

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

METODOLOGIA DE PROJETO MODULAR APLICADA AO DESENVOLVIMENTO DE
UM ROBÔ PLATAFORMA MÓVEL

por

Pedro Henrique Zanchet Garcia

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2019

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Garcia, Pedro Henrique Zanchet
Metodologia de projeto modular aplicada ao
desenvolvimento de um robô plataforma móvel / Pedro
Henrique Zanchet Garcia. -- 2019.
29 f.
Orientador: Alcy Rodolfo dos Santos Carrara.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Metodologia de projeto modular. 2. Robô
plataforma móvel. 3. Arquitetura modular. I. Carrara,
Alcy Rodolfo dos Santos, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Pedro Henrique Zanchet Garcia

METODOLOGIA DE PROJETO MODULAR APLICADA AO DESENVOLVIMENTO DE
UM ROBÔ PLATAFORMA MÓVEL

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mario Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara

Prof. Dr. Flávio José Lorini

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, dezembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Dezir, por seu companheirismo imprescindível nessa jornada, transmitindo coragem e entusiasmo nos momentos difíceis. Assim como Newton, agradeço pelos ombros que proporcionaram ver tão longe.

À minha mãe, Odete, cujo carinho e dedicação inabaláveis, fundamentais nas horas de descrença e desilusão, dão sentido à conclusão dessa etapa.

À minha irmã, Marina, que por vezes é minha antítese, mas nunca deixa de ser meu complemento.

Aos meus amigos, aqui não nominados, porém carinhosamente compreendidos, pelos momentos de felicidade vivenciados juntos; e de dificuldade, vivenciados mais juntos ainda.

A quem, ao longo dessa caminhada, contribuiu para que eu me tornasse uma versão melhor de mim mesmo.

DEDICATÓRIA

Aos argonautas do Pacífico Sul.

*Dê-me seis horas para derrubar uma árvore
e eu passarei as primeiras quatro afiando o machado.*

Abraham Lincoln

Garcia, Pedro Henrique Zanchet. **Metodologia de projeto modular aplicada ao desenvolvimento de um robô plataforma móvel**. 2019. 29 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

A robotização, antes restrita às grandes operações de manufatura, vem ganhando espaço e relevância em diversos contextos econômicos e sociais. À vista disso, diferentes métodos de desenvolvimento de soluções robóticas advém para atender requisitos e objetivos particulares de cada aplicação. O presente trabalho tem o objetivo de analisar a aplicabilidade e viabilidade de uma metodologia de projeto modular no desenvolvimento de um robô plataforma móvel, de forma que este apresente adaptabilidade e baixo custo. Para tanto, o trabalho elenca os componentes físicos e funcionais do robô, mapeia suas interfaces e formula uma proposta de modularização em cinco grupos funcionais, cujo resultado se mostra coerente ao compará-lo com exemplos da literatura. Também, verifica-se analiticamente, através do cálculo de índices de modularidade, a efetividade da aplicação da modularidade na arquitetura da plataforma, observando que, ainda que apresente desafios significativos de implementação, pode ser uma ferramenta relevante para gerenciar as restrições e variáveis-chave do projeto.

PALAVRAS-CHAVE: modularização de projeto, arquitetura modular, robô móvel, variância agrupada de intensidade

Garcia, Pedro Henrique Zanchet. **Modular project management methodology applied to mobile platform robot development**. 2019. 29 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

Robotization, formerly restricted to large manufacturing operations, has been gaining field and relevance through many economic and social contexts. Therefore, many different methods for robotic solutions development emerge to fulfill particular requirements and objectives for each project. This working project has as objective to analyze the deployment and feasibility of a modular project management methodology applied to the development of a mobile platform robot, so that it presents proper adaptability and low costs. For this, it lists the physical and functional elements of the robot, maps its interfaces and proposes five module clusters, which meet other examples on available literature. Also, it is analytically verified, using modularity index calculation, its effectiveness when applied to the platform architecture, remarking that, even with significant challenges on its deployment, it may be an important scheme to manage project constraints and key variables.

KEYWORDS: module clustering, modular architecture, mobile robot, clustered intensity variance

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
2.1.	ARQUITETURA MODULAR DE PRODUTO	1
2.2.	PROJETO MODULAR DE ROBÔS	2
3.	OBJETIVOS	3
4.	FUNDAMENTAÇÃO	3
4.1.	ARQUITETURA DE PRODUTO INTEGRADA E MODULAR	3
4.2.	MÉTODOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DA ARQUITETURA MODULAR.....	4
4.3.	ANÁLISE DO GRAU DE MODULARIDADE DE UM PRODUTO.....	6
5.	ESTUDO DE CASO	8
5.1.	PROJETO CONCEITUAL	8
5.1.1.	Identificação do problema.....	8
5.1.2.	Aplicações e funcionalidades	8
5.1.3.	Normas regulamentadoras.....	8
5.1.4.	Atributos desejáveis	9
5.2.	ARQUITETURA DO SISTEMA	9
5.2.1.	Decomposição do sistema em elementos físicos e/ou funcionais.....	9
5.2.2.	Mapeamento das interações entre elementos	10
5.2.3.	Agrupamento dos elementos em módulos	11
5.2.4.	Avaliação do grau de modularidade.....	12
5.3.	CONSIDERAÇÕES SOBRE O DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	13
6.	ANÁLISE DE RESULTADOS	13
7.	CONCLUSÃO	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
	APÊNDICE	18

1. INTRODUÇÃO

A robotização tem se mostrado agente fundamental no desenvolvimento tecnológico, influenciando não somente a matriz global de produção, como também modificando a forma com que as pessoas se relacionam com os padrões de trabalho e consumo.

Nesse cenário, a utilização de robôs destaca-se na substituição da mão de obra humana em atividades que apresentem riscos para o indivíduo, como, por exemplo, em operações insalubres ou tarefas que, devido à natureza repetitiva do processo, possam ser nocivas à saúde a longo prazo. Também, apresenta ganhos significativos em escala de produção, tendo em vista a possibilidade de operação contínua e acelerada, e em qualidade de produto, devido à minimização de erros por desatenção ou demais adversidades.

Antes restrita ao ambiente industrial, hoje o emprego de robôs é cada vez mais presente em outros contextos, como no setor de serviços e na agricultura. Desta forma, seu crescimento vem ganhando destaque nos debates sobre desenvolvimento econômico, visto que as projeções apontam a possível automação de 54% dos postos de trabalho formais do Brasil até 2026 (ALBUQUERQUE, 2019).

Assim sendo, torna-se um desafio o desenvolvimento de novas soluções robóticas, de modo que seus benefícios se estendam a atividades de menor escala, proporcionando avanços para a sociedade como um todo. Para tanto, é preciso que estes robôs aliem baixo custo com adaptabilidade às necessidades particulares de cada ofício e ambiente.

Visando atender a essas restrições técnicas e econômicas, a arquitetura modular de produto tem se mostrado efetiva (ULRICH, 1993), pois concede maior independência à elaboração e modificação das soluções. Nela, os elementos constituintes do produto são analisados através do mapeamento de suas interfaces, de modo que sejam agrupados em módulos que simplifiquem seu entendimento.

Isto posto, o presente trabalho objetivou apresentar a aplicação de uma metodologia de projeto modular ao desenvolvimento de um robô plataforma móvel, utilizando métodos disponíveis para sua concepção e posterior análise de efetividade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados, de forma sucinta, outros trabalhos relacionados a arquitetura modular de produto e sua aplicação ao projeto robótico.

2.1. ARQUITETURA MODULAR DE PRODUTO

Ulrich (1993) apresentou a relação direta entre o entendimento da arquitetura de um produto com as diretrizes aplicáveis de projeto e o gerenciamento do seu ciclo de vida. O autor também estabelece a diferenciação entre tipologia integrada e modular, ressaltando qualitativamente as implicações da abordagem modular na atualização, manufatura, consumo e fim de vida do produto.

Erixon (1998) endossou os possíveis ganhos advindos da modularização na estruturação de um produto, reunindo estudos de caso de oito empresas de diferentes segmentos que apresentaram reduções de custo em diversas etapas do projeto e sua execução, como logística, qualidade, tempo de desenvolvimento e manufatura. Propôs uma estratégia de modularização da arquitetura de um produto baseado no método do Desdobramento da Função Qualidade.

Steward (1981) introduziu o conceito da Matriz de Estrutura de Projeto (*Design Structure Matrix* – DSM), a qual propõe uma análise dos predecessores e características entre as diferentes variáveis de um projeto e suas interdependências. Dessa forma, a mesma permite

identificar grupos de variáveis que se relacionam para que sejam agrupados em módulos de desenvolvimento.

Pimmler e Eppinger (1994) apresentam como método de modularização a utilização a DSM como ferramenta para mapear as diferentes interações entre os elementos de um sistema. Segundo os autores, esse processo é desenvolvido a partir de três etapas: 1) decomposição do produto em elementos físicos; 2) mapeamento das interfaces espaciais, de materiais, de energia e de informação; e 3) agrupamento dos módulos do sistema através da utilização de um algoritmo iterativo de reordenação de matrizes.

Höltkä-Otto e de Weck (2007) propuseram duas novas métricas para quantificação do grau de modularidade de um produto. Os índices propostos desenvolvidos na fundamentação do trabalho, foram o Valor Único de Modularidade (*Single Value Modularity Index – SMI*) e Fração de Não-Zeros (*Non-Zero Fraction – NZF*). As métricas foram validadas a partir da comparação de mais de uma dezena de produtos mecânicos e eletro-mecânicos.

Newcomb et al (1996), desenvolveram uma análise quantitativa de um índice de modularidade voltada para a redução dos impactos ambientais do produto. Para realização do estudo, os autores partiram da hipótese de que a arquitetura do produto é determinante no ciclo de vida do mesmo, avaliando a compatibilidade e separação dos materiais, o destino de cada componente após o fim da sua vida útil e a servicibilidade do mesmo em termos de frequência e impacto das atividades de manutenção.

2.2. PROJETO MODULAR DE ROBÔS

Fuller (1991) sugeriu que a arquitetura de um robô móvel seja analisada genericamente a partir de quatro módulos: manipulador, controlador, fonte de energia e sistema de movimentação. O autor enfatizou a importância do entendimento da estrutura do produto nas fases do projeto robótico: concepção, desenvolvimento e implementação.

Craig (2005) apontou a subjetividade e a particularidade de cada projeto na proposta e avaliação da modularização de um robô. Como análise geral, Craig sugeriu que os módulos sejam divididos em: 1) manipulador, 2) atuador, 3) sensores e atuadores intermediários e 4) controlador.

Gausemeier et al (2009) entenderam que o desenvolvimento de sistemas mecatrônicos avançados é especialmente complexo devido à sua natureza auto-adaptativa. Segundo os autores, a modularização surge como possível estratégia para gerenciar o desenvolvimento destes produtos. Desta forma, são concebidos, a partir da DSM, os conceitos de Matriz Reconfigurável de Projeto (*Reconfiguration Structure Matrix – RSM*) e DSM-Agregada (*Aggregation-DSM – A-DSM*).

Luo et al (2018) abordaram o projeto estrutural de um robô móvel através de uma modularização arbitrária em três grupos elementares: chassi, suspensão e rodas. O estudo descreve diferentes geometrias construtivas possíveis para cada módulo, enfatizando seu comportamento cinético e cinemático.

Quaglia et al (2013), apresentaram a aplicação do conceito de estrutura mecânica modular envolvido no *Epi.q*, uma família de robôs móveis desenvolvida para aplicações de segurança e monitoramento. Segundo a avaliação dos autores, a aplicação da abordagem por módulos possibilita a reconfiguração dos elementos físicos do sistema, permitindo que o mesmo amplie sua gama de funcionalidades.

3. OBJETIVOS

Considerando a relevância do tema, apresentada na introdução, o presente projeto busca responder a seguinte questão: *como aplicar e avaliar uma estratégia de arquitetura modular de produto no projeto de um robô plataforma móvel?*

Assim sendo, o trabalho tem como objetivo principal analisar a viabilidade da aplicação de uma metodologia de projeto de produto modular voltada para a construção de um robô móvel de médio porte, avaliando seus diferentes módulos constituintes para que o mesmo apresente boa adaptabilidade e versatilidade. Como objetivos secundários, pretende-se comparar a modularização alcançada com exemplos disponíveis na literatura e verificar sua aplicabilidade através da exploração de métodos quantitativos de análise de modularidade.

4. FUNDAMENTAÇÃO

4.1. ARQUITETURA DE PRODUTO INTEGRADA E MODULAR

A arquitetura de um produto foi definida por Ulrich (1993) como sendo a organização dos seus elementos funcionais, o mapeamento das funções desempenhadas por componentes físicos e a especificação das interfaces entre os componentes do mesmo. De acordo com o autor, elementos funcionais podem ser estruturados através de diagramas que indiquem a sequência lógica pela qual as funções do produto são executadas. Isso posto, tem-se, na sequência, a relação entre esses elementos e os componentes físicos do produto. Por fim, identificam-se as interfaces entre os diferentes componentes, ressaltando-se que essas conexões podem ter natureza diversa, como espacial, de energia, de informação e/ou de materiais (PIMMLER; EPPINGER, 1994).

À vista disso, seu entendimento se mostra essencial para o planejamento de todas as etapas do ciclo de vida de um produto, desde a sua concepção até o fim de sua utilidade, passando pelas definições relacionadas aos seus processos de manufatura, compra de suprimentos, manutenção, atualização e diversificação de portfólio.

Dentre as diferentes abordagens possíveis, Ulrich (1993), apontou que a primeira distinção está em adotar uma arquitetura integrada ou modular. Essa diferenciação é fundamental pois estabelece não somente as condições e premissas básicas do projeto, como também reforça a definição dos objetivos e finalidades do produto.

A abordagem integrada de um produto mostra-se complexa, pois consiste em analisar todas as relações funcionais e estruturais do conjunto, bem como as implicações decorrentes das modificações realizadas. De modo geral, a literatura aponta que esse enfoque possibilita ganhos de desempenho absoluto do produto, em especial em casos com restrições de peso e tamanho (WHITNEY, 2002). A concepção de Fuselagem Integrada (*Blended Wing Body* – BWB) ilustra como essa abordagem pode mostrar-se vantajosa. Sua aplicação fora utilizada pela fabricante de aviões Boeing em um avião-conceito e verificou-se que o mesmo apresentou um consumo de combustível por assento 32% inferior e um empuxo estático 19% superior, em comparação a outro avião de porte similar (HÖLTTÄ-OTTO; DE WECK, 2005).

A arquitetura do produto é entendida como modular quando seus componentes são agrupados em conjuntos funcionais de maneira que suas interações sejam avaliadas como intramodular ou intermodular. O número de interfaces foi apontado por Erixon (1998) como uma das principais variáveis na análise da complexidade de um produto, e sua segmentação em dois níveis permite compreensão simplificada da estrutura do mesmo.

Sua aplicabilidade tem se mostrado crescente devido às necessidades mercadológicas de desenvolvimento, diversificação e atualização de produtos. Como apontado por Egan (2004),

foi proposta inicialmente como metodologia para controle de custos de engenharia e inovação, contudo, mostrou-se especialmente eficaz na redução de gastos com manufatura, agilização do tempo de provisionamento e gestão da qualidade. De acordo com Johnson e Bröms (1995, apud EGAN, 2004), executivos da fabricante de caminhões Scania, por exemplo, atribuíram à modularização de seus veículos a alta rentabilidade da companhia, pois, a partir da reutilização de peças e simplificação das linhas de produção, a montadora atingiu margens superiores às de qualquer concorrente.

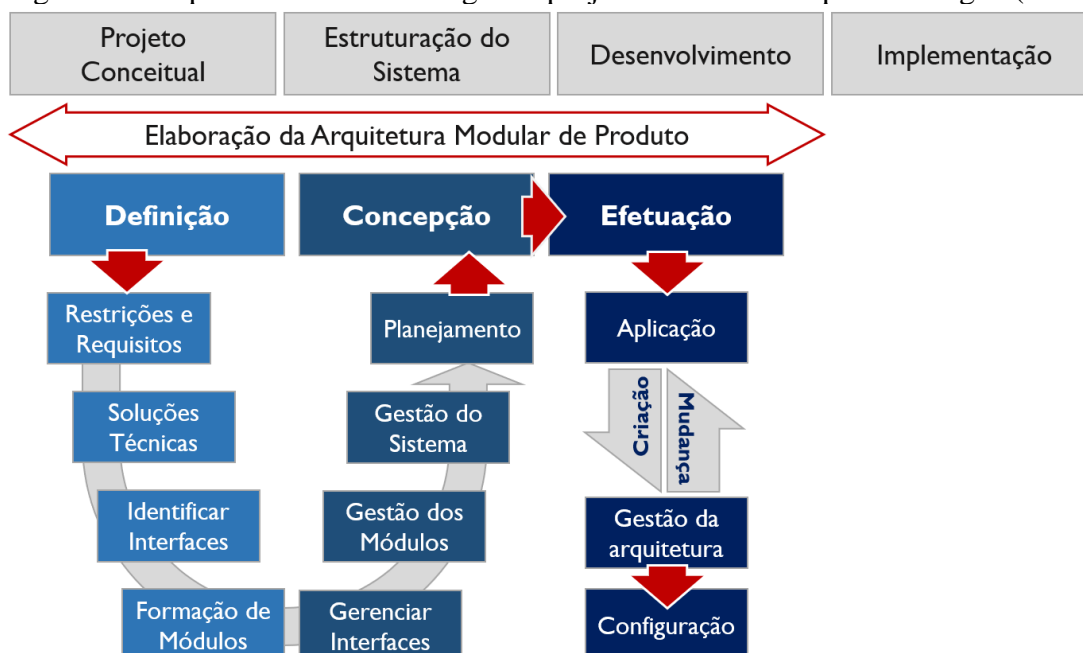
Conforme apontado por Hölttä-Otto e de Weck (2007), ainda que o produto seja projetado a partir de uma das duas abordagens, usualmente não se define o mesmo de forma binária como integrado ou modular. Ao invés disso, sugere-se que um grau de modularização seja determinado a partir de sua estrutura. Métodos quantitativos de análise do grau de modularização foram tratados no item 4.3 deste trabalho.

4.2. MÉTODOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DA ARQUITETURA MODULAR

O desenvolvimento de um projeto robótico pode ser compreendido em três etapas principais: formulação do problema, desenvolvimento de projeto e seus processos e, por fim, implementação (FULLER, 1991). Nesta abordagem, a análise da estrutura do sistema faz parte da segunda etapa na concepção do produto, concomitante à elaboração de definições de engenharia, especificação de componentes, planejamento de manufatura e formulação de modelos de desempenho.

Egan (2004), que mapeou processos de implementação de arquitetura modular, propôs que a análise da estrutura do sistema seja uma etapa evidenciada e anterior à fase de desenvolvimento. Formula, assim, um processo de quatro etapas, detalhadas na Figura 1.

Figura 1 – Etapas de uma metodologia de projeto modular. Adaptado de Egan (2004).



O projeto conceitual visa definir o problema a ser resolvido, identificando as funcionalidades desejadas pelo produto e as restrições impostas ao sistema, sejam elas físicas, técnicas, econômicas ou legais. A análise da estrutura do sistema relaciona as funções predefinidas com os componentes físicos do produto, estabelecendo módulos para gestão do

seu desenvolvimento. Na sequência, tem-se a etapa de desenvolvimento, que compreende a especificação de subsistemas, a definição de processos, a otimização de parâmetros e a geração de conjuntos de engenharia. Por fim, a implementação é composta pela integração dos módulos, realização de testes, disponibilização para produção e validação mercadológicas.

Considerando que a segunda etapa é particular da abordagem modular de projeto, e destacada como fundamental pelo autor supracitado, seu desenvolvimento foi o foco na elaboração deste estudo. Para tanto, diversos métodos e ferramentas de estruturação são propostos na literatura, ora decorrentes de restrições técnicas ou econômicas do produto, ora dos objetivos da análise proposta.

O método de Pimmler e Eppinger (1994) leva em consideração quatro diferentes tipos de interações entre componentes: espacial, de energia, de informação e de materiais. Devido ao caráter multidisciplinar do projeto de um robô, como apontado por Fuller (1991), tal método foi adotado para este trabalho. Nesse sentido, os autores propõem uma análise constituída em três passos, abordados a seguir:

a. Decomposição do sistema em elementos físicos e/ou funcionais

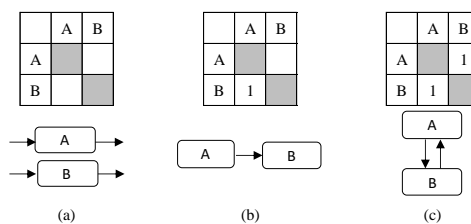
Essa etapa trata da subdivisão do produto em componentes e elementos funcionais, de forma que se atinja um nível de detalhamento que possibilite sua análise sistêmica. Os autores apontam que o principal desafio desta etapa recai na concepção do grau de refinamento dessas divisões, o qual depende da tipologia do produto.

b. Mapeamento das interações entre elementos

Levantados os elementos físicos e funcionais do sistema, é determinante compreender as diferentes interfaces entre os mesmos, descrevendo seus tipos e intensidades. O entendimento dessas relações trata-se de um processo progressivo, visto que o avanço no nível de conhecimento sobre o sistema pode apontar novas correspondências e restrições. Assim sendo, as interações mapeadas devem ser constantemente revisadas no decorrer do projeto.

Como ferramenta para diagramação das relações entre os elementos, os autores propuseram a aplicação da Matriz de Estrutura de Projeto (*Design Structure Matrix*, referida doravante por DSM), proposta por Steward (1981). Na DSM, as variáveis do projeto são dispostas matricialmente, de forma que as variáveis dispostas nas linhas tenham suas predecessoras identificadas nas colunas. Deste modo, conceituam-se três diferentes formas de interação entre as variáveis, quais sejam: paralela, serial e conjugada, ilustradas na Fig. 2 (a), (b) e (c), respectivamente.

Figura 2 – Interação (a) paralela, (b) serial e (c) conjugada entre elementos de uma matriz DSM



Em uma interação paralela (2a), a variável A independe de B, bem como a variável B independe de A. Na relação serial ilustrada em (2b), a variável B depende da variável A, porém

a variável A é independente de B. Por fim, a interação conjugada (2c) apresenta dependência de A em relação a B, e de B em relação a A.

O método proposto pelos autores adapta a aplicação da DSM em três pontos.

O primeiro deles refere-se ao entendimento das variáveis de projeto da DSM como sendo os elementos físicos e/ou funcionais mapeados na primeira etapa.

O segundo considera quatro tipos possíveis de interação para cada relação: espacial, de energia, de informação e de materiais. A Figura 3 apresenta como os quatro tipos são dispostos em um elemento da matriz.

Figura 3 – Notação dos tipos de interações entre elementos

Legenda - Tipo			
Espaço	S	E	Energia
Informação	I	M	Materiais

A representação proposta acima permite uma compreensão multifatorial das interfaces, bem como possibilita futuras revisões de forma mais independente.

Por último, o método propõe a quantificação da intensidade das interações em uma escala de -2 a 2, onde as relações são fortemente indesejadas ou desejadas, respectivamente.

A concepção dessas interações pode ser advinda de diversas fontes. Como meios eficientes, destacam-se a análise por equipes multidisciplinares de engenharia, o levantamento de projetos similares e as pesquisas bibliográficas e mercadológicas. Ainda assim, o resultado de tais análises deve ser rediscutido ao longo do desenvolvimento do projeto.

c. Agrupamento dos elementos em módulos

A terceira etapa consiste em realizar o agrupamento dos elementos em módulos, de acordo com suas interações. Este agrupamento impacta não somente na organização física do produto, mas também na constituição das equipes de trabalho, definição de processos e gestão de portfólio. Portanto, critérios alheios às interfaces mapeadas podem ser levados em conta na elaboração das propostas de modularização.

No que tange à modularização baseada nas interfaces de elementos, tal agrupamento é concebido através da utilização de algoritmos interativos de movimentação de linhas e colunas da matriz. Em seu estudo de caso, Pimmler e Eppinger (1994) propuseram a modularização de um sistema de controle de temperatura automotivo a partir de uma análise heurística da DSM do produto. Para o estudo de caso proposto neste trabalho, foi desenvolvido um algoritmo matemático como instrumento de modularização.

Findadas as três etapas do método, os autores propõem uma análise e discussão criteriosa dos módulos definidos para o produto, as quais tem viés majoritariamente qualitativo. Métodos de análise quantitativa tem sido desenvolvidos com o intuito de tornar comparáveis as características de modularização de produtos, como tratado no próximo item.

4.3. ANÁLISE DO GRAU DE MODULARIDADE DE UM PRODUTO

Existem diferentes concepções e métodos entre autores que se ocupam com a análise do grau de modularidade de um produto. Tais distinções residem tanto nas particularidades do produto, como limitações físicas ou processuais, quanto nos diferentes objetivos a que a análise da modularidade se aplica, como apontado por Newcomb et al (1996), que desenvolveram métricas de modularização voltadas para o gerenciamento do ciclo de vida do produto.

Considerando o recorte deste trabalho, foram referenciadas as métricas propostas por Hölttä-Otto e de Weck (2007), visto que essas tem como objetivo analisar a diminuição do grau de complexidade de um produto a partir do entendimento das relações entre seus elementos funcionais. O estudo, porém, não levou em conta os módulos formulados para o produto, de forma que reflete o quão modular o mesmo pode ser, mas não a assertividade dos módulos propostos.

Em seu trabalho, os autores partiram da análise de modularização via aplicação de uma DSM e propuseram duas novas métricas para quantificação do grau de modularidade do produto: o Índice de Valor Singular de Modularidade (*Singular value Modularity Index*, doravante referido por SMI) e a Fração de Não-Zeros (*Non-Zero Fraction*, doravante referida por NZF).

O SMI é postulado de forma que reflita a concentração das relações do produto em certos componentes-chave. Para tanto, é realizada a decomposição em valores singulares da DSM, através da Equação 1.

$$DSM = U \Sigma_{DSM} V^T \quad (1)$$

Na qual as matrizes U e V são compostas, respectivamente, pelos autovetores de (DSM)(DSM^T) e (DSM^T)(DSM), enquanto a diagonal de Σ_{DSM} apresenta as raízes quadradas dos auto-valores não nulos da DSM, denominadas por valores singulares σ (Equação 2).

$$\Sigma_{DSM} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde o N representa o número de elementos mapeados. Os autores demonstram que o padrão de decaimento dos valores singulares em relação aos seus antecessores, quando normalizados pelo maior valor da matriz, são mais acentuados para arquiteturas integradas que modulares, o que é medido através do SMI (Equação 3).

$$SMI = \frac{1}{N} \arg \min_{\alpha} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\sigma_i}{\sigma_1} - e^{-[i-1]/\alpha} \right| \quad (3)$$

Complementarmente, a NZF busca refletir a dispersão das relações em uma DSM (Equação 4).

$$NZF = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N DSM_{ij}}{N(N-1)} \quad (4)$$

No caso hipotético em que todos os componentes apresentem relação paralela, a NZF atinge seu valor mínimo, 0 (zero). Analogamente, em uma análise em que todos os componentes relacionam-se de forma conjugada, a mesma resulta em seu valor máximo, 1 (um), refletindo a máxima integração entre os elementos (menor dispersão possível).

Através da análise das métricas desenvolvidas, os autores viabilizam a comparação do grau de modularidade e, conseqüentemente, da complexidade de diferentes produtos, independentemente de sua natureza funcional.

Como estudo de caso, os índices foram validados comparando equipamentos de finalidade similar que diferenciavam-se por serem portáteis ou estáticos, como computadores e notebooks. Corroborando com a hipótese de que restrições de volume, peso e gerenciamento

energético concedem ao equipamento móvel um grau de complexidade superior, os valores encontrados para o SMI e a NZF do produto foram superiores.

5. ESTUDO DE CASO

Este trabalho teve como caso de estudo o projeto de um robô plataforma móvel multifuncional de baixo custo e complexidade reduzida. Para tanto, foi utilizada a metodologia de projeto proposta por Egan (2004), que evidencia a estruturação da arquitetura do sistema como etapa fundamental do projeto. Devido à sua especificidade, a etapa de implementação não foi objeto de análise deste trabalho.

5.1. PROJETO CONCEITUAL

5.1.1. Identificação do problema

Com o avanço tecnológico, a utilização de robôs vem se mostrando uma alternativa importante para a substituição da mão de obra humana, seja por motivos econômicos ou razões de segurança.

Todavia, seu desenvolvimento é complexo, pois demanda diferentes especificidades de engenharia. Sendo assim, sua aplicação ainda é relativamente restrita, pois requer altos investimentos financeiros e elevado nível técnico, limitando o acesso a seus benefícios por grande parte de pequenas e médias organizações.

Desta maneira, plataformas robóticas móveis modulares consistem em uma opção para essas aplicações, pois estruturam componentes e elementos de forma que a customização, atualização e manutenção das mesmas sejam exequíveis de forma simplificada.

5.1.2. Aplicações e funcionalidades

O robô plataforma móvel proposto pode ser utilizado em diferentes ambientes e contextos, tais como:

- a. Agricultura: na aplicação de insumos, monitoramento de cultivos e medição de perdas;
- b. Logística: automatização da movimentação de cargas em estoques e controle de inventário;
- c. Segurança do trabalho: auxílio na movimentação de ferramentas e materiais, monitoramento em casos de acidente e gestão de equipamentos de proteção individuais;
- d. Manufatura: controle de qualidade e automatização de processos.

5.1.3. Normas regulamentadoras

Atualmente o desenvolvimento de robôs e dispositivos robóticos no Brasil é regido pela norma técnica ABNT NBR ISO 10218, parte 1 e parte 2. A primeira parte especifica os requisitos e orientações para o projeto seguro, medidas de proteção e informações de uso inerentes aos robôs industriais. Descreve os perigos básicos associados a robôs e prevê requisitos para mitigar ou eliminar adequadamente os riscos associados a esses perigos. A segunda parte especifica os requisitos de segurança para a utilização de robôs em sistemas integrados industriais (ABNT, 2018).

No que diz respeito ao presente projeto, destaca-se a observância das diretrizes de segurança para transmissão de potência. Para tanto, norma aponta que a exposição a elementos mecânicos que desempenham essa função deve ser evitada por proteções fixas ou móveis.

A norma também prevê que os componentes elétricos utilizados no robô estejam de acordo com a norma internacional IEC 60204-1. A seleção de componentes foi abordada de forma introdutória na etapa de desenvolvimento.

Da mesma forma, a criação de modos de falha segura, seja decorrente da falha em algum componente ou corte de energia, também é essencial para o desempenho do projeto. Contudo, sua especificação é validada somente na fase de implementação, fugindo ao escopo do trabalho.

5.1.4. Atributos desejáveis

O projeto do robô plataforma móvel, nos moldes e padrões propostos neste trabalho, foi orientado pela versatilidade e simplicidade. Assim, buscou-se a concepção de um produto que apresente baixo custo de produção, manutenção simplificada, adaptabilidade a diferentes ambientes e disponibilidade comercial para reposição de peças.

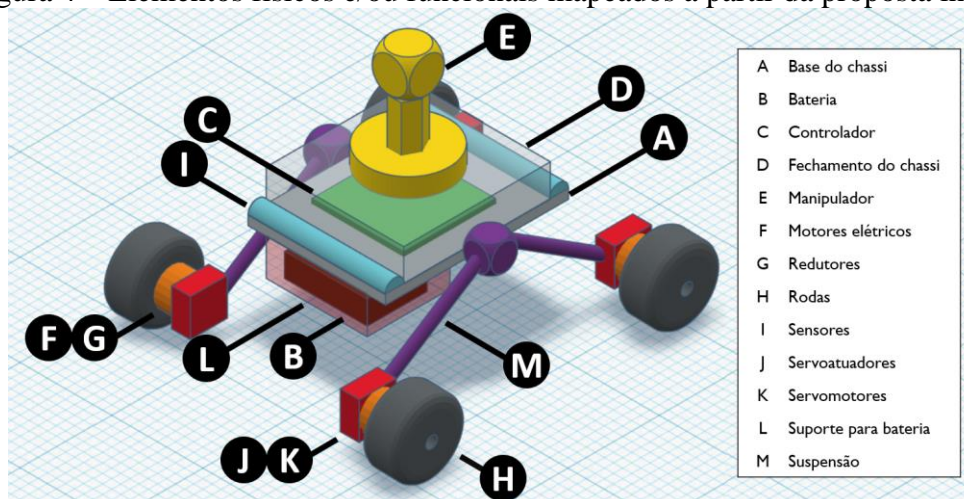
5.2. ARQUITETURA DO SISTEMA

A estruturação modular da arquitetura do sistema foi guiada pelo método proposto por Pimmler e Eppinger (1994), previamente introduzido. A proposta de modularização resultante foi analisada qualitativamente e balizada pelos índices criados por Hölttä-Otto e de Weck (2007).

5.2.1. Decomposição do sistema em elementos físicos e/ou funcionais

Os elementos físicos e/ou funcionais previstos no robô plataforma móvel foram elencados a partir da bibliografia disponibilizada por Fuller (1991) e Craig (2005), e constam de maneira ilustrativa na esquematização do conceito genérico da Figura 4.

Figura 4 – Elementos físicos e/ou funcionais mapeados a partir da proposta inicial



Para concepção dos elementos do robô, certas condições foram assumidas na definição de sua fonte de energia, manipulador, sensores e sistema de guinagem.

Em relação à sua fonte de energia, definiu-se que a mesma seria elétrica a partir de uma bateria. Tal atributo foi defendido por Chen e Yim (2016), que afirmaram que sua utilização apresenta menor custo e maior facilidade de implementação.

O manipulador não integra fisicamente o robô, pois sua definição decorre do uso para o qual a plataforma móvel será destinada. Porém, aqui entendeu-se o mesmo como elemento funcional, para que suas interfaces fossem previamente identificadas.

Quanto aos sensores, sugere-se que, até que haja a definição de quais serão utilizados no projeto, sejam abordados genericamente em uma primeira análise.

Optou-se inicialmente por um sistema de guinagem idealizado através da atuação de servomotores e servoatuadores.

5.2.2. Mapeamento das interações entre elementos

A identificação das interações entre os elementos previamente listados foi diagramada com a aplicação de uma DSM, concebida na Fig. 5(a). A descrição do tipo de interação é realizada conforme notação ilustrada na Fig. 5(b), e a intensidade das mesmas é definida conforme legenda apresentada na Fig. 5(c).

Figura 5 – (a) Diagrama da relação entre os elementos físicos e/ou funcionais do robô utilizando uma DSM; (b) Legenda da notação do tipo de interação; e (c) Legenda da notação da intensidade de interação

Módulo	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Base do chassi	A			1 0 0 0					1 0 0 0			1 0 0 0	2 0 0 0
Bateria	B		0 0 2 0		0 2 0 0	0 2 0 0						0 2 0 0	2 0 0 0
Controlador	C	1 0 0 0	0 2 1 0		0 0 2 0	0 0 1 0			2 0 2 0	0 0 2 0			
Fechamento do chassi	D	2 0 0 0			1 0 0 0				1 0 0 0				1 0 0 0
Manipulador	E	0 1 0 0	0 0 2 0	1 0 0 0					0 0 1 0				
Motores elétricos	F	0 2 0 0	0 0 2 0				1 1 0 0	1 1 0 0					2 0 0 0
Redutores	G					2 2 0 0		2 0 0 0					
Rodas	H					2 2 0 0	2 2 0 0						
Sensores	I	1 0 0 0	0 1 0 0	1 2 2 0	2 0 0 0								
Servoatuadores	J										2 2 0 0		2 0 0 0
Servomotores	K		0 2 0 0	0 0 2 0					0 0 1 0	2 0 2 0			1 0 0 0
Suporte para bateria	L	1 0 0 0	2 0 0 0										
Suspensão	M	2 0 0 0			2 0 0 0								

(a)

Legenda - Tipo	
Espaço	S E
Energia	
Informação	I M
Material	

(b)

Legenda - Intensidade da adjacência

Desejada	2
Benéfica	1
Neutra	0
Negativa	-1
Indesejada	-2

(c)

As interações ilustradas na Fig. 5 foram ao encontro das descrições e projetos descritas por Fuller (1991) e outros autores disponíveis na literatura. Para facilitar sua visualização, elementos da matriz que não continham relação de interação (quatro valores nulos) foram deixados em branco.

Como instrumento de avaliação da proposta acima, foi analisada a NZF elaborada por Hölttä-Otto e de Weck (2007), através da Equação 4. Para esta métrica, visando padronizar o resultado encontrado com os estudos de caso dos autores, os tipos e intensidades das interações foram desconsiderados. Sendo assim, para as relações descritas do robô plataforma móvel, obteve-se $NZF = 0.301$. O valor é similar ao encontrado pelos autores para um telefone celular ($NZF = 0.29$) e superior ao de um computador de mesa (0.15), notebook (0.18) e telefone de mesa (0.21), o que representa um grau inferior de dispersão de interações entre elementos.

Quanto às relações elencadas, destacou-se o refinamento técnico necessário para compreender o grau de conjugação das mesmas, conforme destacado por Steward (1981).

5.2.3. Agrupamento dos elementos em módulos

A estruturação dos módulos é realizada através de algoritmos iterativos que reordenem os elementos levantados de forma que as interações entre os mesmos estejam o mais próximo possível da diagonal principal da matriz (PIMMLER; EPPINGER, 1994).

Para tanto, neste trabalho elaborou-se um algoritmo que visa minimizar um índice intermediário denominado de Variância Agrupada de Intensidade (VAI), dada pela Equação 5.

$$VAI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (|i - j|)^2 \sum_{t=1}^T (DSM_{ijt})^2 \tag{5}$$

Onde *T* corresponde à quantidade de tipos de intensidade elencados e *N* ao número de elementos mapeados.

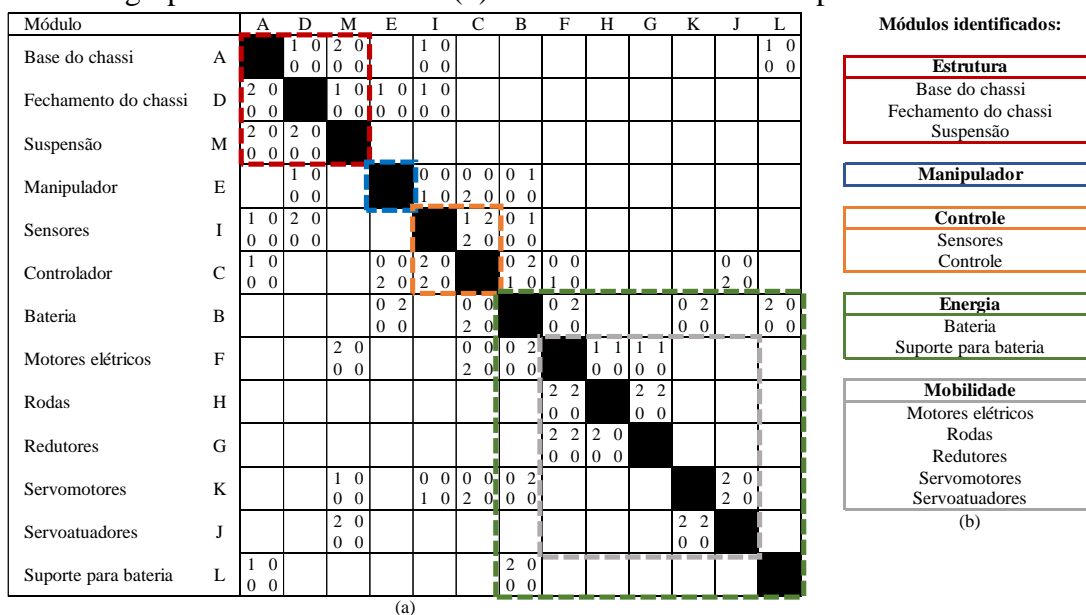
O índice VAI, demonstrado acima, considera o quão distantes da diagonal principal da matriz estão as relações, penalizando maiores distâncias e maiores intensidades de forma quadrática. Observa-se que o índice proposto apresenta comportamento análogo ao da análise de variância para dados agrupados, considerando a soma dos quadrados da intensidade de cada elemento como a frequência de classe da variância.

O algoritmo foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação *Visual Basic Advanced*, tendo sua base de dados inserida em uma planilha no programa *Microsoft Excel*, e encontra-se disponível no APÊNDICE.

Após 215 iterações, foi possível observar a convergência do algoritmo, sendo que o menor VAI fora encontrado pela primeira vez na iteração 98, entrando em ciclo a partir de então.

Com a reorganização dos elementos físicos e funcionais, ilustrada na Fig. 6(a), foi possível entender a arquitetura do robô através da visualização de módulos, concebidos na Fig. 6(b).

Figura 6 – (a) DSM reordenada após utilização do método iterativo do mínimo Variância Agrupada de Intensidade e (b) Módulos Identificados a partir da DSM



(a)

Como parte do processo de definição da arquitetura do sistema, fez-se oportuno realizar uma análise técnica dos módulos supralistados.

A concepção de um módulo composto pelos elementos do chassi e pela suspensão reforça sua relevância no estudo cinético e cinemático do robô, conforme foi trabalhado por Luo et al (2018) e Quaglia et al (2013).

O manipulador, conforme descrito no mapeamento dos elementos, foi aqui descrito genericamente e compõe um módulo individual. Porém, seu posicionamento na matriz reordenada destaca a relevância de suas interfaces tanto com o módulo estrutural quanto com os módulos de controle e energia.

A posição matricial da bateria em relação ao seu suporte pode causar estranhamento, porém é referenciada em situação análoga encontrada por Pimmler e Eppinger (1994), autores do método, que apontam sua sobreposição em relação ao módulo de movimentação.

Observa-se que a relação entre o controlador e os sensores entende ambos também como elementos funcionais, devido às rotinas de programação que regem seu funcionamento.

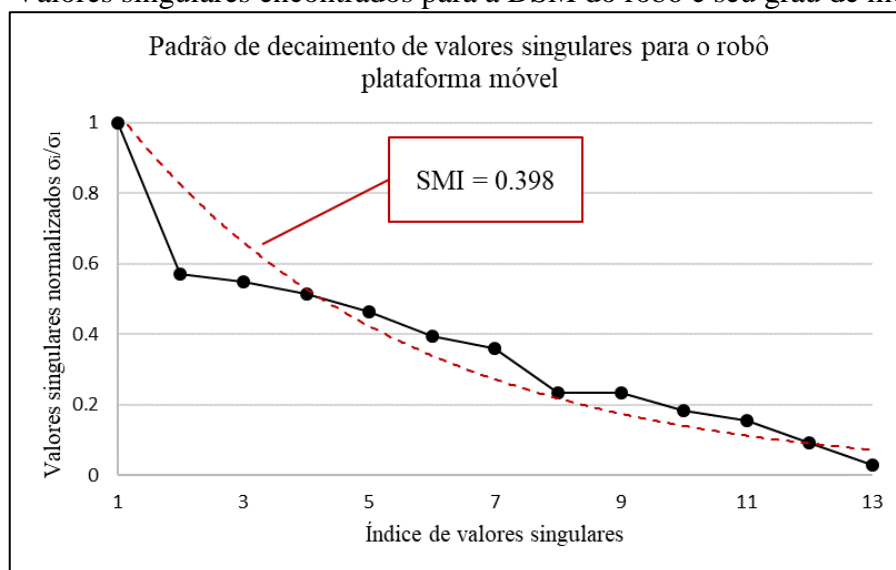
Por fim, os elementos responsáveis pela movimentação e guinagem do robô foram agrupados em um módulo de mobilidade devido à sua proposta construtiva. Para outras propostas, pode vir a ser relevante o estudo dos mesmos como módulos independentes.

5.2.4. Avaliação do grau de modularidade

A análise do grau de modularidade da arquitetura definida foi realizada utilizando o método proposto por Hölttä-Otto e de Weck (2007), conforme descrito no item 4.3. Para adaptação ao procedimento criado pelos autores foi necessário desconsiderar as intensidades e tipos das interações mapeadas pelo método de Pimmler e Eppinger (1994), que seguem tendo relevância qualitativa.

Decompondo a DSM em valores singulares, através da Equação 1, possibilitou-se a identificação do seu padrão de decaimento e a utilização do mesmo no cálculo do SMI do produto, ilustrados na Fig. 7.

Figura 7 – Valores singulares encontrados para a DSM do robô e seu grau de modularidade



O procedimento de cálculo do SMI foi realizado iterativamente através do método do gradiente reduzido generalizado. O mesmo levou em consideração a restrição teórica proposta pelos autores, que limita o índice a valores entre 0 e 1.

5.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE O DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O desenvolvimento do projeto, conforme proposto por Egan (2004), representa a implementação da arquitetura modular e o contínuo gerenciamento da mesma para maximização dos resultados alcançados pelas equipes de desenvolvimento de cada módulo no processo de especificação dos subsistemas.

No que tange à estrutura, sugere-se que o desenvolvimento seja orientado para simplicidade e versatilidade. Para tanto, o projeto de suspensão em bumerangue, por exemplo, tem se mostrado vantajoso (LUO et al, 2018), pois concede boa amplitude de movimento, necessária para operação em terrenos adversos, e seu reduzido número de partes móveis diminui a necessidade de rotinas de manutenção.

A construção da maior parte dos elementos pertencentes aos módulos de energia e mobilidade é complexa em pequena escala, porém os mesmos tem ampla disponibilidade comercial. Assim sendo, a seleção de componentes deve ser priorizada de forma que suas interfaces sigam padrões que permitam fácil substituição e atualização.

Por fim, o desenvolvimento dos módulos de controle e do manipulador tem alta especificidade relacionada com cada atividade fim, portanto devem ser norteados pelos parâmetros particulares de cada aplicação. Desta forma, faz-se oportuna a realização de ampla pesquisa mercadológica, que pode ser realizada através da consulta a clientes ou observação de equipamentos de funcionalidade similar, por exemplo.

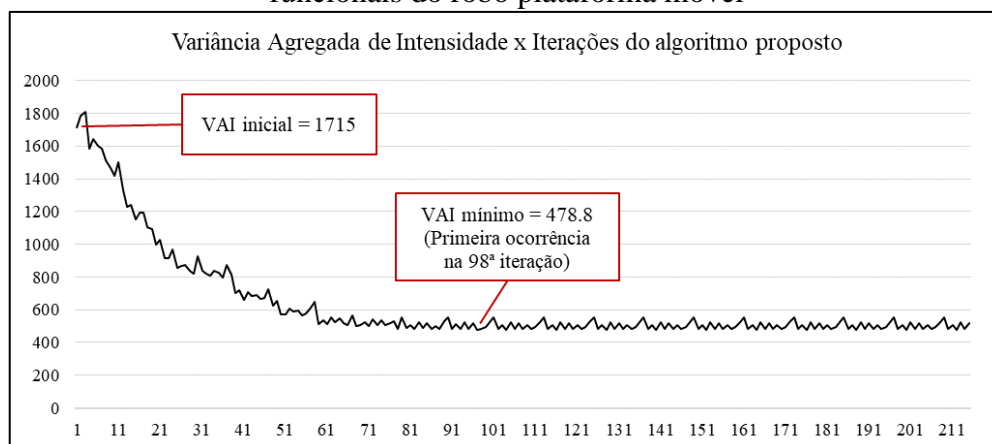
6. ANÁLISE DE RESULTADOS

Com a aplicação da metodologia de projeto de produto modular proposta, analisou-se a composição do robô plataforma móvel em cinco módulos, denominados: estrutura, manipulador, controle, energia e mobilidade, conforme elencados na Figura 6(b).

A modularização concebida demonstrou-se coerente com as hipóteses levantadas por Fuller (1991) e Craig (2005), tendo como principal diferença a evidência de um módulo estrutural. Essa configuração mostrou-se adequada, pois reforça as aplicações desenvolvidas por Luo et al (2018) e Quaglia et al (2013), que destacaram que robôs móveis modulares tem como grande vantagem sua adaptabilidade cinética e cinemática.

Tendo a proposta de modularização sido considerada coerente, validou-se a efetividade do algoritmo desenvolvido para reordenamento dos elementos na matriz DSM, cuja convergência é apresentada na Fig. 8.

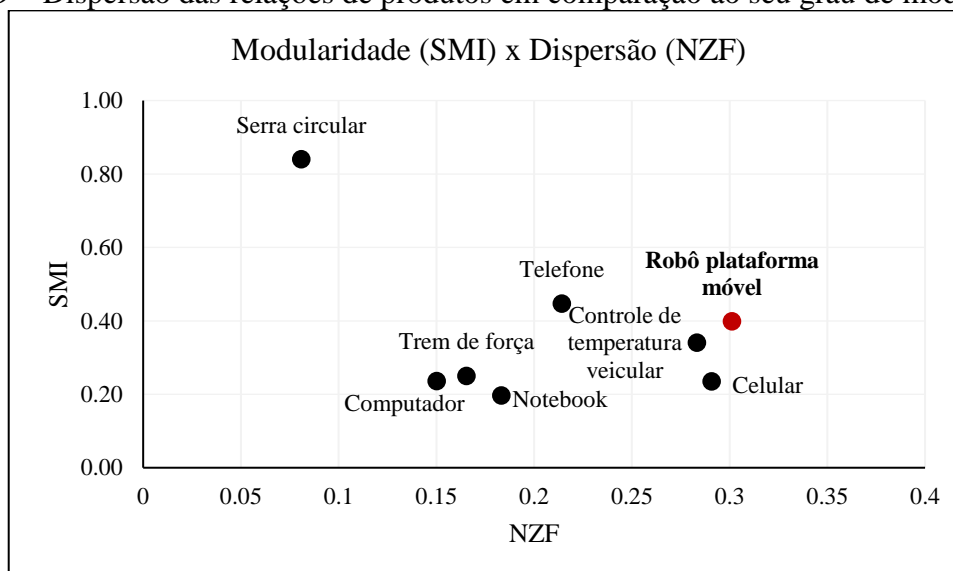
Figura 8 – Convergência do algoritmo iterativo proposto para reordenação dos elementos funcionais do robô plataforma móvel



O índice intermediário VAI atingiu, em seu mínimo, uma redução de 72% em relação à proposta inicial, onde os elementos estavam listados alfabeticamente.

Com o intuito de medir a eficácia da arquitetura modular no projeto do produto, analisaram-se os índices NZF e SMI, desenvolvidos por Hölttä-Otto e de Weck (2007). Os resultados encontrados foram comparados com outros produtos (mecatrônicos, eletromecânicos ou eletrônicos) estudados no desenvolvimento pelos autores, conforme Fig. 9.

Figura 9 – Dispersão das relações de produtos em comparação ao seu grau de modularidade



Na Fig. 9 é possível observar que, dentre os sistemas comparados, o robô plataforma móvel apresenta o maior NZF, isto é, maior densidade relacional entre os elementos.

Os resultados encontrados são coerentes com os estudos de Gausemeier et al (2009), que apontam a natureza reconfigurável dos sistemas mecatrônicos avançados como principal razão para as dificuldades encontradas em sua modularização. Como alternativa, sugerem que a consideração de cenários e interferências funcionais externas podem viabilizá-la.

Por outro lado, o SMI analisado esteve entre os mais altos dentre as amostras. O entendimento dos autores é que um SMI elevado representa que a aplicação da metodologia de projeto modular pode propiciar vantagens ao produto, especificamente quando restrições de viabilidade técnica e necessidades econômicas estão envolvidas – situações nas quais a hipótese da aplicação de uma arquitetura modular fora inicialmente levantada.

7. CONCLUSÃO

Conforme objetivo proposto, a análise dos resultados obtidos demonstra viável a aplicação de uma metodologia de projeto modular no desenvolvimento de um robô plataforma móvel. Verificou-se que a mesma relaciona de forma adequada as restrições técnicas e econômicas do projeto conceitual, e fundamenta diretrizes relevantes para as etapas posteriores de desenvolvimento.

A modularização estabelecida pelos métodos utilizados foi concebida em cinco grupos: estrutura, manipulador, controle, energia e mobilidade. Tal proposta aproxima-se do referencial bibliográfico, mas distingue-se ao destacar os módulos cuja maior independência no desenvolvimento concedem ao robô as vantagens da arquitetura modular.

Isso posto, o algoritmo iterativo de reordenamento de elementos funcionais desenvolvido de forma complementar aos métodos empregados demonstrou-se eficaz, com uma redução de 72% no índice de Variância Agrupada de Intensidade apresentado.

No que tange à aplicabilidade da modularização na arquitetura de um robô plataforma móvel, observou-se, através do elevado índice NZF, que a mesma apresenta desafios de implementação devido à natureza reconfigurável de um robô. Todavia, possibilita ganhos expressivos ao projeto, especialmente no que se refere à produção em escala e diversificação de portfólio, o que foi evidenciado através do alto índice SMI.

A expressividade dos resultados obtidos evidencia a relevância do tema e respalda o desenvolvimento de trabalhos futuros na área. Sugere-se, como continuidade, a utilização de outros índices na análise da modularidade do robô plataforma móvel, em especial voltados para a avaliação do seu ciclo de vida. Também, aponta-se relevante avaliar os impactos da inclusão da etapa de implementação na metodologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **Robôs e dispositivos robóticos - Requisitos de segurança para robôs industriais - ABNT NBR ISO 10218**, 2018.

ALBUQUERQUE, P. H. M. et al. **Na era das máquinas, o emprego é de quem?** Estimação da probabilidade de automação de ocupações no Brasil. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Rio de Janeiro, 2019.

CHEN, M.; YIM, M. Modular Robots. *In*: SICILIANO, B.; KHATIB, O. **Springer Handbook of Robotics**, ed. 2, Nápoles: Springer, 2016. p. 531-542.

CRAIG, J. **Introduction to Robotics – Mechanics and Control**, Upper Saddle River: Prentice Hall, 3rd edition, 2005.

EGAN, M. Implementing a successful modular design – PTC's approach. **Proceedings of the 7th Workshop on Product Structuring**, p. 49-57, 2004.

ERIXON, G. **Modular Function Deployment – A Method for Product Modularisation**, Tese de Doutorado, The Royal Institute of Technology, Estocolmo, 1998.

FULLER, J. L. **Robotics: Introduction, Programming, and Projects**. Nova Iorque: Macmillan Publishing Company, 1991.

GAUSEMEIER, J. et al. Conceptual design of modularized advanced mechatronic systems. **Proceedings of the ICED 09: the 17th International Conference on Engineering Design**, v. 4, p. 263-274, Palo Alto, 2009.

HÖLTTÄ, K.; SUH, E. S.; DE WECK, O. Tradeoff between modularity and performance for engineered systems and products. **Proceedings of the ICED 05: the 15th International Conference of Engineering Design**, p. 449-450, Melbourne, 2005.

HÖLTTÄ-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, n. 2, p. 113-126, 2017.

LUO, Z. et al. Module-based structure design of wheeled mobile robot. **Mechanical Sciences**, v. 9, p. 103-121, 2018.

NEWCOMB, P. J.; BRAS, B.; ROSEN, D. W. Implications of modularity on product design for the life cycle. **Journal of Mechanical Design**, v. 120, ed. 3, p. 483-490, 1998.

PIMMLER, T. U.; EPPINGER, S. D. Integration Analysis of Product Decompositions. **ASME Design Theory and Methodology Conference**, Mineápolis, MN, 1994.

QUAGLIA, G. et al. A Modular Approach for a Family of Ground Mobile Robots. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, v. 10, 2013.

STEWART, D. V. The Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 28, n. 3, p. 71-74, 1981.

ULRICH, K. The role of product architecture in the manufacturing firm. **Research Policy**, v.24, p. 419-440, 1995.

WHITNEY, D. E.; Physical Limits to Modularity. **Engineering Systems Division Internal Symposium**. Massachusetts Institute of Technology, 2002.

APÊNDICE

Código desenvolvido em *Visual Basic Advanced*:

```
Sub Order()
```

```
Dim DSM(12, 12) As Variant
Dim Distance(12, 12) As Variant
Dim NewDSM(12, 12) As Variant
Dim InterColumn As Variant
Dim InterLine As Variant
Dim VAI As Variant
Dim VAI2 As Variant
```

```
VAI = 0
```

```
VAI2 = 0
```

```
'Input dos valores da DSM
```

```
For i = 0 To 12
```

```
  For j = 0 To 12
```

```
    DSM(i, j) = Cells(i + 1, j + 1).Value
```

```
  Next
```

```
Next
```

```
'Input das distâncias para diagonal principal
```

```
For i = 0 To 12
```

```
  For j = 0 To 12
```

```
    Distance(i, j) = Cells(i + 1, j + 16).Value
```

```
  Next
```

```
Next
```

```
For i = 0 To 12 'Cálculo do VAI Inicial
```

```
  For j = 0 To 12
```

```
    VAI = VAI + DSM(i, j) ^ 2 * Distance(i, j) ^ 2
```

```
  Next
```

```
Next
```

```
Range("A101") = VAI
```

```
Range("P16:AC29") = DSM
```

```
For rep = 1 To 20 'vou repetir 10x o algoritmo
```

```
  For ij = 0 To 11 'vou fazer para cada uma das LC
```

```
    Range("O15:AC29").Copy
```

```
    Range("AO15:BC29").PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone
```

```
      For stock = 0 To 13 'Primeiro: guardar valores da coluna em AE e da linha em 31
```

```
        Cells(31, 15 + stock).Value = Cells(16 + ij, 15 + stock).Value
```

```
      Next
```

```

For nxt = 0 To 13 'Segundo: copiar valores da próxima LC pra ela
    Cells(16 + ij, 15 + nxt).Value = Cells(16 + ij + 1, 15 + nxt).Value
Next
For subs = 0 To 13 'Terceiro: valores auxiliares no lugar da próxima LC
    Cells(16 + ij + 1, 15 + subs).Value = Cells(31, 15 + subs).Value
Next
For stock = 0 To 13 'Primeiro: guardar valores da coluna em AE e da linha em 31
    Cells(15 + stock, 31).Value = Cells(15 + stock, 16 + ij).Value
Next
For nxt = 0 To 13 'Segundo: copiar valores da próxima LC pra ela
    Cells(15 + nxt, 16 + ij).Value = Cells(15 + nxt, 16 + ij + 1).Value
Next
For subs = 0 To 13 'Terceiro: valores auxiliares no lugar da próxima LC
    Cells(15 + subs, 16 + ij + 1).Value = Cells(15 + subs, 31).Value
Next

For i = 0 To 12 'Quarto: Gerar NewDSm
    For j = 0 To 12
        NewDSM(i, j) = Cells(i + 16, j + 16).Value
    Next
Next

For i = 0 To 12 'Quinto: Cálculo do VAI2
    For j = 0 To 12
        VAI2 = VAI2 + NewDSM(i, j) ^ 2 * Distance(i, j) ^ 2
    Next
Next

Dim LR As Long
    LR = Range("A100").End(xlDown).Row
    Cells(LR + 1, 1) = VAI2

MinVAI = Cells(104, 5).Value
If VAI2 = MinVAI Then
    Range("O15:AC29").Copy
    Range("bO15:cC29").PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone
Else: End If

If VAI2 < VAI Then 'Sexto: se melhorou, fica trocado, se não volta

VAI = VAI2
VAI2 = 0
    If ij < 11 Then
        ij = ij + 1
    Else: End If
Else
VAI2 = 0
Range("AO15:BC29").Copy

```

```
Range("O15:AC29").PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone
```

```
End If
```

```
Next
```

```
Next
```

```
End Sub
```