**Produto & Produção, vol. 18, n.2, p.45-64. 2017**

**RECEBIDO EM 24/01/2017. ACEITO EM 26/07/2017.**

**Antonio Wagner Forti**
*Universidade Estadual Paulista - UNESP*
*Campus de Guaratinguetá*
awforti@feg.unesp.br

**Jorge Muniz Jr.**
*Universidade Estadual Paulista - UNESP*
*Campus de Guaratinguetá*

**Cesar Ramos Coutinho**
*Volkswagen Caminhões e Ônibus Ltda.*

# Modularização de uma suspensão traseira a ar para veículos comerciais pesados (caminhões e ônibus)

## Resumo

Esse trabalho discute a complementariedade e dois métodos de modularização – *Design Structure Matrix* (DSM) e *Modular Function Deployment* (MFD) – no processo de modularização de um sistema de suspensão traseira a ar para veículos pesados (caminhões e ônibus). Primeiramente, o método DSM, através de um ponto de vista puramente técnico, foi aplicado para gerar os módulos preliminares e reduzir os componentes de 44 para 26, visando facilitar a aplicação do MFD. Em seguida o método MFD foi utilizado para incorporar os requisitos dos clientes e estratégias da empresa no projeto do produto. Os resultados obtidos pelos dois métodos foram analisados criticamente por uma equipe multifuncional (especialistas), a qual consolidou ao final processo, sete módulos. A análise crítica dos resultados pelos especialistas evidenciou que a utilização conjunta desses dois métodos melhorou a eficiência do processo de modularização do produto.

**Palavras-chaves:** Geração de Módulos; *Design Structure Matrix* (DSM), *Modular Function Deployment* (MFD).

## Abstract

This work discusses the complementarity of the two modularization methods – Design Structure Matrix (DSM) and Modular Function Deployment (MFD) – during the modularization process of an air rear suspension system for heavy vehicles (trucks and buses). First, the DSM method, through a purely technical point of view, was applied to generate the preliminary modules and so, reducing the initial amount of components from 44 to 26, in order to facilitate the application of MFD. Then the MFD method was applied to incorporate in the project the customer requirements and company strategies. The results obtained by the two methods were analyzed critically by a multifunctional team (specialists), which consolidated in the end of process, seven modules. The critical analysis of the results by the specialists showed that the application of these two methods together improved a lot the efficiency of the product modularization process.

**Keywords:** Module Generation; *Design Structure Matrix* (DSM); *Modular Function Deployment* (MFD).

## 1. Introdução

Esse trabalho discute a complementariedade dos métodos de modularização *Design Structure Matrix* (DSM) e *Modular Function Deployment* (MFD) do sistema de suspensão traseira a ar para veículos pesados (caminhões e ônibus). O trabalho alinha tanto a expectativa do cliente por produtos personalizados como a estratégia da empresa por atendê-la.

Observa-se que para atender as exigências dos clientes, algumas empresas optam pela customização em massa, ou seja, a produção em massa de produtos que atendam cada cliente individualmente com custos semelhantes aos dos produtos não customizados. Agindo dessa forma, a variedade de produtos dessas empresas e, consequentemente, de componentes tende a aumentar continuamente. Por esse motivo, essas empresas devem ser flexíveis para atender as exigências do mercado e manter a gestão da complexidade gerada pela customização em massa.

Ao optar pelo processo de modularização do produto, a empresa pode planejar seu portfólio de produtos, de tal maneira que cada cliente em potencial possa encontrar o produto que precisa e/ou aquele que satisfaça suas necessidades.

Dentre as várias técnicas de modularização disponíveis, o *Modular Function Deployment* (MFD) e *Design Structure Matrix* (DSM) foram escolhidas para serem aplicadas na modularização do sistema de suspensão traseira a ar para caminhões e ônibus, numa montadora que opera no ambiente de Consórcio Modular, por uma equipe com experiência no desenvolvimento desse produto. O conhecimento adquirido no processo de modularização desse sistema pode ser replicado aos demais sistemas que compõem os caminhões e ônibus.

Segundo Hu et al. (2011), existem relações causa-efeito entre variedade, flexibilidade e complexidade. Ou seja, a variedade nos produtos impacta na flexibilidade da produção, que por sua vez, resulta em complexidade na operação.

Contudo, não há consenso acadêmico e empírico de como lidar com complexidade de sistemas produtivos de alto volume e alta variedade. Isso evidencia a relevância para analisar este cenário com vista a contribuir para melhorar a competividade industrial, em especial a da indústria automotiva, a qual influencia uma cadeia produtiva relevante. Segundo Hallgren e Olhager (2009) a empresa deve reduzir as diferenças entre as necessidades do mercado e suas capacidades operacionais de atendê-las por meio de melhor integração, flexibilidade e agilidade de seus sistemas produtivos.

A busca por competitividade tem feito com que as montadoras automotivas aumentem a oferta de produtos e lidem melhor com a flexibilidade nos sistemas produtivos. A oferta de portfólios com maior variedade de produtos geralmente exige o gerenciamento de maior quantidade de componentes em processo, o que reduz a eficiência operacional da fábrica e impõem complexidade à gestão de sistemas produtivos (MAcDUFFIE et al., 2006). Sistemas produtivos de veículos como caminhões, que são produzidos sob encomenda, têm alta variedade de alternativas e alto volume de produção. Por esse motivo, necessitam atenção e novos métodos de gerenciamento para mitigar ineficiências.

As montadoras de caminhões têm dado atenção à customização em massa (HU et al., 2008; FUJITA, 2002). Elas tem buscado produzir numa mesma linha de montagem uma maior variedade de produtos personalizados com desempenho de produção em massa (SMITH et al., 2013).

Segundo Shamsuzzoha e Helo (2010) e Blackenfelt (2001), empresas estão revendo e selecionando estratégias apropriadas para maior velocidade no desenvolvimento ou adaptação dos seus produtos. Ao optar pela customização em massa, a empresa necessita encontrar um equilíbrio entre as necessidades dos clientes, que devem ser satisfeitas, e o bom desempenho operacional, articulados na empresa por áreas como Comercial, Desenvolvimento de Produto e Operações.

Esforços para melhor gerir a complexidade podem criar diferencial competitivo. Efthymiou et al. (2012), observam diferentes métodos para medir a complexidade e orientar decisões de produção. No entanto, a melhor adequação destes métodos à realidade de sistemas produtivos de alto volume e alta variedade é uma fronteira de pesquisa a ser explorada.

Os estudos pioneiros de MacDuffie et al. (1996) e Fisher e Ittner (1999) na década de 90 evidenciam que a maior variedade de produtos dificulta a entrega de produtos pelas montadoras com qualidade, no prazo desejado e a custos baixos. Este contexto não se alterou muito e representa um

importante campo de estudo. Assim sendo, a pergunta a ser respondida é: Como conseguir os benefícios da customização em massa e manter o desempenho operacional em ambientes automotivos complexos, de alta variedade de produto e alto volume de produção?

O desenvolvimento de arquitetura modular do produto é citado como um meio de lidar com essas demandas relacionadas com o conceito de customização em massa, na qual uma ampla variedade de produtos pode ser produzida por meio da combinação de um número limitado de módulos contidos nas plataformas de produto. Desta forma, a modularidade consegue racionalizar a utilização de componentes através da sua padronização, ou seja, utilização do mesmo componente em diversos produtos. Assim sendo, através da modularidade é possível manter a personalização dos produtos e flexibilidade da produção. Os módulos podem ser combinados por meio da família de produtos, aumentando suas variantes para atender às necessidades dos clientes mantendo os custos e complexidade baixos (MILLER, 1998; JOSE e TOLLENAERE 2005, EAGER et al., 2010; SHAMSUZZOHA e HELO, 2010).

Dentro desse contexto, vislumbra-se contribuir como este trabalho, no trato da flexibilidade e da complexidade em sistemas produtivos de alto volume de produção e alta variedade de produtos, típicas na produção de veículos comerciais como caminhões e ônibus. Além disso, pretende-se fornecer elementos capazes de auxiliar na popularização de novos conceitos e melhor entendimento de como lidar com técnicas de modularização de produtos.

Para trabalho apresenta na Introdução os objetivos, a problemática, a relevância e delimitação do estudo. No Panorama teórico são abordados os conceitos dos métodos de modularização DSM e MFD, juntamente com a definição teórica sobre termos diretamente envolvidos com o estudo. No Procedimento Teórico e Aplicação apresenta-se o passo-a-passo do processo de modularização, proposto nesse trabalho, de um sistema de suspensão traseira a ar para caminhões e ônibus, numa montadora que opera no ambiente de Consórcio Modular. Na seção Conclusões são apresentadas as considerações finais obtidas com a realização desse trabalho.

## 2. Panorama Teórico

Nesta seção são apresentadas fundamentos dos métodos de modularização no desenvolvimento do produto, em especial: módulo, modularidade e modularização; arquitetura do produto; e, plataforma do produto, na qual a variedade é criada através das famílias de produto. Finalizando serão apresentados métodos de modularização, com ênfase no DSM e MFD.

Empresas que aumentam a variedade de seus produtos constantemente tornam os processos produtivos complexos. Com isto, seus respectivos desafios produzem impactos que afetam suas estratégias, conforme ilustrado na Figura 1.

| Desafio | →→ | Impacto | →→ | Estratégia |
|---|---|---|---|---|
| Foco nas necessidades do cliente | →→ | Produtos personalizados com aumento de variedade | →→ | Desenvolvimento de produtos flexíveis |
| Concorrência em mercado globalizado | →→ | Impõem maior eficiência em custo, tempo de lançamento e qualidade | →→ | Gerenciamento de portfólio |
| Rápida evolução tecnológica | →→ | Maior complexidade e menor ciclo de vida do produto | →→ | Gestão da complexidade |

Figura 1 – Desafio, Impacto e Estratégia da indústria no mercado de veículos comerciais
Fonte: Elaborada pelo autor

Uma forma de atuar sobre a complexidade, gerada pela customização em massa, é por meio da padronização do produto. Isso potencializa a aplicação dos mesmos componentes e/ou sistemas em diversos produtos, racionalizando assim, a utilização dos mesmos. Uma das desvantagens da padronização é que a necessidade do cliente pode não ser atendida totalmente. Uma alternativa à padronização é o desenvolvimento de arquitetura modular do produto, na qual uma ampla variedade de produtos ou família de produto pode ser produzida com a combinação de um número limitado de componentes ou sistemas, os quais são chamados de módulos e estão contidos nas plataformas de produto. A arquitetura modular do produto possibilita equilíbrio entre custos e variedade dos

componentes e/ou sistemas. Desta forma, a modularidade consegue balancear padronização e racionalização, que é bom para a empresa, com personalização e flexibilidade, que é bom para os clientes (EAGER, 2010; SHAMSUZZOHA e PETRI, 2010; JOSE e TOLLENAERE, 2005, MILLER, 1998).

Para atingir a modularidade do produto, por meio de da modularização dos componentes e/ou subconjuntos desse produto, primeiramente, é necessário definir quais serão seus módulos. Existem vários métodos para a obtenção de módulos, ou seja, vários métodos de modularização do produto. Normalmente, a escolha do método a ser utilizado depende basicamente: (1) do produto a ser modularizado (produto existente ou inovador); (2) do cenário, no qual se pretende aplicar a modularização e; (3) da familiaridade do usuário com o método de modularização a ser aplicado. Independentemente do método de modularização a ser empregado, o processo de modularização do produto deve ser executado por uma equipe multifuncional, com vasta experiência no desenvolvimento de produto. Essa equipe trabalhará tanto na coleta dos dados, os quais serão processados computacionalmente e gerarão os possíveis módulos, quanto na análise dos resultados, ou seja, verificar se os módulos gerados estão de acordo com os processos de fabricação do produto e estratégia da empresa. (BATAGLIN E FERREIRA, 2013; MACHADO E MAZIERO, 2014).

O princípio básico de todos os métodos de modularização do produto é o de agrupar componentes ou soluções técnicas e definir os possíveis módulos, visando criar ou aperfeiçoar a arquitetura do produto. Para isso, cada método necessita de dados e/ou informações, os quais podem vir: das necessidades dos clientes; das características físicas e geométricas ou funcionais dos componentes do produto; e da própria estratégia de negócios da empresa. Arquitetura modular do produto é caracterizada pela existência de interfaces padronizadas entre os blocos de construção que possuem funções específicas e são definidos e selecionados para atender à estratégia da empresa, neste caso, os blocos de construção são denominados módulos (ERIXON, 1996; BLACKENFELT, 2001; BORJESSON, 2012). O esquema de um processo de modularização é apresentado na Figura 2.

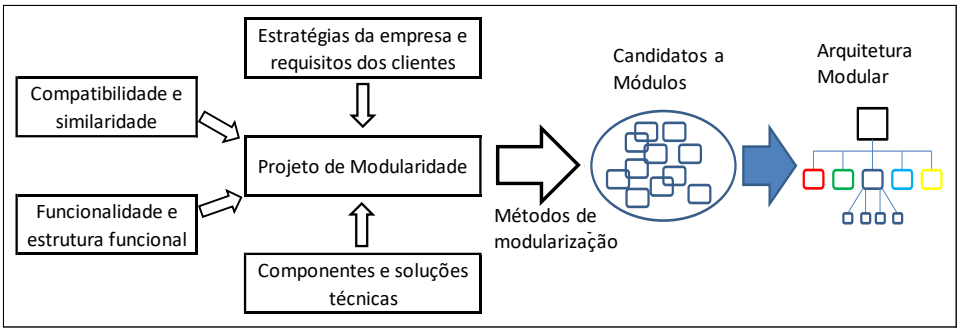


Figura 2 – Esquema de um processo de modularização
Fonte: Adaptado de Erixon (1996) e Borjesson (2012)

Dentre os vários métodos de modularização, o Modular Function Deployment (MFD) e o Design Structure Matrix (DSM) estão entre os mais aplicados pela indústria. Esses dois métodos apresentam características similares como entrada de dados matricial e solução utilizando tanto softwares comerciais quanto acadêmicos. Além disso, eles apresentam também características complementares. Enquanto o MFD leva em conta as estratégias da empresa e as necessidades do cliente, o DSM foca na interação física e geométrica entre os componentes do produto. Assim sendo, a aplicação destes dois métodos por uma equipe multifuncional de desenvolvimento do produto pode tornar o processo de modularização mais eficaz (NILSON E EXIRON, 1998; BORJESSON, 2012)

## 2.1. Módulo, Modularização e Modularidade

Modularização é a atividade na qual a estruturação em módulos é adotada, ou seja, um sistema complexo é estruturado em vários subsistemas independentes, ou seja, em módulos. Assim sendo, a modularização tem por objetivo agrupar os componentes do produto a fim de gerar módulos, os quais serão partes de uma arquitetura modular do produto. Pode-se também definir modularização como sendo métodos estruturados que agrupam os componentes ou soluções técnicas e definem os candidatos a

módulos utilizando informações do cliente, físicas ou geométricas e funcionais, além do que estratégicas da empresa definir e/ou aperfeiçoar a arquitetura do produto.

Um módulo está normalmente relacionado a uma unidade funcional independente em relação ao propósito do produto do qual ele faz parte, ou seja, a função é realizada dentro do próprio módulo e limita-se a ele. Modularidade é a capacidade de criar produtos complexos através da combinação de módulos relativamente simples, o que implica num padrão comum para interfaces e interações. Estes módulos são normalmente organizados em plataforma, na qual a família de produtos é gerada (MILLER, 1998; ERIXON, 1998).

## 2.2. Arquitetura do Produto

Ulrich e Tung (1991) definiram arquitetura do produto como sendo a forma pelo qual uma função é incorporada aos componentes físicos. A arquitetura do produto relaciona a funcionalidade do produto (função) aos seus componentes e subsistemas físicos (sistemas), além do que, a maneira como eles estão conectados e mapeados. Uma boa definição de arquitetura afeta o ciclo de vida, a flexibilidade e o potencial de customização em massa do produto. A arquitetura modular do produto é obtida a partir dos módulos comuns necessários para a formação da plataforma do produto, a qual servirá como base para a geração da família de produtos.

## 2.3. Plataforma do produto

Uma arquitetura modular do produto define um sistema modular e representa o mapeamento das funções dos módulos ao produto com suas interfaces e interações. A variedade do produto é gerada com as combinações destes módulos em famílias e o conjunto destes módulos é agrupado em plataformas do produto, conforme Figura 3.

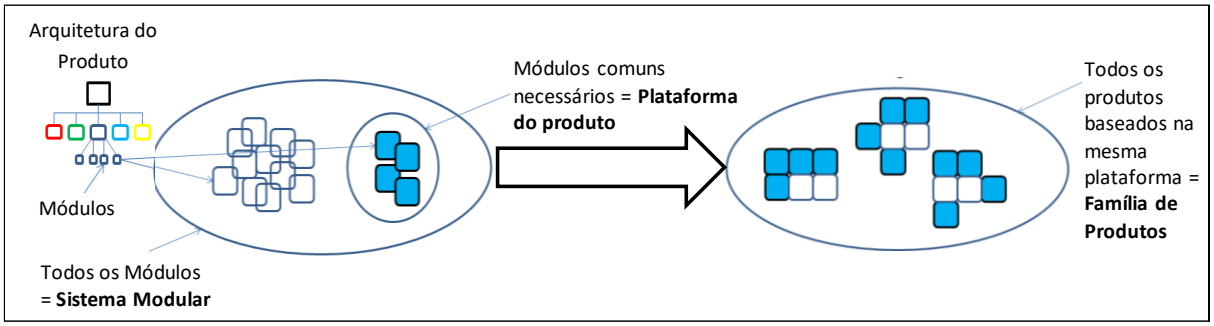


Figura 3 - Relação entre sistema modular, plataforma e família de produtos.
Autor: Adaptado de Erixon (1996) e Borjesson (2012)

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

## 2.4. Métodos de modularização disponíveis e a escolha dos métodos para esse caso.

Existem vários métodos de modularização disponíveis, dentre os quais pode-se destacar: (1) *Modular Function Deployment* (MFD), (2) *Design Structure Matrix* (DSM), (3) *Function Structure Heuristics* (FSH), (4) *Decomposition Approach* (DA), (5) *Function-Strategy* DSM (FS-DSM), (6) MFD com adição de propriedades de convergência e (7) MFD aplicado concomitantemente ao DSM. Os três primeiros (MFD, DSM e FSH) são considerados métodos fundamentais, enquanto que os outros quatro são métodos híbridos, os quais são obtidos a partir da combinação ou aperfeiçoamento dos três

primeiros. Borjesson (2010) analisou qualitativamente os 7 (sete) métodos, baseados em onze critérios, conforme Figura 4. O resultado dessa análise é apresentado na Figura 5.

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

Figura 4 - Critérios para análise qualitativa dos métodos de modularização
Fonte: Adaptado de Borjesson (2010)

| Critérios | MFD | DSM | FSH | DA | FS-DSM | MFD+CP | MFD+DSM |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Organização dos dados | ● | ● | ○ | ◗ | ◗ | ● | ● |
| Flexibilidade | ● | ◗ | ● | ◗ | ◗ | ● | ◗ |
| Execução simultânea | ● | ◗ | ○ | ◗ | ◗ | ● | ● |
| Facilidade em aprender e utilizar | ◗ | ● | ○ | ◗ | ○ | ◗ | ◗ |
| Suportado por software | ● | ● | ○ | ◗ | ○ | ◗ | ◗ |
| Design handover | ● | ◗ | ○ | ◗ | ◗ | ● | ● |
| Repetitividade | ◗ | ● | ◗ | ● | ◗ | ◗ | ◗ |
| Aplicação prática | ● | ● | ● | ○ | ◗ | ◗ | ○ |
| Desenvolvimento de plataforma ou família | ◗ | ◗ | ● | ◗ | ◗ | ◗ | ◗ |
| Específico para modularidade | ● | ◗ | ● | ● | ● | ● | ● |
| Apresentação dos resultados | ● | ◗ | ○ | ◗ | ◗ | ● | ● |

● Forte ◗ Médio ○ Fraco

Figura 5 - Qualificação dos métodos de modularização
Fonte: Adaptado de Borjesson (2010)

Com relação ao critério “organização dos dados”, métodos baseados em matrizes são mais convenientes por pelo menos duas razões. A primeira, é que os dados podem ser manipulados facilmente utilizando softwares disponíveis comercialmente; e a segunda, é que a estrutura matricial é útil para produtos mais complexos, nos quais diagramas de estrutura funcional são mais complicados de serem aplicados. Exceto o FSH, que utiliza estrutura funcional, todos os demais métodos utilizam matrizes no tratamento dos dados. O DSM apresenta a forma mais simples de entrada de dados matricial, enquanto MFD apresenta o melhor *handover* (transferência de conhecimento). Por outro lado, a força dos métodos baseados em estruturas funcionais é a facilidade em trabalhar com pouca informação disponível. Esta característica torna o FSH o método mais adequado para ser aplicado no desenvolvimento de produtos inovadores durante a fase de conceituação. Os métodos MFD e DSM tem forte suporte de software. O MFD utiliza agrupamento hierárquico e o DSM pode ser solucionado utilizando algoritmo Idicula-Gutierrez-Thebeau (IGTA). O MFD com Propriedade de Convergência e MFD em conjunto com o DSM também podem ser solucionados utilizando softwares, porém, não há muita aplicação prática e, consequentemente, testes em projetos reais sobre a eficácia desses métodos. Quanto aos métodos FSH e FS-DSM, as informações a respeito de software que auxiliem no processo de modularização através deles são exíguas (BORJESSON,M 2010).

O DSM apresenta facilidade na entrada de dados, uma vez que, ela leva em consideração apenas as relações internas existentes entre os elementos, como posição geométrica e funcionalidade. Além disso, existem vários softwares que podem auxiliar no processo de modularização. Assim sendo, o DSM é um dos métodos de maior repetitividade dos resultados. Contudo, para uma correta aplicação dos dados de entrada (relação entre os componentes), há necessidade de uma equipe multifuncional como profundo conhecimento sobre o produto a ser modularizado. O DSM pode ser utilizado como base para o início

dos estudos de modularização em arquiteturas complexas para simplificar o processo de desenvolvimento (HÖLTTÄ OTTO e SOLONEN, 2003; ARCHER, 2010).

Okudan e Gupta (2013) mostraram que o método DA também apresenta boa repetitividade dos resultados. Contudo, a grande dificuldade na obtenção de um software para auxiliar no processo e pouca utilização desse método em casos na indústria, fazem com que esse método seja pouco utilizado.

O método MFD e seus híbridos levam em consideração os requerimentos dos clientes e o planejamento estratégico da empresa através do *Quality Function Deployment* (QFD) e dos *Module Drivers* (MD). O FS-DSM consegue captar a estratégia da empresa de uma forma simplificada baseada também nos MD do método MFD. Os demais métodos não possuem esta capacidade (BORJESSON, 2009).

Os métodos MFD, DSM e FSH são os mais estudados e utilizados pelas empresas. Os métodos MFD e DSM apresentam características similares como entrada de dados matricial e disponibilidade de software para sua aplicação. Além disso, eles apresentam características complementares. O MFD tem forte influência das estratégias da empresa, abrangência dos dados de entrada (vozes do cliente, engenharia e empresa) e flexibilidade, ao passo que, o DSM está mais relacionado com os dados técnicos do produto (relação entre os componentes). Portanto, a aplicação destes dois métodos de forma combinada pode tornar o processo de modularização do produto mais eficaz. Por esse motivo, serão utilizados esses dois métodos de modularização no decorres desse trabalho para a geração dos módulos (BORJESSON E HÖLTTÄ OTTO, 2013).

## 3. Procedimento Metodológico e Aplicação

O Procedimento Metodológico pode ser dividido em duas fases, conforme Figura 6.

Figura 6 – Detalhamento do procedimento metodológico
Fonte: Elaborada pelo autor

Na Fase 1 é aplicado o DSM no sistema escolhido para ser modularizado.- Nessa fase, os primeiros módulos são gerados. Esses módulos formados passam a ser tratados como elementos, consequentemente, o números de elementos iniciais diminui, uma vez que cada módulo formado é constituído de mais de um elemento. Com a diminuição do número de elementos do sistema, a aplicação do MFD na Fase 2 torna-se menos trabalhosa em todas as suas etapas. Para finalizar os módulos obtidos pelo DSM e MFD são analisados.

### 3.1. Escolha do sistema a ser modularizado (Fase 1)

Na Figura 7 são apresentados os elementos da suspensão traseira a ar para caminhões e ônibus.

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

Figura 7- Soluções técnicas ou elementos
Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme descrito anteriormente, o projeto foi desenvolvido numa empresa que opera num ambiente de consorcio modular, com vários parceiros para a montagem de conjuntos completos de peças. O Consórcio Modular busca redução nos custos de produção, investimento, estoques, tempo de produção e, principalmente, flexibilidade na produção de veículos diferenciados, trata-se de um modelo ímpar de produção de alto volume e alta variedade.

A parte modularizada é a suspensão traseira a ar (parte fabricada por terceiros), a qual está fortemente relacionada com a variedade do produto (suspensão completa), tanto em capacidade de carga como desempenho de frenagem. Portanto, ela é impactante na inovação tecnológica do produto.

Para associar e detalhar os elementos básicos da suspensão e formar um subsistema maior, no caso a suspensão traseira completa, empregou-se a metodologia *Botton-up* (ver seção 3.3, item b). Este enfoque foi escolhido, por se tratar de um produto existente e, consequentemente, haver uma lista de seus componentes. Esse fato permitiu sua decomposição em 44 soluções técnicas ou elementos.

## 3.2. Aplicação o método de modularização DSM (Fase 1)

O objetivo dessa parte da Fase 1 é gerar os primeiros módulos e diminuir a quantidade inicial de 44 elementos para facilitar a aplicação do método MFD. O DSM é fortemente influenciado pelo conhecimento da equipe de trabalho (HÖLTTÄ OTTO e SOLONEN, 2003; ARCHER, 2010). O conhecimento é relevante para determinação da interação entre os elementos na matriz de modularização, na qual é preciso indicar quais elementos possuem interação, inserindo o valor unitário na intersecção entre a linha e a coluna dos mesmos. A matriz de modularização DSM, apresentada na Figura 8 foi elaborada usando o software DSM EXCEL MACRO 2.1.

A partir da aplicação do DSM foram gerados subconjuntos de componentes. Os subconjuntos formados foram: (1) *Carrier* (*Carrier*, *Yoke* e fixação do *yoke*); (2) Cubo de roda (cubo, rolamento, retentor, prisioneiro e anel do ABS); (3) Suporte de freio (suporte, “S” came e ajustador); (4) Freio de rodas (*spider*, sapatas + lonas, roletes e molas); (5) Bolsão de ar (molas pneumáticas anteriores e posteriores); (6) Tirantes (tirantes superiores e inferiores); (7) Barra estabilizadora (tirantes, suporte mancal, bucha superior, bucha mancal e barra estabilizadora) e; (8) Amortecedor (amortecedor e bucha). A lista final de soluções técnicas ou elementos passou de 44 para 26, conforme Figura 9. São esses 26 elementos que serão utilizados durante a aplicação do MFD.

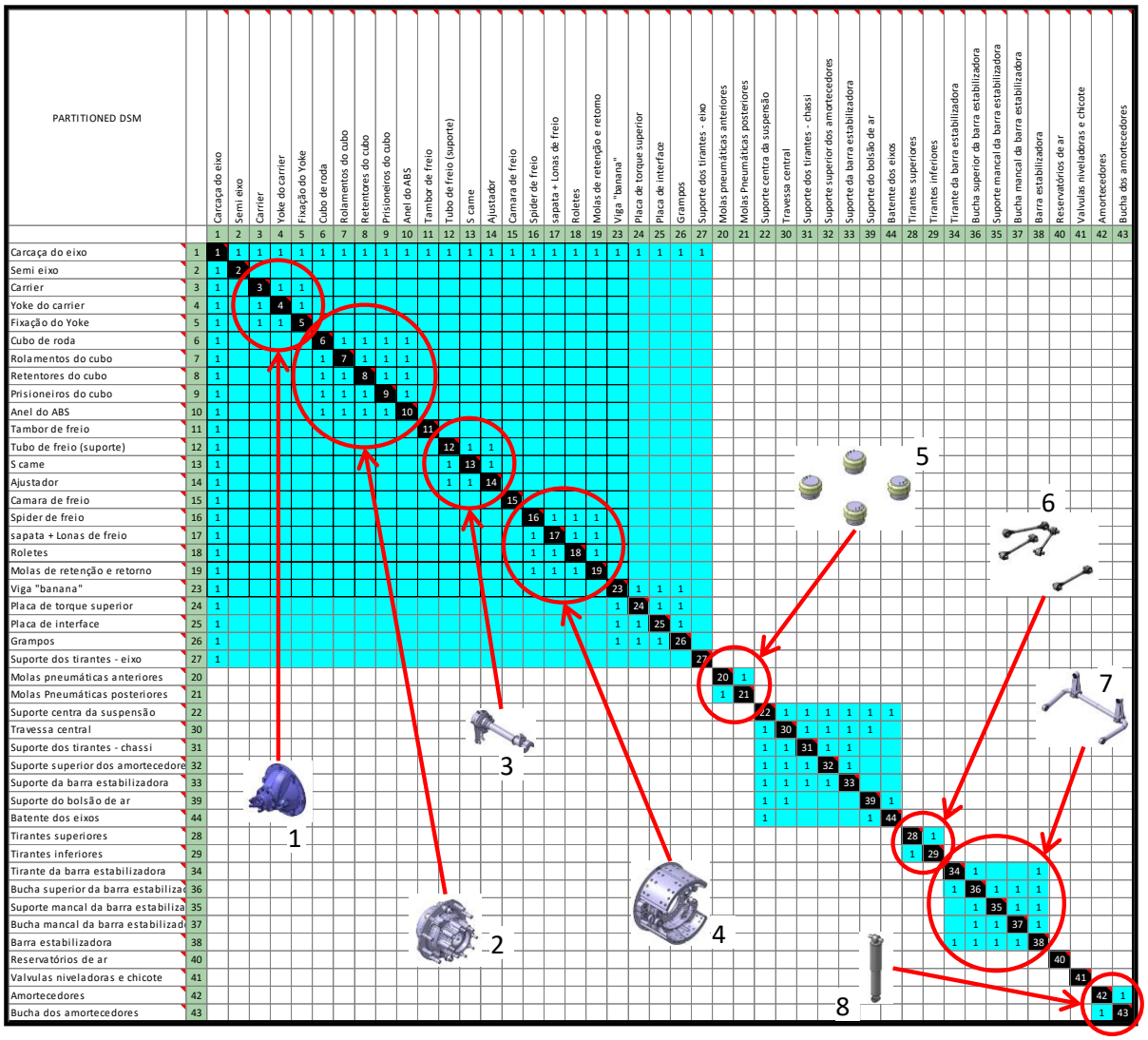


Figura 8 – DSM aplicado às 44 soluções técnicas
Fonte: Elaborada pelo autor

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

Figura 9 – Soluções técnicas ou elementos obtidos a partir da aplicação do DSM
Fonte: Elaborada pelo autor

## 3.3. Aplicação o método de modularização MFD (Fase 2)

O MFD é um método de modularização matricial que utiliza três matrizes: Desdobramento da Função Modular (*Quality Function Deployment* – QFD); Matriz de Propriedade do Produto (*Design Property Matrix* – DPM) e a Matriz de Indicação de Módulos (*Module Indication Matrix* – MIM). Essas matrizes formam o Mapa de Gerenciamento do Produto, (*Product Management Map* – PMM) esquematizado na Figura 10. A Figura 20 apresentará o resultado final do PMM.

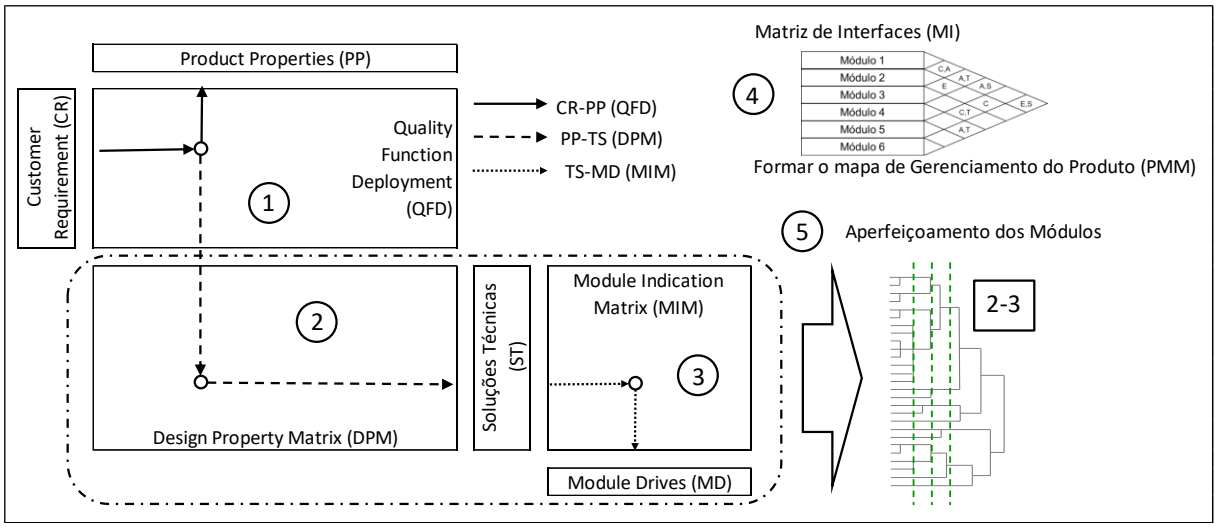


Figura 10 – Representação esquemática da PMM
Fonte: Adaptada de Borjesson (2010)

Com o projeto piloto definido, aplica-se o método MFD que será conduzido em cinco passos:
Passo 1 – Definir os requisitos dos clientes e propriedades do produto (QFD).
Passo 2 – Selecionar as soluções técnicas (DPM).
Passo 3 – Gerar o conceito modular (MIM) → 2-3 podem ser representados por dendogramas
Passo 4 – Analisar o conceito modular – Tipo de interface entre os modulos.
Passo 5 – Aperfeiçoar os módulos.

**a) Passo 1: Definir os requisitos dos clientes**

O levantamento dos requisitos dos clientes consiste na identificação de suas necessidades, desejos e expectativas. Essas informações podem ser obtidas de várias formas, entre elas através das pesquisas dos departamentos de Vendas e Marketing. Bataglin (2013) e Machado e Maziero (2014) utilizaram, em projetos de modularização, *brainstorming* e *benchmarking* com envolvimento de uma equipe de projeto multidisciplinar para estudar e elaborar uma lista com os requisitos do cliente. Segundo Archer (2010) e Oliveira (2010) uma forma eficiente de determinar estas propriedades do produto é utilizar a metodologia de *brainstorming* e a confecção do diagrama de Ishikawa (espinha de peixe), com a equipe técnica do projeto de modularização.

Nesse trabalho, que é um refinamento de uma arquitetura de um produto existente, foram utilizadas informações de produtos similares existentes na empresa. Os requisitos dos clientes foram baseados em material disponível e em diálogos com engenheiros e especialistas em *marketing* do produto. Segundo estas investigações, as principais necessidades dos clientes para veículos comerciais, as quais podem ser supridas através do desenvolvimento de uma suspensão pneumática com conceito modular, em geral são: baixo custo operacional; conforto para o motorista e passageiro; valor de revenda; manutenção rápida, fácil e de baixo custo; capacidade de carga líquida; integridade da carga; disponibilidade de rede e serviços. Baseado nestes resultados foram definidos os principais requisitos dos clientes para uma suspensão pneumática, conforme apresentado na Tabela 1.

O grau de importância para cada um dos requisitos variou de 3 a 5. Para os itens relacionados a baixo custo operacional e segurança foi atribuído o grau de importância 5. Para os itens relacionados ao conforto e aplicação foi atribuído o grau de importância 4 e para os demais itens o grau de importância 3. Com o intuito de entregar ao cliente o que ele quer, o produto deve possuir algumas características denominadas propriedades do produto. Essa é a linguagem da engenharia para atender aos requisitos dos clientes, e assim, criar o escopo do projeto. As propriedades do produto devem ser mensuráveis e controláveis, para que possam ser atribuídas metas que definam os objetivos a serem alcançados pela engenharia. As 21 propriedades do produto estão apresentadas na Figura 11.

Tabela 1 – Requisitos que o clientes esperam de um suspensão (5 – maior importância).

| Requisito do Cliente | Importância |
|---|---|
| Baixo desgaste de pneus | 5 |
| Durabilidade/Confiabilidade dos componentes | 5 |
| Manutenção fácil e de baixo custo | 5 |
| Segurança | 5 |
| Capacidade de carga vertical e tração | 4 |
| Conforto para passageiros e integridade da carga | 4 |
| Estabilidade/Dirigibilidade | 4 |
| Baixo nível de ruído | 3 |
| Capacidade de transpor obstáculos | 3 |
| Possibilidade de regular seus parâmetros | 3 |

Fonte: Elaborada pelo autor

Na

▲ = 9 ■ = 3 ● = 1

| Requisitos do Cliente | Propriedades do Produto: Frequência da Suspensão | Amortecimento da suspensão | Rate das buchas de borracha | Ângulo de rolagem máximo | Capac. de carga longitudinal | Rigidez lateral | Rigidez torcional | Curso da Suspensão | Distância do solo | Ângulo de saída | RBA | Volume de ar | Tempo p/ encher os bolsões | Desaceleração | Capac. de carga vertical | Startability | Gradeability | Peças de desgaste removíveis | Peças de fixação padronizados | Acesso para manutenção | Durabilidade | Peso | Pontuação |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Conforto para passageiros e integridade da carga | ▲ | ▲ | ■ | ■ | | | | ▲ | | | | | | | | | | | | | | 4 | 132 |
| Estabilidade/Dirigibilidade | ▲ | ▲ | ■ | ▲ | ▲ | ■ | ■ | ● | | | | | | | | | | | | | | 4 | 184 |
| Baixo desgaste de pneus | ● | ■ | | | ■ | ● | ● | | | | | | | ● | ▲ | | | | | | | 5 | 76 |
| Capacidade de transpor obstáculos | | | ■ | | ■ | ■ | ■ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | | | | | | | | | | | 3 | 192 |
| Possibilidade de regular seus parâmetros | | | ■ | | | | | ▲ | | | | ▲ | ▲ | | ■ | | | | | | | 3 | 132 |
| Segurança | | ● | ● | | ■ | ■ | ■ | | | | | | | ▲ | ■ | | | | | | | 5 | 92 |
| Baixo nível de ruído | | ▲ | ▲ | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | | | | | ■ | 3 | 108 |
| Capacidade de carga vertical e tração | ▲ | ● | | ● | ▲ | | | ■ | | | | | | | ▲ | ▲ | ▲ | | | | | 4 | 200 |
| Manutenção fácil e de baixo custo | | | | | | | | | | | | | | | | | | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | 5 | 144 |
| Durabilidade/Confiabilidade dos componentes | ● | ● | ● | ● | | | | | | | | | | | | | | | | | ▲ | 5 | 52 |
| **Pontuação** | 118 | 128 | 79 | 66 | 111 | 41 | 41 | 115 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 50 | 105 | 36 | 36 | 45 | 45 | 45 | 99 | | |

é apresentada a matriz QFD, na qual os requisitos dos clientes são relacionados com as propriedades do produto. Os critérios utilizados foram: 9 para relação forte, 3 para relação média e 1 para relação fraca. Quando não existe relação, não há pontuação. Por exemplo: o requisito do cliente "Conforto para o Passageiro e Integridade da Carga" tem relação forte com Propriedade do Produto "Frequência da Suspensão", assim sendo, foi atribuída a pontuação 9.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. | Frequência da suspensão | 8. | Curso da suspensão | 15. | Capac. carga vertical |
| 2. | Amortecimento da suspensão | 9. | Distância do solo | 16. | Startability |
| 3. | Rate das buchas de borracha | 10. | Ângulo de saída | 17. | Gradeability |
| 4. | Ângulo de rolagem máximo | 11. | RBA | 18. | Elementos de desgaste removíveis |
| 5. | Capac. carga longitudinal | 12. | Volume de ar | 19. | Elementos de fixação padronizados |
| 6. | Rigidez lateral | 13. | Tempo de enchimentos dos bolsões | 20. | Acesso para manutenção |
| 7. | Rigidez torcional | 14. | Desaceleração | 21. | Durabilidade |

Figura 11 – Propriedades do produto

Fonte: Elaborada pelo autor

▲ = 9 ■ = 3 ● = 1

| Requisitos do Cliente | Propriedades do Produto | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Peso | Pontuação |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Frequência da Suspensão | Amortecimento da suspensão | Rate das buchas de borracha | Ângulo de rolagem máximo | Capac. de carga longitudinal | Rigidez lateral | Rigidez torcional | Curso da Suspensão | Distância do solo | Ângulo de saída | RBA | Volume de ar | Tempo p/ encher os bolsões | Desaceleração | Capac. de carga vertical | Startability | Gradeability | Peças de desgaste removíveis | Peças de fixação padronizados | Acesso para manutenção | Durabilidade | | |
| Conforto para passageiros e integridade da carga | ▲ | ▲ | ■ | ■ | | | | ▲ | | | | | | | | | | | | | | 4 | 132 |
| Estabilidade/Dirigibilidade | ▲ | ▲ | ■ | ▲ | ▲ | ■ | ■ | ● | | | | | | | | | | | | | | 4 | 184 |
| Baixo desgaste de pneus | ● | ■ | | | ■ | ● | ● | | | | | | | ● | ▲ | | | | | | | 5 | 76 |
| Capacidade de transpor obstáculos | | | ■ | | ■ | ■ | ■ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | | | | | | | | | | | 3 | 192 |
| Possibilidade de regular seus parâmetros | | | ■ | | | | | ▲ | | | | ▲ | ▲ | | ■ | | | | | | | 3 | 132 |
| Segurança | | ● | ● | | ■ | ■ | ■ | | | | | | | ▲ | ■ | | | | | | | 5 | 92 |
| Baixo nível de ruído | | ▲ | ▲ | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | | | | | ■ | 3 | 108 |
| Capacidade de carga vertical e tração | ▲ | ● | | ● | ▲ | | | ■ | | | | | | | ▲ | ▲ | ▲ | | | | | 4 | 200 |
| Manutenção fácil e de baixo custo | | | | | | | | | | | | | | | | | | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | 5 | 144 |
| Durabilidade/Confiabilidade dos componentes | ● | ● | ● | ● | | | | | | | | | | | | | | | | | ▲ | 5 | 52 |
| **Pontuação** | 118 | 128 | 79 | 66 | 111 | 41 | 41 | 115 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 50 | 105 | 36 | 36 | 45 | 45 | 45 | 99 | | |

Figura 12 - Matriz QFD

Fonte: Elaborada pelo autor

A Pontuação das propriedades do produto é o somatório do tipo de relação que ele apresenta com os requisitos do cliente multiplicado pelo seu relativo peso. A coluna #1 apresenta o valor 118 (9x4+9x4+1x5+9x4+1x5). A Pontuação dos requisitos do cliente é o somatório do tipo de relação que apresenta com as propriedades do produto multiplicado pelo respectivo peso. Analisando a linha #1 encontra-se o valor 132 (9+9+3+3+9) x 4.

**b) Passo 2: Selecionar as soluções técnicas**

Nesta etapa do MFD, as propriedades do produto devem estar contidas fisicamente no produto de forma que possam ser percebidas pelo cliente. Elas devem ser confrontadas com as soluções técnicas utilizando a matriz DPM (*Design Property Matrix*). Os critérios de pontuação utilizados foram os mesmos do QFD, ou seja, 9, 3 e 1 para, respectivamente, forte, média e fraca interação entre as Soluções Técnicas e as Propriedades do Produto. A matriz DPM é mostrada na Figura 13. Essas propriedades são as soluções técnicas propostas pela engenharia.

▲ = 9 ■ = 3 ● = 1

| Soluções Técnicas | Propriedades do Produto | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Frequência da Suspensão | Amortecimento da suspensão | Rate das buchas de borracha | Ângulo de rolagem máximo | Capac. de carga longitudinal | Rigidez lateral | Rigidez torcional | Curso da Suspensão | Distância do solo | Ângulo de saída | RBA | Volume de ar | Tempo p/ encher os bolsões | Desaceleração | Capac. de carga vertical | Startability | Gradeability | Peças de desgaste removiveis | Peças de fixação padronizados | Acesso para manutenção | Durabilidade |
| Carcaça do eixo | | | | | | ■ | ■ | | ▲ | | | | | | ▲ | | | | | | ▲ |
| Semi eixo | | | | | | | | | | | | | | | ▲ | ■ | ■ | | | ■ | ▲ |
| Carrier | | | | | | | | | | | | | | | ▲ | ▲ | ▲ | | | ■ | ▲ |
| Cubo de rodas | | | | | | ■ | | | | | | | | ■ | ▲ | ■ | ■ | | | ■ | ▲ |
| Tambor de freio | | | | | | | | | | | | | | ▲ | ■ | | | | | | ▲ |
| Suporte de freio | | | | | | | | | | | | | | ▲ | ■ | | | ■ | | ■ | ▲ |
| Câmara de freio | | | | | | | | | | | | | | ▲ | | | | | | ■ | ▲ |
| Freio de rodas | | | | | | | | | | | | | | ▲ | | | | ■ | | ▲ | ▲ |
| Viga "banana" | | | | | ▲ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | ▲ | | | | | | ▲ |
| Placa de torque superior | | | | | ▲ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | ▲ | | | | | | ▲ |
| Placa de interface | | | | | ▲ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | ▲ | | | | | | ▲ |
| Grampos | | | | | ▲ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | ▲ | | | | | | ▲ |
| Suporte dos tiranes - eixo | | | | | ▲ | ▲ | ▲ | | | | | | | | | | | ■ | | | ▲ |
| Bolsão de ar | ▲ | | | | | ■ | ■ | ▲ | | | | ■ | ■ | | ▲ | | | ■ | | ■ | |
| Suporte central da suspensão | | | | | ▲ | ■ | ■ | | ■ | | | | | | | | | | ■ | | ▲ |
| Travessa central | | | | | ▲ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | ■ | | ▲ |
| Suporte dos tirantes - chassi | | | | | ▲ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | ■ | | ▲ |
| Suporte dos amortecedores | | ■ | ■ | | | | | ■ | | | | | | | | | | ▲ | ■ | | |
| Suporte da barra estabilizadora | | | ■ | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | | ▲ | ■ | | |
| Suporte do bolsão de ar | ■ | | | | | | | ■ | | | | | | | ■ | | | ▲ | ■ | | |
| Batente do eixo | | | ■ | | | | | ■ | | | | | | | ■ | | | ▲ | ■ | | |
| Tirantes | | | | | ▲ | ▲ | ▲ | | | | | | | | | | | ■ | | | ▲ |
| Barra estabilizadora | | | ■ | ▲ | | | ▲ | | | ■ | | | | | | | | ■ | | | ▲ |
| Reservatório de ar | | | | | | | | | | | | ▲ | ▲ | | | | | | | | |
| Válvulas niveladoras e chicote | | | | | | | | ▲ | | | | | | | | | | | | | |
| Amortecedores | | ▲ | ■ | | | | | ▲ | | | | | | | | | | | | | |
| **Pontuação** | 12 | 12 | 15 | 12 | 81 | 48 | 54 | 51 | 24 | 3 | 0 | 12 | 12 | 39 | 93 | 15 | 15 | 54 | 21 | 27 | 162 |

Figura 13 – Matriz DPM
Fonte: Elaborada pelo autor

Lange (2008) propõe que a análise funcional para definição das soluções técnicas seja feita essencialmente de duas formas: *Top-down* (de cima para baixo ou do amplo para o específico) e *Botton-up* (de baixo para cima ou do especifico para o amplo). A análise *Top-down* tem inicio descrevendo a função principal do produto e desdobrando esta função aos níveis mais baixos até alcançar as soluções técnicas ou elementos para que esta função seja definida. Na análise *Botton-up*, o ponto de partida é um produto existente, sendo que todas as soluções técnicas são questionadas e novas propostas são discutidas. Esse tipo de análise é feita a partir da decomposição do produto em componentes. Oliveira (2010) define as soluções técnicas através da metodologia *Botton-up*, argumentando que o produto a ser modularizado já existe no mercado e apresenta as soluções técnicas, como sendo uma lista de componentes do produto. Archer (2010) utiliza as duas metodologias para definir soluções técnicas: *Botton-up*, durante os estudos preliminares para conhecimento do produto nas fases de *teardown* (desmontagem) e *benchmarking* (análise competitiva); e a *Top-down* na definição das soluções técnicas propriamente ditas.

**c) Passo 3 – Gerar o conceito modular.**

A última matriz a ser formada é a MIM ou Matriz de Indicação de Módulos (*Modulo Indication Matrix*). Esta matriz é utilizada para correlacionar as soluções técnicas com os direcionadores de modularidade, que são estratégias da empresa relacionadas com a formação dos módulos. O MFD possui 12 direcionadores de modularidade, porém esse número pode ser aumentado ou diminuído em função da estratégia empresa ou da intenção da modularização. Alinhar a modularização às estratégias da

empresa é uma grande vantagem deste método. Neste projeto foram utilizados os 12 direcionadores propostos no MFD.

Segundo Borjesson (2009), a matriz DPM é normalmente maior que a Matriz de Indicação de Módulos (MIM). Ou seja, existem mais propriedades do produto do que direcionadores de estratégia. Ele argumenta que um preenchimento inadequado da matriz DPM pode, por exemplo, propor módulos fortemente influenciados pela visão da engenharia e pouco da estratégia da empresa e vice-versa. Ele argumenta que o dendograma é uma ferramenta que também pode e deve ser utilizada para verificar a "qualidade" da pontuação.

Assim sendo, as matrizes MIM e a DPM devem ser analisadas juntas para indicar quais soluções técnicas possuem maior similaridade e podem ser agrupadas em um mesmo módulo. A indicação dos melhores agrupamentos é feita utilizando um método estatístico de clusterização hierárquica e a visualização, feita com o auxilio de dendograma. Para gerar o dendograma foi utilizado o software MINITAB, configurado com *linkage method* "completo" e distância "Euclidiana". Na Figura 14 é apresentada a matriz MIM pontuada e a Figura 15 o respectivo dendograma obtido.

▲ = 9 ■ = 3 ● = 1

| Soluções Técnicas | Direcionadores de Estratégia: *Carry over* | Evolução Tecnológica | Alteração plane-jada do produto | Diferentes especi-ficações técnicas | Estilo | Unidade comum | Organização / Processo | Teste em separado | Fornecedores estratégicos | Serviço / Manutenção | Atualização | Reciclagem | Pontuação |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Carcaça do eixo | ▲ | | | ▲ | | | ▲ | ▲ | ▲ | | | ■ | 48 |
| Semi eixo | ▲ | | | ▲ | | | ▲ | ▲ | ▲ | | | ■ | 48 |
| Carrier | | ▲ | | ▲ | | | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | | | 54 |
| Cubo de rodas | ▲ | | | | | ▲ | ▲ | | | ■ | | ■ | 24 |
| Tambor de freio | | | | ▲ | | | ▲ | | | | | ■ | 21 |
| Suporte de freio | | ▲ | ■ | ▲ | | | ▲ | | ▲ | ▲ | | | 48 |
| Câmara de freio | | ▲ | | ▲ | | | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | | | 54 |
| Freio de rodas | | ▲ | ■ | ▲ | | | ▲ | | ▲ | ▲ | | | 48 |
| Viga "banana" | | | ▲ | ▲ | | | | | | | | ■ | 21 |
| Placa de torque superior | | | ▲ | ▲ | | | | | | | | ■ | 21 |
| Placa de interface | | | ▲ | ▲ | | | | | | | | ■ | 21 |
| Grampos | | | ▲ | ▲ | | | | | | | | ■ | 21 |
| Suporte dos tirantes - eixo | | | ▲ | ▲ | | | | | | | | ■ | 21 |
| Bolsão de ar | | | ▲ | ▲ | | | | ■ | ■ | ▲ | | ■ | 36 |
| Suporte central da suspensão | | | ▲ | ▲ | | | | | | | | ■ | 21 |
| Travessa central | | | ▲ | ▲ | | | | | | | | ■ | 21 |
| Suporte dos tirantes - chassi | | | ▲ | ▲ | | | | | | | | ■ | 21 |
| Suporte dos amortecedores | ▲ | | | | | ▲ | | | | | | | 18 |
| Suporte da barra estabilizadora | ▲ | | | | | ▲ | | | | | | | 18 |
| Suporte do bolsão de ar | ▲ | | | | | ▲ | | | | | | | 18 |
| Batente do eixo | ▲ | | | | | ▲ | | | | | | | 18 |
| Tirantes | | | ▲ | ▲ | | | | ■ | ■ | ▲ | | | 33 |
| Barra estabilizadora | | | ▲ | ▲ | | | | ▲ | ▲ | | | | 36 |
| Reservatório de ar | | | ▲ | ▲ | | | | | | | | | 18 |
| Válvulas niveladoras e chicote | | | ▲ | ▲ | | | | | ▲ | | | | 27 |
| Amortecedores | | ▲ | ▲ | ▲ | | | | | ▲ | | | ▲ | 45 |
| **Pontuação** | 63 | 45 | 132 | 189 | 0 | 45 | 72 | 51 | 87 | 57 | 0 | 48 | |

Figura 14 – Matriz MIM
Fonte: Elaborada pelo autor

Na matriz MIM é apresentado o somatório das Soluções Técnicas nas linhas e o somatório dos Direcionadores de Estratégia nas colunas dessa Matriz, seguindo a pontuação: 9, 3 e 1 para, respectivamente, forte, média e fraca interação entre as Soluções Técnicas e os Direcionadores Estratégicos.

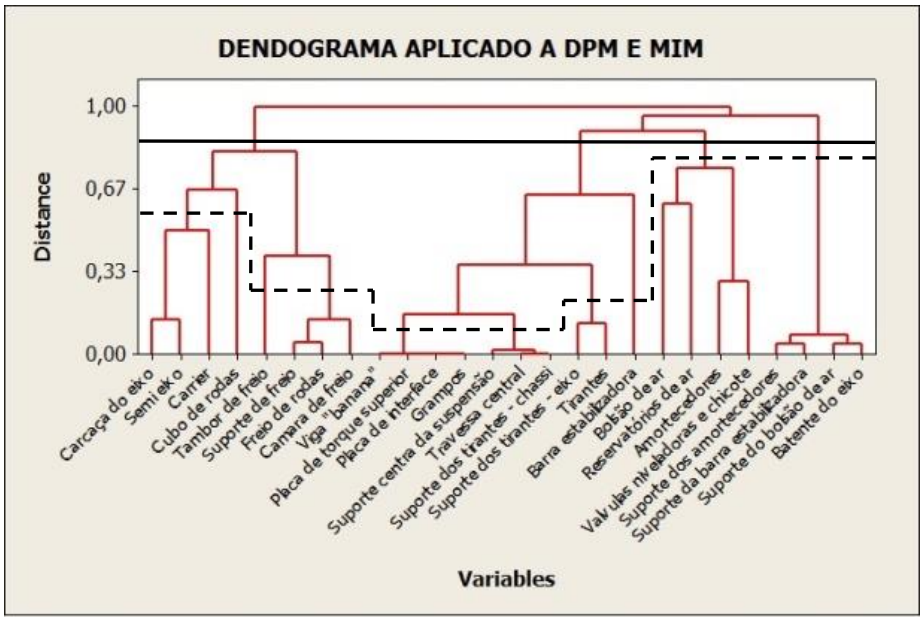


Figura 15 – Dendograma relativo pontuação da DPM e MIM
Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo Borjesson (2009), os dendogramas devem ser interpretados e analisados para decidir quais agrupamentos devem ou não devem se tornar módulos. Nessa fase do MFD a experiência da equipe de modularização é decisiva. Resultados muito discrepantes podem indicar que a pontuação das matrizes DPM e MIM não está adequada e deve ser revista. Além disso, ele cita outras razões que podem levar a resultados discrepantes:

- O MFD não possui informações da geometria do produto, ou seja, relação de posição física/geométrica entre os elementos;
- Propriedades críticas são analisadas superficialmente;
- Excesso de propriedades do produto na DPM;
- Sequência adequada de algumas soluções técnicas é ignorada;
- A matriz DPM normalmente é muito maior que a MIM e pode formar módulos fortemente influenciados pelas propriedades do produto;
- Informações importantes não são relacionadas corretamente com as propriedades do produto;
- Conceitos importantes não são tratados adequadamente.

Analisando o dendograma apresentado na Figura 15 é possível considerar tanto as ramificações mais baixas e com maior similaridade (linha tracejada), quanto as mais altas, nas quais os elementos ainda possuem similaridade para serem agrupados (linha cheia). Adotando as ramificações mais altas, são formados quatro grandes agrupamentos conforme mostrado na Figura 16. Com as ramificações mais baixas são formados dez agrupamentos conforme mostrado na Figura 17.

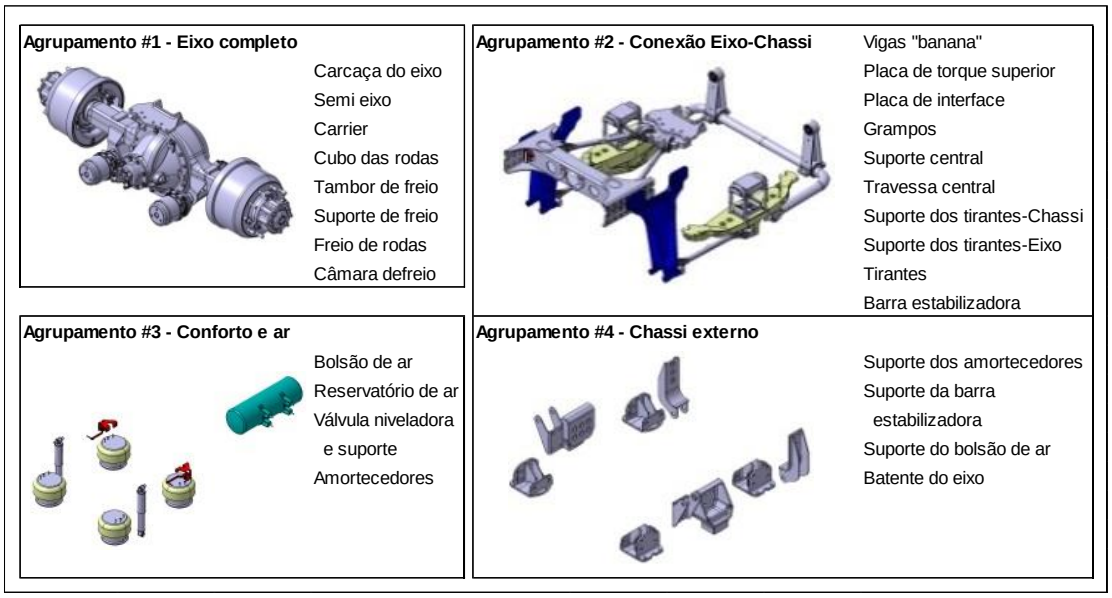


Figura 16 – Sugestão de agrupamento com as ramificações mais altas (linha cheia Figura 15)
Fonte: Elaborado pelo autor

Fazendo uma analogia com o resultado apresentado pelo DSM, conforme Figura 8, verifica-se que o MFD também propõe a formação de um agrupamento com eixo traseiro incluindo a viga banana com todas suas interfaces de fixação e o suporte dos tirantes-eixo. O método agrupa também todos os elementos de interface e de relação com o chassi. Além disso, mantêm os reservatórios de ar e válvulas niveladoras e chicotes separados, uma vez que o DSM é fortemente influenciado pela visão da engenharia considerando o acoplamento, geometria e funcionalidade dos elementos, conforme apresentado na Figura 8. Na análise do dendograma é possível observar um agrupamento considerando o eixo completo, porém mantêm as vigas bananas e suas interfaces separadas. Os elementos dos eixos são fortemente influenciados pelos direcionadores de estratégia "organização/processo" e "fornecedores estratégicos" (Figura 14), já as vigas bananas e suas interfaces são influenciadas pelos direcionadores de estratégia "alteração planejada do produto" e "diferentes especificações técnicas" (Figura 14). Por isso, através da análise do MFD é possível perceber que estes componentes devem ser agrupados em módulos separados.

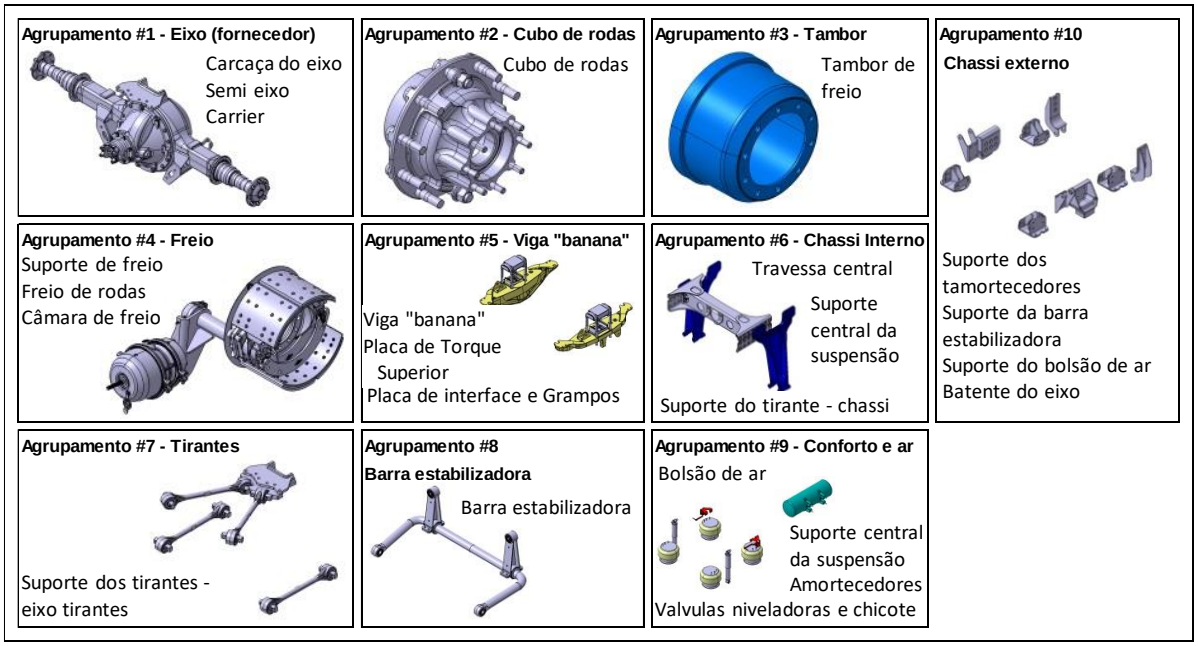


Figura 17 – Sugestões de agrupamento com as ramificações mais baixas (linha tracejada Figura 15)
Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados apresentados pelos dois métodos foram analisados de forma detalhada pela equipe de modularização e, optou-se pela formação de sete módulos, que foram obtidos tanto diretamente dos métodos DSM e MFD, quanto da combinação de ambos, conforme Figura 18.

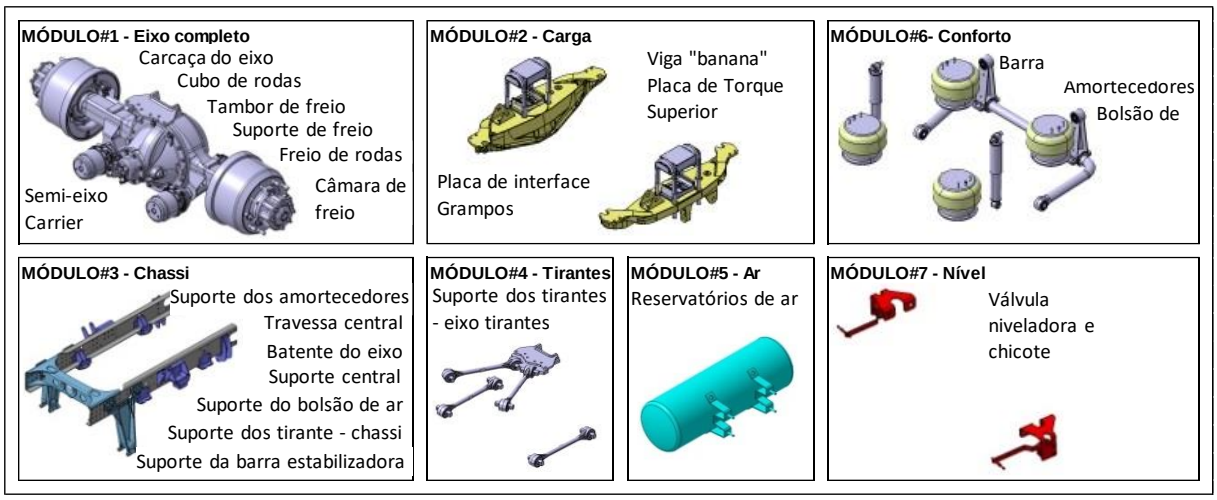


Figura 18 – Conceito modular proposto
Fonte: Elaborado pelo autor

**d) Passo 4 – Analisar o conceito modular.**

Os conceitos gerados devem ser analisados com relação a suas interfaces através da Matriz de Interface (MI), que correlaciona os módulos entre si baseados nas suas condições de interface.

Para fazer isso, a classificação proposta por Lange (2008) é utilizada. Conforme essa classificação a relação de interface entre os módulos pode ser: controle/comunicação (C); meio ambiente (E); campo (F); fixação (A); espacial (S); transferência (T). A Figura 19 mostra a matriz de interface obtida por meio da aplicação do conceito modular no produto. Nota-se, que pode haver uma, mais de uma ou nenhuma interface entre os módulos. O módulo “Eixo Completo” tem relação de Fixação (A) e Transferência (T) com o módulo de Carga, ou seja, estão fixos e há transferência de esforços entre eles. Os módulos “Conforto” e “Ar” tem relação de Controle/Comunicação entre si, ou seja, o elemento reservatório de ar do módulo “Ar” controla os bolsões de ar do módulo “Conforto”.

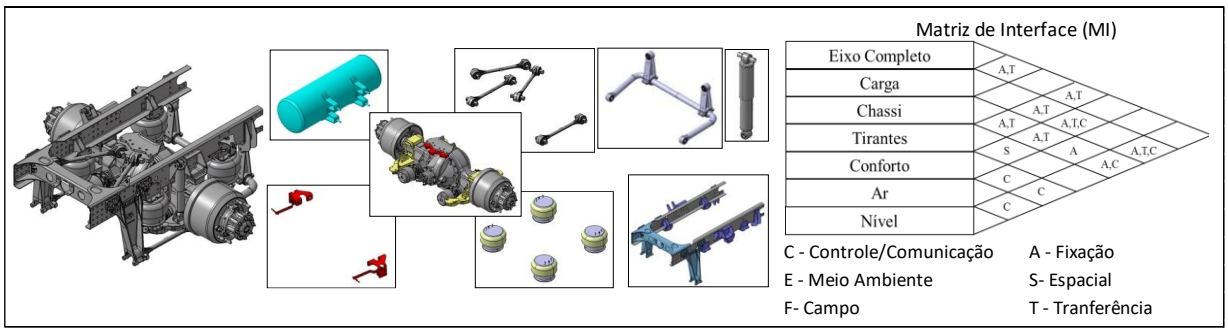


Figura 19 – Matriz de interface referente ao conceito modular
Fonte: Elaborada pelo autor

Nesta fase do processo, elabora-se o mapa de gerenciamento do produto (PMM). Este mapa é formado pelas 3 matrizes do MFD (QFD, DPM e MIM) mais a matriz de interfaces (MI). O PMM mostra uma visão ampla de todo o desenvolvimento, e quais requisitos dos clientes, propriedades do produto e estratégias da empresa influenciam no agrupamento em módulo das soluções técnicas. Além disso, ela também apresenta o caminho percorrido durante o todo o processo de modularização. Com isso, ela é um documento que pode ser consultado durante todo o desenvolvimento do projeto, caso algum conceito não se mostre viável e precise ser modificado. Logo, por meio dela é possível, por exemplo, verificar quais eventuais necessidades dos clientes têm a possibilidade de serem ou não serem atendidas pelo processo de modularização.

Segundo Bataglin (2013), o PMM não deve ser utilizado apenas pela equipe envolvida com o processo de modularização, mas sim por todos aqueles que de alguma forma estão envolvidos com o produto até a sua produção. O PMP deste projeto é mostrado na Figura 20.

▲ = 9
■ = 3
● = 1

**Propriedades do Produto**

| Requisitos do Cliente | Frequência da Suspensão | Amortecimento da suspensão | Rate das buchas de borracha | Ângulo de rolagem máximo | Capac. de carga longitudinal | Rigidez lateral | Rigidez torcional | Curso da Suspensão | Distância do solo | Ângulo de saída | RBA | Volume de ar | Tempo p/ encher os bolsões | Desaceleração | Capac. de carga vertical | Startability | Gradeability | Peças de desgaste removíveis | Peças de fixação padronizados | Acesso para manutenção | Durabilidade | Peso | Somatório |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Conforto para passageiros e integridade da carga | ▲ | ▲ | ■ | ■ | | | | ▲ | | | | | | | | | | | | | | 4 | 132 |
| Estabilidade/Dirigibilidade | ▲ | ▲ | ■ | ▲ | ▲ | ■ | ■ | ● | | | | | | | | | | | | | | 4 | 184 |
| Baixo desgaste de pneus | ● | ■ | | | ■ | ● | ● | | | | | | | ● | ▲ | | | | | | | 5 | 76 |
| Capacidade de transpor obstáculos | | | ■ | | ■ | ■ | ■ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | | | | | | | | | | | 3 | 192 |
| Possibilidade de regular seus parâmetros | | | ■ | | | | | ▲ | | | | ▲ | ▲ | | ■ | | | | | | | 3 | 132 |
| Segurança | | ● | ● | | ■ | ■ | ■ | | | | | | | ▲ | ■ | | | | | | | 5 | 92 |
| Baixo nível de ruído | | ▲ | ▲ | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | | | | | ■ | 3 | 108 |
| Capacidade de carga vertical e tração | ▲ | ● | | ● | ▲ | | | ■ | | | | | | | ▲ | ▲ | ▲ | | | | | 4 | 200 |
| Manutenção fácil e de baixo custo | | | | | | | | | | | | | | | | | | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | 5 | 144 |
| Durabilidade/Confiabilidade dos componentes | ● | ● | ● | ● | | | | | | | | | | | | | | | | | ▲ | 5 | 52 |
| **Pontuação** | 118 | 128 | 79 | 66 | 111 | 41 | 41 | 115 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 50 | 105 | 36 | 36 | 45 | 45 | 45 | 99 | | |

**Direcionadores de Estratégia**

| Soluções Técnicas – Módulo | Componente | Carry over | Evolução Tecnológica | Alteração plane-jada do produto | Diferentes especificações técnicas | Estilo | Uniade comum | Organização / Processo | Teste em separado | Fornecedores estratégicos | Serviço / Manutenção | Atualização | Reciclagem | Somatório |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Eixo Completo | Carcaça do eixo | ▲ | | | ▲ | | | ▲ | ▲ | ▲ | | | ■ | 48 |
| | Semi eixo | ▲ | | | ▲ | | | ▲ | ▲ | ▲ | | | ■ | 48 |
| | Carrier | | ▲ | | ▲ | | | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | | | 54 |
| | Cubo de rodas | ▲ | | | | | ▲ | ▲ | | | ■ | | ■ | 24 |
| | Tambor de freio | | | | ▲ | | | ▲ | | | | | ■ | 21 |
| | Suporte de freio | | ▲ | ■ | ▲ | | | ▲ | | ▲ | ▲ | | | 48 |
| | Câmara de freio | | ▲ | | ▲ | | | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | | | 54 |
| | Freio de rodas | | ▲ | ■ | ▲ | | | ▲ | | ▲ | ▲ | | | 48 |
| Carga | Viga "banana" | | | ▲ | ▲ | | | | | | | | ■ | 21 |
| | Placa de torque superior | | | ▲ | ▲ | | | | | | | | ■ | 21 |
| | Placa de interface | | | ▲ | ▲ | | | | | | | | ■ | 21 |
| | Grampos | | | ▲ | ▲ | | | | | | | | ■ | 21 |
| Chassi | Suporte central da suspensão | | | ▲ | ▲ | | | | | | | | ■ | 21 |
| | Travessa central | | | ▲ | ▲ | | | | | | | | ■ | 21 |
| | Suporte dos tirantes - chassi | | | ▲ | ▲ | | | | | | | | ■ | 21 |
| | Suporte de amortecedores | ▲ | | | | | ▲ | | | | | | | 18 |
| | Suporte da barra estabilizadora | ▲ | | | | | ▲ | | | | | | | 18 |
| | Suporte do bolsão de ar | ▲ | | | | | ▲ | | | | | | | 18 |
| | Batente do eixo | ▲ | | | | | ▲ | | | | | | | 18 |
| Tirantes | Suporte dos tiranes - eixo | | | ▲ | ▲ | | | | | | | | ■ | 21 |
| | Tirantes | | | ▲ | ▲ | | | | ■ | ■ | ▲ | | | 33 |
| Conforto | Barra estabilizadora | | | ▲ | ▲ | | | | ▲ | ▲ | | | | 36 |
| | Bolsão de ar | | | ▲ | ▲ | | | | ■ | ■ | ▲ | | ■ | 36 |
| | Amortecedores | | ▲ | ▲ | ▲ | | | | | ▲ | | | ▲ | 45 |
| Ar | Reservatório de ar | | | ▲ | ▲ | | | | | | | | | 18 |
| Nível | Válvulas niveladoras e chicote | | | ▲ | ▲ | | | | | ▲ | | | | 27 |
| **Somatório** | | 63 | 45 | 132 | 189 | 0 | 45 | 72 | 51 | 87 | 57 | 0 | 48 | |

Figura 20 – PMM referente ao processo de modularização proposto
Fonte: Elaborado pelo autor

Na parte superior da Figura 20 pode-se observar a matriz QFD, a qual relaciona requisitos do cliente com propriedades do produto, conforme apresentado na Figura 12. Abaixo da matriz QFD, encontra-se a matriz DPM, a qual relaciona soluções técnicas com propriedades do produto, conforme apresentado na Figura 13. A direita da matriz DPM está a matriz MIM, a qual relaciona soluções técnicas com direcionadores de estratégia da empresa, conforme apresentado anteriormente na Figura 14. Assim sendo, através do PMM (esquematizado inicialmente na Figura 10) é possível observar: (1) Como requisitos do cliente foram atendidos através das propriedades do produto; (2) Quais soluções técnicas afetam determinadas propriedades do produto; (3) Como as soluções técnicas estão relacionadas com os direcionadores de estratégia da empresa. Desse modo, pode-se analisar o processo de modularização numa só figura e como os diferentes atores estão relacionados, ou seja: (1) Clientes, através dos requisitos do cliente; (2) Engenharia, através das propriedades do produto e das soluções técnicas; (3) Empresa, através dos direcionadores de estratégia.

**e) Passo 5 – Aperfeiçoar os módulos**

Segundo Erixon (1998) a fase final do método MFD consiste em documentar todas as etapas do processo de modularização, ou seja, especificar os módulos com suas interfaces, as necessidades

atendidas dos clientes, as soluções técnicas agrupadas e os direcionadores de estratégia. Todas as informações devem ser descritas em um formato padronizado e divulgadas para as áreas envolvidas no projeto. Na Figura 21 encontra-se uma proposta de formato deste documento.

| **Responsável:** | **Nome do Módulo:** |
|---|---|
| | *Nome sugestivo (adicionar figura)* |
| **Objetivo:** | *Listas as estratégia que deve ser atendidas ( ver MIM)* |
| **Soluções Técnicas:** | *Listar soluções técnicasque compoem o módulo ( ver PMP e dendograma)* |
| **Interfaces com:** | *Listas módulo que possuem interface e seu tipo (ver MI)* |
| **Considerar:** | *Listar os requisitos do cliente afetados (ver QFD)* |

Figura 21 – Proposta de documento do processo de modularização
Fonte: Adaptado de Erixon (1998)

Portanto, essa fase do MFD está relacionada com a geração de informações para o projeto dos componentes e das interfaces entre os módulos obtidos. Apesar de importante, ela não faz parte do escopo desse trabalho, conforme descrito no seu início.

Através da analise dos resultados apresentados é possível contatar que os resultados obtidos diretamente através dos métodos DSM e MFD, pela equipe de modularização, apresentaram algum tipo de restrição, tanto de ordem técnica quanto de estratégia da empresa. Assim sendo, nenhum dos dois métodos obteve uma aceitação total por parte dos integrantes da equipe de modularização. Contudo, os métodos apresentaram várias alternativas para serem analisadas. Os métodos em si, forneceram subsídios para que a equipe qualificada pudesse analisar os resultados e tomar as melhores decisões, ponderando entre as soluções puramente técnicas e aquelas estratégicas para a empresa.

Uma percepção dos integrantes da equipe foi que a aplicação do DSM no início do projeto facilitou muito o trabalho de aplicação do MFD. Além disso, deve-se ter uma atenção especial durante a pontuação das matrizes QFD, DPM e, principalmente, a MIM, a qual relaciona a formação dos módulos com as estratégias da empresa.

## 4. Conclusões

Os módulos finais foram obtidos, tanto diretamente a partir do DSM e do MFD, quanto pela combinação de ambos. A formação dos módulos está baseada num correto fornecimento dos dados e numa análise criteriosa dos resultados. Logo, durante o processo de modularização do produto, é importante a colaboração de uma equipe multifuncional e capacitada no desenvolvimento do produto.

Durante a correlação das soluções técnicas com as propriedades do produto utilizando a matriz DPM, observou-se que a pontuação deve ser feita de forma direta e objetiva, focando nas relações mais fortes. Através da analise do dendograma é possível verificar a qualidade desta pontuação fornecida. Caso seja obtida uma ramificação muito longa no dendograma, isso significa que as pontuações podem não estar adequadas, sendo aconselhável revê-la.

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

A proposta de módulos a partir do MFD foi feita através da análise do dendograma aplicado conjuntamente as matrizes DPM e MIM. A representação hierárquica e os agrupamentos gerados foram discutidos pela equipe de modularização do projeto. Análises considerando tantos as ramificações mais baixas (maior similaridade) e as ramificações mais altas (menor similaridades) apresentaram diferentes possibilidades de agrupamentos para a formação dos módulos.

Para a proposta final dos módulos, através do MFD, os resultados foram avaliados para detectar inconsistências funcionais, de manufatura e geométricas, uma vez que esse método não contempla esse

tipo de análise. Em contra partida, os resultados do DSM, através de uma visão técnica, serviram para verificar quais elementos poderiam ser agrupados sem comprometer a funcionalidade do produto.

Portanto, ambos os métodos utilizados auxiliaram muito no processo de modularização do produto. Contudo, uma equipe altamente qualificada para analisar os resultados e escolher corretamente os módulos, levando em consideração todos os atores envolvidos (cliente, engenharia e empresa) é de fundamental importância para alcançar os resultados esperados.

**Referências**

ARCHER, J. de A.; SCALICE, R. K. **Aplicação e Análise de uso de Três Metodologias de Projetos de Produtos Modulares**. In: XXX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – ENEGEP, 2010. 14 f.

BATAGLIN, M; FERREIRA, J.C.E. **Método da Implantação da Função Modular Aplicado ao Projeto e Manufatura Sustentável de Produtos em uma Empresa do Setor Metal-Mecânico**. In: 7o COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2013, Penedo, Itatiaia, RJ, 2013. v. CD-ROM.

BLACKENFELT, M. *Managing Complexity by Product Modularization: Balancing the aspects of technology and business during the design process*. 2001. 90 p. **Doctoral Thesis – The Royal Institute of Technology**, Stockholm, Sweden, 2001.

BORJESSON, F. *Improved Output in Modular Function Deployment Using Heuristics*. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN – ICED**. Stanford, CA, USA. 12 p, 2009.

BORJESSON, F.; HÖLTTÄ-OTTO, K. *Improved Clustering Algorithm for Design Structure Matrix. In: International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering*, **Conference – IDETC/CIE**. Chicago, IL, USA. 10 p, 2012.

EAGER, A., ELSAM, K., GUPTA, R., & VELINDER, M., *Modular Design Playbook Guidelines for Assessing the Benefits and Risks of Modular design*, 2010.

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

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

EFTHYMIOU, K.; PAGOROPOULOS, A.; PAPAKOSTAS, N.; MOURTZIS, D.; CHRYSSOLOURIS, G., *Manufacturing Systems Complexity Review: Challenges and Outlook*. **Procedia CIRP**, v.3, p. 644 – 649, 2012.

JOSE, A. e TOLLENAERE, M., *Modular and platform methods for product family design: Literature Analysis*. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v.16, n.3, p. 371–390., 2005.

FISHER, M. L.; ITTNER, C. D., *The Impact of Product Variety on Automobile Assembly Operations: Empirical Evidence and Simulation Analysis*. **Management Science**, v. 45, n. 6, p. 771-786, 1999.

FUJITA, K., *Product variety optimization under modular architecture*. **CAD Computer Aided Design**, v. 34, n.12, p. 953–965, 2002.

HALLGREN, M., OLHAGER, J., *Lean and Agile Manufacturing: External and Internal Drivers and Performance Outcomes*. **International Journal of Operations & Production Management**. v. 29, n. 10, p. 976-999, 2009.

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

HU, S.J., ZHU, X., WANG, H., KOREN, Y. *Product Variety and Manufacturing Complexity in Assembly Systems and Supply Chains*. In: **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v.57, p. 45–48, 2008.

HU, S. J.; KO, j.; WEYAND, l.; ELMARAGHY, H. A.; LIEN, T. K.; KOREN, Y; BLEY, H.; CHRYSSOLOURIS, G.; NASR, N.; SHPITALNI, M. *Assembly system design and operations for product variety*. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 60, n. 2, p. 715–733, 2011.

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

MacDUFFIE, J. P., SETHURAMAN, K., FISCHER, M., *Product Variety and Manufacturing Performance: Evidence from International Automotive Assembly Plant Study*. **Management Science**, v. 42, n. 3, p. 350-369, 1996.

MacDUFFIE, J. P. and HELPER, S., *Collaboration in Supply Chains: With and Without Trust*, in Charles Heckscher and Paul S. Adler (eds.), The Firm as a Collaborative Community: The Reconstruction of Trust in the Knowledge Economy, pp. 417-466. **New York: Oxford University Press**, 2006.

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

MILLER, T. D., *Defining Modules, Modularity and Modularization Evolution of the Concept in a Historical Perspective*. **Proceedings of the 13th IPS Research Seminar**, 1–19, 1998.

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

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

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

SHAMSUZZOHA, A. H. M. e HELO, P. T. *Modular Product Architecture: The Role of Information Exchange for Customization*. **Rapid Modelling and Quick Response**, Ed: Springer p195–212, 2010.

SMITH, S., SMITH, G. C.; JIAO, R.; CHU, C. H. *Mass customization in the product life cycle*. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 24, p. 877-885, 2013.

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