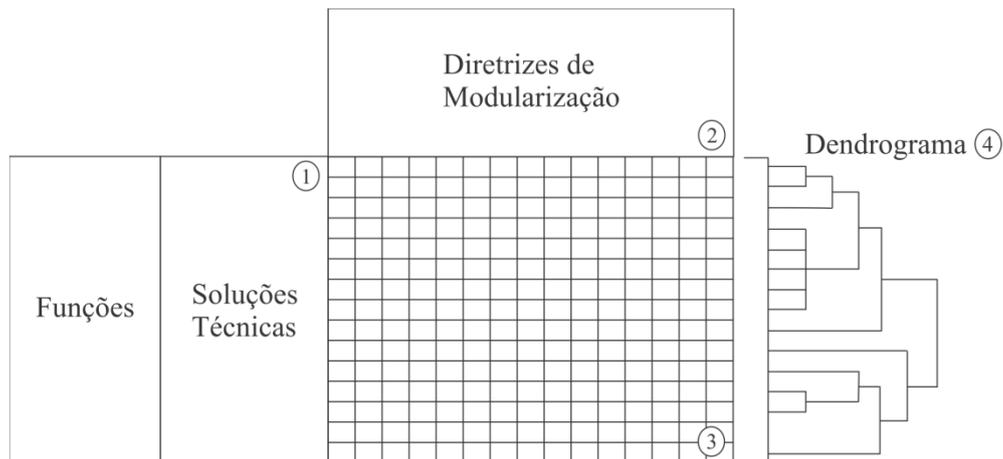


Figura 4-7: Matriz MIM

Esta decomposição segue à descrita na literatura (ERIXON, 1998; BORJESSON, 2009), na qual no método MFD o produto é decomposto através de análise funcional.

4.4.3.1 Escolha das diretrizes

Nesta aplicação do método, foram selecionadas 13 diretrizes de modularização, pertencentes às três áreas estratégicas descritas por Stake (2001). Estas diretrizes foram retiradas da literatura (quadro de diretrizes no referencial teórico), e foram escolhidas pela equipe de desenvolvimento do método. Na Figura 4.8, estão expostas as diretrizes utilizadas na modularização da máquina de diálise.

Após a seleção das diretrizes, a matriz MIM relacionando as 23 soluções técnicas com as 13 diretrizes de modularização foi entregue a três técnicos especializados em máquinas de hemodiálise. O preenchimento da matriz foi realizado em conjunto com os autores deste artigo, de forma a sanar dúvidas, explicar objetivos e o funcionamento geral da matriz MIM.

Para cada diretriz apresentada, os autores apresentaram a seguinte questão: Qual a intensidade da relação entre a solução técnica e a diretriz, como no exemplo a seguir para o critério da variação: Existem razões (fortes, médias, fracas, inexistentes) para que o "filtro" seja um módulo separado, pois ele proporciona aos consumidores diferentes modelos de máquina gerando variantes em um produto?

Cada diretriz apresentada possuía a sua pergunta norteadora do preenchimento. O preenchimento ocorreu de forma similar ao QFD, com graus de 9, 3, 1 e 0, representando respectivamente as relações fortes, médias, fracas e a inexistência da relação entre soluções técnicas e diretrizes.

Funções	Soluções Técnicas
Controlar/Monitorar o fluxo do sangue	1. Manômetro Pressão Aspiração
Bombear o sangue para o dialisador	2. Bomba de sangue
Reduzir a capacidade de coagulação do sangue.	3. Bomba de heparina
Controlar/Monitorar a pressão do sangue - entrada no dialisador.	4. Manômetro Pressão Arterial
Controle/Monitoramento da pressão do sangue- saída (pós-diálise).	5. Manômetro Pressão Venosa
Realizar a "filtração" do sangue	6. Filtro (descartável)
Permitir a entrada de água tratada	7. Tubulação de água tratada
Aquecer a água (dialisato) à temperatura corpórea	8. Aquecedor dialisato de entrada
Deaerar o dialisato	9. Câmera de deaeração
Fornecer uma "base" ao dialisato	10. Filtro e bomba / Bicarbonato
Fornecer um "ácido" ao dialisato	11. Filtro e bomba /Ácido/acetato
Misturar os líquidos do dialisato	12. Filtro mistura do dialisato
Monitorar a concentração iônica	13. Monitor de condutividade
Monitorar a temperatura	14. Termômetro
Monitorar o fluxo - ultrafiltração	15. Câmera de balanço
Impedir o dialisato "ruim" de chegar ao dialisador	16. Bypass
Detetor de sangue no dialisato	17. Detector de ruptura
Bombear a saída do dialisato	18. Bomba de pressão negativa
Ajustar e visualizar parâmetros e desempenho	19. Painel de operação; Monitor
Controlar, Alimentar e Assegurar o Sistema Elétrico.	20. Inter. central, tomada elét. aux.; baterias; Aterramento da superfície;
Garantir a memória de dados de desempenho e controlar o sist. integrando softwares e hardwares.	21. CPU; Placas; Software;
Avisar externamente erros, problemas técnicos, ...	22. Luminosos; Sonoros.
Proteger os equipamentos internos e permitir o deslocamento;	23. Carcaça; Rodas.



② Diretrizes de Modularização

Área estratégica	Diretriz	Fonte
Variedade x Padronização	Carry Over	Erixon (1998)
	Evolução Tecnológica	Erixon (1998)
	Novo Projeto	Gu e Sosale (1999)
	Padronização	Gu e Sosale (1999)
	Variação	Seligger e Zettl (2008); Gu e Sosale (1999; Erixon (1998)
Montagem e Desenvolvimento	Montagem	Erixon (1998)
	Equipe	Gu e Sosale (1999)
	Testes	Erixon (1998)
	Caixa Preta	Erixon (1998)
	Tempo de desenvolvimento	Seligger e Zettl (2008)
Pós Venda	Reciclagem	Erixon (1998)
	Manutenção	Gu e Sosale (1999)
	Intensidade de uso	Seligger e Zettl (2008)



③ Matriz MIM

	Carry Over	Evolução Tecnológica	Montagem	Reciclagem	Manutenção	Novo Projeto	Padronização	Variação	Tempo de desenv.	Intensidade de Uso	Equipe	Testes	Caixa Preta
Manômetro Pressão Aspiração	9	9	3	9	3	9	9	3	1	9	1	9	9
Bomba de sangue	9	1	9	9	9	9	9	9	3	9	3	9	9
Bomba de heparina	9	1	9	9	9	9	9	9	3	9	3	9	9
Manômetro Pressão Arterial	9	9	3	9	3	9	9	3	3	9	3	9	9
Manômetro Pressão Venosa	9	9	3	9	3	9	9	3	3	9	3	9	9

Figura 4-8: Matriz MIM Máquina de hemodiálise

4.4.3.2 Agrupamento das Soluções Técnicas

Depois de preenchida a matriz MIM, a mesma foi analisada com a ajuda de um *software* estatístico, para agrupar os componentes de acordo com as respostas. A matriz foi analisada no software SPSS v.18[®], através de análise de *cluster* hierárquico, por meio do método Ward e utilizando como medida o distância euclidiana. O dendrograma é uma representação hierárquica do nível de similaridade entre as soluções técnicas, demonstrando os módulos (BORJESSON, 2009).

O ponto de corte escolhido para a interpretação do dendrograma gerado foi fixado em 5 módulos, dada a indicação de Erixon (1998) de que o número de módulos de um produto deve ser a raiz quadrada do número de soluções (23 soluções = 4,79).

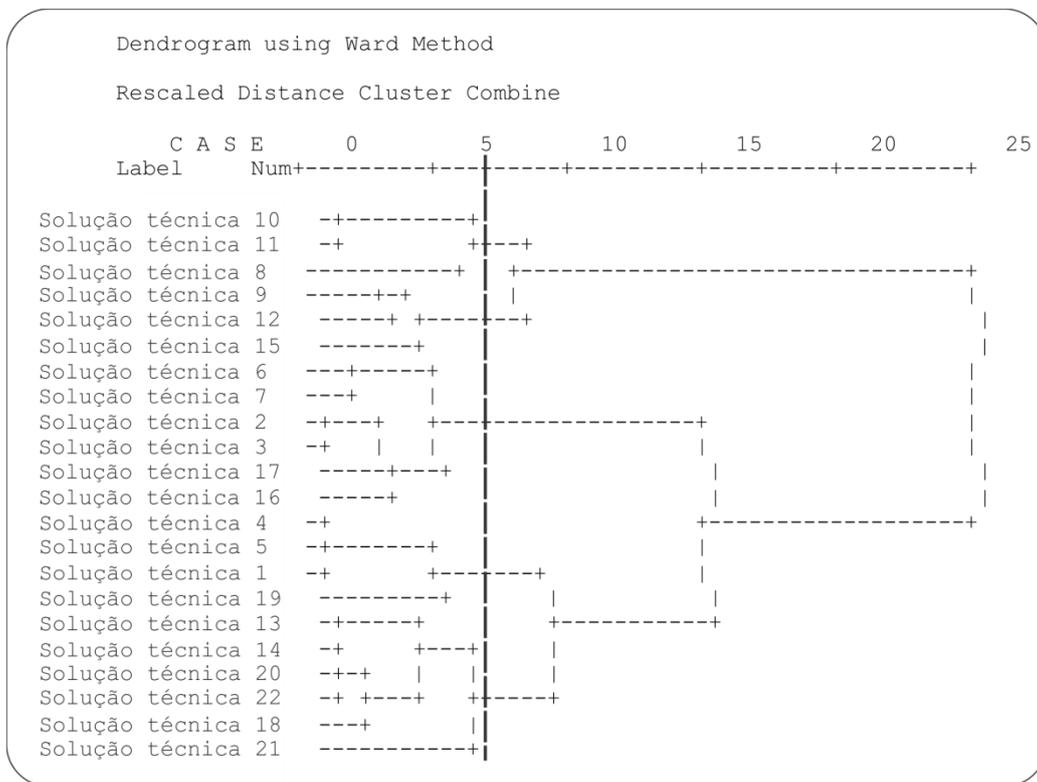


Figura 4-9: Dendrograma

Os cinco módulos indicados pelo dendrograma são apresentados na Figura 4.10.

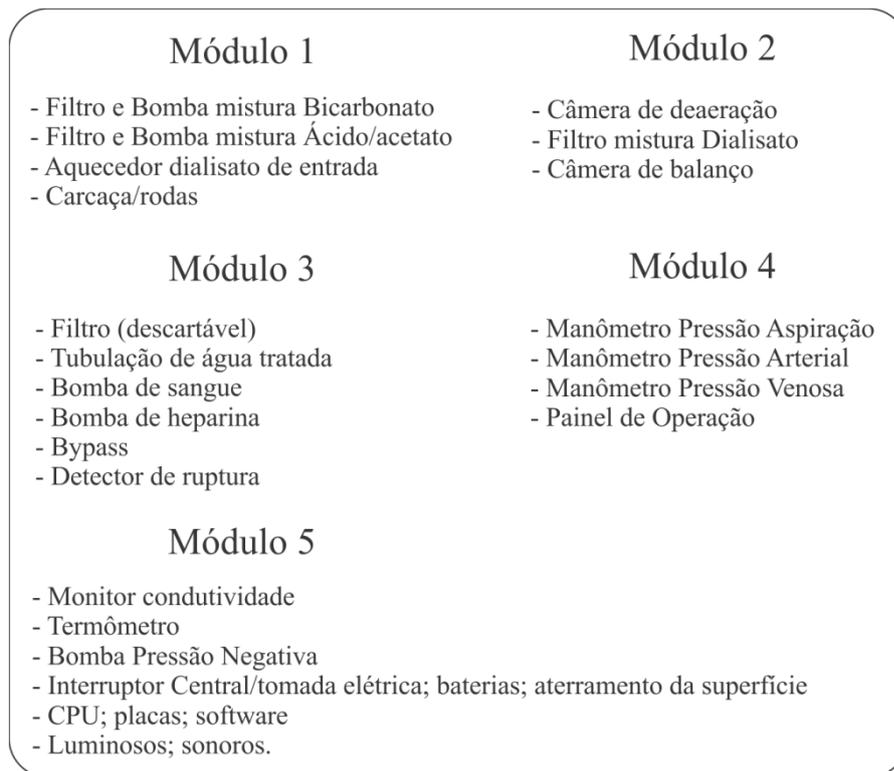


Figura 4-10: Módulos da máquina indicados pelo dendrograma

Os equipamentos de hemodiálise apresentam basicamente dois circuitos de fluidos que interagem entre si, visando à substituição da função renal dos pacientes. Assim, têm-se os circuitos de sangue e de dialisato que ocorrem de modo extracorpóreo aos pacientes (SILVA, 2012). Os módulos 1 e 2 correspondem ao circuito de dialisato, enquanto o módulo 4 corresponde ao circuito de sangue. O módulo 3 em sua maioria corresponde ao circuito de sangue, porém o Bypass e o Detector de ruptura correspondem ao circuito de dialisato (podem ser remanejados em outro módulo). O módulo 5 também apresenta um componente do circuito de dialisato, a bomba de pressão negativa, que necessita remanejamento, e outros componentes elétricos e eletrônicos necessários para o funcionamento da máquina.

Esses módulos foram discutidos entre os autores e os técnicos e os resultados foram considerados satisfatórios, visto as limitações do método MFD. O resultado obtido foi aprovado, porém não representa os módulos finais de uma máquina de diálise. Estes agrupamentos ainda precisam ser validados e discutidos pela equipe, de forma a corrigir inconsistências e realocar alguns componentes.

Através da matriz MIM é possível analisar as relações que os módulos têm com as diretrizes. No módulo 1, as diretrizes mais importantes (mais pontuadas) são Novo Projeto e Variação, relacionando assim o módulo com a obtenção de variedade na máquina. O módulo

2 apresenta diretrizes bem pontuadas relacionadas a questão de organização de manufatura. No módulo 3, as diretrizes mais bem pontuadas apontam para a criação de variedade, assim como no módulo 1. Os módulos 4 e 5 apresentam diretrizes bem pontuadas relacionadas aos 3 objetivos estratégicos citados por Stake (2001). Em nenhum dos módulos houve uma única diretriz sobressalente as demais.

4. 5 Discussão

A aplicação da configuração do MFDA escolhida para a máquina de diálise correspondeu a uma alta complexidade e baixo grau de novidade para o projeto em questão, pois a aplicação foi realizada com o intuito de melhorias nos equipamentos existentes sem inovações radicais. Com este tipo de projeto, seguem-se os requisitos conhecidos pelos fabricantes. Com base nos requisitos existentes e já conhecidos pelos técnicos, o método tornou-se mais simples e mais rápido, tendo visto que a mesma se inicia na matriz MIM, relacionando soluções técnicas com diretrizes de modularização.

Esta aplicação não visou nenhum objetivo em específico, como a geração da variedade em máquina de diálise ou facilitar o processo de manutenção da máquina. Foram escolhidas diretrizes representantes dos três objetivos estratégicos relacionados à modularização, exemplificando que a aplicação não necessariamente precisa ter um único objetivo.

Assim como citado por Borjesson (2009), o dendrograma serve como um indicativo de modularização, não revelando por si só os módulos do produto. O dendrograma agrupa as soluções técnicas conforme similaridades, e precisa ser interpretado pela equipe para a decisão dos módulos do produto. Borjesson (2009) cita uma série de razões pelas quais os dendrogramas precisam ser interpretados, entre elas a desconsideração das relações geométricas e a sobreposição de algumas soluções semelhantes.

Além disso, a pontuação dada à matriz MIM influencia diretamente a geração do dendrograma, fazendo com que diferentes equipes, que possuem diferentes opiniões, possam chegar a resultados distintos de modularização de um mesmo produto. Essa baixa repetibilidade é uma das críticas feitas ao método, dado que as pontuações são subjetivas e dependem da opinião da equipe. Assim como as pontuações dadas a matriz MIM podem variar conforme a equipe de preenchimento, também pode variar a interpretação do dendrograma. Os módulos indicados pelo dendrograma para a máquina de diálise, necessitam ser revisados e discutidos pela equipe de projeto para corrigir inconsistências.

Com base na aplicação do método MFD na máquina de hemodiálise, algumas constatações sobre o método foram consideradas pelos autores. A etapa de agrupamento, a qual relaciona soluções técnicas com diretrizes de modularização, não gerou, numa primeira interação, resultados representativos para conduzir a modularização. Uma das possíveis razões para isso é a proposta para o agrupamento das partes na matriz MIM. Nessa proposta, é realizada uma questão de forma independente relacionando cada parte com as diretrizes. Desta forma, os componentes pontuados com 9, por exemplo, porque tem fortes razões para se tornarem módulos isolados, tendem a formar um único módulo. Acredita-se que a pergunta norteadora e a forma de preenchimento da matriz MIM conduzam a um resultado que necessita de ajustes, independente da experiência dos respondentes. Uma possível causa, baseada nesta experiência dos autores, é a falta de uma análise comparativa das relações entre as partes. Sugere-se que a pergunta conduza ao entendimento de o quanto há interdependência entre as partes considerando determinada diretriz.

Através da aplicação na máquina de hemodiálise, pode-se perceber que o método MFD, com sua forma de agrupamento, relacionando cada solução técnica com cada diretriz de modularização, não gera um resultado final satisfatório. Desta forma, o resultado da matriz MIM precisa de muitos ajustes, ajustes que podem descaracterizar os módulos. Acredita-se que a pergunta norteadora e a forma de preenchimento da matriz MIM conduzam a um resultado sempre carente de ajustes, independente da experiência dos respondentes. Isso porque não são analisadas as relações de partes com partes, somente de partes com diretrizes. Desta forma, todos os componentes pontuados com 9, porque tem fortes razões para se tornarem módulos sozinhos, acabam por ser agrupados em um mesmo módulo, de forma contrária á intenção dada com a pontuação.

Após a revisão dos módulos pela equipe, o método segue com a análise de interfaces e aperfeiçoamento dos módulos, etapas 4 e 5 do método original de Erixon (1998). O método MFDA não propõe nenhuma modificação nestas duas etapas, deixando a cargo da empresa a aplicação de ferramentas usuais em seu processo de desenvolvimento de produtos para a verificação dos módulos.

4.6 Conclusão

O objetivo deste trabalho é a aplicação o método MFDA, uma adaptação do método MFD, que considera diferentes tipologias de projeto, simulando a escolha da melhor configuração de método assim como das diretrizes norteadoras do processo. A aplicação foi

realizada em uma máquina de hemodiálise, e conforme suas especificidades, foi escolhida a configuração do método mais adequada para a modularização do produto.

A aplicação do MFDA seguiu quatro etapas distintas: definição do produto, definição de tipologia de projetos, aplicação da configuração de método indicada e escolha das diretrizes de modularização. A configuração escolhida foi a configuração para produtos de baixa novidade e alta complexidade e, portanto, a aplicação não passou pelas etapas de definição de requisitos e definição de soluções técnicas, dado que o conhecimento proveniente destas etapas já é de domínio das empresas fabricantes.

A aplicação demonstrou que mesmo não passando por duas etapas do método original, é possível gerar a matriz MIM e posteriormente, o dendrograma. O dendrograma é um indicativo das relações entre as soluções técnicas, fomentando a discussão da equipe e possíveis ajustes nos agrupamentos feitos. A aplicação foi realizada com o auxílio de três técnicos especializados em máquinas de hemodiálise.

Como sugestões para trabalhos futuros, a utilização das outras configurações do método, bem como a proposição de novas medidas e dimensões que melhor indiquem a tipologia de projetos. Sugere-se também o estudo de uma nova forma de interpretação da matriz MIM, estimando o grau de dependência entre as partes quanto aos critérios estabelecidos nas diretrizes de modularização.

4.7 Referências Bibliográficas

ALIZON, F.; SHOOTER, S.B.; SIMPSON, T.W. Improving an existing product family based on commonality/diversity, modularity, and cost. *Design Studies* v. 28, p. 387-409, 2007.

AKAO, Y. (ed.). *Quality Function Deployment – integrating customer requirement into product design*. Cambridge (Mass.): Productivity Press, 1990.

ARCHER, J.A.; SCALICE, R.K.. Aplicação e Análise de Uso de Três Metodologias de Projeto de Produtos Modulares. XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. São Paulo, Brasil, 2010.

BARROS, E.; MANFRO, R.C.; THOMÉ, F.S. [et al.]. *Nefrologia: rotinas, diagnóstico e tratamento*. 2ª ed. Porto Alegre: Artes Médicas, 1999.

BERONIUS, A. Case study of modularization in the industry. Proceedings from the 2nd seminar on development of modular products. Dalarna University, Suécia, 2004.

BI, Z.M.; ZHANG, W.J.. Modularity Technology in Manufacturing: Taxonomy and Issues. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* v 18, p. 381-390, 2001.

BLACKENFELT, M. Managing complexity by product modularization: balancing the aspects of technology and business during the design process. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2001

BORJESSON, F.. Improved Output In Modular Function Deployment Using Heuristics. Proceedings of the International Conference on Engineering Design: ICED 2009. Estados Unidos, 2009.

CLARK, K.B.; FUJIMOTO, T. Product Development and Competitiveness. *Journal of the Japanese and International Economies* v. 6, p. 101-143, 1992.

DANIILIDIS, C.; ENBLIN, V.; EBEN, K.; LINDEMANN, U.. A Classification framework for product modularization methods. Proceedings of the International Conference on Engineering Design, Dinamarca, 2011.

DATASUS - Banco de Dados em Saúde no Brasil – Ministério da Saúde. *Banco de Dados*. Disponível em: <<http://www.datasus.gov.br>>. Acessado em: 08 de janeiro de 2013, 2012.

DURAY R, WARD PT, MILLIGAN GW, BERRY WL.. Approaches to mass customization: configurations and empirical validation. *Journal of Operations Management* v. 18, p. 605-625, 2000.

ERICSSON, A.; ERIXON, G., *Controlling Design Variants: Modular Product Platforms*, Dearborn, MI: ASME Press, 1999.

ERIXON, G.; VON YXKULL, A.; ARNSTROM, A.. Modularity – the basis for product and Factory Reengineering. *Annals of the CIRP* 45, 1-6, 1996.

ERIXON, G.. “Modular Function Deployment – a method for product modularization”. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technnology, Stockholm, 1998.

GU, P.; SOSALE, S..Product Modularization for life cycle engineering. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* v. 15, p. 387- 401, 1999.

HOLMQVIST, T.K.P.; PERSSON, M.L.. Analysis and Improvement of Product Modularization Methods: Their Ability to Deal with Complex Products. *Systems Engineering* v. 6, p. 195-209, 2003.

HOLTTA, K. M.M.; OTTO, K. N. Incorporating design effort complexity measures in product architectural design and assessment. *Design Studies* v. 26, p. 463-485, 2005.

HOLTTA-OTTO, K.; de WECK, O. Degree of modularity in engineering systems and products with technical and business constraints. *Concurrent Engineering-Research and Applications* v.15, p.113-126, 2007.

HOLTA-OTTO, K.; TANG, V.; OTTO, K. Analyzing module commonality for platform design using dendrograms. *Research Engineering Design* v. 19, p. 127-141, 2008.

JIANG, L.; ALLADA, V. Robust Modular product family design using a modified Taguchi Method. *Journal of Engineering Design* v. 16, p. 443-458, 2005.

- JIAO, J.; TSENG, M.M.. A methodology of developing product family architecture for mass customization. *Journal of Intelligent Manufacturing* v. 10, p. 3-20, 1999.
- JOSE, A.; TOLLENAERE, M.. Modular and platform methods for product family design: literature analysis. *Journal of Intelligent Manufacturing* v.16, p.371-390, 2005.
- KEXIN, H..Advantages and disadvantages of modularity. Proceedings from the 2nd seminar on development of modular products. Dalarna University, Suécia, 2004.
- KONG, F.B.; MING, X.G.; WANG, L.; WANG, X.H.; WANG, P.P..On Modular Products Development. *Concurrent Engineering, Research and Applications* v. 17, p. 291-300, 2010.
- KRENG, V.B.; LEE, T.P.. Modular product design with grouping genetic algorithm – a case study. *Computers and Industrial Engineering* v.46, p. 443-460, 2004.
- KUDERER, K..Benefits of Modularity.The 4nd Student Conference on Development of Modular Products. Höskolan Dalarna, Suécia, 2006.
- LAU, A.K.W.. Critical success factors in managing modular production design: Six company case studies in Hong Kong, China and Singapore. *Journal Engineering and Technology Management* v. 28, p. 168-183, 2011.
- MEEHAN, J.S.; DUFFY, A.H.B.; WHITFIELD, R.I. Supporting ‘Design for Re-use’ with Modular Design.*Concurrent Engineering: Research and Applications* v.15, p.141-155, 2007
- MEYER, M. H.; LEHNERD, A. P. *The power of product platforms: building value and cost leadership*. New York:Free Press, 1997.
- MODULAR DESIGN PLAYBOOK.. Guidelines for assessing the Benefits and Risks of Modular Design.The Corporate Executive Board Company, 2010.
- NEPAL, B., MONPLAISIR, L.; SINGH, N. Integrated fuzzy logic-based model for product modularization during concept development phase. *International Journal of Production Economics* v.96, p.157-174, 2005.
- PAHL, G.; BEITZ, W. *Engineering design. A systematic Approach*. London: Springer-Verlag London, 1996
- PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.H.. *Engineering Design: A Systematic Approach*, Third Edition. London: Springer-Verlag, 2007.
- PARK, J.; SHIN, D.; INSUN, P.; HYEMI, H. A product platform concept development method. *Journal of Engineering Design* v.19, p.515-532, 2008.
- PERSSON, D..Modules and Interfaces. Proceedings from the 2nd seminar on development of modular products. Dalarna University, Suécia, 2004.
- PIRRUNG, C..Comparison of different methods of modularisation and their best pplication. Proceedings from the 2nd seminar on development of modular products. Dalarna University, Suécia, 2004.

ROOZENBURG, N.F.M.; EEKELS, J. *Product Design: Fundamentals and Methods*. Chichester: John Wiley & Sons, 1996.

SANCHEZ, R.; COLLINS, R.P. Competing – and Learning – in Modular Markets. *Long Range Planning* v.34, p. 645-667, 2001.

SAND, J.C.; GU, P.; WATSON, G. HOME: House Of Modular Enhancement— a Tool for Modular Product Redesign. *Concurrent Engineering: Research and Applications* v.10, p.153-164, 2002.

SBN – Sociedade Brasileira de Nefrologia. Censo de diálise SBN 2011. *Relatório*. Disponível em <http://www.sbn.org.br/pdf/censo_2011_publico.pdf>. Acesso em: 08 de janeiro de 2013, 2011.

SCHUH, G.; LENDERS, M.; ARNOSCHT, J. Focussing product innovation and fostering economies of scale based on adaptative product platforms. *CIRP Annals, Manufacturing Technology* v 58, p. 131-134, 2009.

SELIGER, G.; ZETTL M. Modularization as an enabler for cycle economy. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* v. 57, p. 133-136, 2008.

SILVA, A.C. Circuito de sangue e agentes influenciadores de hemodiálise. Anais: VII Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação. Tocantins, 2012.

SHENHAR, A.J., DVIR, D. “How Projects Differ, and What to Do About It”. In *The Wiley Guide to Managing Projects*, Wiley & Sons, 1265–86, 2004.

SHENHAR *et al.* Toward a NASA-Specific Project Management Framework. *Engineering Management Journal* v.17, p. 8-17, 2005.

STAKE, R.B. On conceptual development of modular products. Doctoral Thesis, Division of Assembly Systems, Department of Production Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2000.

ULRICH, K.T. *Design: Creation of artifacts in society*. Published by the University of Pennsylvania, 2005.

ULRICH, K.; EPPINGER, S.D. *Product design and development*. The McGraw-Hill Companies, 2nd ed, 2000.

ZETTL, M.; SELIGER, G.; BILGEN, E. Product Life Cycle Oriented Methodology Supporting the Development of Modular Product Structures. In: Global Conference On Sustainable Development And Life Cycle Engineering 4., 2006, São Carlos, 2006.

ZHANG, W. Y.; TOR, S. Y.; BRITTON, G. A. Managing modularity in product family design with functional modeling. *International Journal of advanced manufacturing Technology* v. 30, p.579-588, 2006.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

O tema dessa dissertação é a utilização de métodos de modularização no desenvolvimento de conceitos de produtos publicados na literatura. Estes métodos auxiliam no processo de criação de produtos modulares. Embora estes métodos sejam publicados na literatura, muitos deles não são praticados pelas empresas e, ainda, estas apresentam dificuldades em escolher um método que melhor se adapte aos seus tipos de projetos, além de dificuldade em implementar na prática tais métodos. Assim, o objetivo geral desta dissertação é propor uma reestruturação de métodos de modularização para a criação e avaliação de conceitos, adaptados as particularidades de cada projeto. Essa dissertação foi dividida em três artigos científicos, orientados conforme os objetivos específicos desta dissertação, apresentados a seguir.

O primeiro artigo buscou analisar os métodos para modularização existentes na literatura, através de revisão sistemática, com o intuito de entender e classificar os métodos, facilitando o processo de tomada de decisão por parte das empresas de que métodos e abordagens são mais adequados a sua situação específica. Para a análise dos métodos, os mesmos foram classificados conforme parâmetros encontrados na literatura e também com relação às ferramentas e técnicas utilizadas no processo de modularização de produtos. Os parâmetros guiam a escolha através da contextualização do ambiente de aplicação de cada método, enquanto a análise das fases guia a empresa com relação a competências e conhecimentos necessários para a aplicação do método.

Através da busca por métodos para modularização pode-se perceber uma falta de consenso a respeito dos termos e definições ligados a esta área do conhecimento, bem como uma falta de consenso com relação ao que pode ser considerado como método para modularização. Desta forma, foram escolhidos para análise métodos que trabalham o problema da modularização a partir de um mesmo ponto de vista, de arquiteturas individuais, garantindo a comparação entre métodos que abordam a modularização em um mesmo nível de detalhe.

A análise realizada no primeiro artigo apontou um método mais flexível e completo que os demais para a modularização de produtos, o *Modular Function Deployment*– MFD,

assim como apontou a falta de integração desses métodos a um processo de desenvolvimento de produtos (PDP). Esses métodos apresentam uma configuração única que *a priori* deve servir para todos os tipos de projeto. Baseado nessas questões levantadas no primeiro artigo, verificou-se a necessidade de adaptar um método conforme tipologia de projetos. A flexibilidade do método MFD possibilitou essa adaptação, que visa auxiliar as empresas, oferecendo diferentes configurações de método que se adaptam as particularidades de seus projetos de desenvolvimento de produtos.

O artigo 2 apresenta esta proposta de método, baseada na revisão sistemática que levantou as questões anteriormente citadas, assim como uma revisão de literatura para aprofundar o conhecimento sobre o MFD, e entrevistas semi-estruturadas com acadêmicos e profissionais especialistas, para o levantamento de informações a respeito do MFD com base no levantamento da experiência prática. O MFD foi adaptado para considerar diferentes níveis de complexidade e novidade em projetos, configurando assim o método *Modular Function Deployment Adapted* – MFDA, que também traz algumas proposições de melhorias em duas etapas do método.

No terceiro artigo, a adaptação do método proposto foi aplicada em um equipamento de hemodiálise para analisar a melhor configuração de módulos. O objetivo do trabalho foi apresentar o método MFDA passo a passo, escolhendo a melhor configuração de método e as diretrizes norteadoras do processo de modularização.

O resultado encontrado com o MFDA é similar ao encontrado pelo MFD tradicional, porém, no caso do equipamento de hemodiálise, a aplicação foi mais rápida, pois o MFDA passou por menos etapas para a modularização do produto. A vantagem do método MFDA é a praticidade, pois ele considera diferentes tipos de projeto e o conhecimento prévio da equipe de desenvolvimento, conduzindo-a conforme as necessidades específicas do projeto em questão. Para projetos mais complexos, o método apresenta uma configuração mais robusta; para projetos mais simples, o método apresenta uma configuração mais prática.

A aplicação, realizada com a ajuda de técnicos especializados, apontou na prática algumas críticas citadas na literatura ao método MFD, como a subjetividade na interpretação das diretrizes e na pontuação das relações. Também foi apontada a não consideração de aspectos funcionais do produto, prejudicando o agrupamento das soluções técnicas.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Ao longo do trabalho, foi possível identificar algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Interpretação da MIM relacionando partes com outras partes com relação às diretrizes.

- Realização de um levantamento mais abrangente a respeito dos métodos de modularização, considerando que a revisão sistemática faz uma busca por palavras chave utilizadas, e não existe consenso a respeito de termos e denominações nesta área do conhecimento.

- Proposição de um guia para a definição de complexidade e novidade de produtos, com uma ferramenta de auxílio a esta tarefa.

- Estabelecimento de um guia para a decomposição de produtos, auxiliando assim a definição de tipologias de projeto.

- Apresentação de uma ferramenta para o recolhimento dos requisitos do produto, na primeira etapa do método MFDA.

- Verificar a eficácia do método MFDA, testando suas diferentes configurações em produtos com diferentes tipologias de projeto.

- Verificar diferenças na geração do dendrograma utilizando apenas as informações da Matriz MIM, e utilizando as informações provenientes da matriz DPM e da Matriz MIM – conforme proposto por Borjesson (2009).

- Propor a adição de uma etapa, em conjunto com a matriz MIM, proveniente de outros métodos para modularização, a fim de verificar questões de funcionalidade na modularização de produtos.

Mass customization and Modularity: a theoretical position in the past decade

Monique Sonego*, Márcia Elisa Echeveste*, IstefaniCarisio de Paula*

*ProductionEngineering, Federal Universityof Rio Grande do Sul, Centro, Porto Alegre, Brazil

Email: moniqueds@producao.ufrgs.br, echeveste@producao.ufrgs.br, istefani@producao.ufrgs.br

Abstract

This paper aims to illustrate the theoretical position on the mass customization strategy and modularity during the decade of 2000s. Literature points modularity as one of the best ways to achieve mass customization. In order to delineate this decade scenario, we have conducted a search of these themes on the Web of Science database. The objective is to illustrate the theoretical position on the mass customization strategy and modularity during the decade of 2000s. Only journal papers, refined by subject areas related to engineering and management, and published between 2000 and 2009 were considered. A total of 70 papers were collected for a bibliometric review with the tool HistCite. Results of this search were analyzed using a series of bibliometric criteria, presenting the twenty most cited papers among the 70 selected publications, a relation graph among papers and authors, papers and citation count distributions across the years, authors and countries with the higher quantity of topic related publications, and finally, an analysis of journals in which these papers were published. Furthermore, a subject classification based on the 70 studied papers is presented, thus identifying predominant topics such as supply chain studies, modularity methods and literature review. In conclusion, this investigation indicated the rising of new fields of study, such as modularity and mass customization in services, and summarizes the opinion unveiled by the researched papers' authors about future investigation opportunities.

Keywords: mass customization; modularity; bibliometry.

1. Introduction

Mass customization can be defined as the challenge of meeting the individual needs of customers while maintaining the efficiency of manufacturing similar to mass production (Jiao and Tseng, 2004). According to the literature, the development of Mass Customization has as basic assumption the use of flexible manufacturing system (FMS) and practices applied during the Product Development Process (PDP). Tseng and Jiao (1996) present an approach called Design for Mass Customization (DFMC), based on the premise that mass customization can be effectively achieved during product design, more precisely in the concept development stage. Thus, the DFMC aims at considering issues of scope and scale economy still in the early stages of product development, evolving from a unique product development process to the development of a family of products.

By the means of the strategy of multiple products based on families that share platforms, it is possible to reduce time and costs of product development, increase reliability and variety of products, reduce management complexity and make business strategies more flexible (Muffato, Roveda, 2000). Two methods allow to dealing with the variety in products based on platforms:

projects with modular basis and projects based on scale (Alizonet *al.*, 2009). According to Muffato and Roveda (2000), platforms tend to be more flexible with modular architecture.

Module, according to Miller and Elgard (1998), is an essential and self-contained functional unit in relation to the product to which it belongs, having standardized interfaces and interactions which allow (through combinations) the composition of products; modularity is an attribute of a system related to its structure and functionality (a system which has modularity has self-contained functional units with standardized interfaces); and modularization is the activity in which the modular structure occurs. The term “self-contained”, used by the authors, refers to a function performed within the module and limited to it. Da Silveira *et al.* (2001) argue that products from mass customization should be modular, versatile and constantly renewed. In order to apply or develop research related to modularity and mass customization, it is necessary to understand how both themes relate to each other and which advances were already achieved by researchers throughout recent years.

Pine (1993) argues that modularity is a key to achieving mass customization. According to Duray (2002), modularity is a key aspect to reach volume of scale (the mass), while the engagement of the customer results on customization. The goal of modularity is mainly to earn flexibility for mass customization through the design of products relying on customer specifications and using modular components (Duray, 2002). According to Kuderer (2006), modularity also helps to overcome the complexity that customization brings to the manufacturing systems, acting as a tool to break down the product structure into smaller units, which are easier to administrate. The research question in this paper is what researchers have investigated and advanced in the last ten years?

Thus, the objective of this paper is to perform a survey of the publications concerning modularity and mass customization during the 2000s viewing to identify influential papers and authors, journals and countries that have mostly contributed to the growth of knowledge in this field, as well the current trends. The investigation was performed in the Web of Science database.

2. Research Method

Bibliometrics is a set of laws and empirical principles that help determining the theoretical foundations of Information Science (Guedes, Borschiver, 2005). Citation analysis allows exploring the contexts in which innovations occur and thus develop a more reliable sense of how the work and ideas of a researcher are received by the community and other researchers (Cronim 2000). In addition to the citations, by the means of bibliometrics it is possible to analyze the scientific performance of organizations, agencies and countries based on the counting of publications and citations in the literature (Narim, Hamilton, 1996). For the execution of bibliometrics, the steps below were followed:

Choice of the Database and Keywords: To search for articles that make up the bibliometric analysis, a search in the Web of Science database was carried out, which despite having a limited number of academic publications, presents a set of high-quality publications (Cronim, 2000). The terms “mass customization” and the root *modul* were used as keywords, ensuring the search for the words “module”, “modularity”, “modularization” and “modular”, forming the following search algorithm: “mass customization” AND modul*. The search chosen was the one for “topic”, which includes the title, the abstract and the keywords of the paper (results: 284 papers).

Refinement of the search: The result obtained with the search algorithm went through filters to compose the final stratum for bibliometric analysis. Only journal articles were considered, excluding articles from congresses and symposia as well as books, dissertations and theses (results: 144 papers). Afterwards, a second filter was used, now by areas of knowledge where the following areas were considered: Engineering Manufacturing, Operation Research Management Science, Engineering Industrial, Management, Business, Engineering Multidisciplinary and Planning Development (results: 122 papers). Next, all journals that contained only one single publication on the subject were excluded (results: 101 papers). The last filter applied to the search relates to time, where the years 2000 to 2009 were selected. After all these refinements, the final stratum of the search included 70 articles that were saved in plain text format and worked with the help of HistCite software.

Statistics of articles and journals: The HistCite software was developed by Eugene Garfield, the inventor of Science Citation Index, in order to help researchers to visualize the results of bibliographic searches on the Web of Science database, allowing the analysis and organization of search results (Thomson Reuters, 2011). Using the HistCite it is possible to analyze the most cited authors for a given subject, most prolific countries and institutions, most cited papers, publication distribution across time, among others.

3. Results

The first analysis of the articles resulting from the search was the analysis of citations. This analysis shows the most cited articles among the 70 papers reviewed. In this bibliometrics, only two articles were cited more than 10 times and only 13 articles were cited more than once. Analyzing the 70 articles from Web of Science, 43 articles are not mentioned even once by the other articles studied in this bibliometric analysis.

Figure 1 shows the 20 most cited articles, distributed across a network of relationships based on citations. Through the relationships it is possible to see a group of papers mentioning both Durayet *al.* (2000) and Salvador *et al.* (2002), the two most cited articles in this bibliometrics, forming a principal network. It is also possible to notice a second group of papers on the right side of the graph, which are papers that do not cite and are not cited by the group of papers that make up the twenty most cited ones. The graphic was redesigned to offer a better understanding of the relationships, and was based on the original graphic created in the HistCite® software (Thomson Reuters, 2011). The size of the spheres shows the number of citations and the distribution in the lines shows the date of publication of the paper.

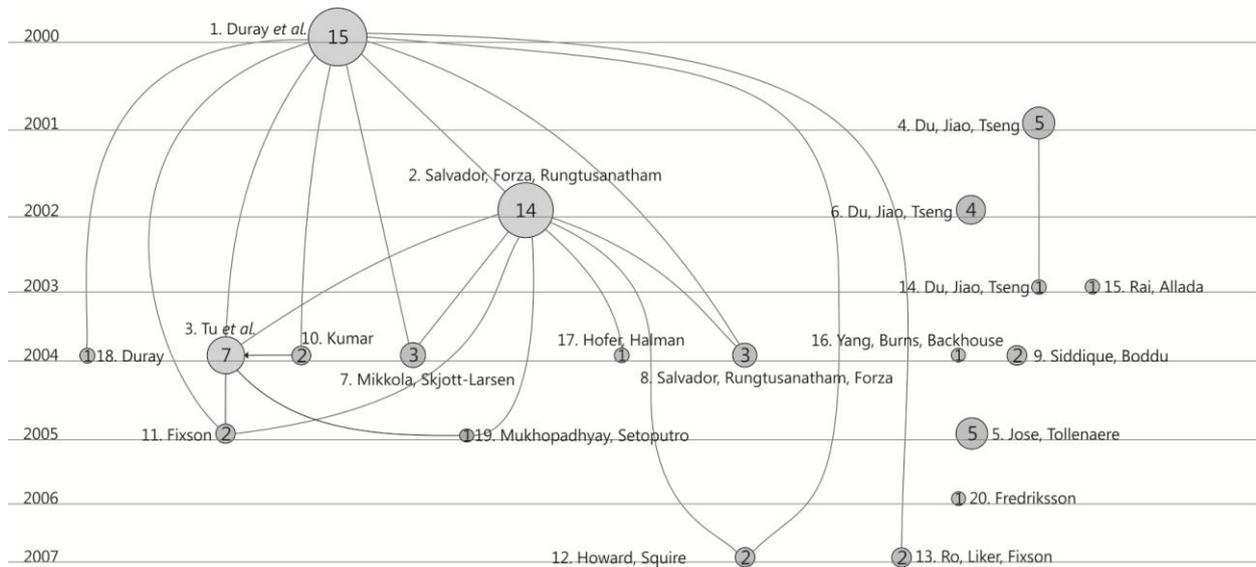


Figure 1: Network of relationships

Duray, Ward, Milligan and Berry, in his 2000 paper, present Mass Customization (MC) as a paradox breach, because MC combines craft production with mass production methods. The authors allege in their paper that despite the phenomenon of mass customization exist in practice, the academy does not adequately invest in this new way of competition. The authors develop a configurational model to classify the customization based on the customer involvement in the project and on the product modularity.

The 2002 paper of Salvador, Forza and Rungtusanatham explores how manufacturing characteristics affect the type of modularity to be incorporated into the architecture of a product family as well as the modularity relationship with the outsourcing of components. The paper is based on studies of multiple cases of product families belonging to six European companies. Among its theoretical results is the description of a new type of modularity, not described in the literature yet, the combinatorial modularity.

Tu, Vonderembse, Ragu-Nathan, Ragu-Nathan (2004) present the concept of MBMP (Modularity-Based Manufacturing Practices) and develop an instrument to measure MBMP, as well as build a framework that relates customer closeness, MBMP and the ability of mass customizing. Based on 303 responses obtained with members of the Society of Manufacturing Engineers, statistical significance and positive relationships among the three constructs studied were found.

The second analysis concerns the distribution of papers by year of publication, in which is possible to see that in the years 2004 and 2007 there was a significantly above the average production in relation to other years. In 2004, the AI Edam-Artificial Intelligence For Engineering Design Analysis And Manufacturing and Production Planning & Control journals represent half of the publications of the period, with four publications each. In 2007, two journals also have nearly half the total publication of the year: IEEE Transactions On Engineering Management, with five publications, and Concurrent Engineering-Research And Applications, with three publications.

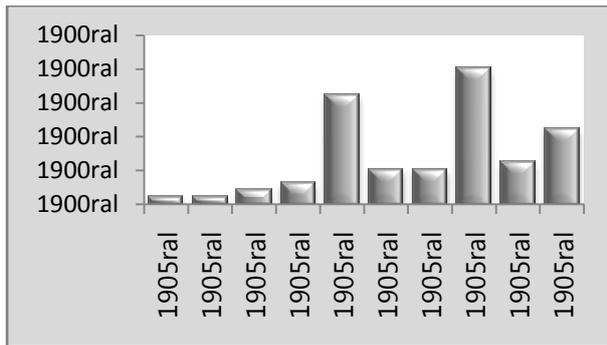


Figure 2: distribution of papers by year of publication

The papers analyzed in this bibliometrics were published in 18 different journals. The journal that has the largest number of publications on the subject is the International Journal of Production Research, with nine publications, followed by the Concurrent Engineering – Research and Applications, with eight publications. The third journal with the highest number of publications is the Ai Edam-Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing, with five publications. As mentioned in the methodology, journals with only one publication on the subject were discarded.

Although it contains the largest number of publications, the International Journal of Production Research does not contain publications of high-impact factor, if taken into account the number of citations of its publications. The Concurrent Engineering – Research and Applications presents only two papers cited by the collection, however, these two papers present a higher citation index, appearing among the twenty most cited articles of the collection. The two most cited articles from the collection were published in the same journal, the Journal of Operations Management, this one appearing as the journal of greatest relevance in the subject and also presenting two other relevant publications.

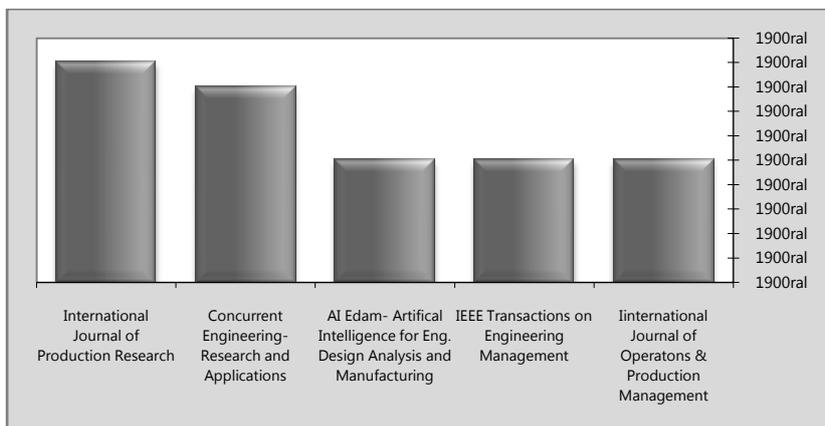


Figure 3: Distribution of papers by Journals

The distribution of papers by country of origin in the research shows that the United States and China hold more than half of the publications concerning MC and Modularity present in the Web of Science database. The distribution made by the HistCite® software (2011) shows 17 different countries as countries of origin of articles and five articles without defining the country of origin.

Among the 158 authors, only 19 had more than one publication. The authors Huang GQ, from the University of Hong Kong, and Jiao JX are the ones presenting more papers in the collection, each with

four publications. With three papers each, there are the authors Agard B., Du, X.H., Salvador F. and Tseng, M.M.

4. Analysis by article category

Through the analysis of the 70 papers it was noticed the presence of common approaches and subjects. Papers were then, identified according to such common criteria, resulting on the classification presented by figure 4. It should be noted that many papers may be easily classified in more than one subject, as they may approach relation between subjects, such as the relation among modularity and supply chain (Huang, Zhang, Lo, 2007).

2009			• Kong <i>et al.</i>	• Brun, Zorzini	• ElMaraghy, Mahmoudi • Squire <i>et al.</i> • Qu <i>et al.</i>	• Agard, Penz • Agard, Da Cunha, Cheung • Song, Kusiak	• Gu, Xue, Nee • Voss, Hsuan • Moon <i>et al.</i>
2008		• Li, Huang, Newman • Olivarez-Benitez, Gonzalez-Velarde	• Zhuo, San, Seng	• Rughtusanatham, Salvador		• Kuroda, Mihira	• Li, Xue, Gu
2007	• Siddique, Ninan	• Galan, Racero, Eguia, Garcia • Williams <i>et al.</i> • Van Wie <i>et al.</i>	• Meng, Jiang, Huang • Meehan, Duffy, Whitfield • Holttä-Otto, de Weck • Jacobs, Vickery, Droge • Mikkola • Gupta, Roth	• Kumar • Ro, Liker, Fixson • Yang, Qi, Lu, Gu	• Huang, Zhang, Lo • Howard, Squire	• Wang, Lin • Thomas, Warsing • Tu, Xie, Fung • Blecker, Abdelkafi	• Ming <i>et al.</i>
2006	• Shao <i>et al.</i>		• Zhang, Thor, Britton	• Fredriksson		• Da Cunha, Agard, Kusiak • Dekkers	
2005	• Tang, Chen, Ji	• Yeh, Wu • Fixson • Jose, Tollenaere	• Mukhopadhyay, Setoputro				
2004	• Siddique, Boddu	• Jiao, Zhang, Prasanna • Zha, Sriram, Lu • Hofer, Halman	• Tu <i>et al.</i> • Germani, Mandorli	• Zangiacomi <i>et al.</i> • Partanen, Haapasalo • Lin • Duray	• Coronado <i>et al.</i> • Salvador, Rungtusanatham, Forza • Mikkola, Skjott Larssen	• Yang, Burns, Backhouse	• Fung, Chong, Wang • Kumar
2003		• Du, Jiao, Tseng	• Rai, Allada	• Akkermans <i>et al.</i>			
2002		• Du, Jiao, Tseng	• Salvador, Forza, Rungtusanatham				
2001		• Du, Jiao, Tseng					
2000		• Duray <i>et al.</i>					
	Customer	Architecture	Modularity	Application-cases	Supply Chain	Production	Other

Figure 4: Categories and subjects

The first category consists of the papers focused on **customer integration and participation in the process** of mass customization. Siddique e Boddu (2004) present in his paper the integration of the customer in the process via the Internet, in a program that automatically generates a three-

dimensional image of the product according to the configuration chosen, a price estimate and the sequence information for the line assembly. The paper of Durayet *et al.* (2000) offers a model for classifying mass customization based on consumer involvement. Shao *et al.* (2006) present an approach that generates customer groups according to their product specifications (clustering), and the association of these characteristics with the configuration alternatives.

The second category identified concerns papers related to **architecture, platform and product families**. Among the issues found, the presentation of the APF concept (Architecture of Product Family) by Du *et al.* (2001), as a conceptual structure to an organizational logic for the generation of product families, methods to assist the choice of platform (Williams *et al.*, 2007), methods for conducting the best possible formation of families aimed at producing (Galan *et al.*, 2007); bibliographic review about the platform concept, presenting methods for modularization and formation of platforms (Jose, Tollenaere, 2005), frameworks for architecture evaluation based on commonality, platform and modularity (Fixson, 2005) among others.

The third category identified presents the papers focused on different aspects of **Modularity**. In addition to the discussion of the benefits achieved by the strategy and its competitive effects (Jacobs *et al.*, 2007), there are also papers dealing with the types and levels of modularity (Holtta-Otto, De Weck, 2007) as well as presenting methods to drive the modularization at the early stages of product development (Zhang, Tor, Britton, 2006; Meng, Jiang, Huang, 2007; Zhuo, San, Seng, 2008).

The fourth category identified is about the papers that present studies concerning the **application** of principles of mass customization and modularity in different productive sectors, such as the electronics industry (Partanen, Haapasalo, 2004), the footwear industry (Zangiacominiet *et al.*, 2004), the steam turbines industry (Yang *et al.*, 2007), as well as from different countries, such as European multinational corporations (Akkermans *et al.*, 2003) and Taiwanese production networks (Lin, 2004), in addition to studies in specific companies, such as Volvo Cars (Fredriksson, 2006). Furthermore, the papers that presented studies on the **transition** from mass production to mass customization (Rungtusanatham, Salvador, 2008) and mass customization to mass personalization (Kumar, 2007) were also included.

The fifth category identified in this bibliometrics was the papers related to the **supply chain**. Among the papers included in this category, there are four of the papers presented as the 20 most cited. The article by Mikkola and Skjott-Larsen (2004) presents mass customization, postponement and modularization as three interrelated strategies complementary to the management of the supply chain. Other issues addressed in this category are the configuration of the supply chain according to the level of customization offered (Salvador *et al.*, 2004), the role of product architecture in the supply chain design (Howard, Squire, 2007), as well as the relationship between the suppliers' capabilities, the supply chain collaboration and the responsiveness of the buyer (Squire *et al.*, 2009), among others.

The sixth category presents studies that focus on aspects related to **production**, its planning and control. Among the selected papers are studies related to: postponement strategy (Yang *et al.*, 2004), cost control system (Tu *et al.*, 2007), data mining (Shao *et al.*, 2006; Da Cunha *et al.*, 2006; Song, Kusiak, 2009); module stocks for final assembly (Agardet *et al.*, 2009); defect tracking through the house of quality (Wang, Lin, 2007), among others.

Among the articles studied some stood out due to the presentation of more specific subjects or new views on the subject. Among these, Adaptable design was studied by Guet *et al.* (2009) and Li *et al.* (2008), the adaptation of modularity concepts and mass customization for services is presented by Voss and Hsuan (2009) and Moon *et al.* (2009), as well as MC is presented as one of the key technologies for the approach called Product Lifecycle Management (PLM). In the paper by Fung *et al.* (2004), there is an examination of the relationships between the product style and the consumer trends and preferences, bringing the idea of intangible modules to upgrade common products.

5. ResearchTrends

Many authors, at the end of their papers, indicate potential for improvement in this field of study by the means of the presentation of gaps in their researches, the possibility of adding new parameters and characteristics to their studies, through the test of methods and proposals in other areas, and even guidelines for the improvement and continuity of their works. However, more general issues also arise as opportunities for future work, which also point to ways for the maturation of the subject. One such issue is presented by Tuet *et al.*, in 2004, raising the need to study the nature of the relationship between the modularity and innovation. Duray (2000) cites the importance of future researches to include services as part of the model of mass customization, as well as the exploration of the implications that the products coming from MC have in the market, its benefits and the satisfaction generated on the client and the costs associated with these practices. Voss and Hsuan (2009) also cite the need for development and improvement of studies in the area of customization and modularity in services, as well as development of approaches and tools to help projects related to this.

Questions related to the life cycle are cited by Jose and Tollenaere (2005), as well as the need to develop methods that assist the generation of platforms that bring practical results and relate to aspects such as costs. Benefits and costs associated with product customization strategies implemented by companies could be analyzed from a comparative perspective, with case studies being analyzed (Brun, Zorzini, 2009). Fixson (2005) cites as an opportunity for future researches the study of the linkages between the product architecture and its connections with process and supply, as well as with costs, quality and time.

Kumar (2004) cites directions for research in supply chain and MC, for example, researches related to operations strategy (price, quality, flexibility, delivery and service), functional strategies (product design, product development, stock, lead time, purchasing, transportation, distribution and retail strategies), issues of adjustment between mass customization and capabilities of supply and software development chain that help the client with the co-design of products (product configurators).

6. Conclusion

This article presented a bibliometric analysis on the subject of Mass customization and Modularity. The bibliographic review by the bibliometric method allowed to draw a picture of what has been handled in relation to these matters in the 2000s, identifying the most influential works, the authors engaged in the subject, countries and journals with the highest number of publications and researches in the area, as well as the most discussed topics.

Through citation analysis it was possible to see the great impact of the papers by Durayet *et al.* (2000) and Salvador *et al.*, from 2002, which are the papers of major impact in the collection of articles used in this bibliometrics due to the high number of citations. According to the distribution of publications over time it is possible to see a growing trend in the number of publications during the decade, with special attention to the years 2004 and 2007, which show an increase in the number of publications compared to other years. The analysis by category of articles presented seven different topics related to MC and Modularity and its distribution over time, demonstrating the appearance of new areas to explore, for example, the application of MC and Modularity in services. The research trends presented by some authors lead to a direction of what may be the scope of papers found in the next decade, as well as gaps not sufficiently explored yet by the academy.

Acknowledgments: This work received financial support from the state of Rio Grande do Sul, through FAPERGS (PqG nº 06/2010 – 1008530).

7. References

- Agard B, da Cunha C, Cheung B. (2009) Composition of module stock for final assembly using an enhanced genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 47, 5829-5842.
- Agard B, Penz B. (2009) A simulated annealing method based on a clustering approach to determine bills of materials for a large product family. *International Journal of Production Economics*, 117, 389-401.
- Akkermans HA, Bogerd P, Yucesan E, van Wassenhove LN (2003). The impact of ERP on supply chain management: Exploratory findings from a European Delphi study RID B-4374-2010. *European Journal of Operational Research*, 146, 284-301.
- Alizon, F. ; Shooter, S. B. ; Simpson, T.W. Henry Ford and the Model T: lessons for product platforming and mass customization. *Design Studies*, 30, 588-605.
- Blecker T, Abdelkafi N. (2007). The development of a component commonality metric for mass customization. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 54, 70-85.
- Brun A, Zorzini M. (2009). Evaluation of product customization strategies through modularization and postponement. *International Journal of Production Economics*, 120, 205-220.
- Coronado AE, Lyons AC, Kehoe DF, Coleman J. (2004) Enabling mass customization: extending build-to-order concepts to supply chains. *Production Planning & Control*, 15, 398-411.
- Cronim, B. (2000) Bibliometrics and beyond: some thoughts on web-based citation analysis. *Journal of Information Science*, 27,1-7.
- Da Cunha C, Agard B, Kusiak A. (2006). Data mining for improvement of product quality. *International Journal of Production Research*, 44, 4027-4041.
- Da Silveira, G.; Borenstein, D.; Fogliatto, F.S. (2001). Mass customization: literature review and research directions. *International Journal of Production Economics*, 72, 1-13.
- Dekkers R. (2006). Engineering management and the Order Entry Point. *International Journal of Production Research*, 44, 4011-4025.
- Devos, P. (2011). Research and bibliometrics: A long history... *Clinics and Research in Hepatology and Gastroenterology*, 35, 336-337.
- Du XH, Jiao JX, Tseng MM. (2001) Architecture of product family: Fundamentals and methodology RID A-9212-2010. *Concurrent Engineering-Research and Applications*, 9, 309-325.
- Du XH, Jiao JX, Tseng MM. (2002). Graph grammar based product family modeling RID A-9212-2010. *Concurrent Engineering-Research and Applications*, 10, 113-128.
- Du XH, Jiao JX, Tseng MM (2003). Modelling platform-based product configuration using programmed attributed graph grammars RID A-9212-2010. *Journal of Engineering Design*, 14, 145-167.
- Duray R, Ward PT, Milligan GW, Berry WL. (2000). Approaches to mass customization: configurations and empirical validation. *Journal of Operations Management*, 18, 605-625.
- Duray, R. (2002). Mass customization origins: mass or custom manufacturing? *International Journal of Operations & Production Management*, 22, 314-328.
- Duray R. (2004). Mass customizers' use of inventory, planning techniques and channel management. *Production Planning & Control*, 15, 412-421.

- ElMaraghy HA, Mahmoudi N. (2009). Concurrent design of product modules structure and global supply chain configurations. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 22, 483-493.
- Fixson SK. (2005). Product architecture assessment: a tool to link product, process, and supply chain design decisions. *Journal of Operations Management*, 23, 345-369.
- Fredriksson P. (2006). Mechanisms and rationales for the coordination of a modular assembly system - The case of Volvo cars. *International Journal of Operations & Production Management*, 26, 350-370.
- Fung RYK, Chong SPY, Wang Y. (2004). A framework of product styling platform approach: Styling as intangible modules. *Concurrent Engineering-Research and Applications*, 12, 89-103.
- Galan R, Racero J, Eguia I, Garcia JM. (2007). A systematic approach for product families formation in Reconfigurable Manufacturing Systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23,489-502.
- Germani M, Mandorli F. (2004). Self-configuring components approach to product variant development. *AI EDAM-Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing*, 18, 41-54.
- Guedes, V.; Borschiver, S. (2005) Bibliometria: uma ferramenta estatística para a gestão da informação e do conhecimento, em sistemas de informação, de comunicação e de avaliação científica e tecnológica. *Proceedings CINFORM - Encontro Nacional de Ciência da Informação VI*, Salvador – Bahia.
- Gupta S, Roth AV. (2007). Martin K. Starr: A visionary proponent for system integration, modular production, and catastrophe avoidance. *Production and Operations Management*, 16, 1-12.
- Hofer AP, Halman JIM. (2004). Complex products and systems: Potential from using layout platforms. *AI EDAM-Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing*, 18, 55-69.
- Holtta-Otto K, de Weck O. (2007). Degree of modularity in engineering systems and products with technical and business constraints. *Concurrent Engineering-Research and Applications*, 15,113-126.
- Howard M, Squire B. (2007). Modularization and the impact on supply relationships. *International Journal of Operations & Production Management*, 27, 1192-1212.
- Huang GQ, Zhang XY, Lo VHY. (2007). Integrated configuration of platform products and supply chains for mass customization: A game-theoretic approach. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 54, 156-171.
- Jacobs M, VickerySK, Droge C. (2007). The effects of product modularity on competitive performance - Do integration strategies mediate the relationship? RID A-8013-2009. *International Journal of Operations & Production Management*, 27,1046-1068.
- Jiao, J.; Tseng, M.M. (2004). Customizability analysis in design for mass customization. *Computer-Aided Design*, 36, 745-757.
- Jiao JX, Zhang LF, Prasanna K. (2004). Process variety modeling for process configuration in mass customization: An approach based on object-oriented petri nets with changeable structures RID A-9212-2010. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 16, 335-361.
- Jose A, Tollenaere M. (2005). Modular and platform methods for product family design: literature analysis. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 16, 371-390.
- Kong FB, Ming XG, Wang L, Wang XH, Wang PP. (2009). On Modular Products Development. *Concurrent Engineering-Research and Applications*, 17, 291-300.
- Kuderer, K. (2006). Benefits of Modularity. The 4th student conference on Development of. Modular Products, 74-81; 2006.
- Kumar A. (2004). Mass customization: Metrics and modularity. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 16, 287-311.
- Kumar A. (2007). From mass customization to mass personalization: a strategic transformation. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 19, 533-547.
- Kuroda M, Mihira H. (2008). Strategic inventory holding to allow the estimation of earlier due dates in make-to-order production. *International Journal of Production Research*, 46, 495-508.
- Li L, Huang GQ, Newman ST. (2008). A cooperative coevolutionary algorithm for design of platform-based mass customized products. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19, 507-519.
- Li Y, Xue DY, Gu PH. (2008). Design for product adaptability. *Concurrent Engineering-Research and Applications*, 16, 221-232.
- Lin BW. (2004). Original equipment manufacturers (OEM) manufacturing strategy for network innovation agility: the case of Taiwanese manufacturing networks. *International Journal of Production Research*, 42, 943-957.
- Meehan JS, Duffy AHB, WhitfieldRI. (2007). Supporting 'design for re-use' with modular design RID A-4040-2010. *Concurrent Engineering-Research and Applications*, 15, 141-155.
- Meng XH, Jiang ZH, Huang GQ. (2007). On the module identification for product family development. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35, 26-40.
- Mikkola JH, Skjott-Larsen T. (2004). Supply-chain integration: implications for mass customization, modularization and postponement strategies. *Production Planning & Control*, 15, 352-361.
- Mikkola JH. (2007). Management of product architecture modularity for mass customization: Modeling and theoretical considerations. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 54,57-69.

- Miller, T.D.; Elgard, P. (1998). Defining Modules, Modularity and Modularization : Evolution of the concept in a Historical Perspective. *Proceeding of the 13th IPS Research Seminar*, Dinamarca.
- Ming XG, Yan JQ, Lu WF, Ma DZ, Song B. (2007). Mass production of tooling product families via modular feature-based design to manufacturing collaboration. *PLM Journal of Intelligent Manufacturing*, 18, 185-195.
- MoonSK, Simpson TW, Shu J, Kumara SRT. (2009). Service representation for capturing and reusing design knowledge in product and service families using object-oriented concepts and an ontology. *Journal of Engineering Design*, 20, 413-431.
- Muffato, M.; Roveda, M. (2000). Developing product platforms: analysis of the development process. *Tecnovation*, 20, 617-630.
- MukhopadhyaySK, Setoputro R. (2005). Optimal return policy and modular design for build-to-order products. *Journal of Operations Management*, 23, 496-506.
- Naik, G. (2010). China avança em pesquisa e desenvolvimento. *The Wall Street Journal*. Disponível em <<http://online.wsj.com/article/SB129237291875466773.html>>. Acesso em 21 nov. 2011.
- Narin, F.; Hamilton, K.S. (1996) Bibliometric performance measures. *Scientometrics*, 36, 293-310.
- Olivares-Benitez E, Gonzalez-Velarde JL. (2008). A metaheuristic approach for selecting a common platform for modular products based on product performance and manufacturing cost. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19, 599-610.
- Partanen J, Haapasalo H. (2004). Fast production for order fulfillment: Implementing mass customization in electronics industry. *International Journal of Production Economics*, 90, 213-222.
- Pine, B.J. (1993). Mass customization: the new frontier in business competition. *Harvard Business School Press*, Boston.
- Qu T, Huang GQ, Chen X, Chen HP. (2009). Extending analytical target cascading for optimal supply chain network configuration of a product family. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 22, 1012-1023.
- Rai R, Allada V. (2003). Modular product family design: agent-based Pareto-optimization and quality loss function-based post-optimal analysis. *International Journal of Production Research*, 41, 4075-4098.
- Ro YK, Liker JK, Fixson SK. (2007). Modularity as a strategy for supply chain coordination: The case of US auto. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 54, 172-189.
- Rungtusanatham MJ, Salvador F. (2008). From mass production to mass customization: Hindrance factors, structural inertia, and transition hazard. *Production and Operations Management*, 17, 385-396.
- Salvador F, Forza C, Rungtusanatham M. (2002). Modularity, product variety, production volume, and component sourcing: theorizing beyond generic prescriptions. *Journal of Operations Management*, 20, 549-575.
- Salvador F, Rungtusanatham M, Forza C. (2004). Supply-chain configurations for mass customization. *Production Planning & Control*, 15, 381-397.
- Shao XY, Wang ZH, Li PG, Feng CXJ. (2006). Integrating data mining and rough set for customer group-based discovery of product configuration rules. *International Journal of Production Research*, 44, 2789-2811.
- Siddique Z, Boddu KR. (2004). A mass customization information framework for integration of customer in the configuration/design of a customized product. *AI EDAM-Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing*, 18, 71-85.
- Siddique Z, Ninan JA. (2007). A grammatical approach for real-time design of engineer-to-order products. *Journal of Engineering Design*, 18, 157-174.
- Song Z, Kusiak A. (2009). Optimising product configurations with a data-mining approach. *International Journal of Production Research*, 47, 1733-1751.
- Squire B, Cousins PD, Lawson B, Brown S. (2009). The effect of supplier manufacturing capabilities on buyer responsiveness The role of collaboration. *International Journal of Operations & Production Management*, 29, 766-788.
- Tang ZJ, Chen RQ, Ji XH. (2005). Operational tactics and tenets of a new manufacturing paradigm 'instant customerisation'. *International Journal of Production Research*, 43, 2873-2894.
- Thomas DJ, Warsing DP. (2007). A periodic inventory model for stocking modular components. *Production and Operations Management*, 16, 343-359.
- Thomson Reuters. Products and services – Histcite. (2011). Acesso em 29 dez. 2011. Disponível em <http://thomsonreuters.com/products_services/science/science_products/a-z/histcite/>.
- Tseng, M.M.; Jiao, J. (1996). Design for mass customization. *Annals of the CIRP*, 45.
- Tu Q, Vonderembse MA, Ragu-Nathan TS, Ragu-Nathan B. (2004). Measuring modularity-based manufacturing practices and their impact on mass customization capability: A customer-driven perspective. *Decision Sciences*, 35, 147-168.
- Tu YL, Xie SQ, Fung RYK. (2007). Product development cost estimation in mass customization. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 54, 29-40.

- Van Wie M, Stone RB, Thevenot H, Simpson T. (2007). Examination of platform and differentiating elements in product family design. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 18, 77-96.
- VossCA, Hsuan J. (2009). Service Architecture and Modularity*. *Decision Sciences*, 40, 541-569.
- Wang H, Lin ZQ. (2007). Defects tracking matrix for mass customization production based on House of Quality. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 19, 666-684.
- Williams CB, Allen JK, Rosen DW, Mistree F. (2007). Designing platforms for customizable products and processes in markets of non-uniform demand. *Concurrent Engineering-Research and Applications*, 15, 201-216.
- Yang B, Burns ND, Backhouse CJ. Postponement: a review and an integrated framework RID E-5520-2010. *International Journal of Operations & Production Management*, 24, 468-487.
- Yang QH, Qi GN, Lu YJ, Gu XJ. (2007). Applying mass customization to the production of industrial steam turbines. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 20, 178-188.
- Yeh JY, Wu TH. (2005). Solutions for product configuration management: An empirical study. *AI EDAM-Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis And Manufacturing*, 19, 39-47.
- Zangiacomi A, Zhijian L, Sacco M, Boer CR. Process planning and scheduling for mass customised shoe manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 17, 613-621.
- Zha XF, Sriram RD, Lu WF. Evaluation and selection in product design for mass customization: A knowledge decision support approach. *AI EDAM-Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing*, 18, 87-109.
- Zhang WY, Tor SY, BrittonGA. (2006). Managing modularity in product family design with functional modeling RID F-8930-2010. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30, 579-588.
- Zhuo L, San WY, Seng LK. (2008). Integrated approach to modularize the conceptual product family architecture. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36, 83-96.