

Thyago Alberto Ullmann

**MÉTODO PARA MODELAGEM FUNCIONAL DE  
PRODUTOS MECATRÔNICOS: PROPOSTA DE  
ESTRUTURA UNIFICADA**

Dissertação submetida ao  
Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia e Ciências  
Mecânicas da Universidade  
Federal de Santa Catarina para  
a obtenção do Grau de Mestre  
em Engenharia e Ciências  
Mecânicas  
Orientador: Prof. Dr. Régis  
Kovacs Scalice

Joinville  
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Ullmann, Thyago Alberto  
Método para modelagem funcional de produtos  
mecatrônicos : proposta de estrutura unificada /  
Thyago Alberto Ullmann ; orientador, Régis Kovacs  
Scalice, 2018.  
147 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas,  
Joinville, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2.  
Desenvolvimento de produtos. 3. Modelagem  
funcional. 4. Produtos mecatrônicos. 5. Projeto  
conceitual. I. Kovacs Scalice, Régis. II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. III.  
Título.

Thyago Alberto Ullmann

**MÉTODO PARA MODELAGEM FUNCIONAL DE  
PRODUTOS MECATRÔNICOS: PROPOSTA DE  
ESTRUTURA UNIFICADA**

147

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Joinville, 06 de Julho de 2018

---

Prof. Breno Salgado Barra, Dr.  
Coordenador Pós-ECM  
Universidade Federal de Santa Catarina

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Régis Kovacs Scalice, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Cristiano Vasconcellos Ferreira, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Gian Ricardo Berkenbrock, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Osmar Possamai, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Este trabalho é dedicado a minha esposa  
Maiara, a minha mãe Renita e ao meu  
pai Edvino (*in memoriam*).



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me guiar e me dar tranquilidade para seguir em frente com os meus objetivos e não desanimar com as dificuldades.

A minha esposa, Maiara Borges de Andrade pelo apoio, incentivo e compreensão despendidos durante a elaboração desta dissertação.

Aos meus pais Renita Klabunde Ullmann e Edvino Ullmann (*in memoriam*) pelo suporte e direcionamento.

Ao professor e orientador Régis Kovacs Scalice, pelos ensinamentos, pelas análises, pelos incentivos e suporte em todo desenvolvimento deste trabalho.

A minha família e amigos pela descontração nos momentos de tensão, pela compreensão nos momentos de ausência e palavras de incentivo.

A Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade de aquisição de conhecimentos com a realização deste mestrado.





## RESUMO

O desenvolvimento de projetos de produtos mecatrônicos apresenta complexidade ao considerar as fronteiras do domínio existentes entre as disciplinas de mecânica, eletrônica e software. Ao analisar as práticas existentes para o desenvolvimento de projetos para estes produtos, foi verificada a ausência de procedimentos consolidados para algumas atividades de projeto, tal qual a modelagem funcional. Esta dissertação teve como objetivo desenvolver um método que auxilie a fase inicial do projeto conceitual dos produtos mecatrônicos com direcionamento para a modelagem funcional. Ao considerar os trabalhos estudados para compor a pesquisa, foi verificada uma dificuldade no sentido de como elaborar o modelo funcional de produtos mecatrônicos, de forma a apresentar em um único diagrama as correlações entre as funções pertencentes às diferentes disciplinas envolvidas. O desenvolvimento da dissertação foi alinhado com a metodologia Design Science Research e teve como foco a análise das práticas utilizadas no modelamento funcional de produtos mecatrônicos. Esta dissertação contempla o desenvolvimento, aplicação e avaliação de uma metodologia de apoio para a elaboração do modelo funcional de produtos mecatrônicos, sendo que o método proposto foi aplicado no projeto de desenvolvimento de um produto mecatrônico específico, o veículo autônomo para inspeção de trilhos ferroviários. Para avaliação do método foram verificados fatores como eficácia, usabilidade e repetibilidade, e constatado como característica uma apresentação mais harmônica do modelo funcional, permitindo visualizar as relações entre as áreas de mecânica, elétrica e software, em um diagrama unificado.

**Palavras-chave:** desenvolvimento de produtos, modelagem funcional, produtos mecatrônicos, projeto conceitual



## ABSTRACT

The development of mechatronic products designs presents complexity to consider the frontiers of actual domain between mechanic, electronic and software disciplines. To analyse the existing practices for project development for this kind of products, it was verified the absence of consolidated procedures for some projects activities, such as the functional modeling. This dissertation aims develop a method to helps the initial phase of conceptual project of mechatronic products with a focus on function modeling. Considering the studies to compose the research, it was verified the difficult in the way to prepare the functional model of mechatronic products, in order to present a single diagram the correlations between the functions belonging to the different disciplines involved. The development of the dissertation was aligned with Design Science Research and had the focus to analyse the practices used in the modeling of mechatronic products. This dissertation contemplates the development, application and evaluation to a methodology to support the function modeling of mechatronics products, wherein the proposal method was applied in the development projet of specific mechatronic product, an autonomous vehicle for inspection of railway rails. For the evaluation of the method were verified factors such as effectiveness, usability and repeatability, and observed such as feature an harmonic presentation of function model, allowed to view the relations between the areas mechanic, electric and software, in a unified diagram.

**Key words:** product development, functional modeling, mechatronic products, conceptual project



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação Função Global.....	19
Figura 2 - Desdobrameto da Função Global.....	20
Figura 3 - Processamento RSL. ....	25
Figura 4 - Exemplo HOOM.....	37
Figura 5 - Exemplo FOOM. ....	37
Figura 6 - Modelo de produto com dois modos.....	38
Figura 7 – Método de Fusão. ....	39
Figura 8 - Método de Agrupamento. ....	40
Figura 9 - Junção do FBS com DSM.....	42
Figura 10 - Fases e estágios para modelagem. ....	44
Figura 11 - Fases e estágios para modelagem. ....	44
Figura 12 - Cenários das funções. ....	44
Figura 13 - Arquitetura Funcional. ....	45
Figura 14 - Arquitetura física do produto. ....	45
Figura 15 - Casos de uso do equipamento. ....	47
Figura 16 - Diagrama posicionamento do olho. ....	48
Figura 17 - Abordagem FBS com SysML.....	49
Figura 18 – Modelagem Funcional Integrada (IFM) .....	53
Figura 19 – Fluxo de atividades proposto por Eigner et al (2010). .....	54
Figura 20 - Lógica para construção das classe de problemas. ....	58
Figura 21 - Condução da Design Science Research. ....	58
Figura 22 - Procedimento metodológico do trabalho. ....	61
Figura 23 – Simbologia Fases e Etapas. ....	64
Figura 24 - Procedimento metodológico proposto. ....	66
Figura 25 – Desmonstração da Função Global com as Entradas e Saídas.....	69
Figura 26 – Diagrama Fluxo de atividades Inscrição. ....	72
Figura 27 – Estrutura para exemplo do Modelo Funcional das Funções Mecânicas e Elétricas. ....	74
Figura 28 – Estrutura para exemplo do Modelo Funcional Proposto.....	75
Figura 29 – Representação dos fluxos com linhas interrompidas. .....	76
Figura 30 – Função Global Compressor de Ar.....	80
Figura 31 – Diagrama Fluxo de Atividades: Compressão de ar.	85
Figura 32 – Modelo funcional Compressor de Ar (Mecânica e Elétrica). ....	86
Figura 33 - Modelo funcional final Compressor de Ar. ....	87

Figura 34 – Avaliação especialistas da academia sobre a contribuição das fases do método. ....	91
Figura 35 - Avaliação profissionais da indústria sobre a contribuição das fases do método. ....	91
Figura 36 - Avaliação especialistas da academia sobre a classificação das funções. ....	92
Figura 37 - Avaliação profissionais da indústria sobre a classificação das funções. ....	93
Figura 38 - Avaliação especialistas da academia sobre a eficácia do método proposto.....	93
Figura 39 - Avaliação profissionais da indústria sobre a sobre a eficácia do método proposto. ....	94
Figura 40 - Avaliação especialistas da academia sobre a abrangência do método proposto. ....	95
Figura 41 - Avaliação profissionais da indústria sobre a abrangência do método proposto. ....	95
Figura 42 - Avaliação especialistas da academia sobre a usabilidade do método proposto. ....	96
Figura 43 - Avaliação profissionais da indústria sobre a usabilidade do método proposto. ....	96
Figura 44 - Avaliação especialistas da academia sobre a repetibilidade do método proposto.....	97
Figura 45 - Avaliação profissionais da indústria sobre a repetibilidade do método proposto.....	98
Figura 46 – Função Global Veículo.....	104
Figura 47 – Diagramas Fluxos de Atividades: Gerenciar ferrovia. ....	113
Figura 48 – Diagramas Fluxos de Atividades: Gerenciar missão. ....	114
Figura 49 – Diagramas Fluxos de Atividades: Realizar missão I. ....	115
Figura 50 – Diagramas Fluxos de Atividades: Realizar Missão II. ....	116
Figura 51 - Modelo funcional Veículo (Mecânica e Elétrica)...	119
Figura 52 – Modelo funcional final Veículo.....	120
Figura 53 – Modelo funcional final Veículo (Casos de uso dos agrupamentos Gerenciar Ferrovia e Gerenciar Missão ocultos). ....	121
Figura 54 – Modelo funcional Veículo elaborado pelo LEF ....	123
Figura 55 – Diagrama caso de uso Realizar Missão - LEF .....	124

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Protocolo de busca na base de dados Scopus. ....	26
Quadro 2 - Análise das Pontuações. ....	28
Quadro 3 - Artigos Pontuados. ....	28
Quadro 4 - Quantidade de artigos em cada nota. ....	33
Quadro 5 - Lista de Periódicos. ....	33
Quadro 6 - Descritivo dos períodos de publicação. ....	35
Quadro 7 - Origem dos Autores. ....	35
Quadro 8 - Metodologias listadas por Eisenbart et al (2017). ....	50
Quadro 9 - Perspectivas centrais da modelagem funcional. ....	51
Quadro 10 - Lista de Casos de Uso. ....	67
Quadro 11 - Lista de Estados. ....	68
Quadro 12 - Lista de Funções Elementares. ....	71
Quadro 13 - Caso de Uso Compressor de Ar. ....	79
Quadro 14 - Estados Compressor de Ar. ....	80
Quadro 15 - Funções Elementares Compressor de Ar. ....	81
Quadro 16 - Caracterização entrevistados área acadêmica. ....	89
Quadro 17 - Caracterização entrevistados área industrial. ....	90
Quadro 18 - Casos de Uso Veículo. ....	102
Quadro 19 - Estados do Veículo. ....	104
Quadro 20 - Funções do Veículo. ....	105





## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO .....	21
1.2 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA .....	23
1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	23
1.4 LIMITAÇÕES DO TRABALHO .....	24
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	24
<b>2. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA</b> .....	<b>25</b>
2.1 ESTRUTURA DA RSL .....	25
2.2 ANÁLISE DAS PRÁTICAS .....	36
2.2.1 Artigos de periódicos .....	36
2.2.2 Literatura Complementar .....	46
2.2.3 Trabalhos adicionais .....	49
2.2.4 Comparação entre as Práticas e a Modelagem Funcional Tradicional.....	54
2.2.5 Classificação de Produtos Mecatrônicos .....	55
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>57</b>
3.1 DESIGN SCIENCE RESEARCH .....	57
3.2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO .....	60
<b>4. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO PARA MODELAGEM FUNCIONAL DE PRODUTOS MECATRÔNICOS</b> .....	<b>63</b>
4.1 GLOSSÁRIO PARA O DESENVOLVIMENTO DA PROPOSTA .....	63
4.2 MÉTODO DE MODELAGEM FUNCIONAL DE PRODUTOS MECATRÔNICOS .....	65
4.2.1 Fase 1 – Obter Informações .....	65
4.2.2 Fase 2 – Definir Casos de Uso.....	66
4.2.3 Fase 3 – Definir Estados.....	67
4.2.4 Fase 4 – Identificar Funções .....	68
4.2.5 Fase 5 – Modelar Software .....	70
4.2.6 Fase 6 - Construir o Modelo Funcional .....	73
<b>5. AVALIAÇÕES DO MÉTODO DE MODELAGEM FUNCIONAL DE PRODUTOS MECATRÔNICOS</b> .....	<b>78</b>
5.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO EM UM COMPRESSOR DE AR.....	78
5.2 AVALIAÇÃO DO MÉTODO POR ESPECIALISTAS E PROFISSIONAIS .....	84
5.2.1 Procedimentos de avaliação.....	84
5.2.2 Questões e respostas .....	90

<b>5.2.3</b>	<b>Considerações sobre a avaliação.....</b>	<b>98</b>
5.3	APLICAÇÃO DO MÉTODO NO PROJETO DO VEÍCULO AUTÔNOMO PARA A INSPEÇÃO DE TRILHOS FERROVIÁRIOS .....	100
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>125</b>
6.1	LIMITAÇÕES E OPORTUNIDADES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	126
<b>REFERENCIAS</b> .....		<b>129</b>

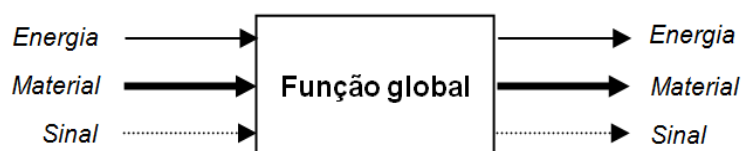
## 1. INTRODUÇÃO

A modelagem funcional permite descrever os produtos em um nível abstrato, onde é possível visualizar a estrutura do produto por meio das funcionalidades. O que possibilita uma maior abrangência na obtenção das soluções. A abstração também pode ser empregada na identificação de restrições, que possam restringir a utilização de novas tecnologias no produto, materiais e processos de fabricação. Como vantagem, o resultado da análise destes fatores possibilita um melhor entendimento da tarefa de projeto e identificação das funções do produto contribuindo significativamente para o Projeto Conceitual. (ROZENFELD *et al.*, 2006)

Back et al. (2008) se referem a modelagem funcional com o termo síntese funcional e atribuem a origem na década de 1970 citando trabalhos de pesquisadores alemães como: Koller (1985), Pahl e Beitz (1996), Rodenacker (1991) e Roth (1982).

Para Ferreira (1997) e Back et al. (2008) a modelagem funcional é representada inicialmente pela função global ou total do produto, sendo esta um resumo do que se deve esperar de produto e normalmente é obtida com a análise dos requisitos funcionais contidos na lista de especificações meta do produto. Rozenfeld et al. (2006) completa que a função global é representada em geral por uma transformação com entradas e saídas definidas, de energias, materiais e sinais, como pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 - Representação Função Global.



Fonte: Adaptado de Rozenfeld et al. (2006)

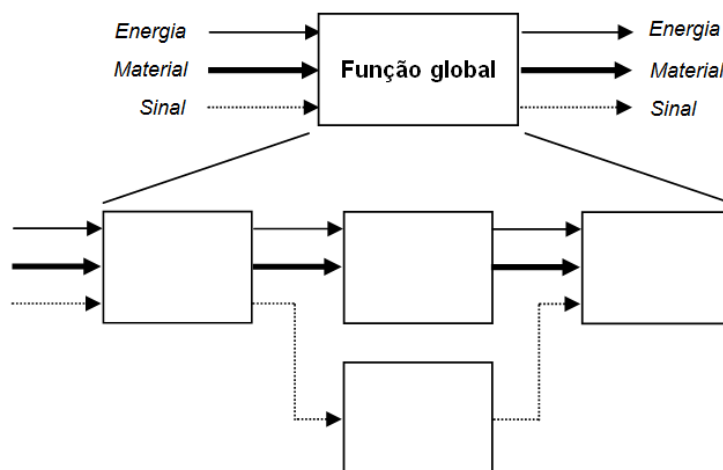
Juntamente com a função global são analisadas e definidas as interfaces do sistema, com destaque para interações com outros sistemas técnicos, interações com o usuário e interações com o meio ambiente. (BACK et al., 2008)

De acordo com Rozenfeld et al. (2006) as entradas e saídas do sistema são classificadas em energia, material e sinal. O sinal

é considerado como sendo a forma física na qual uma informação é transportada. O material representa propriedades de forma, massa, cor, condições, entre outros. Já a energia é a responsável pelo transporte ou transformação de matéria e sinal, pois para que o produto realize uma transformação é necessário a existência de um fluxo de energia entrando e saindo do sistema.

A estrutura funcional é obtida com o desdobramento da função global (Figura 2) em funções menos complexas. Esta estrutura é desdobrada em um processo iterativo até a obtenção de uma representação que atenda o nível de detalhamento requerido.

Figura 2 - Desdobramento da Função Global.



Fonte: Adaptado de Rozenfeld et al. (2006)

A correlação do tema modelagem funcional com produtos mecatrônicos pode apresentar conflitos considerando uma questão central neste tipo de produto, onde as decisões de projeto não podem ser tomadas analisando um único domínio, considerando impacto em outros domínios. O desafio está na identificação de uma abordagem que considere a interação dos domínios mecânicos, eletrônicos e de controle. (CABRERA et al., 2010)

Nesta pesquisa é realizada a análise para utilização da modelagem funcional em produtos complexos de forma a alcançar um desempenho satisfatório na utilização da metodologia frente às diferentes disciplinas empregadas em produtos mecatrônicos.

## 1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

De acordo com Liu et al. (2015) na indústria moderna, produtos complexos e variados são impulsionados pelo avanço da tecnologia e pela diversidade das necessidades dos consumidores. E, a partir da demanda dos consumidores, para garantir um aumento no desempenho dos produtos, a integração de produtos com muitas funções ou tecnologias são desenvolvidos para substituir produtos específicos. A integração de produtos específicos em um só artefato tornou-se uma forma comum de inovação.

A integração de produtos específicos pode ser direcionada para análise de produtos mecatrônicos onde atrás do projeto do conceito está a capacidade de transferir domínios complexos da mecânica para eletrônica e para o software, com o objetivo de alcançar uma alta performance e reduzir custos, conforme descrito por Walters, Bradley e Dorey (2000).

Abid et al. (2015) reforçam que o desenvolvimento de sistemas mecatrônicos é complexo em vários níveis. Por um lado, as interações entre diferentes domínios criam dependência funcional e estrutural que geralmente não são gerenciadas pelas ferramentas disponíveis. Em complemento o desenvolvimento de sistemas mecatrônicos envolve a colaboração entre diferentes áreas que exigem abordagens metodológicas que possam reunir as melhores práticas.

A abordagem da modelagem funcional em produtos mecatrônicos direciona para uma flexibilidade na utilização dos conceitos. Fotso, Wasgin e Rettberg (2012) reforçam que este tema é convencional para uso na engenharia mecânica onde se verificam produtos menos complexos em comparação aos mecatrônicos principalmente pela ausência de software de controle.

Em um levantamento da literatura para busca do estado da arte apresentado no capítulo 2 desta dissertação, foram identificadas práticas em artigos publicados em periódicos e congressos. Estas práticas têm por objetivo auxiliar a fase inicial de projetos de produtos mecatrônicos e são constituídas por etapas que trabalham as funções do produto, sendo que estas práticas não atingem o mesmo grau de abstração existente na abordagem da modelagem funcional.

Entre os trabalhos identificados sobre o tema podem ser citados como exemplos os artigos de Wu, Leu e Liu (2010) e Leu, Wu e Liu (2009) que trabalham uma árvore de funções para produtos compostos pelas disciplinas de mecânica, eletrônica e software, e o trabalho de Zheng et al. (2016) que possui um direcionamento para análise das interfaces das disciplinas nas fases iniciais do projeto conceitual. Mhenni et al. (2014) utilizam a metodologia de linguagem para sistemas SysML junto ao modelo V de desenvolvimento de produtos onde também são inseridas análises das funções.

As abordagens com o tema específico modelagem funcional foram evidenciadas com um detalhamento maior em artigos publicados em congressos, denominados na base de dados como Conference Papers. As abordagens identificadas não apresentam com clareza as interfaces entre as disciplinas envolvidas nos produtos mecatrônicos além de apresentações pouco detalhadas de forma que não direcionam para prática do como fazer. Considerando o nível de abstração que a modelagem funcional possibilita quando aplicada em produtos mecânicos, há a possibilidade de explorar a técnica para expandir as suas contribuições para os produtos mecatrônicos.

De acordo com Eisenbart et al (2017) embora a maioria dos modelos funcionais incluir múltiplas perspectivas em combinação, nenhum modelo revisado implica todas as perspectivas de modelagem de funções e as morfologias. A análise dos autores sugere ainda que a perspectiva do processo de transformação é sempre uma das perspectivas mais proeminentes em modelos de função, e assim, essa perspectiva, de forma exclusiva, assume um papel central na representação da funcionalidade, independentemente dos limites disciplinares. Os autores direcionam que os processos de transformação fornecem um grande potencial para servir como base no desenvolvimento de uma abordagem de modelagem de função integrada, e eventualmente, suporte adequadamente o desenvolvimento do sistema interdisciplinar, no entanto, até agora, esse potencial sugerido deve ser verificado na prática.

Considerando a pesquisa da literatura, identifica-se a oportunidade do desenvolvimento de um método de modelagem específico para produtos mecatrônicos com foco nas funções, tendo como base a modelagem funcional tradicional, e capaz de representar as três disciplinas visualizadas nestes produtos.

## 1.2 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

A necessidade de trabalhar o tema modelagem funcional no ambiente de produtos mecatrônicos foi evidenciada durante o projeto de desenvolvimento de um veículo autônomo para a inspeção de trilhos ferroviários, projeto este que está sendo desenvolvido no Laboratório de Estudos Ferroviários (LEF) do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Ao trabalhar o tema da modelagem dentro do projeto, foi identificado como problema, o direcionamento da modelagem funcional tradicional para a área de mecânica, e com isso, verificada a ausência de uma ferramenta específica e única para adaptação e aplicação da modelagem funcional em produtos compostos ainda por funções desempenhadas pela área de elétrica e da área de software. Neste contexto, é considerado como pergunta da pesquisa, quais etapas e fases são necessárias para elaborar a modelagem funcional de um produto mecatrônico?

## 1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

Na busca pela evolução no processo conceitual de desenvolvimento de produtos mecatrônicos, a pesquisa em análise tem como objetivo geral desenvolver um método para a modelagem funcional de produtos mecatrônicos que contemple as disciplinas de mecânica, elétrica e software, e que apresente as relações entre estas.

Além do objetivo geral, o trabalho tem como objetivos específicos:

1. Identificar o estado da arte para modelagem funcional de produtos mecatrônicos;
2. Explicitar quais os aspectos devem ser considerados para o desenvolvimento de uma metodologia para a modelagem funcional de produtos mecatrônicos;
3. Elaborar uma proposta para elaborar a modelagem funcional de produtos mecatrônicos;
4. Avaliar a proposta para elaborar a modelagem funcional de produtos mecatrônicos.

## 1.4 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

A pesquisa está restringida para análise das práticas que possibilitem realizar ou auxiliar a atividade de desenvolvimento de um modelo funcional para produtos mecatrônicos, não sendo abordado o processo de desenvolvimento de produtos mecatrônicos como um todo.

## 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente texto está dividido em seis capítulos, sendo o primeiro representado pela introdução. No segundo capítulo é apresentado um detalhamento da revisão sistemática da literatura com análises quantitativas dos artigos analisados. Juntamente é apresentada a análise bibliográfica dos artigos selecionados. No terceiro capítulo é apresentada a metodologia base para realização do trabalho, detalhando as fases do Design Science Research. O capítulo 4 apresenta o desenvolvimento do procedimento foco da pesquisa com a modelagem funcional de produtos mecatrônicos. No quinto capítulo são apresentadas as avaliações do procedimento desenvolvido e no capítulo 6 são discutidos os resultados e conclusões do trabalho.



## 2. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

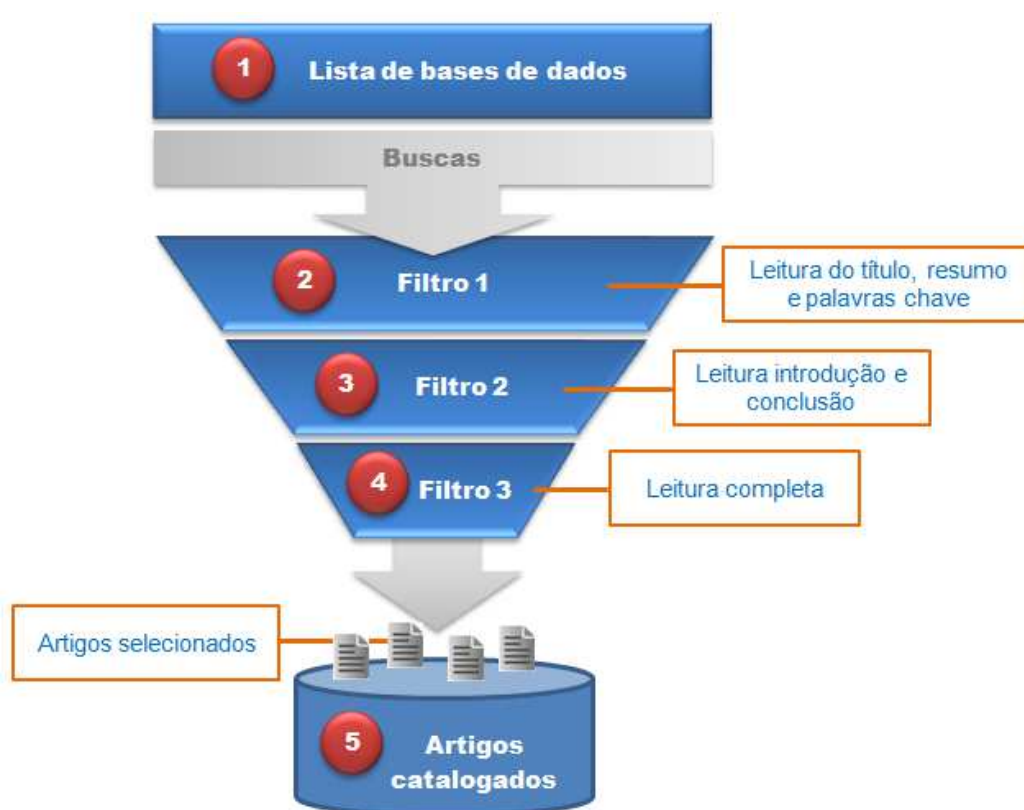
### 2.1 ESTRUTURA DA RSL

A busca e a análise dos artigos utilizou os princípios da Revisão Sistemática da Literatura (RSL) tomando como base o trabalho desenvolvido por Kitchenham et al. (2010). Para sua realização, inicialmente é definida a questão de pesquisa, e a partir desta, são definidas as palavras-chave e os operadores lógicos. Seguidos estes passos, é possível iniciar a coleta de dados e sua posterior análise.

A questão de pesquisa a qual este trabalho se orienta é: quais os métodos e ferramentas são utilizados para elaborar a modelagem funcional de um produto mecatrônico?.

As etapas seguintes da RSL são apresentadas na Figura 3, onde é possível visualizar o fluxo das informações até a obtenção dos artigos que contribuem para a questão da pesquisa.

Figura 3 - Processamento RSL.



Fonte: Adaptado de Conforto, Amaral e Silva (2011)

A etapa 1 descrita na Figura 3 é direcionada com a utilização da base de dados Scopus considerando a sua abrangência e facilidade de uso. A definição dos strings de busca está restrita para título, resumo e palavras chave, e teve como objetivo a verificação de trabalhos que relacionam o a modelagem funcional com produtos mecatrônicos. Os protocolos de busca são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Protocolo de busca na base de dados Scopus.

<b>Base de dados</b>	Scopus
<b>Período de coleta</b>	01/08/2016 a 30/08/2016
<b>Observações</b>	Busca limitada a título, resumo e palavras-chave; somente artigos
<b>String de busca 1</b>	( TITLE-ABS-KEY ( "function model" ) OR TITLE-ABS-KEY ( "function modeling" ) OR TITLE-ABS-KEY ( "functional modeling" ) OR TITLE-ABS-KEY ( "functional model" ) AND TITLE-ABS-KEY ( mechatronic ) )
<b>String de busca 2</b>	( TITLE-ABS-KEY ( "systems modeling" ) AND TITLE-ABS-KEY ( mechatronic ) )
<b>String de busca 3</b>	( TITLE-ABS-KEY ( "product architecture" ) AND TITLE-ABS-KEY ( mechatronic ) )
<b>String de busca 4</b>	( TITLE-ABS-KEY ( "functional basis" ) AND TITLE-ABS-KEY ( mechatronic ) )
<b>String de busca 5</b>	( TITLE-ABS-KEY ( "functional analysis" ) AND TITLE-ABS-KEY ( mechatronic ) )
<b>String de busca 6</b>	( TITLE-ABS-KEY ( "functional design" ) AND TITLE-ABS-KEY ( mechatronic ) )
<b>String de busca 7</b>	( TITLE-ABS-KEY ( "feature-based modeling" ) AND TITLE-ABS-KEY ( mechatronic ) )
<b>String de busca 8</b>	( TITLE-ABS-KEY ( "product representation" ) AND TITLE-ABS-KEY ( mechatronic ) )

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Quadro 1 (continuação) - Protocolo de busca na base de dados Scopus.

<b>String de busca 9</b>	( TITLE-ABS-KEY ( "function-based design" ) AND TITLE-ABS-KEY ( mechatronic ) )
<b>String de busca 10</b>	( TITLE-ABS-KEY ( "functional synthesis" ) AND TITLE-ABS-KEY ( mechatronic ) )
<b>String de busca 11</b>	( TITLE-ABS-KEY ( "product modeling" ) AND TITLE-ABS-KEY ( mechatronic ) )
<b>String de busca 12</b>	( TITLE-ABS-KEY ( "systems model" ) AND TITLE-ABS-KEY ( mechatronic ) )

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

A pesquisa foi realizada entre 1 e 30 de agosto de 2016 e direcionada para artigos publicados em periódicos, sendo desconsiderados trabalhos de congressos denominados na base Scopus como “Conference Paper”.

A etapa de busca resultou em 99 artigos sendo que após a realização do primeiro filtro foram selecionados 86 artigos. Este filtro inicial considera a análise do título, resumo e palavras chave. O segundo filtro dos artigos inclui a leitura da introdução e conclusão, o que resultou em 25 artigos que possuem direcionamento para a questão da pesquisa.

Como critério de inclusão dos artigos há um direcionamento para os trabalhos que desenvolvem práticas que auxiliam a fase inicial do desenvolvimento do projeto de produtos mecatrônicos com foco na análise das funções dos produtos. Com relação a exclusão, para fins de filtragem, foram desconsiderados artigos com direcionamento para um modelo de desenvolvimento de projeto para produtos mecatrônicos, artigos que trabalham com enfoque na comunicação entre as áreas e equipes de projetos, artigos com práticas de desenvolvimento de produtos mecatrônicos para a confiabilidade ou redução de falhas, artigos com práticas para a validação de projeto conceitual e artigos com foco na modelagem específica do software de controle envolvido nos produtos mecatrônicos. Tais artigos divergem da questão da pesquisa.

A terceira etapa do filtro tem como objetivo realizar uma análise detalhada do conteúdo de cada artigo. Nesta última etapa

os artigos foram pontuados em uma escala de 1 a 10 indicando a sua correlação com a questão da pesquisa, sendo a escala apresentada no Quadro 2.

Quadro 2 - Análise das Pontuações.

<b>Nota</b>	<b>Descrição da pontuação</b>
1	Artigos sem abordagem de uma prática específica de modelagem funcional de produtos mecatrônicos ou que possuem uma abordagem com modelo genérico de desenvolvimento de produtos
3	Artigos que citam práticas para a modelagem funcional de produtos mecatrônicos mas não possuem uma explicação específica da ferramenta
5	Artigos que correlacionam práticas de modelagem funcional de produtos mecatrônicos mas apenas os vinculam a um modelo integrado de desenvolvimento de produtos
7	Artigos que correlacionam práticas de modelagem funcional de produtos mecatrônicos e vinculam a um modelo integrado de desenvolvimento de produtos, porém com pouco detalhamento
10	Artigos que citam e detalham práticas de modelagem funcional de produtos mecatrônicos

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

O Quadro 3 apresenta a relação de artigos classificados após a realização dos filtros com base no título, resumo, palavras chave, introdução e conclusão. Também é indicada a classificação dos artigos após a leitura completa dos conteúdos.

Quadro 3 - Artigos Pontuados.

<b>Id</b>	<b>Classif.</b>	<b>Informações do Artigo</b>		<b>Ano</b>	<b># Cit.</b>
3	5	<b>Autores</b>	Foeken, M.J., Alvarez Cabrera, A.A., Voskuijl, M., Van Tooren, M.J.L.	2012	2
		<b>Título</b>	Enabling control software generation by using mechatronics modeling primitives		
		<b>Periód.</b>	Advanced Engineering Informatics		

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Quadro 3 (continuação) - Artigos Pontuados.

Id	Classif.	Informações do Artigo		Ano	# Cit.
		Autores	Título		
6	10	Autores	Wu, J.-C., Leu, M.C., Liu, X.F.	2009	7
		Título	A Hierarchical Object-oriented Functional Modeling Framework for Co-Design of Mechatronic Products		
		Periód.	Concurrent Engineering Research and Applications		
7	10	Autores	Leu, M.C., Wu, J.C., Liu, X.F.	2009	2
		Título	Axiomatic functional and object-oriented product design framework		
		Periód.	CIRP Annals - Manufacturing Technology		
9	1	Autores	Buur, J., Myrup Andreassen, M.	1989	49
		Título	Design models in mechatronic product development		
		Periód.	Design Studies		
12	7	Autores	Liu, C., Hildre, H.P., Zhang, H., Rølvåg, T.	2015	1
		Título	Conceptual design of multi-modal products		
		Periód.	Research in Engineering Design		
13	5	Autores	Politze, D.P., Dierssen, S., Wegener, K.	2012	1
		Título	Function module drivers for assessing the similarity between product functions		
		Periód.	CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology		
15	7	Autores	Van Beek, T.J., Erden, M.S., Tomiyama, T.	2010	42
		Título	Modular design of mechatronic systems with function modeling		
		Periód.	Mechatronics		

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Quadro 3 (continuação) - Artigos Pontuados.

<b>Id</b>	<b>Clas.</b>	<b>Informações do Artigo</b>		<b>Ano</b>	<b># Cit.</b>
16	7	<b>Autores</b>	Alvarez Cabrera, A.A., Foeken, M.J., Tekin, O.A., (...), Van Houten, F.J.A.M., Tomiyama, T.	2010	29
		<b>Título</b>	Towards automation of control software: A review of challenges in mechatronic design		
		<b>Periód.</b>	Mechatronics		
19	5	<b>Autores</b>	Walters, R.M., Bradley, D.A., Dorey, A.P.	2000	0
		<b>Título</b>	Conceptual study for a computer-based tool to support electronics design in a mechatronic environment		
		<b>Periód.</b>	Microprocessors and Microsystems		
36	10	<b>Autores</b>	Zheng, C., Le Duigou, J., Bricogne, M., Eynard, B.	2016	0
		<b>Título</b>	Multidisciplinary interface model for design of mechatronic systems		
		<b>Periód.</b>	Computers in Industry		
40	5	<b>Autores</b>	Yuan, W., Liu, Y., Zhao, J., Wang, H.	2016	0
		<b>Título</b>	Pattern-based integration of system optimization in mechatronic system design		
		<b>Periód.</b>	Advances in Engineering Software		
41	3	<b>Autores</b>	Thramboulidis, K.	2015	0
		<b>Título</b>	Comments on "A model-based design methodology for the development of mechatronic systems"		
		<b>Periód.</b>	Mechatronics		
42	5	<b>Autores</b>	Abid, H., Pernelle, P., Noterman, D., Campagne, J.-P., Ben Amar, C.	2015	0
		<b>Título</b>	SysML approach for the integration of mechatronics system within PLM systems		
		<b>Periód.</b>	International Journal of Computer Integrated Manufacturing		

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Quadro 3 (continuação) - Artigos Pontuados.

Id	Clas.	Informações do Artigo		Ano	# Cit.
		Autores	Título		
45	10	Autores	Mhenni, F., Choley, J.-Y., Penas, O., Plateaux, R., Hammadi, M.	2014	7
		Título	A SysML-based methodology for mechatronic system architectural design		
		Periód.	Advanced Engineering Informatics		
47	5	Autores	Nomaguchi, Y., Fujita, K.	2013	0
		Título	Knowledge representation framework for interactive capture and management of reflection process in product concepts development		
		Periód.	Advanced Engineering Informatics		
51	3	Autores	Liu, Y.-S., Fan, H.-R., Jiang, Y.-Q., Cao, Y.	2012	0
		Título	M-design: system modeling platform for multi-domain complex mechatronics		
		Periód.	Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software		
56	3	Autores	Christophe, F., Sell, R., Coatanéa, E.	2008	10
		Título	Conceptual design framework supported by dimensional analysis and system modelling language		
		Periód.	Estonian Journal of Engineering		
62	3	Autores	Osman, K., Stamenković, D., Lazarević, M.	2013	0
		Título	Integration of system design and production processes in robust mechatronic product architectures development - Extended M-FBFP framework		
		Periód.	Hemijaska Industrija		
79	1	Autores	Van Der Auweraer, H., Anthonis, J., De Bruyne, S., Leuridan, J.	2013	14
		Título	Virtual engineering at work: The challenges for designing mechatronic products		
		Periód.	Engineering with Computers		

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Quadro 3 (continuação) - Artigos Pontuados.

<b>Id</b>	<b>Clas.</b>	<b>Informações do Artigo</b>		<b>Ano</b>	<b># Cit.</b>
80	3	<b>Autores</b>	Behbahani, S., De Silva, C.W.	2013	1
		<b>Título</b>	Automated identification of a mechatronic system model using genetic programming and bond graphs		
		<b>Periód.</b>	Journal of Dynamic Systems, Measurement, Transactions ASME		
81	5	<b>Autores</b>	Salem, F.A.	2013	1
		<b>Título</b>	Mechatronics design of small electric vehicles; research and education		
		<b>Periód.</b>	International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering		
82	3	<b>Autores</b>	Roy, D.	2013	0
		<b>Título</b>	Design, system model and development of customized Electronic Light Barriers for robotic and mechatronic applications		
		<b>Periód.</b>	Robotics and Computer-Integrated Manufacturing		
83	3	<b>Autores</b>	Low, C.Y., Aziz, N., Aldemir, M., (...), Anacker, H., Mellado, M.	2013	1
		<b>Título</b>	Strategy planning for collaborative humanoid soccer robots based on principle solution		
		<b>Periód.</b>	Production Engineering		
86	3	<b>Autores</b>	Nattermann, R.S., Anderl, R.	2011	3
		<b>Título</b>	Simulation data management approach for developing Adaptronic Systems - The W-model methodology		
		<b>Periód.</b>	World Academy of Science, Engineering and Technology		
93	3	<b>Autores</b>	Vyatkin, V., Hanisch, H.-M., Pang, C., Yang, C.-H.	2009	58
		<b>Título</b>	Closed-loop modeling in future automation system engineering and validation		
		<b>Periód.</b>	IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics		

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018



O Quadro 4 apresenta a quantidade de artigos de acordo com as notas.

Para fins de estudo na análise bibliográfica foram detalhados os artigos classificados com notas 7 e 10 considerando a ênfase destes nos métodos de modelagem para as fases iniciais do projeto de produtos mecatrônicos.

Quadro 4 - Quantidade de artigos em cada nota.

<b>Nota</b>	<b>Quantidade de Artigos</b>
1	2
3	9
5	7
7	3
10	4
<b>Total:</b>	<b>25</b>

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018.

Os 25 artigos pontuados na RSL foram publicados em 22 periódicos diferentes. Os periódicos Mechatronics e Advanced Engineering Informatics possuem 5 artigos publicados e totalizam 77 citações com estes artigos conforme apresentado no Quadro 5. Isso demonstra que o interesse sobre o tema permeia várias publicações, porém as publicações mais qualificadas se concentram em apenas poucas revistas.

Quadro 5 - Lista de Periódicos.

<b>Periódico</b>	<b>Quantidade de Artigos</b>	<b>Citações</b>
Mechatronics	3	71
Advanced Engineering Informatics	2	7
IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews	1	58
Design Studies	1	49
Engineering with Computers	1	14
Estonian Journal of Engineering	1	10
Concurrent Engineering Research and Applications	1	7

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Quadro 5 (continuação) - Lista de Periódicos.

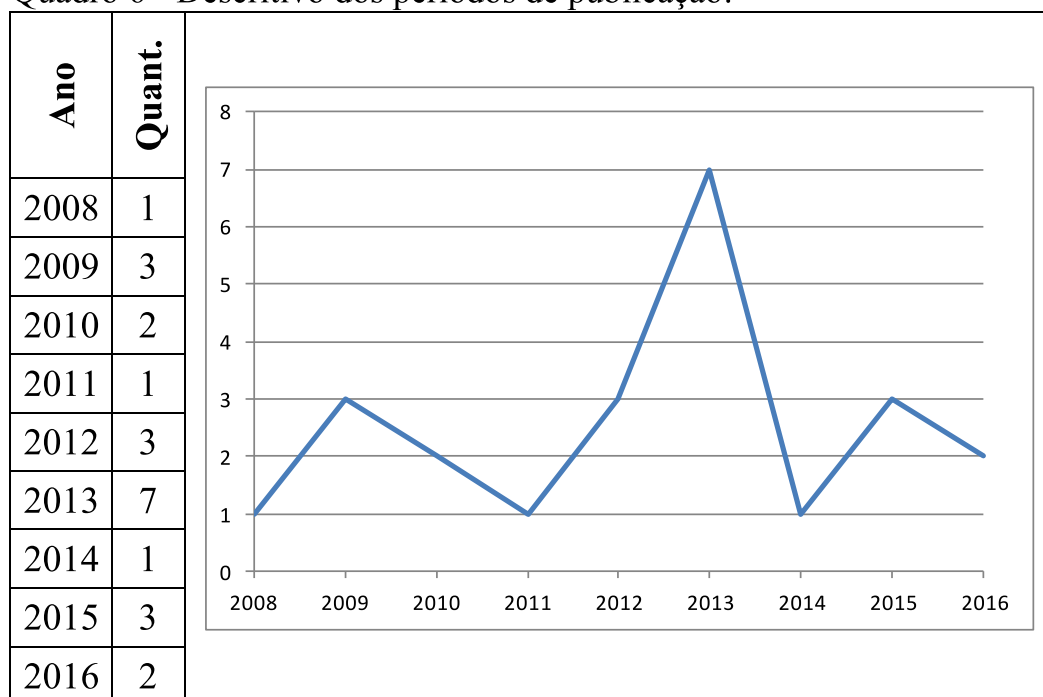
<b>Periódico</b>	<b>Quantidade de Artigos</b>	<b>Citações</b>
World Academy of Science, Engineering and Technology	1	3
Advanced Engineering Informatics	1	2
CIRP Annals - Manufacturing Technology	1	2
CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology	1	1
International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering	1	1
Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME	1	1
Production Engineering	1	1
Research in Engineering Design	1	1
Advances in Engineering Software	1	0
Computers in Industry	1	0
Hemijaska Industrija	1	0
International Journal of Computer Integrated Manufacturing	1	0
Journal of Software	1	0
Microprocessors and Microsystems	1	0
Robotics and Computer-Integrated Manufacturing	1	0

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

A análise do ano de publicação dos 25 artigos selecionados demonstra que 23 artigos foram publicados nos últimos 8 anos, demonstrando a atualidade do tema. Como é apresentado no Quadro 6, as exceções estão relacionados com artigos publicados em 1989 e 2000. O gráfico apresentado no Quadro 6 possibilita visualizar um pico no ano de 2013 com 7 publicações.

O Quadro 7 apresenta a relação dos países de origem dos autores dos artigos. Não foi verificada a existência de autores brasileiros dentre os artigos selecionados após os filtros iniciais da RSL.

Quadro 6 - Descritivo dos períodos de publicação.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Quadro 7 - Origem dos Autores.

Países	Quantidade
Reino dos Países Baixos	14
França	13
China	7
Alemanha	5
Bélgica	4
Noruega	4
Reino Unido	4
Estados Unidos da America	3
Nova Zelandia	3
Suiça	3
Dinamarca	2
Finlândia	2
Japão	2
Malasia	2
Sérvia	2
Arabia Saudita	1
Canada	1
Croacia	1
Espanha	1
Estonia	1
Grécia	1
India	1

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Quadro 7 (continuação) - Origem dos Autores.

Países	Quantidade
Irã	1
Tunísia	1
Turquia	1
Total	80

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Os artigos de periódicos selecionados com a RSL serão analisados no item 2.2, juntamente com os artigos denominados “Conference papers” considerados neste trabalho como artigos de congressos.

## 2.2 ANÁLISE DAS PRÁTICAS

### 2.2.1 Artigos de periódicos

Wu, Leu e Liu (2010) e Leu, Wu e Liu (2009) propõem uma estrutura de decomposição funcional orientada a objetos (object-oriented - OO) direcionada para o co-design (design simultâneo) e co-análise (análise simultânea) das funções do produto, estruturas e as relações entre os componentes. A estrutura proposta utiliza uma árvore de funções (function tree) para apresentar o modelo funcional do produto adicionando o uso do HOOM<sup>1</sup> e o FOMM<sup>2</sup>.

Os autores buscam oferecer uma ferramenta que auxilie na comunicação em uma equipe multidisciplinar de projeto através do detalhamento e análise nível a nível do produto considerando partes mecânicas, eletrônicas e software, além de ser uma ponte entre projetistas e engenheiros no desenvolvimento das especificações de projeto.

O hierarchical OO functional modeling technique é iniciado com a definição da função principal do produto. Após a definição, a subfunção é decomposta em subfunções e cada subfunção deve ser decomposta até a identificação de uma função primitiva. Estas funções primitivas são então relacionadas com os objetos. O HOOM é então utilizado para decomposição da estrutura de objetos de alta ordem para objetos primitivos. Os

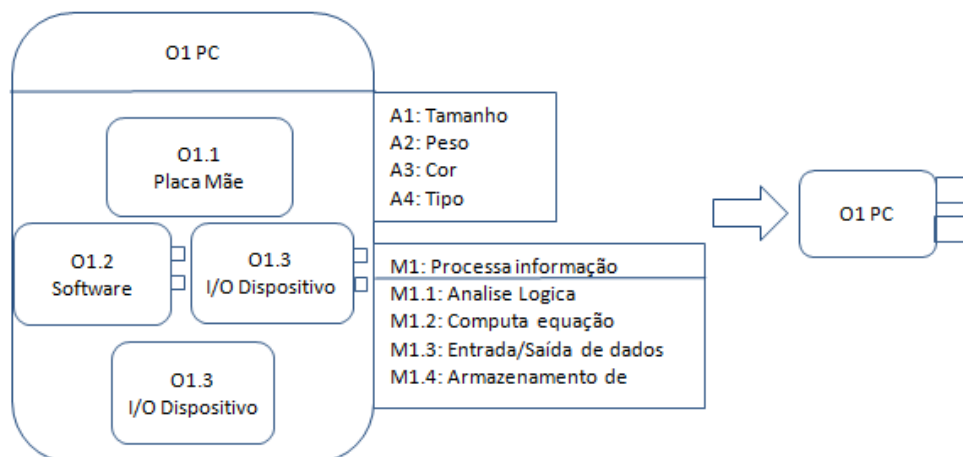
---

<sup>1</sup> HOOM: High Order Object Model (Modelo de Objetos de Alta Ordem)

<sup>2</sup> FOMM: Function and Object Mapping Model (Modelo de Mapeamento de Objetos e Funções)

autores exemplificam um objeto primitivo como sendo a placa mãe enquanto um objeto de alta ordem seria um computador, como pode ser verificado na Figura 4.

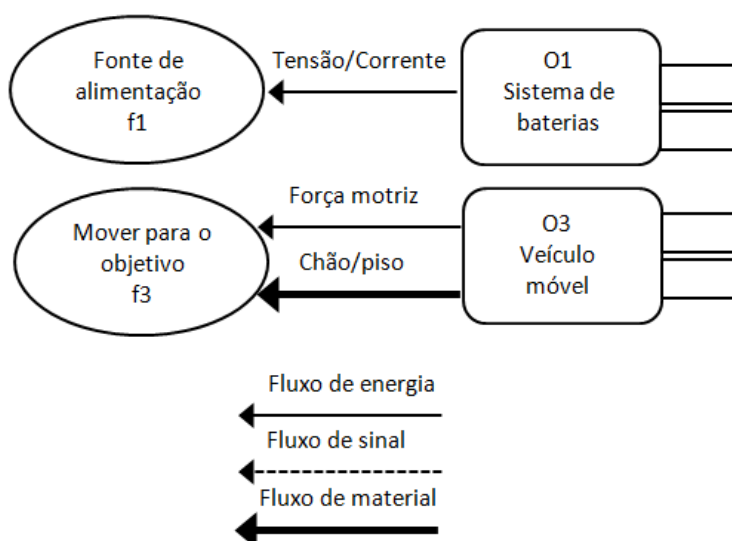
Figura 4 - Exemplo HOOM.



Fonte: Wu, Leu e Liu (2010)

O FOOM é então utilizado como técnica de análise e verificação para descrever o mapeamento das relações e implementação de parâmetros entre funções e objetos. A análise dos parâmetros de implementação, refere-se aos fluxos de informação necessários para que os objetos implementem as funções conforme apresentado na Figura 5. Existindo três tipos de fluxos: material, energia e sinal.

Figura 5 - Exemplo FOOM.

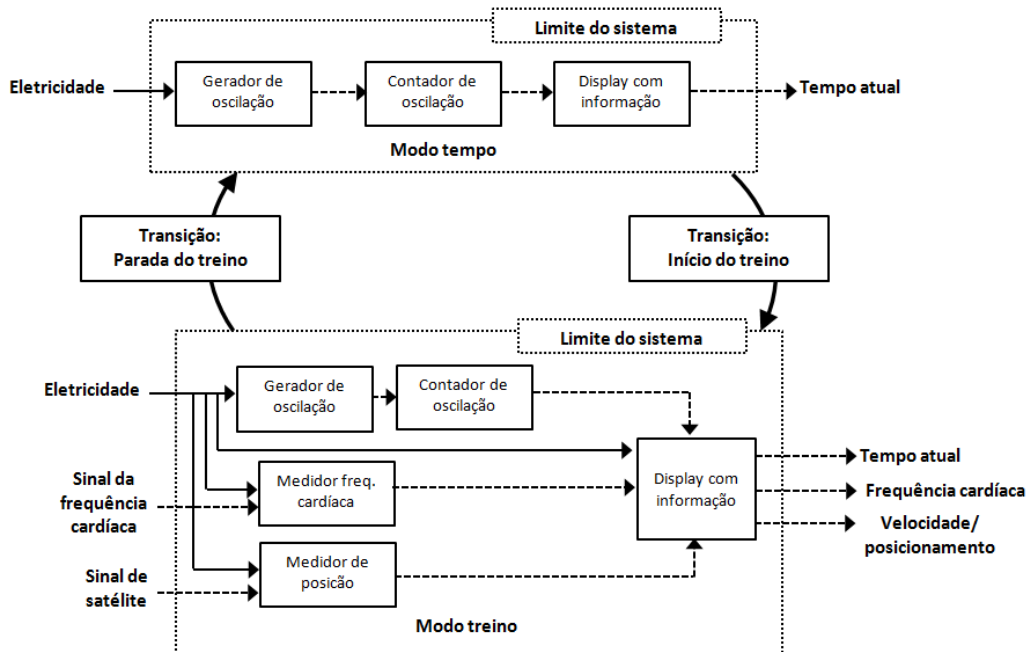


Fonte: Wu, Leu e Liu (2010)

Os autores complementam o trabalho com um exemplo de aplicação da ferramenta no desenvolvimento de um robô para desarmar bombas.

LIU et al. (2015) apresentam uma metodologia para o projeto conceitual de produtos complexos baseada na análise de modos. Considera-se modo o estado de configuração do sistema comutável para um propósito específico. Como exemplo os autores citam uma luminária urbana com energia solar, onde ocorre a conversão e armazenamento de energia no modo diurno e conversão de energia em iluminação no modo noturno. Os autores apresentam uma relação entre modo, função e tecnologia através dos três eixos de um sistema cartesiano e abordam a apropriação destes três aspectos em produtos simples que evoluíram com a apropriação de outras tarefas. Como exemplificação é apresentado a modelagem de um relógio esportivo com medição de batimentos cardíacos conforme Figura 6.

Figura 6 - Modelo de produto com dois modos.

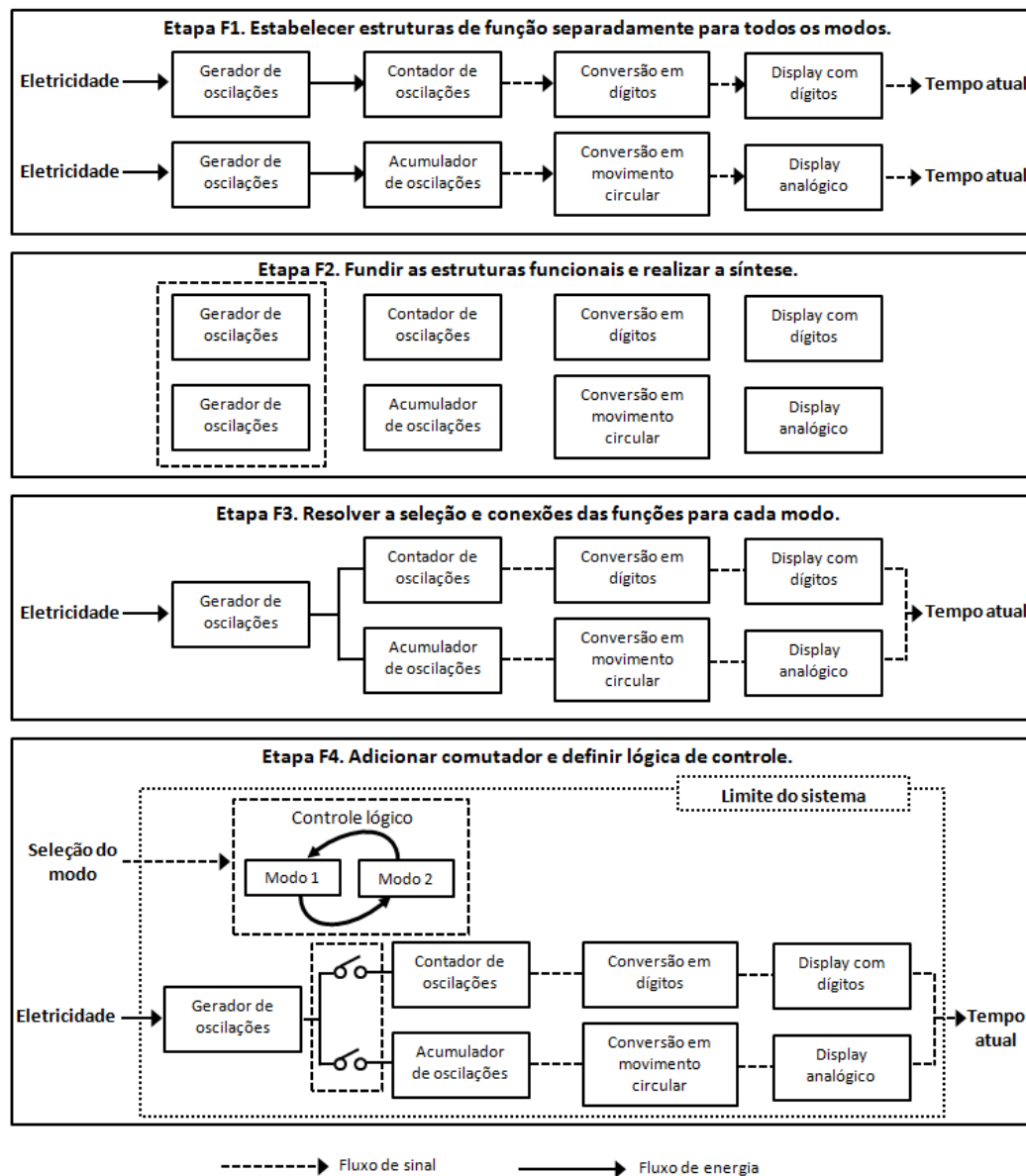


Fonte: LIU et al. (2015)

Como sequência ao método de projeto sistemático apresentado por Pahl et al. (2007), os autores apresentam dois métodos para realizar o detalhamento das funções e sub-funções e produtos com vários modos. O primeiro denominado Merging Method (Método de Fusão) é composto por quatro etapas que

promovem a síntese entre as funções através dos modos como pode ser observado na Figura 7.

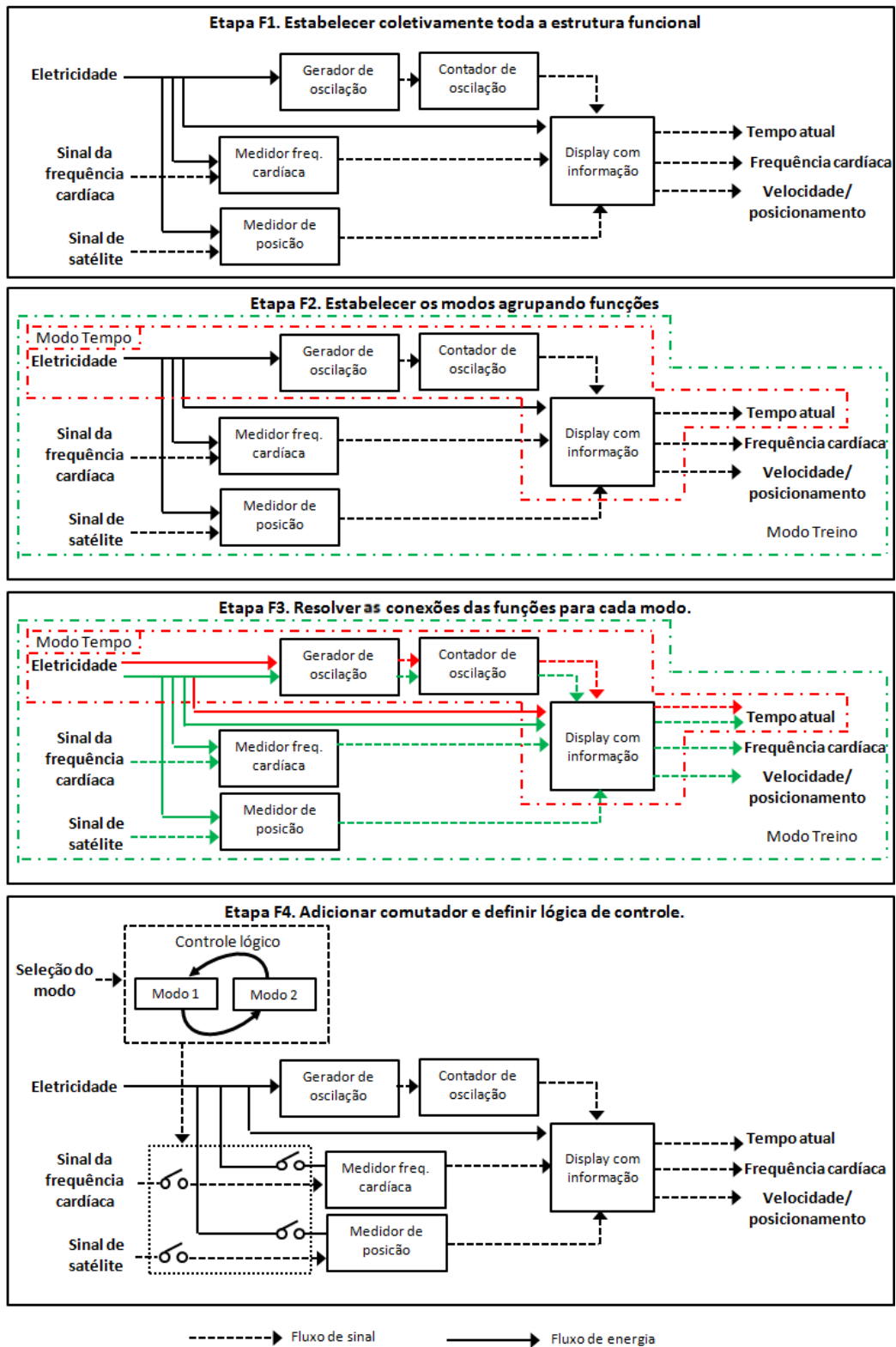
Figura 7 – Método de Fusão.



Fonte: LIU et al. (2015).

O segundo denominado Clustering Method (Método de Agrupamento), pode ser visualizado na Figura 8, e também é composto por 4 etapas sendo que o objetivo é estabelecer modos com base na abundância de recursos do sistema.

Figura 8 - Método de Agrupamento.



Fonte: LIU et al. (2015)



O trabalho desenvolvido por van Beek, Erden e Tomiyama (2010) relaciona a modelagem funcional com o projeto modular de produtos mecatrônicos. Analisando o desenvolvimento do modelo funcional, os autores utilizam o function–behavior–state (FBS; Função de Comportamento de Estado) como sendo uma abordagem de modelamento baseada nas descrições funcionais e comportamentais de elementos estruturais. A abordagem possui suporte de software denominado FBS Modeler. A ferramenta citada permite ao projetista desenvolver o FBS sugerindo decomposições funcionais, associação de funções de nível mais baixo com estruturas físicas e verificar a consistência do modelo. Qualquer função em conflito com as estruturas físicas pode ser detectada e visualizada pelo usuário.

O FBS Modeler é composto por dois tipos de conhecimento. O primeiro está direcionado para as características físicas (processos, entidades e relações espaciais das entidades) correspondentes ao comportamento objetivo do sistema. O segundo tipo de conhecimento é direcionado ao nível subjetivo das funcionalidades. Estes conhecimentos são armazenados em duas formas, considerando como as funções são decompostas em sub-funções e quais as características físicas das funções. Ao projetar um produto com o FBS Modeler, o projetista define e decompõe primeiro as funções necessárias. Então analisa os recursos físicos para realizar as funções. A metodologia desenvolvida pelos autores relaciona o FBS com a design structure matrix (DSM; Matriz de Estrutura do Projeto) como pode ser visualizado na Figura 9 com a exemplificação para uma bomba de vácuo para garrafas de vinho. Esta matriz apresenta um direcionamento para a modularização do produto no projeto conceitual. (VAN BEEK, ERDEN E TOMIYAMA, 2010)

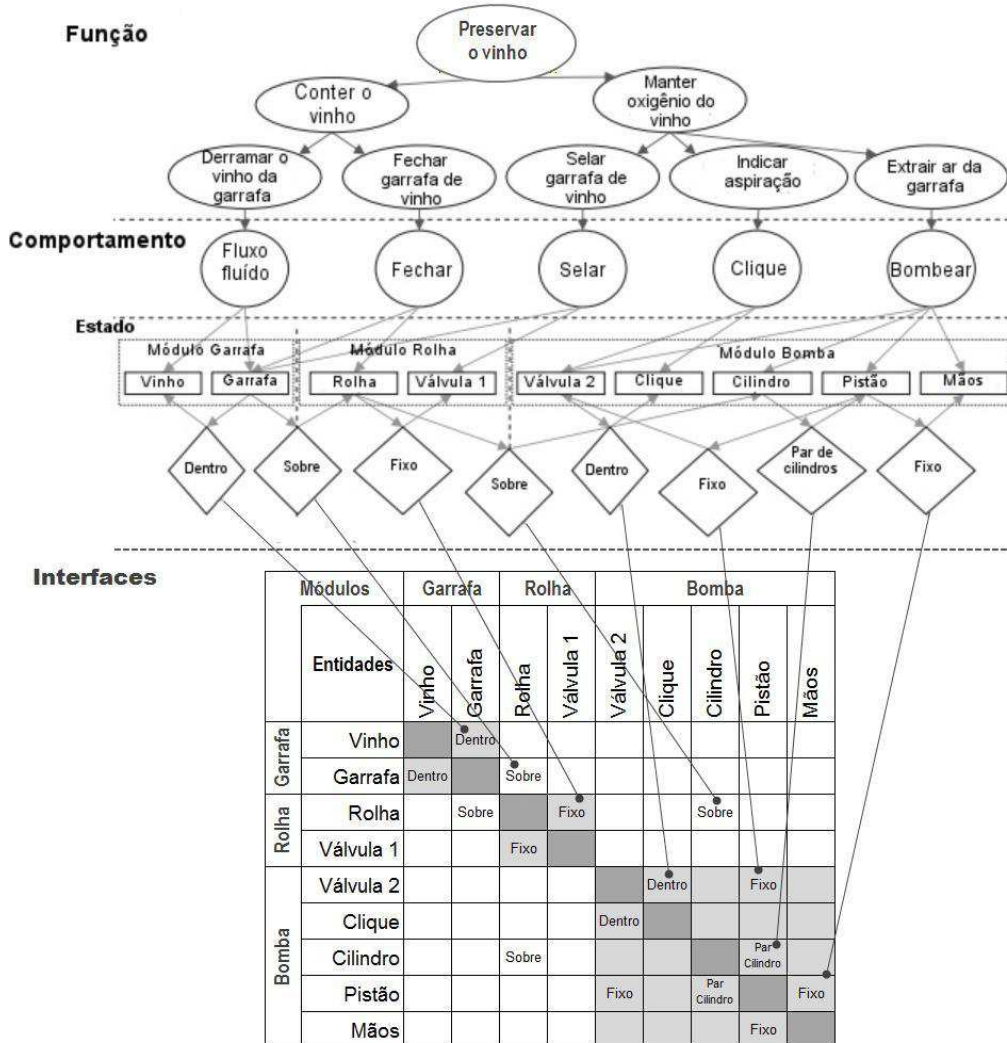
A proposta desenvolvida por Cabrera et al. (2010) apresenta uma alternativa à abordagem de integração das metodologias existentes para apoiar o desenvolvimento de sistemas mecatrônicos e adiciona uma orientação para o controle de software. Os autores sugerem o uso do FBS (function–behavior–state) para iniciar a modelagem e abrangem a integração com a utilização de outras metodologias como IDEF0, QFD<sup>3</sup> e Modelo V. Estas metodologias traduzem um modelo de informação funcional de alto nível com objetivo fornecer uma

---

<sup>3</sup> QFD: Quality Function Deployment (Desdobramento da Função Qualidade)

visão geral e classificar informações detalhadas de projeto, capturando funções, requisitos e a arquitetura do sistema.

Figura 9 - Junção do FBS com DSM.



Fonte: van Beek, Erden e Tomiyama (2010)

Além das informações de alto nível, os autores apresentam a necessidade de um modelo do sistema de informações de análise como simulações do controlador. Neste sentido é proposto a utilização de técnicas orientadas a objetos como o Systems Modeling Language (SysML<sup>4</sup>) integrado com ferramentas como CATIA<sup>5</sup> e Matlab/Simulink<sup>6</sup>, e a combinação do SysML com o Composable Object (COB; Objeto Composto). Estas técnicas

<sup>4</sup> SysML: Systems Modeling Language (Linguagem de Modelamento de Sistemas)

<sup>5</sup> CATIA: Software CAD

<sup>6</sup> Matlab e Simulink: Softwares de cálculo

permitem a construção de modelos rápidos e intuitivos, uma vez que os elementos de modelagem foram desenvolvidos. Considerando o nível arquitetônico, várias visões sobre o sistema geral podem ser visualizados. Essas visões podem ser usadas para capturar e preocupações e exigências das partes interessadas do projeto, favorecendo o projeto simultâneo e reduzindo problemas de comunicação entre a equipe de projeto.

Zheng et al. (2016) apresentam um modelo de interface multidisciplinar em produtos mecatrônicos. O método é composto por três conceitos: classificação da interface, modelagem da interface e definição de regras de compatibilidade das interfaces. De acordo com os autores o modelo de interface multidisciplinar permite uma representação comum para as interfaces definidas pela equipe de projeto, membros de especialidades diversas. Assim o modelo proposto garante a consistência da interface e auxilia os projetistas a garantir a correta integração de componentes diferentes. O estudo é iniciado com a análise dos tipos de transferências que ocorrem através de uma interface sendo relacionados: geometria da interface, energia da interface, controle da interface e comunicação de interface. Na sequência são analisadas as configurações das interfaces considerando então três elementos em sistemas mecatrônicos (componente, ambiente e interface). O estudo correlaciona os três elementos de forma que envolve a interface entre componentes, interface entre componentes e o ambiente, interface entre componentes e interface, interface entre interfaces e interface entre interfaces e ambiente. Os autores apresentam estas correlações através do UML<sup>7</sup>.

Mhenni et al. (2014) trabalham uma correlação para a utilização do SysML na modelagem de sistemas mecatrônicos com o Modelo V, considerando as fases de projeto do sistema e a integração do sistema, sendo que o trabalho apresentado tem foco na primeira fase do modelo. A metodologia proposta, o SysML based, visa auxiliar o projetista na fase de projeto do sistema para ter uma modelagem consistente. A metodologia também tenta orientar o projetista frente à variedade de diagramas do SysML, dando uma seqüência de usos desses diagramas em diferentes estágios de projeto como apresentado nas Figura 10 e 11.

---

<sup>7</sup> UML: Unified Modeling Language (Linguagem Unificada de Modelamento)

Figura 10 - Fases e estágios para modelagem A.



Fonte: Mhenni et al. (2014)

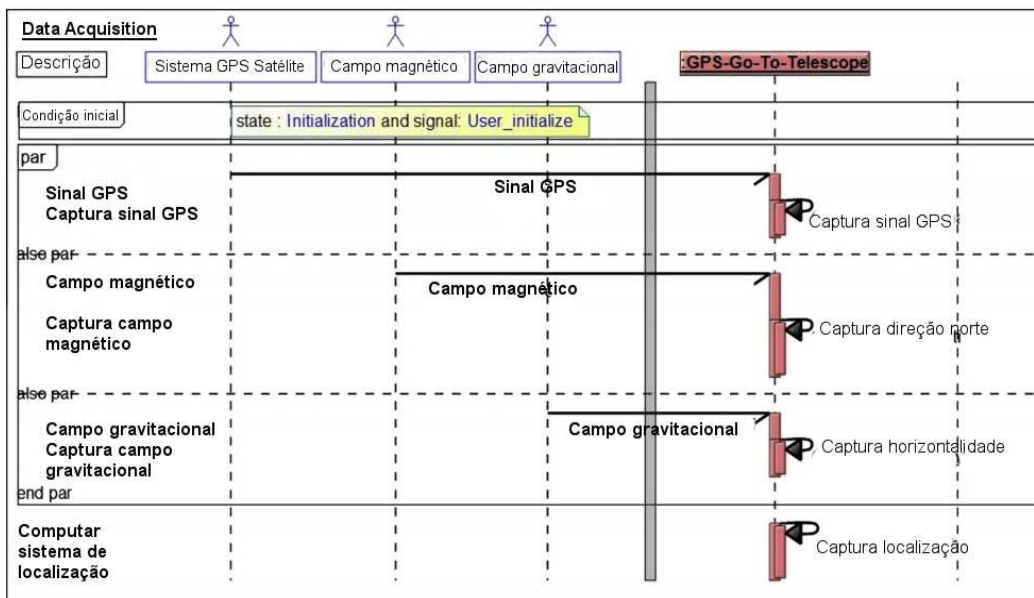
Figura 11 - Fases e estágios para modelagem B.



Fonte: Mhenni et al. (2014)

O processo de modelação SysML based é composto por duas fases e a metodologia é apresentada com o exemplo de desenvolvimento de um equipamento de GPS. A primeira fase é denominada black-box (caixa preta), e tem a função de fornecer um ponto de vista geral do sistema. No contexto das funções, o sétimo estágio desta fase trabalha com o cenário das funções como pode ser visualizado na Figura 12.

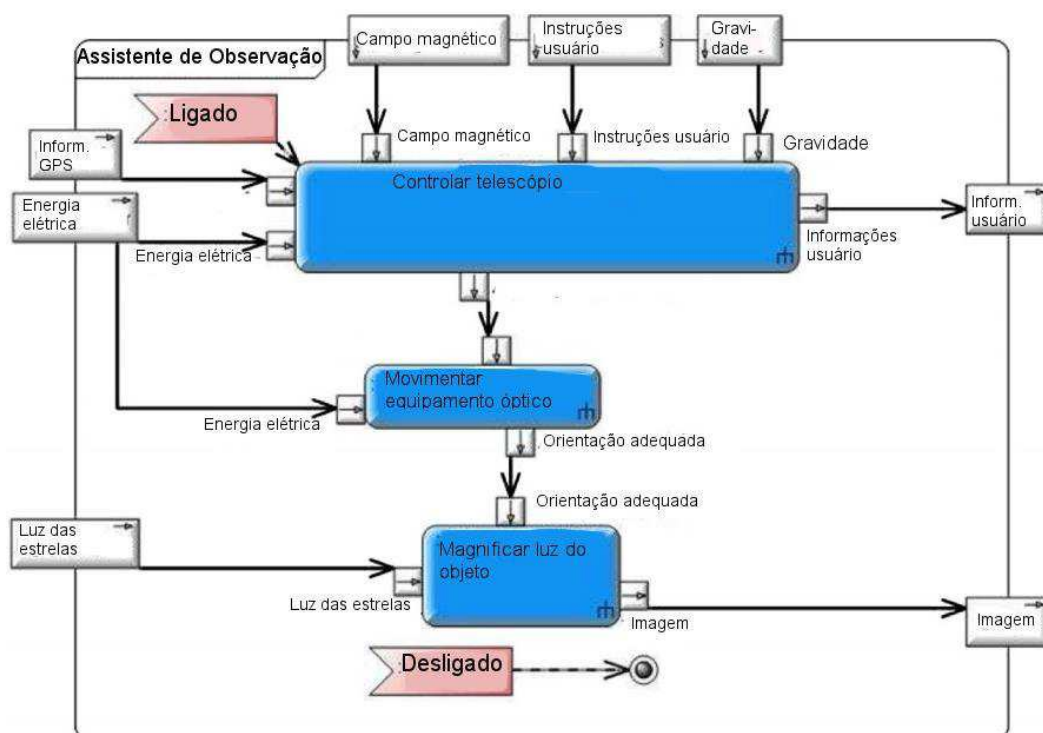
Figura 12 - Cenários das funções.



Fonte: Mhenni et al. (2014)

A segunda fase, denominada white-box (caixa branca), é composta pelo detalhamento da arquitetura interna do sistema, e direcionando para as funções do exemplo é realizada a demonstração com a Figura 13.

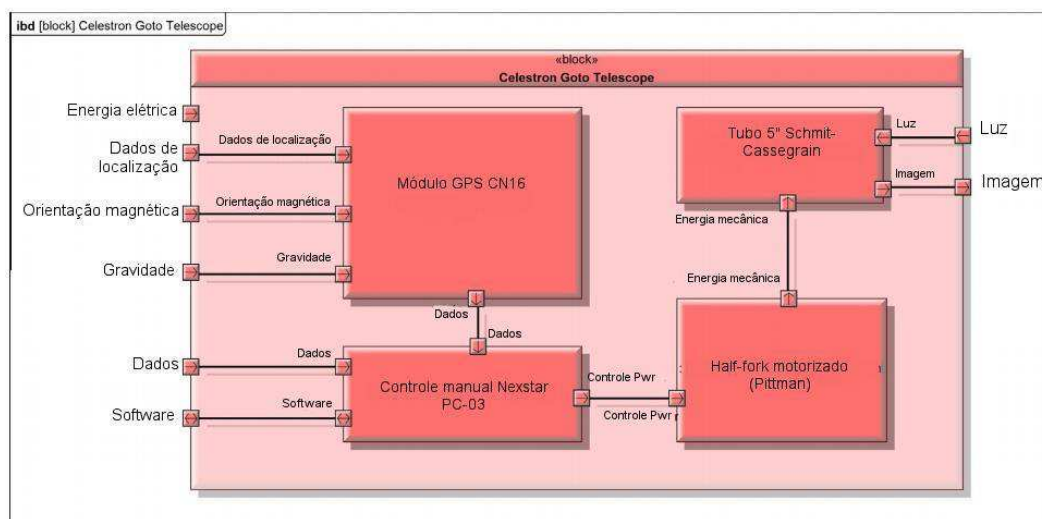
Figura 13 - Arquitetura Funcional.



Fonte: Mhenni et al. (2014)

O estágio final da fase white-box busca a apresentação da arquitetura física para o produto conforme Figura 14.

Figura 14 - Arquitetura física do produto.



Fonte: Mhenni et al. (2014)

### 2.2.2 Literatura Complementar

Para esta seção serão expostos 3 artigos classificados na base de dados como “Conference Paper” e que após a utilização das técnicas da RSL foram selecionados considerando uma possível contribuição para as pesquisa em desenvolvimento.

Fotso e Rettberg (2012) buscaram realizar uma síntese nos conceitos utilizados para o projeto de produtos mecatrônicos. Os autores realizam uma revisão sobre as abordagens para o projeto de produtos mecatrônicos e direcionam para a existência de duas formas para realizar a concepção. A primeira abordagem é a modelagem funcional, sendo similar ao método convencional utilizado em engenharia mecânica. A segunda abordagem é a Model-Based Design (Projeto Baseado em Modelos), que possui uma correlação com a Model-Based System Engineering (MBSE, Sistema de Engenharia Baseado em Modelos).

Para Fotso e Rettberg (2012) uma diferença fundamental entre as duas abordagens, reside no fato de que a modelagem funcional é considerada informal, neste sentido há uma incapacidade de ser repetível o modelo funcional para um determinado produto. Caso o produto seja desenvolvido por duas equipes de engenharia, há baixa probabilidade de serem obtidos os mesmos resultados. Outra diferença indicada pelos autores, é a reutilização do conhecimento, pois a modelagem funcional arquiva um modelo que poderia ser utilizado somente em um produto particular, enquanto que no projeto baseado em modelos, o modelo arquivado pode servir de base para criar, especificar e explorar o modelo do produto.

Os autores ainda expõem a existência de diferentes métodos para definição do modelo na modelagem funcional, onde são relacionadas as normas VDI (Associação de Engenharia da Alemanha) 2422, 2222, 2206 e 2221. Além das normas alemãs, é inserido neste contexto o Invention Machine (Máquina de Invenção) ou TechOptimizer. (FOTSO E RETTBERG, 2012)

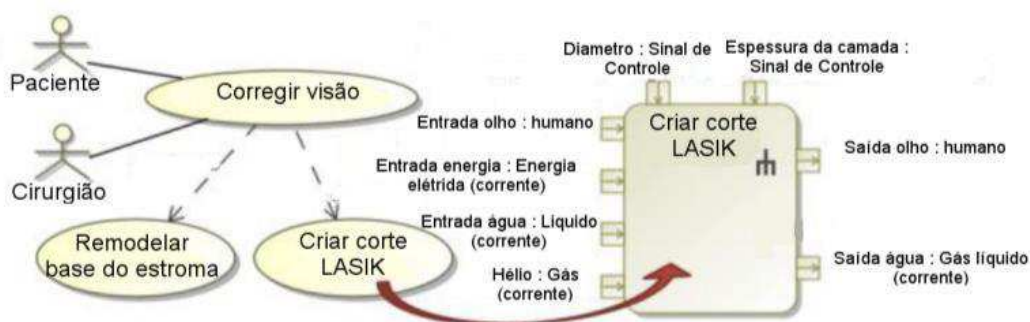
Kruse et al. (2014) descrevem uma comparação sistemática de modelos funcionais com SysML. Uma primeira abordagem busca integrar o SysML com o Product Lifecycle Management (PLM; Gestão do Ciclo de Vida do Produto) e em uma segunda abordagem há a utilização de bibliotecas de funções e fluxos no SysML em uma base funcional. Esta segunda abordagem visa dar suporte a um procedimento de modelamento

similar ao proposto por Pahl et al. (2007). Para a análise os autores fazem referência a um equipamento oftalmológico.

Para os autores o uso do modelo funcional em SysML inserindo fluxos e funções de uma biblioteca de modelo de função auxilia o projeto de sistemas mecatrônicos, permitindo a modelagem baseada em computação e sintetiza um projeto automatizado. O objetivo de criar uma biblioteca de funções específica, é desenvolver uma abordagem que apoia a reutilização do conhecimento, consistência entre modelos e modelagem eficiente. (KRUSE et al., 2014)

Na Figura 15 são apresentados os casos de uso no equipamento oftalmológico e detalhado o fluxo para um dos casos.

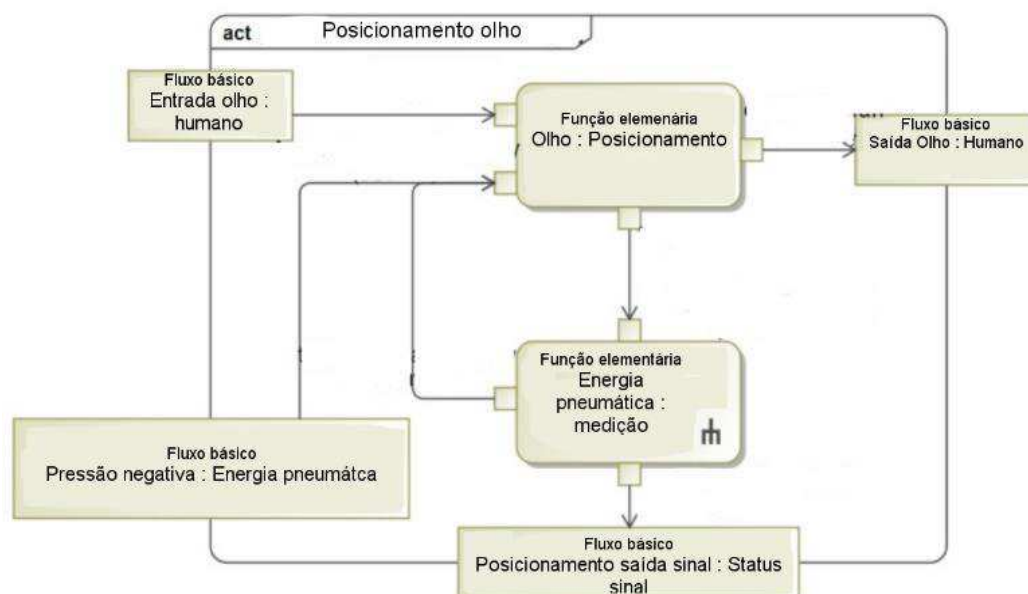
Figura 15 - Casos de uso do equipamento.



Fonte: Kruse et al. (2014)

Dentro da função principal há um desdobramento em diagramas. Para o equipamento em análise são considerados os diagramas: controle do processo, conversão de energias, posicionamento do olho, nivelar córnea e cortar olho. O diagrama posicionamento do olho é apresentado na Figura 16 com funções elementares. Estes SysML são denominados como ação de comportamento e utilizam as funções elementares posição e medição as quais são definidas como atividades na biblioteca de funções. (KRUSE et al., 2014)

Figura 16 - Diagrama posicionamento do olho.

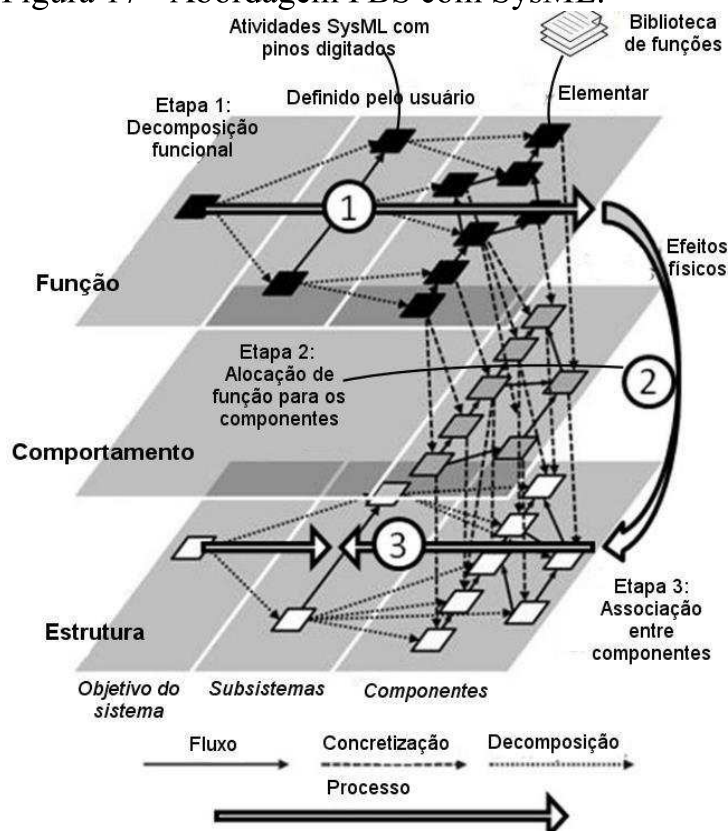


Fonte: Kruse et al. (2014)

O trabalho desenvolvido por Kruse et al. (2012) possui direcionamento para o projeto baseado em modelos Function-Behavior-Structure (FBS; Função de Comportamento da Estrutura) em bibliotecas com o SysML para dar suporte as concepções, com uma abordagem em reutilizar modelos funcionais em SysML. O método utiliza um fluxo operador para formulação das funções baseado em bases funcionais do NIST (National Institute of Standards and Technology) e é analisado na modelagem de um carro elétrico. O termo Função do FBS estabelece uma relação de entrada ou saída com o fluxo descrevendo as entradas e saídas, e o operador descrevendo a mudança entre entrada e saída para expressar o que o sistema deve fazer. O termo Comportamento é modelado através de uma rede de efeitos físicos que cumprem as funções realizando-as através de princípios de trabalho. O termo Estrutura é um arranjo de componentes físicos que pode também incluir software, proporcionar a forma de realização da funcionalidade alvo, e respectivamente os efeitos físicos do comportamento. O fluxo do método sugerido pelos autores é apresentado na Figura 17.



Figura 17 - Abordagem FBS com SysML.



Fonte: Kruse et al. (2012)

A primeira etapa que é apresentada na Figura 17 é uma decomposição funcional da solução central. Todas as funções principais definidas pelo usuário são decompostas em sub-funções definidas pelo usuário ou funções elementares. A decomposição é completa quando todas as funções definidas pelo usuário são especificadas por funções elementares da biblioteca, para que possam ser associadas. Para testar a abordagem inicial, as associações diretas entre as funções e os componentes estruturais (Etapa 2) são usadas para verificar o modelo de decomposição funcional por meio do modelo estrutural, que é feito (Etapa 3) com base nos componentes associados e o sistema global. (KRUSE et al., 2012)

### 2.2.3 Trabalhos adicionais

Em 2017 foi identificado o trabalho desenvolvido por Eisenbart, Gericke e Blessing (2017), o qual realiza uma compilação de dados relacionados com a modelagem funcional em projetos interdisciplinares conforme apresentados no Quadro 8.

Quadro 8 - Metodologias listadas por Eisenbart, Gericke e Blessing (2017)

	<b>Modelos Funcionais</b>	<b>Principais Referências</b>
<b>Engenharia Mecânica</b>	Lista de funções	Ehrlenspeil 2007
	Estrutura de função	Ehrlenspeil 2007
		Hubka e Eder 1988
		Hundal 1990
		Pahl et al. 2007
		Rodenacker 1970
		Stone and Wood 2000
		Ullmann 2010
		Ulrich e Eppinger 2008
	Árvore de função	Ullman 2010; Pugh 1991
	Árvore de significados de função	Andreasen and Hein 2000
	Lista de separação homem/máquina	Tjalve 1978
	Modelo de fluxo de processo	
	Gráfico processo da função	
Estrutura do processo	Blessing e Upton 1997	
Estrutura da transformação do processo	Hubka e Eder 1988	
Sequência de ação do usuário	Ulrich e Eppinger 2008	
Concepções de uso	Roozenburg and Eekels 1995	
<b>Engenharia Elétrica</b>	Linguagem de Representação Funcional da Causa (CFRL)	Iwasaki et al. 1993
	Máquina de estado finito	Belzer et al. 1975
	Diagramas blocos de função	van Alven 1964
	Árvore de função	Scheffer et al. 2006
	Tabela de função	Scheffer et al. 2006
	Rede Petri	Baumgarten 1996
	Diagrama de sequencia	ISO 2012
	Especificação (V)HDL	Dewey 2000, Bleck et al.1996
	Lista de característica	Kruchten 2004
<b>Software</b>	Diagrama fluxo de função	Bosman 1978
	IDEF-0 (Técnica de Projeto e Análise Estruturada)	Ross, 1977
	Divulgação acumulada	Schwaber 2007
	Diagrama de sequencia	Kruchten 2004, IABG 2006
	Storyboarding	Cooper 2007
	Descrições casos de uso	Kruchten 2004, IABG 2006
	Esquemas casos de uso	ISO 2012, IABG 2006, Kruchten 2004
Diagrama fluxo atividade casos de uso	Kruchten 2004, IABG 2006	

Fonte: Eisenbart, Gericke e Blessing (2017)

Quadro 8 (continuação) – Metodologias listadas por Eisenbart, Gericke e Blessing (2017).

<b>Sistema Mecatrônico</b>	Diagrama de fluxo e contexto	Salminen e Verho 1989
	Lista de eventos	Salminen e Verho 1989
	Árvore de significados de função	Buur 1990
	Árvore de função	Gausemeier et al. 2009, Salminen e Verho 1989
	Estrutura de função	Kajitani 1986 (in Buur 1990)
	Modelo híbrido função/solução	Möhringer e Gausemeier 2002
	Diagrama de comportamento inicial	Gausemeier et al. 2009
	Proposta de funções ativa	Buur 1990
	Diagrama transição de estado	Buur 1990, Salmine e Verho 1989
	Transformação de funções	Buur 1990

Fonte: Eisenbart, Gericke e Blessing (2017)

Além da relação de metodologias verificadas, Eisenbart, Gericke e Blessing (2017) compilam perspectivas da modelagem funcional conforme apresentado na Quadro 9.

Quadro 9 - Perspectivas centrais da modelagem funcional

<b>Estado</b>	Representação dos estados em que um sistema pode estar ou dos estados dos operadores inicial (entrada) e final (saída) de um processo de transformação
<b>Processos de transformação</b>	Representação dos processos executados pelos operadores de funções (produtos técnicos, <i>stakeholders</i> , etc.) que - a partir da perspectiva dos projetistas - fazem parte do sistema em desenvolvimento e que podem ou não resultar em uma mudança de estado do sistema ou de operadores. Neste caso, os processos técnicos são processos de transformação executados por sistemas técnicos (produtos técnicos, dispositivos, etc.), enquanto os processos humanos são executados por <i>stakeholders</i> envolvidos no cumprimento das funções (isto inclui explicitamente atividades humanas, por exemplo, durante a execução do serviço)
<b>Processos de interação</b>	Representação de processos de interação de <i>stakeholders</i> ou de outros sistemas técnicos, que a partir da perspectiva dos projetistas, não fazem parte de um sistema, com <i>stakeholders</i> ou sistemas técnicos, os quais fazem parte do sistema em consideração

Fonte: Eisenbart, Gericke e Blessing (2017)

Quadro 9 (continuação) - Perspectivas centrais da modelagem funcional

<b>Efeitos</b>	Representação dos efeitos físico-químicos necessários, que devem ser fornecidos para permitir e apoiar os processos de transformação que alteram o(s) estado(s) do operador e/ou do sistema em novo(s) estado(s)
<b>Casos de uso</b>	Representação de diferentes cenários de aplicação do sistema técnico para um propósito específico (por exemplo, cumprir um objetivo e alterar o estado do sistema ou do usuário); Geralmente está associado à interação de <i>stakeholders</i> ou a outro sistema técnico com o sistema técnico em desenvolvimento (processos de interação), que desencadeia, e exige, processos subsequentes a serem realizados pelo sistema
<b>Alocação de sistemas técnicos</b>	Representação da tarefa dos produtos técnicos, seus sub-sistemas ou qualquer outro tipo de meios técnicos (tangíveis ou intangíveis) que atuam como operadores de função na execução ou habilitação de uma ou mais funções; Esses meios técnicos podem ser parte do sistema em questão ou interagir com ele
<b>Alocação de stakeholder</b>	Representação das tarefas de diferentes partes interessadas (seres humanos ou outros seres), que podem ser usuários beneficiados de um sistema ou de operadores de função que contribuem para o sistema, e através da execução dos processos necessários, ou recursos

Fonte: Eisenbart, Gericke e Blessing (2017)

Além das pesquisas sobre modelagem funcional, os autores desenvolveram um método próprio para modelagem funcional interdisciplinar e que possui aplicação para produtos mecatrônicos. Em Eisenbart, Gericke e Blessing (2014) os autores apresentam o Integrated Function Modelling (IFM; Modelagem Funcional Integrada). A representação macro do método desenvolvido pelos autores pode ser visualizada na Figura 18, onde cada quadrante cinza é composto por uma matriz.

A aplicação do método é realizada utilizando como exemplo uma máquina de venda automática de café. Inicialmente os autores selecionam três casos de uso para o produto: preparar uma xícara de café, preparar água quente para chá e limpeza automática. (EISENBART, GERICKE E BLESSING, 2014)

Os autores então elaboram um diagrama de processos contendo as ações que serão realizadas internamente pelo produto

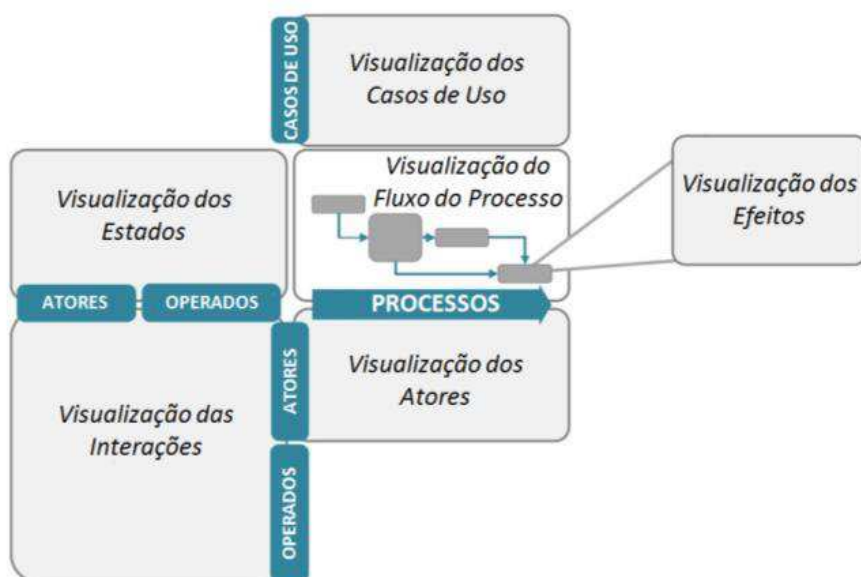
para alcançar os objetivos dos casos de uso, como: processo de pedido da bebida, processo de aquecimento da água, processo de moer grãos de café, processo de disposição da bebida na xícara, entre outros. Com a utilização de uma matriz é realizado o cruzamento de cada caso e uso com os processos que desenvolvidos e que serão utilizados para realizar o atendimento de cada caso de uso. (EISENBART, GERICKE E BLESSING, 2014)

Na sequência, com a utilização de outra matriz os processos são cruzados com os atores. Os autores consideram como atores o sistema de aquecimento, o moedor de grãos, a xícara, o controle de unidades, o usuário, o ambiente, entre outros. Nesta matriz é utilizada a letra “X” para indicar que o ator afeta o processo ou “O” para indicar que o ator é afetado pelo processo. (EISENBART, GERICKE E BLESSING, 2014)

A terceira matriz correlaciona novamente os atores e adiciona os operados, que neste contexto são considerados como operados a água, os grãos de café e a energia. Tanto atores como operados são cruzados com os estados em que se situam em cada processo. (EISENBART, GERICKE E BLESSING, 2014)

Por fim os atores e operados são cruzados entre si em uma outra matriz denotando a interação entres estes, sendo que na ligação entre estes é realizada uma descrição das ações que ocorrem e mencionados os processos onde ocorrem. (EISENBART, GERICKE E BLESSING, 2014)

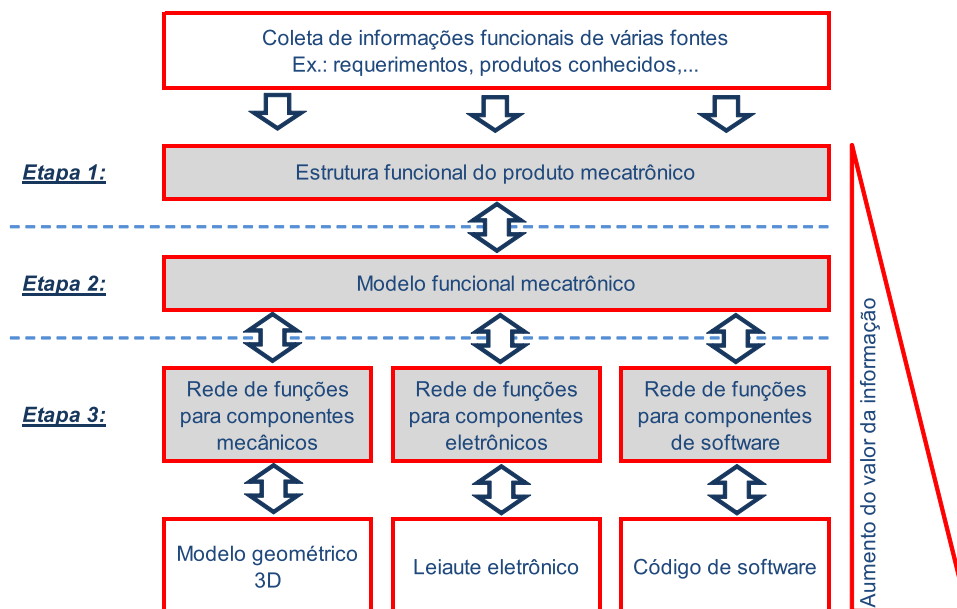
Figura 18 – Modelagem Funcional Integrada (IFM)



Fonte: Eisenbart, Gericke e Blessing (2014)

Na pesquisa elaborada por Eisenbart (2014) é verificada a indicação do trabalho desenvolvido por Eigner et al. (2010) o qual também realiza uma modelagem com base no UML para os produtos mecatrônicos. A abordagem realizada por Eigner et al. (2010) e apresentada na Figura 19, enfatiza, no início do fluxo, a busca por informações funcionais sobre o produto, com o objetivo de formar uma base de dados para suportar as demais atividades que devem ser realizadas para obter modelagem do produto.

Figura 19 – Fluxo de atividades proposto por Eigner et al (2010).



Fonte: Eigner et al. (2010)

## 2.2.4 Comparação entre as práticas e a modelagem funcional tradicional

As práticas apresentadas nos tópicos anteriores não realizam uma abordagem de aplicação da modelagem funcional tradicional em produtos mecatrônicos, de forma a evidenciar as relações entre as disciplinas envolvidas nestes produtos. São apresentadas outras formas de representação das funções como a linguagem UML e SysML, sendo que não há um direcionamento em como trabalhar as diferentes funções contidas em um produto mecatrônico de forma a obter um diagrama que permita a equipe de projeto delimitar as responsabilidades vinculadas a área de

mecânica, incorporando responsabilidades da área de elétrica e área de software.

### **2.2.5 Classificação de Produtos Mecatrônicos**

Considerando o contexto de aplicação da pesquisa e visando auxiliar na condução do projeto e na avaliação dos resultados, foi considerada uma análise teórica da classificação dos produtos mecatrônicos, onde de acordo com Bishop (2005) a primeira classificação para produtos mecatrônicos foi apresentada no final da década de 1970 pela Sociedade Japonesa para a Promoção da Indústria de Máquinas (JSPMI - Japan Society for the Promotion of Machine Industry). Esta classificação realiza um agrupamento dos produtos mecatrônicos e quatro categorias:

- Categoria 1: representada principalmente por produtos mecânicos com sistemas eletrônicos incorporados que objetivam melhorar a funcionalidade. Entre os exemplos são incluídos máquinas ferramenta com controle numérico e drives de velocidade variável em máquinas de manufatura.
- Categoria 2: é direcionada para os sistemas mecânicos tradicionais compostos por dispositivos internos significativamente atualizados que incorporam sistemas eletrônicos, sendo que as interfaces de usuários externos não são alteradas. Exemplos incluem máquina de costura moderna e sistemas de fabricação automatizados.
- Categoria 3: nesta categoria são citados os sistemas que mantêm a funcionalidade do sistema mecânico tradicional, sendo que os mecanismos internos são substituídos por eletrônicos. Como exemplo o relógio digital, e com direcionamento para a mecatrônica de precisão, liderada pela indústria de automação e setor de robótica.
- Categoria 4: representada por produtos projetados com tecnologias mecânicas e eletrônicas através de integração sinérgica. Exemplos incluem fotocopiadoras, lavadoras e secadoras inteligentes, fogões e fornos automáticos, e os sistemas de imagens médicas

Partindo para um contexto de sistemas, Rzevski (2003) realiza uma classificação dos sistemas mecatrônicos em função

das características comportamentais. O autor trabalha com a 3 classificações a seguir:

- Sistemas mecatrônicos automáticos: considerados os mais comuns, são caracterizados pela capacidade de manusear materiais e energia, comunicação com o ambiente onde operam e a capacidade de se auto regular devido a existência de respostas pré programadas ao identificar mudanças no ambiente.
- Sistemas mecatrônicos inteligentes: são capazes de atingir objetivos em condições de incerteza. O projeto destes sistemas permite a resposta à mudanças ocorridas no ambiente de operação sem que haja necessidade de reprogramação.
- Redes mecatrônicas inteligentes: são caracterizados pela capacidade de decidir o próprio comportamento por meio da negociação das suas unidades constituintes, sendo estas unidades constituída por um sistema mecatrônico inteligente. Como diferenciação, neste tipo de sistema, há a capacidade de melhorar o desempenho com a auto organização.



### 3. METODOLOGIA

De acordo com Lacerda et al. (2013) o reconhecimento de uma pesquisa como sólida e relevante no campo acadêmico e sociedade, exige que esta seja desenvolvida com rigor e que seja passível de debate e verificação. Neste sentido, este capítulo apresenta os procedimentos utilizados para atingir os objetivos propostos no trabalho.

#### 3.1 DESIGN SCIENCE RESEARCH

Simon (1996) contextualiza a ciência no âmbito natural e direciona esta para uma série de conhecimentos sobre uma classe de objetos e fenômenos do mundo. Esta ciência tem como foco o estudo das características, comportamentos e interações no meio natural, onde disciplinas como biologia e química fazem a pesquisa e explicação de fenômenos naturais, enquanto as disciplinas de sociologia e economia estão direcionadas para o meio social. Em uma outra abordagem o autor indica a existência de estudos sobre o universo artificial, onde as ciências do artificial fazem a concepção de artefatos que realizem objetivos. As ciências do artificial estão relacionadas com as escolas de engenharia no contexto de criar e projetar artefatos com propriedades específicas e atinjam objetivos previamente definidos.

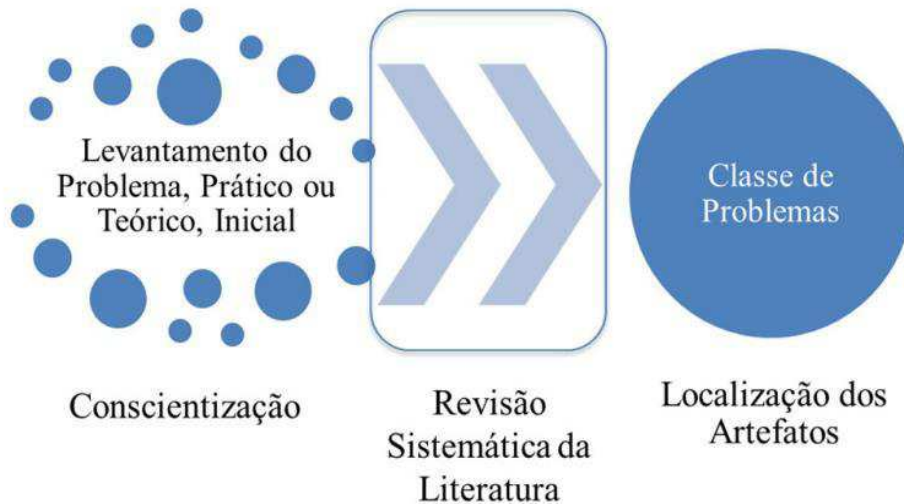
No sentido de criação de uma ciência que seja dedicada em propor como construir ou projetar artefatos que possuam propriedades específicas, Simon (1996) indica o surgimento de uma ciência de projeto (Design Science - DS). Lacerda et al. (2013) complementam que a DS é responsável por conceber e validar sistemas que ainda não existem para melhorar as situações existentes.

Para Romme (2003) a concepção de conhecimento e realização de pesquisas científicas relacionados com as organizações deve envolver a DS e a Design Science Research - DSR. Chakrabarti (2010) interpreta a DS como sendo a base epistemológica e a DSR sendo o método que possibilita a elaboração do conhecimento.

Com base na pesquisa desenvolvida por Lacerda et al. (2013), o avanço do conhecimento em uma determinada área parte da análise dos problemas e soluções que possam

compartilhar características comuns em uma DS. Surge então o termo classe de problemas, que é definido como uma organização de um conjunto de problemas que contenha artefatos úteis para a ação nas organizações. A Figura 20 apresentada pelos autores permite uma visualização gráfica da definição dada as classes de problemas.

Figura 20 - Lógica para construção das classe de problemas.



Fonte: Lacerda et al. (2013)

Os autores complementam que a partir da identificação de um problema, surge a necessidade de conscientização acerca do mesmo e então realizar uma revisão sistemática da literatura (RSL) afim de relacionar soluções empíricas já desenvolvidas. A RSL direciona para a busca de artefatos que abordam soluções para o problema em questão. Com a exposição e definição das classes de problemas e dos artefatos pode ser iniciada a condução da Design Science Research. (LACERDA et al., 2013)

Conforme Peffers et al. (2007) o processo de desenvolvimento de uma pesquisa envolvendo a DSR é caracterizado por seis atividades em sequência que são apresentadas na Figura 21.

Figura 21 - Condução da Design Science Research.



Fonte: Adaptado de Peffers et al. (2007)

As etapas expostas por Peffers et al. (2007) são listadas a seguir:

- Na atividade de Identificação do Problema o pesquisador deve desenvolver a compreensão do problema e a importância da sua solução. Nesta etapa também é verificado como a definição do problema pode direcionar para o desenvolvimento de um artefato que possa fornecer uma solução efetiva.
- Na atividade de Definição dos Resultados Esperados devem ser definidos os objetivos de uma solução, tomando por base a definição do problema e o conhecimento, e vislumbrando um resultado possível e viável. Os objetivos podem ser quantitativos, como a análise de parâmetros e comparações entre uma solução desejável e soluções já existentes, ou qualitativos como uma descrição de como um novo artefato pode apoiar a solução de problemas ainda não abordados.
- A atividade de Projeto e Desenvolvimento é direcionada para a criação do artefato. Estes artefatos são construções, modelos ou métodos. Conceitualmente, um artefato pode ser qualquer objeto projetado que possua contribuição para a pesquisa incorporada no projeto. Esta atividade inclui determinar a funcionalidade desejada do artefato e sua arquitetura e, em seguida, criar o artefato real.
- A Demonstração possibilita o uso do artefato para resolver uma ou mais instâncias do problema. Isto poderia envolver o seu uso na experimentação, simulação, estudo de caso, prova, ou outra atividade apropriada.
- Na Avaliação deve ser observado o quanto o artefato suporta a solução para o problema. Nesta atividade é realizada uma comparação dos objetivos de uma solução com os resultados observados na demonstração. Requer conhecimentos de métricas e técnicas de análise relevantes. Dependendo da natureza do local do problema e do artefato, a avaliação pode assumir várias formas. No final

desta atividade o pesquisador pode retornar a atividade de projeto e desenvolvimento para tentar melhorar a eficácia do artefato ou para continuar a comunicação e deixar mais melhorias para projetos subsequentes.

- A última atividade (Comunicação) consiste em disseminar o problema e sua importância, o artefato, sua utilidade e novidade, o rigor de seu projeto e sua eficácia para pesquisadores e outros públicos relevantes. Em pesquisas acadêmicas, os pesquisadores podem usar a estrutura desse processo para estruturar o artigo, assim como a estrutura nominal de um processo de pesquisa empírica (definição de problemas, revisão de literatura, desenvolvimento de hipóteses, coleta de dados, análise, resultados, discussão e conclusão).

### 3.2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O procedimento metodológico para o desenvolvimento deste trabalho está fundamentado na DSR tal qual pode ser visualizado na Figura 22.

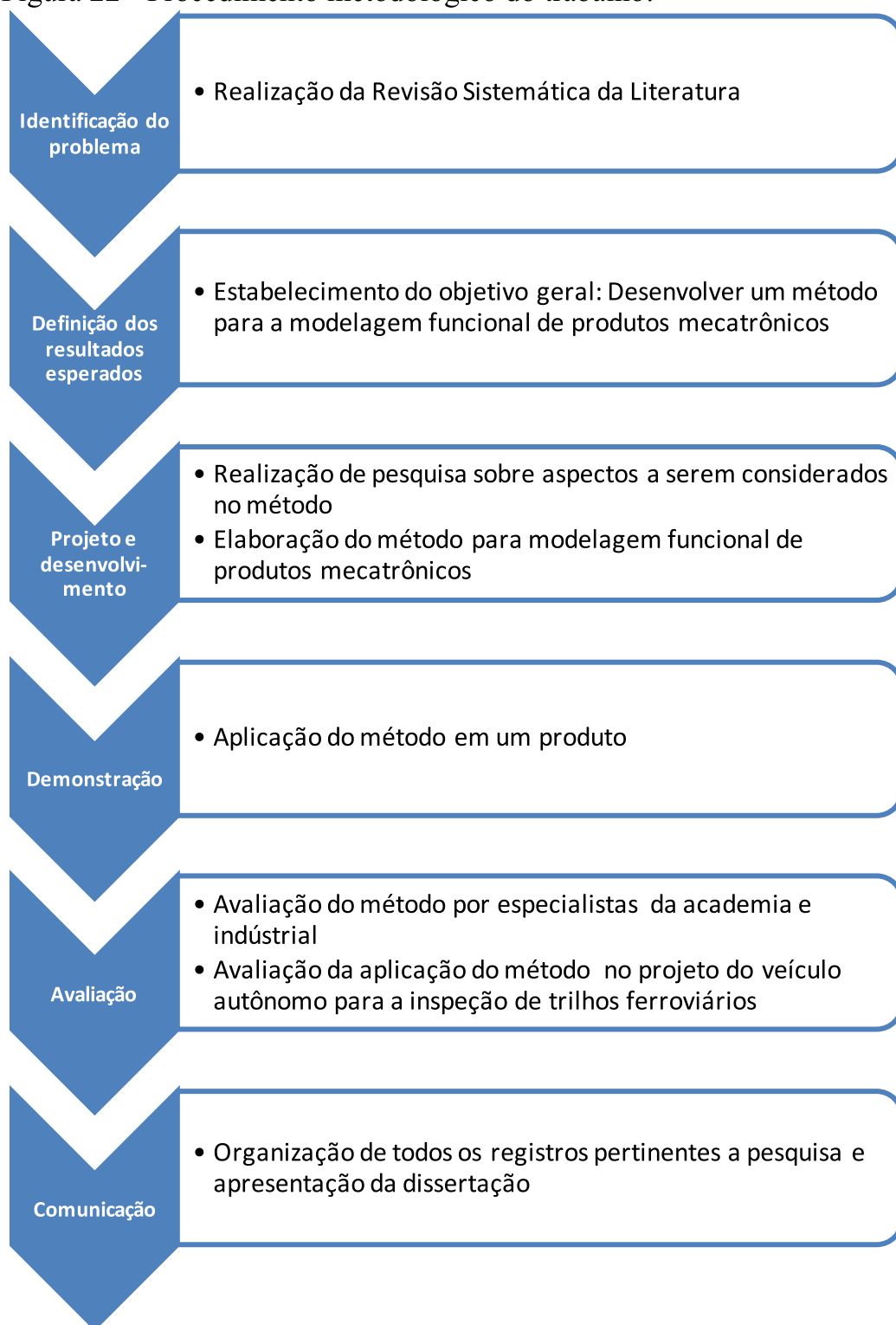
Para a Identificação e Compreensão do problema é analisado o estado da arte com o auxílio da Revisão Sistemática da Literatura que é apresentada no capítulo 2 deste trabalho. A partir da evolução no conhecimento e entendimento dos aspectos que envolvem o desenvolvimento da modelagem funcional para produtos mecatrônicos é delineado o objetivo do trabalho que foi apresentado no capítulo 1.

O Projeto e Desenvolvimento do trabalho considera a compilação dos fatores que devem ser considerados em um método de modelagem funcional direcionando uma importância maior para interligação e representação das diferentes disciplinas envolvidas nos produtos mecatrônicos. Esta compilação serve como fundamentação para elaboração do artefato denominado, neste contexto, como método. Esta fase ainda é composta por simulações do artefato e a correlação com as práticas identificadas na RSL.

A Demonstração do artefato é direcionada para aplicação no desenvolvimento do projeto de um veículo autônomo para a inspeção de trilhos ferroviários. A determinação do projeto

considera a complexidade do produto e atendimento a premissa de ser um produto mecatrônico onde, previamente, a modelagem funcional convencional apresentou dificuldades para a representação do produto.

Figura 22 - Procedimento metodológico do trabalho.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Realizada a aplicação do trabalho parte-se a Avaliação dos resultados obtidos com o uso do método e a Avaliação da usabilidade que este oferece no decorrer das fases de elaboração da modelagem funcional. Nesta fase são analisados se as etapas do método são eficazes e se há a necessidade de ajustes no desenvolvimento para então reavaliar o método. A Avaliação também considera a generalidade do método no contexto de amplitude para os produtos mecatrônicos.

Os tópicos relacionados na Avaliação juntamente com as informações desenvolvidas em todo o estudo são registrados no trabalho e servem como Comunicação do argumento para o atendimento do objetivo geral e objetivos específicos e base para outros estudos.

## 4. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO PARA MODELAGEM FUNCIONAL DE PRODUTOS MECATRÔNICOS

Usualmente a modelagem funcional é realizada na fase do projeto conceitual do processo de desenvolvimento de produtos, o que comporta a elaboração de um diagrama que represente o produto no ponto de vista das funções, além de permitir uma revisão das informações obtidas durante o projeto informacional, e o direcionamento para a validação do projeto conceitual. Este capítulo contempla o desenvolvimento detalhado do Método de Modelagem Funcional proposto, sendo inicialmente realizada uma apresentação dos conceitos utilizados no desenvolvimento e na sequência a apresentação e detalhamento das fases e etapas que compõem o método.

### 4.1 GLOSSÁRIO PARA O DESENVOLVIMENTO DA PROPOSTA

Para a nomenclatura da proposta inserida neste trabalho são considerados os conceitos apresentados por Fonseca (2000):

- **Metodologia:** permite abordar o objeto projeto alinhando o estabelecimento dos “que”, “quando”, “com que” e “como”. Em um aspecto mais amplo, a metodologia de projeto abarca o estudo de todos os mecanismos que facilitam, sistematicamente, a abordagem do projeto;
- **Método:** pode ser traduzido em “como”, pois considera os procedimentos mais adequados para alcançar os objetivos propostos, na área de projeto;
- **Técnica:** os modelos e ferramentas de trabalho desenvolvidos para o trabalho na atividade de projeto são técnicas, ou termos diretos, são os “com que”;
- **Modelo:** são utilizados por engenheiros e cientistas na simulação e explicação do mundo real;
- **Ferramenta:** objeto ou sistema de objetos mais para obter os fins que se perseguem.

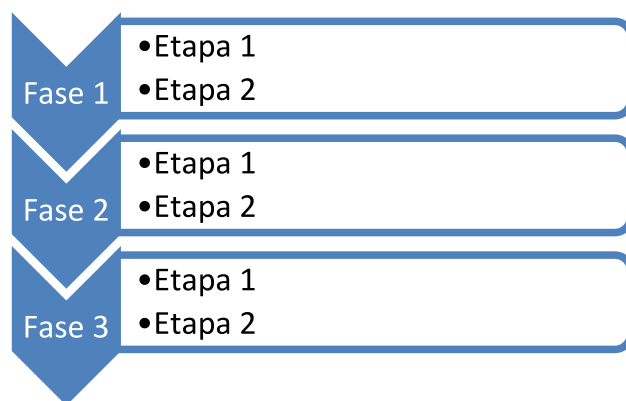
Realizando um alinhamento com os conceitos expostos por Fonseca (2000), considera-se a proposta do trabalho como um “método”.

Para a elaboração do método para modelagem funcional de produtos mecatrônicos são considerados os três níveis de abstração apresentados por Maribondo (2000):

- **Fases:** correspondem aos estágios mais abrangentes do processo de projeto. Direcionam para um grau elevado grau de abstração para o desenvolvimento do problema devido a abrangência de seus objetivos. Podem ser identificadas como as missões principais a serem desenvolvidas na busca das soluções mais adequadas à demanda inicial;

**Etapas:** correspondem cada um dos estágios em que se pode dividir o desenvolvimento de uma fase. Direcionam para um nível de abstração menor no desenvolvimento do problema de projeto quando comparadas com os estágios das fases e com isso permitem uma melhor visualização do problema em estudo. Em resumo, correspondem ao desdobramento das missões principais em ações realizáveis em busca das soluções mais adequadas à demanda inicial. Para o método proposto, a simbologia relacionada com as fases é apresentada na Figura 23;

Figura 23 – Simbologia Fases e Etapas.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

- **Tarefas:** correspondem aos estágios em que se pode dividir o desenvolvimento de uma etapa. Podem ser utilizadas com o objetivo de reduzir o nível de complexidade das informações contidas nos estágios das etapas, e com isso auxilia a simplificar o desenvolvimento do problema de projeto. Correspondem



as ações específicas a serem desenvolvidas na busca das soluções mais adequadas à demanda inicial. Para o método proposto, a simbologia relacionada com as etapas é apresentada na Figura 23.

Além dos níveis acima, também devem ser considerados os seguintes termos para compreensão do modelo proposto:

- **Diagrama:** Representação gráfica de certos fatos, fenômenos ou relações científicas, sociais, econômicas ou mecânicas por meio de figuras geométricas (pontos, linhas, áreas etc.); gráfico, esquema (DIAGRAMA, 2017)
- **Sistema:** Inter-relação de unidades, partes etc., responsáveis pelo funcionamento de uma estrutura organizada. (SISTEMA, 2017)
- **Atividade:** Conjunto de trabalhos, ações ou funções específicas que se fazem com um fim determinado. (ATIVIDADE, 2017)
- **Comportamento:** Forma de proceder. (COMPORTAMENTO, 2017)
- **Entidade:** Aquilo que constitui a essência de um ser ou de uma coisa. (ENTIDADE, 2017)

## 4.2 MÉTODO DE MODELAGEM FUNCIONAL DE PRODUTOS MECATRÔNICOS

O método desenvolvido para elaborar a modelagem funcional de produtos mecatrônicos é representado pela Figura 24, sendo que cada atividade relacionada ao método está apresentada na sequência deste capítulo.

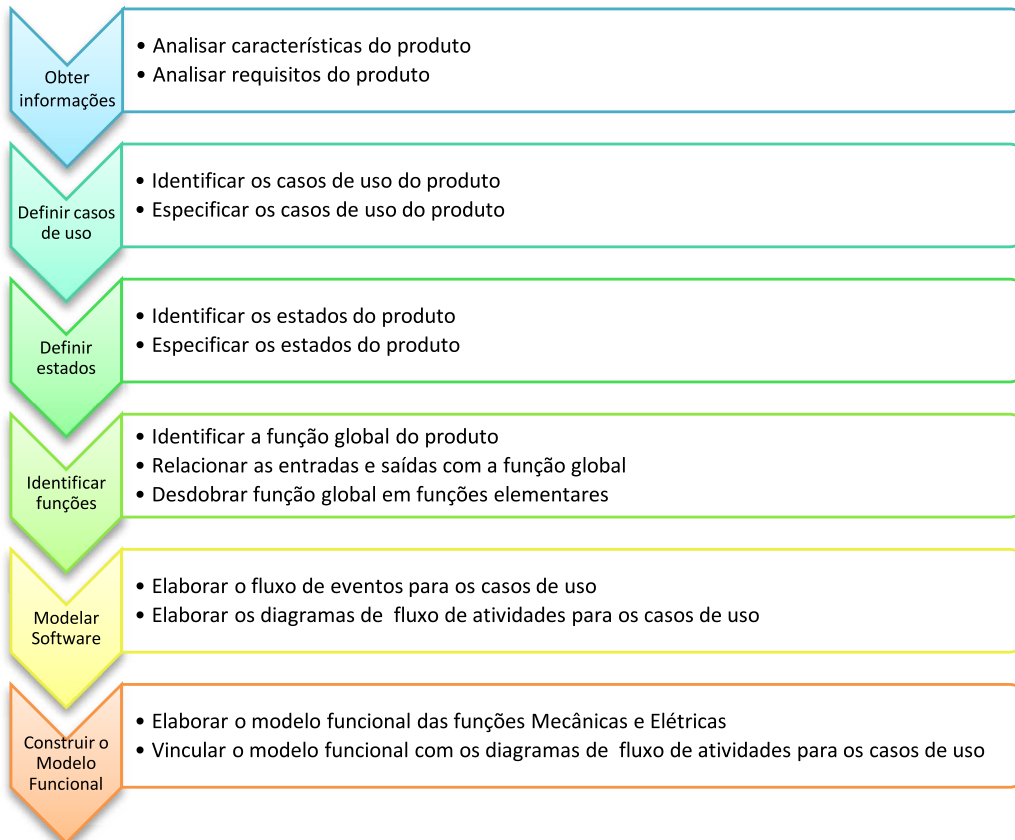
### 4.2.1 Fase 1 – Obter Informações

Para iniciar a modelagem funcional de um produto mecatrônico é necessário conhecer e entender os requisitos técnicos deste. Estas informações podem ser resultantes da aplicação de outras ferramentas na fase do Projeto Informacional do produto.

Propõe-se fazer tal qual apresentado por Eigner et al. (2010) na Figura 19, onde início da modelagem funcional se dá

com a coleta de informações funcionais de várias fontes, onde se destacam produtos já conhecidos e requisitos identificados nas etapas anteriores do projeto.

Figura 24 - Procedimento metodológico proposto.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Reforçando as informações sugeridas por Eigner et al. (2010), na fase Informações Sobre o Produto devem ser considerados também o escopo do produto e as diretrizes do produto.

Nesta fase deve ser considerada a etapa de análise das características e requisitos do produto para aumentar o entendimento do projeto antes de dar seguimento nas fases de desenvolvimento do modelo funcional.

#### 4.2.2 Fase 2 – Definir Casos de Uso

Nesta fase devem ser identificados os casos de uso para os quais o produto se destina. Esta análise permite aprofundar o conhecimento sobre o produto a ser modelado funcionalmente e

possibilita visualizar as ocorrências do mesmo processo em diferentes casos de uso.

Para Eisenbart et al. (2017) a exibição dos diferentes casos de uso indica o envolvimento de processos individuais dentro destes. As dependências entre processos que impedem sua execução paralela ou sequencial, podem prejudicar a operabilidade dos casos de uso em que estes estão envolvidos. A visualização tem como objetivo suportar a análise destas dependências.

Para ilustrar a identificação dos casos de uso em um produto mecatrônico, Eisenbart et al. (2014) utiliza como exemplo uma máquina de venda automática de café, onde são considerados como casos de uso a preparação de uma xícara de cappuccino, a preparação de água quente para chá, e a limpeza automática do sistema interno do equipamento.

Direcionando para o Método de Modelagem Funcional de Produtos Mecatrônicos, é sugerido identificar os casos de uso que estão envolvidos com o produto e em uma etapa subsequente realizar uma especificação (parágrafo explicativo) de cada caso de uso, de forma a contextualizar as informações sobre cada caso. O método ainda considera como casos de uso todas as operações realizadas pelo software de controle mesmo que não estejam diretamente relacionadas com as funções das áreas de elétrica e mecânica, como exemplo as operações de parametrização. Para estas etapas é sugerido desenvolver uma lista conforme modelo apresentado no Quadro 10.

Quadro 10 – Modelo de Lista de Casos de Uso.

<b>Casos de uso do produto</b>	<b>Especificação do caso de uso</b>
Caso de uso A	Parágrafo explicativo sobre o caso de uso A
Caso de uso B	Parágrafo explicativo sobre o caso de uso B
Caso de uso C	Parágrafo explicativo sobre o caso de uso C
Caso de uso D	Parágrafo explicativo sobre o caso de uso D

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

### **4.2.3 Fase 3 – Definir Estados**

Em complemento a fase relacionada com os casos de uso, na fase Definir Estados devem ser identificados os estados

que o produto deve apresentar, de modo a desenvolver o entendimento sobre o comportamento do produto.

Conforme apresentado por Eisenbart et al. (2017) esta análise pode representar os estados em que um sistema pode estar ou então representar os estados dos operados de um processo de transformação (inicial e final).

Direcionando para as etapas do Método de Modelagem Funcional de Produtos Mecatrônicos, a identificação dos estados deve estar voltada para representar cada estado que produto pode ou deve apresentar. Em uma visualização simplificada, um produto pode apresentar o estado ligado e o estado desligado, sendo que devem ser verificadas possíveis variações como um estado de Início de Operação, onde algumas atividades são executadas pelo sistema para permitir que o produto atinja o estado de ligado ou em operação total. Para as etapas de identificar e especificar os casos de uso, é sugerido desenvolver uma lista conforme modelo apresentado no Quadro 11.

Quadro 11 – Modelo de Lista de Estados.

<b>Estados do produto</b>	<b>Especificação do estado</b>
Estado X	Parágrafo explicativo sobre o estado A
Estado Y	Parágrafo explicativo sobre o estado B
Estado Z	Parágrafo explicativo sobre o estado C
Estado W	Parágrafo explicativo sobre o estado D

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

#### **4.2.4 Fase 4 – Identificar Funções**

Para melhor entendimento da modelagem funcional, é necessária uma explanação sobre o conceito de função vinculado ao desenvolvimento de produtos. Neste sentido pode ser considerada a revisão realizada por Eisenbart et al (2017), onde os autores correlacionam as definições em três seguimentos:

- Função como a capacidade de um sistema em alcançar um objetivo ou cumprir uma determinada tarefa mostrando algum comportamento;
- Função como uma transformação ou conversão requerida, ou mudança de estado de operadores distintos, tendo correlações típicas com especificações de material, energia ou sinais;

- Função traduzida como sendo igual ou derivação do objetivo de um sistema, em termos do cumprimento de um objetivo.

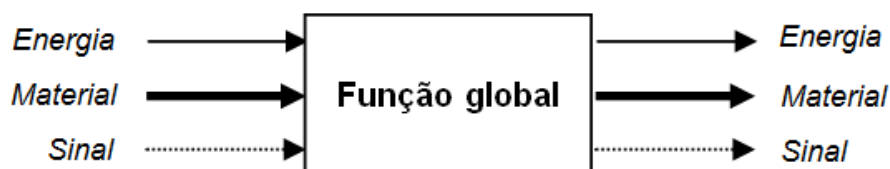
Como fechamento da revisão, Eisenbart et al (2017) consideram função como sendo algo intencionalmente designado dentro de um sistema para completar uma tarefa em particular.

Seguindo Pahl et al. (2007), para o propósito de descrever e resolver problemas de projeto, é correto aplicar o termo função como entradas e saídas relacionadas a um sistema, cujo propósito é realizar uma tarefa. Os autores ainda realizam uma derivação dos tipos de funções que podem compor o desenvolvimento de um produto, onde é destacada a Função Global e as Funções Elementares. Todas as funções devem ser representadas por um verbo no infinitivo denotando a ação a ser realizada, adicionados de um ou mais substantivos.

Considerando a fase Identificar Funções do método proposto, tem-se como uma das etapas a identificação da Função Global do produto. A partir das informações obtidas sobre o produto deve ser identificada qual a Função Global, que o produto deve apresentar. Conforme citado no capítulo 1, esta função pode ser traduzida como o objetivo principal do produto, sendo o que este deve entregar para o usuário.

Após a definição da Função Global tem-se a etapa de identificação das entradas e saídas que estão relacionadas com o produto. Conforme Pahl et al. (2007) o fluxo das entradas e saídas pode ser classificado em Energia, Material e Sinal, conforme apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Demonstração da Função Global com as Entradas e Saídas.



Fonte: Adaptado de Rozenfeld et al. (2006)

Realizada a identificação da Função Global e das entradas e saídas que estão relacionadas ao produto, segue-se para a etapa de desdobramento da Função Global em Funções Elementares.

Para que o produto esteja apto a cumprir a função global, uma série de outras ações devem ser realizadas pelo sistema.

Estas podem ser identificadas como Funções Elementares e devem ser listadas de modo a manter o alinhamento com as informações e requisitos iniciais do produto. O desdobramento pode ser realizado até um nível de abstração desejado, mas para o método é proposto realizar o desdobramento até uma função que possa ser vinculada com um objeto primitivo conforme o trabalho desenvolvido por Wu, Leu e Liu (2010). Considerando a característica interdisciplinar dos produtos mecatrônicos é sugerido iniciar o desdobramento com as funções do campo da mecânica, seguido pelo campo da elétrica e por final o campo de software.

Como mencionado anteriormente já existe uma consolidação para a aplicação da modelagem funcional para produtos mecânicos. Para o método proposto, considera-se que as funções elétricas também podem ser visualizadas com a mesma facilidade das funções mecânicas. Tal pressuposto está de acordo com a orientação de Gausemeier et al. (2009) onde as funções do campo da elétrica e eletrônica podem ser relacionadas como sensores ou atuadores.

Para o campo de software verifica-se que não é possível realizar o desdobramento no mesmo grau de abstração da mecânica e elétrica, visto que não se pode identificar um objeto primitivo no campo de software. Neste sentido é sugerido que nesta etapa seja realizada uma análise prévia das funções que deverão ser exercidas para o controle do produto, sendo que a fase de software tem como objetivo consolidar as informações e desenvolver a interface para com as demais disciplinas envolvidas.

Para facilitar a análise das Funções Elementares, também é sugerido o desenvolvimento de uma lista contendo as funções e uma respectiva classificação da disciplina que possui relação com cada função. O modelo desta lista pode ser visualizado no Quadro 12.

#### **4.2.5 Fase 5 – Modelar Software**

Nesta fase são identificadas e desenvolvidas as informações necessárias para realizar o controle do produto, sendo considerada a representação deste controle com o software. A representação desta fase deve possibilitar a integração do

modelo tradicional de modelagem funcional abordada por Pahl et al. (2007) evidenciando a lógica de controle do produto.

O desenvolvimento e nomenclatura desta fase, considera a convenção das três disciplinas que compõem os produtos mecatrônicos alinhado com os trabalhos desenvolvidos por Walters, Bradley e Dorey (2000), Fotso, Wasgin e Rettberg (2012), Wu, Leu e Liu (2010) e Eisenbart et al (2017). Neste sentido, além das disciplinas de mecânica e elétrica, é considerado como terceira composição dos produtos mecatrônicos, o termo software.

Quadro 12 – Modelo de Lista de Funções Elementares.

<b>Funções Elementares do produto</b>	<b>Disciplina</b>
Função I	Mecânica
Função II	Mecânica
Função III	Mecânica
Função IV	Elétrica
Função V	Elétrica
Função VI	Elétrica
Função VII	Software
Função VIII	Software
Função IX	Software

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

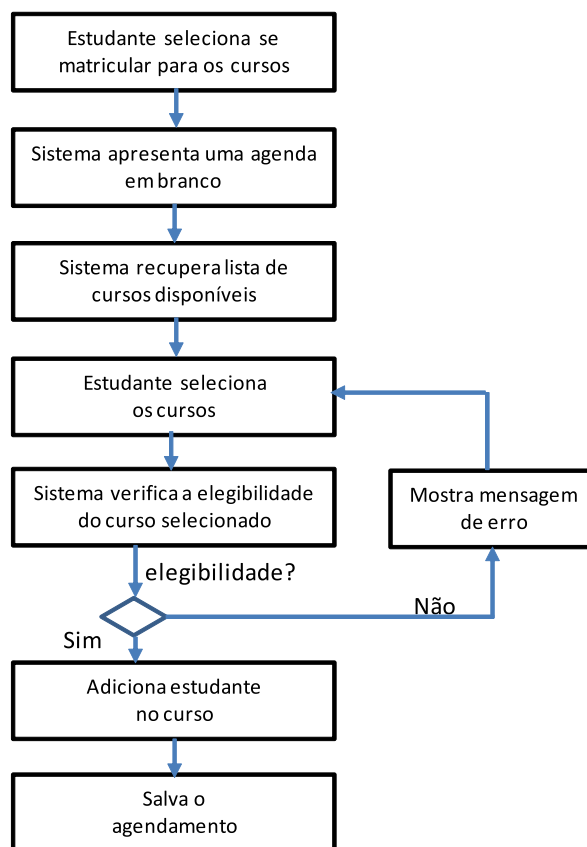
Eisenbart (2014) relaciona algumas representações que podem ser aplicadas para o desenvolvimento do software e entre estas há um direcionamento para o Rational Unified Process (RUP; Processo Racional Unificado) desenvolvido por Kroll e Kruchten (2003).

Alinhado com o RUP, a fase de software do Método de Modelagem Funcional de Produtos Mecatrônicos proposto considera inicialmente a etapa de elaboração do fluxo de eventos para cada caso de uso identificado na Fase 2 – Casos de Uso, sendo que estes devem estar sequenciados para que o software realize o controle das funções físicas do produto. Os fluxos de eventos devem ser descritos na forma de tópicos explicativos, indicando as atividades que são realizadas pelo software a cada evento. Na etapa de elaboração do fluxo de eventos, devem ser considerados os estados do produto, indicando por exemplo no

início do diagrama se o sistema já se encontra em operação ou está desligado.

Após a elaboração dos fluxos de eventos para cada caso de uso, deve ser realizada a etapa de elaboração dos diagramas de fluxo de atividades para cada caso de uso. A Figura 26 apresenta um diagrama de fluxo de atividades conforme exemplo abordado por Kroll e Kruchten (2003) considerando o desenvolvimento de um software para matrícula de alunos em uma determinada instituição, sendo que entre os casos de uso identificados para o software, é realizado o detalhamento do caso de uso Inscrição para os cursos.

Figura 26 – Diagrama Fluxo de atividades Inscrição.



Fonte: Adaptado de Eisenbart (2014)

O fato do desenvolvimento do software estar posicionado após a listagem das funções no Método de Modelagem Funcional de Produtos Mecatrônicos é proposital, mesmo este estando diretamente vinculado com os casos de uso. Esta sequência visa permitir a visualização de todas as Funções Elementares no desenvolvimento do software e garantir que as funções



elementares do campo de software sejam consideradas nos diagramas de fluxo de atividades.

Direcionando para o Método de Modelagem Funcional de Produtos Mecatrônicos proposto, é sugerido que os diagramas de fluxo de atividades sejam elaborados na horizontal para facilitar a interface com as funções dos campos da mecânica e elétrica na fase de construção do modelo funcional.

#### **4.2.6 Fase 6 - Construir o Modelo Funcional**

Para iniciar a fase Construir o Modelo Funcional é sugerido realizar a etapa de elaboração do modelo, primeiramente para as funções dos campos da mecânica e da elétrica. Conforme ilustrado na Figura 27, os campos são divididos horizontalmente, sendo que as funções mecânicas ocupam a primeira linha do modelo seguido pelas funções do campo da elétrica. Este modelo inicial já deve contemplar as entradas e saídas identificadas no item 4.2.4.

Os campos da mecânica e da elétrica podem apresentar algumas funções que não possuem interações com as demais, como por exemplo, funções de suporte da estrutura física ou funções de proteção das partes físicas do produto.

Para o Método de Modelagem Funcional de Produtos Mecatrônicos proposto, considera-se que as funções mecânicas e elétricas são constantes, portanto o arranjo definido nesta etapa será mantido até a apresentação do modelo funcional final, independente das variações de estados ou casos de uso do produto.

Após elaborar o modelo funcional para as funções dos campos da mecânica e da elétrica pode ser realizada a etapa de vincular o modelo funcional com os diagramas de fluxo de atividades para os casos de uso conforme apresentado na Figura 28.

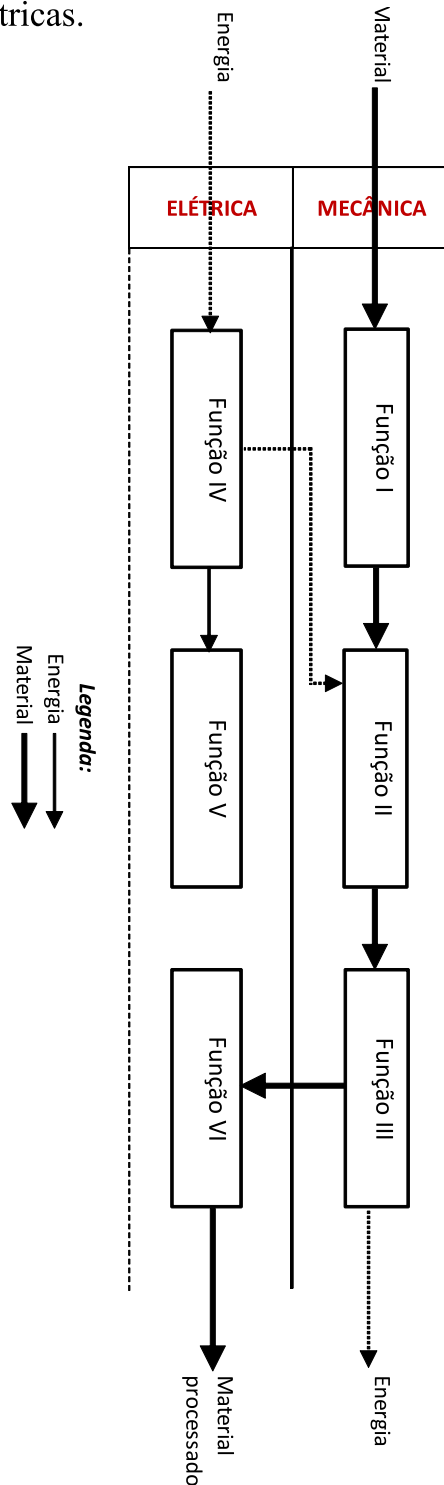
A apresentação do modelo funcional conforme ilustrado na Figura 28 visa fornecer uma visualização sistêmica do produto de forma ampla e consistente para aumentar o entendimento nas fases subsequentes do projeto do produto.

Seguindo a organização das disciplinas horizontalmente, a proposta orienta a apresentação do software, na forma dos casos de uso, em linhas abaixo das funções mecânicas e elétricas de forma que os diagramas de fluxo de atividades estejam

interagindo com as funções das duas linhas iniciais conforme o comportamento esperado para o produto.

O posicionamento do campo da elétrica entre os campos da mecânica e software denota que a disciplina da elétrica realiza uma interface entre as outras, realizando a interface entre o controle e ações físicas do produto.

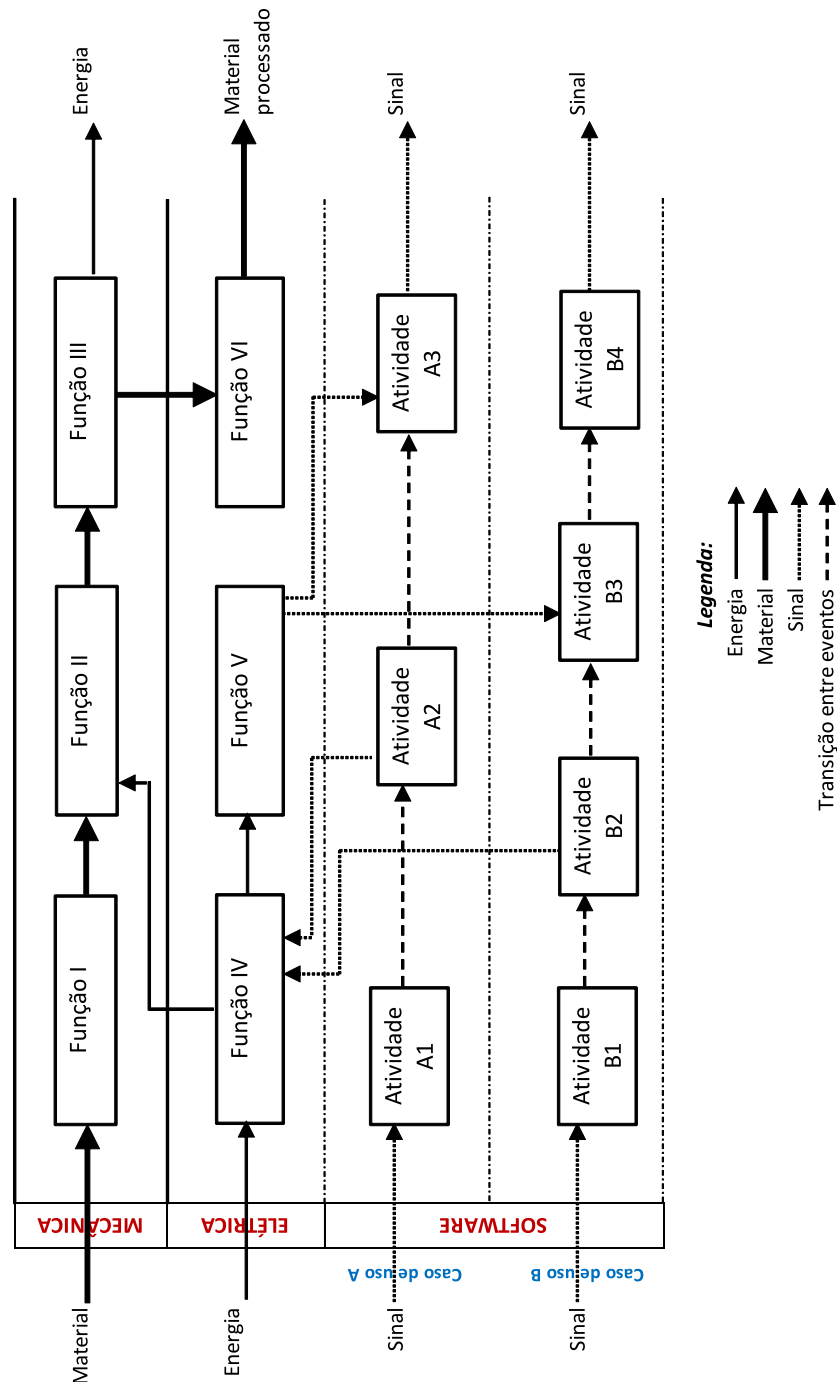
Figura 27 – Estrutura para exemplo do Modelo Funcional das Funções Mecânicas e Elétricas.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Na modelagem proposta, o usuário do produto ou outros sistemas que poderão ser integrados ao produto são nomeados como entidade e encontram-se fora das fronteiras do modelo funcional, sendo que os sinais iniciais de controle representados no início dos casos de uso do software são originados por estas entidades.

Figura 28 – Estrutura para exemplo do Modelo Funcional Proposto.

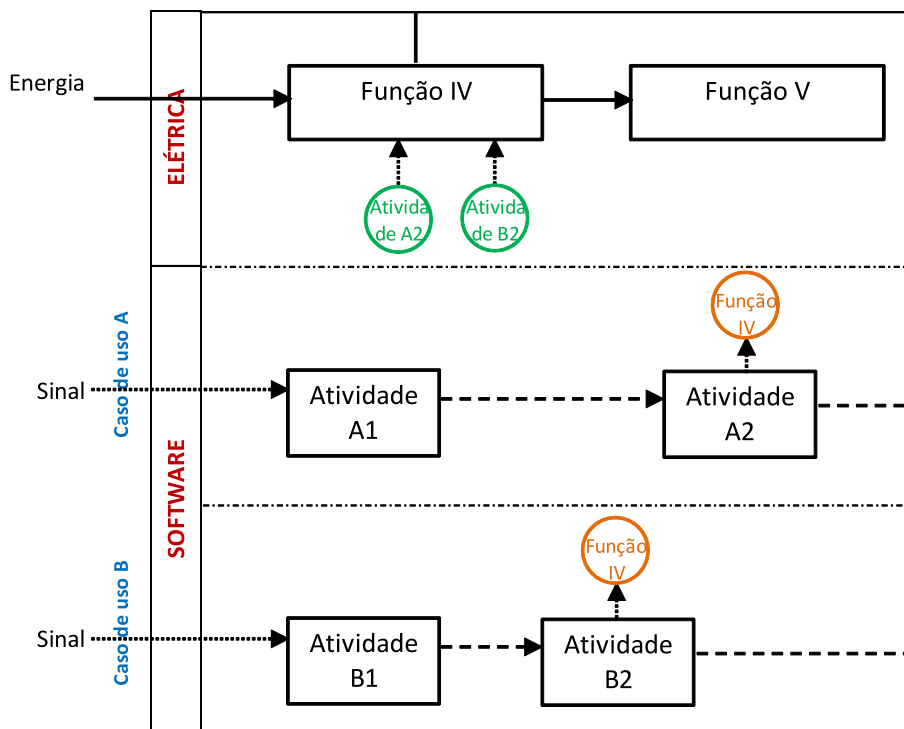


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

As entradas e saídas apresentadas na Figura 28 são apenas ilustrativas, sendo que o método proposto permite uma flexibilização destes fluxos. Visualiza-se que o fluxo de material e energia pode apresentar entradas e saídas tanto no campo da mecânica como da elétrica. Já para o fluxo de sinal, considera-se a possibilidade que as entradas e saídas ocorram nos campos de mecânica, elétrica e software, havendo um direcionamento de entradas de sinais no campo de software indicando o controle sobre as demais funções.

O Método de Modelagem Funcional de Produtos Mecatrônicos considera também uma flexibilidade para representação dos fluxos entre as disciplinas, levando em consideração a complexidade de interações e a quantidade de casos de usos que podem ocorrer nos produtos mecatrônicos. Neste sentido, é possível representar os fluxos utilizando os conectores da simbologia de fluxogramas, conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29 – Representação dos fluxos com linhas interrompidas.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Conforme apresentado na Figura 29, as Atividades A2 e B2 localizadas no campo de software poderiam estar ligadas a Função IV do campo de elétrica por meio de linhas, mas considerando a quantidade de ligações que podem existir entre os campos, o método propõe uma representação com o uso de círculos, considerando emissor e receptor, onde dentro dos círculos é indicado a função de destino no campo de elétrica e mecânica para saídas das caixas de atividades do software, e as atividades de origem do campo de software para as entradas nas funções de elétrica e mecânica.

Ao obter o modelo funcional do produto mecatrônico conforme estrutura apresentada na Figura 28, considera-se como concluída a aplicação do Método de Modelagem Funcional de Produtos Mecatrônicos proposto, o qual pode ser incorporado ao projeto conceitual, possibilitando a sequência nas atividades de desenvolvimento do produto. O modelo funcional obtido com o método proposto, possibilita um melhor entendimento sobre o produto, e auxilia na consolidação das informações para a posterior identificação dos princípios de solução que devem ser relacionados para o atendimento das funções.

## **5. AVALIAÇÕES DO MÉTODO DE MODELAGEM FUNCIONAL DE PRODUTOS MECATRÔNICOS**

Para a avaliação do Método de Modelagem Funcional de Produtos Mecatrônicos proposto, foram consideradas três análises conforme itens a seguir. Em um primeiro momento a avaliação é realizada com a aplicação do método em um compressor de ar. Na sequência é apresentada a avaliação do método obtida com a aplicação do questionário com especialistas da área desenvolvimento de produtos e por final a aplicação do método no veículo autônomo para inspeção de trilhos ferroviários conforme previsto no capítulo 3.

### **5.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO EM UM COMPRESSOR DE AR**

A primeira avaliação do Método de Modelagem Funcional de Produtos Mecatrônicos é considerada com a aplicação da proposta na modelagem no projeto de um compressor de ar rotativo de parafusos seguindo as fases e etapas apresentadas no Capítulo 4.

Seguindo para a Fase 1 – Obter Informações, considera-se como escopo do produto: “Compressor de ar rotativo de parafusos com velocidade variável com fornecimento de ar direto”. Entende-se com este escopo que o compressor de ar apresente uma flexibilidade durante a operação, de forma que, ao atingir a pressão desejada, o produto não interrompa a compressão de ar, mas possibilite reduzir a compressão até que a pressão da rede, ao qual está acoplado, apresente uma baixa devido ao consumo, e então o produto volte a compressão normal. Esta característica tem como objetivo reduzir o número de partidas do motor presente no compressor e como consequência apresentar menor consumo de energia elétrica. Outra característica verificada no escopo, indica que o produto não possui um reservatório próprio para o armazenamento de ar comprimido, desta forma o compressor estará acoplado diretamente em uma rede de ar a qual poderá ou não possuir um reservatório independente. Para fins de avaliação, considera-se que as informações apresentadas neste parágrafo atendem a etapa Analisar características existente na Fase 1 – Obter Informações sobre o produto.

Para a segunda etapa que compõe a Fase 1 – Obter Informações sobre o produto, Analisar requisitos, são listados os tópicos a seguir:

- O compressor deve operar com energia elétrica;
- O compressor deve possuir um sistema que possibilite variar a rotação do motor;
- O compressor deve realizar uma filtragem do ar captado;
- O compressor deverá fornecer ar comprimido com uma pressão de até 9 bar;
- O compressor deve possuir um sistema para reduzir a temperatura do ar comprimido fornecido para a rede;
- O compressor deve possuir um sistema de controle que possa ser parametrizado pelo usuário;
- O compressor deve possuir uma estrutura metálica para sustentação e proteção dos componentes;

As informações listadas servirão como base para a elaboração das fases subsequentes do método proposto.

Seguindo para a Fase 2 – Definir Casos de uso, para fins de avaliação do método, considerou-se apenas um caso de uso nesta fase, o qual é apresentado no Quadro 13 com a respectiva especificação, atendendo as duas etapas existentes na Fase 2 – Definir Casos de uso (Identificar e Especificar os casos de uso).

Quadro 13 - Caso de Uso Compressor de Ar.

Caso de uso	Especificação do caso de uso
Compressão de ar	O compressor recebe o comando do usuário para entrar em funcionamento, ou caso esteja em operação recebe o comando para desligamento. Para entrar em funcionamento, após receber o comando, o motor elétrico inicia a operação, sendo que a entrada de ar para compressão permanece fechada para não sobrecarregar o motor. Após alguns segundos a entrada de ar é liberada e o produto começa a fornecer ar comprimido para a rede de ar na qual o produto está acoplado. O sistema monitora a pressão na saída de ar comprimido do compressor e ao identificar que a pressão está acima de 9 bar a entrada de ar no sistema é bloqueada. Este bloqueio permanece até a redução da pressão para menos de 9 bar devido ao consumo do ar na rede. Havendo redução da pressão a entrada de ar é liberada novamente. Caso a pressão não reduza mesmo com a restrição na entrada de ar, a rotação do motor deverá ser reduzida. Havendo redução da pressão a rotação do motor volta para a condição ideal. Caso a pressão não reduza mesmo com a alteração na rotação do motor elétrico, o motor deve ser desligado. Mesmo com o motor estando desligado por excesso de pressão, a pressão continua sendo monitorada até ser identificada a redução e com isso o motor volta a ser acionado.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Após a identificação e especificação dos casos de uso, são realizadas as etapas de identificação e especificação dos estados que o produto pode apresentar de acordo com a Fase 3 – Definir Estados, conforme apresentado no Quadro 14.

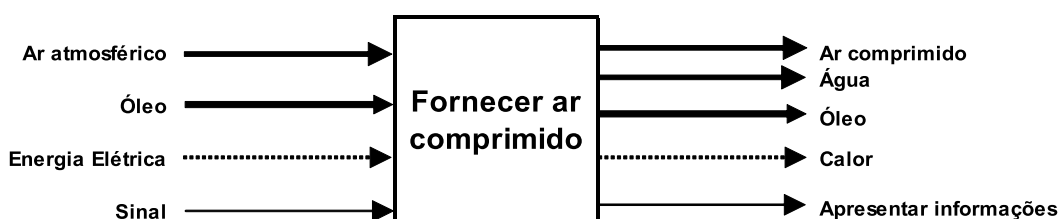
Quadro 14 - Estados Compressor de Ar.

<b>Estados do produto</b>	<b>Especificação do estado</b>
Desligado	Quando o compressor não está em funcionamento devido ao comando fornecido pelo usuário para desligamento.
Início de Operação	Ao receber o comando do usuário para entrar em operação, o sistema entra em funcionamento sendo que há uma restrição na entrada de ar para evitar uma sobrecarga no motor.
Operação Plena	Após o estado de Início de Operação e sem a restrição na entrada de ar o compressor fornece ar comprimido para a rede de ar na qual está acoplado.
Alívio	Ao identificar que a pressão da rede de ar alcançou o valor estabelecido/parametrizado, o sistema realiza uma sequência de ações para estabilizar a pressão.
Espera	Caso as ações realizadas para estabilizar a pressão no estado Alívio não sejam suficientes, o funcionamento do motor é interrompido e o sistema aguarda a redução da pressão na rede para voltar ao estado de Operação Plena.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Seguindo para a Fase 4 – Identificar Funções, são então analisadas as funções do produto. A primeira etapa caracteriza-se com a identificação da Função Global do Produto e em sequência a identificação das entradas e saídas com a Função Global. Estas duas etapas são ilustradas com a Figura 30.

Figura 30 – Função Global Compressor de Ar.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018



Realizadas as etapas de identificação da Função Global e relacionamento com as entradas e saídas do produto, segue-se então para a etapa de desdobramento da Função Global em Funções Elementares. Para o produto compressor de ar, as Funções Elementares identificadas com o desdobramento são apresentadas no Quadro 15, que também vincula as funções com as respectivas disciplinas.

Quadro 15 - Funções Elementares Compressor de Ar.

<b>Funções elementares do produto</b>	<b>Disciplina</b>
Remover resíduos do ar	Mecânica
Armazenar óleo	Mecânica
Transferir óleo para compressão	Mecânica
Comprimir ar	Mecânica
Separar óleo e ar	Mecânica
Refrigerar óleo	Mecânica
Refrigerar ar	Mecânica
Controlar temperatura óleo	Mecânica
Mostrar nível de óleo	Mecânica
Sustentar equipamento	Mecânica
Alimentar componentes eletrônicos	Elétrica
Regular entrada de ar na compressão	Elétrica
Alterar tensão e corrente (Variar a rotação)	Elétrica
Transformar energia elétrica em mecânica	Elétrica
Medir pressão	Elétrica
Reunir dados para apresentar informações	Software
Receber comando de acionamento	Software
Transferir sinal para controle entrada de ar	Software
Transferir sinal para variar rotação	Software
Transferir sinal para partida do motor	Software
Receber comando de desligamento	Software

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Conforme apresentado no item 4.2.4, para o campo de software é realizada uma análise prévia das funções que deverão ser exercidas para o controle do produto, sendo que na Fase 5 – Modelar Software estas informações serão consolidadas com o fluxo de eventos aplicado ao produto.

Na Fase 5 – Modelar Software são detalhadas as informações para o desenvolvimento do software que estará contido no produto. A primeira etapa desta fase direciona para elaboração do fluxo de eventos para os casos de uso. Conforme verificado na Fase 2, para o produto Compressor de Ar foi identificado apenas um caso de uso, Compressão de ar, sendo que o fluxo de eventos para este caso é apresentado a seguir na forma de tópicos:

1. Considerando inicialmente que o produto está no estado Desligado, o usuário envia um sinal para o software ligar o produto;
2. O controle transmite o sinal para acionamento do motor elétrico, transferindo o produto para o estado Início de Operação;
3. Após enviar o sinal para o motor, o controle contabiliza um tempo para então enviar o sinal para abertura da entrada de ar atmosférico no sistema, direcionando o produto para o estado de Operação Plena;
4. O controle recebe a informação sobre a pressão do ar comprimido na saída do produto;
  - a. A pressão estando abaixo do parametrizado, o controle não realiza atividade e mantém o produto no estado de Operação Plena;
  - b. A pressão estando acima do parametrizado, o controle analisa o valor excedido e transfere o produto para o estado de Alívio;
    - i. A pressão estando até duas unidades acima do parametrizado, o controle envia um sinal para restringir a entrada de ar atmosférico no sistema;
    - ii. Após enviar o sinal para restrição na entrada de ar o controle acompanha a pressão do ar comprimido na saída do compressor;
    - iii. A pressão retornando para o valor parametrizado, o controle envia um sinal para liberar a entrada de ar atmosférico no sistema e transfere o compressor para o estado Operação Plena, retornando o fluxo para o início do tópico 4;

- iv. Caso a pressão continue duas unidades acima do parametrizado, o compressor se mantém no estado de Alívio e o controle envia um sinal para reduzir a rotação do motor, alterando a tensão e a corrente elétrica fornecidos, e em consequência há redução no fornecimento de ar comprimido;
  - v. Após enviar o sinal para reduzir a rotação do motor, o controle acompanha a pressão do ar comprimido na saída do compressor;
  - vi. A pressão retornando para o valor parametrizado, o controle envia um sinal para aumentar a rotação do motor e transfere o compressor para o estado Operação Plena, retornando o fluxo para o início do tópico 4;
  - vii. Caso a rotação continue aumentando, o controle envia um sinal para desligamento do motor, transferindo o produto para o estado de Espera;
  - viii. No caso de desligamento do motor devido ao excesso de pressão, o controle continua acompanhando a pressão na saída do compressor e ao identificar a redução da pressão, envia um sinal para acionamento do motor, retornando o fluxo para o tópico 2;
5. O software deverá apresentar ainda um evento para desligamento do produto por solicitação do usuário e um evento que possibilite ao usuário realizar a parametrização do produto.

Seguindo para a segunda etapa da Fase 5, com base no fluxo de eventos definido anteriormente, é então elaborado o diagrama de fluxo de atividades para o caso de uso Compressão de ar conforme ilustrado na Figura 31, onde as atividades são apresentadas dentro dos retângulos. Para situações onde fluxo pode ter mais de uma opção de sequência, é inserido um losango contendo o questionamento que define o caminho a ser seguido.

Devido a quantidade de eventos considerados no fluxo, é considerada uma identificação em cada atividade no diagrama (ex.: S1, S2,..., Sn) com o objetivo de facilitar a Fase 6 do método proposto que prevê o vínculo entre o modelo funcional e o diagrama de fluxo de atividades.

Seguindo para a Fase 6 – Construir o Modelo Funcional, última fase do Método de Modelagem Funcional de Produtos Mecatrônicos proposto, esta é caracterizada pela utilização das fases anteriores para, em uma primeira etapa, elaborar o modelo funcional considerando as funções do campo da mecânica e da elétrica. No produto Compressor de ar, o modelo funcional é apresentado na Figura 32.

A segunda etapa da Fase 6 visa vincular o modelo funcional apresentado na Figura 32 com o diagrama de fluxo de atividades apresentado na Figura 31, indicando as interfaces entre as disciplinas. Esta junção, representa o modelo funcional final do produto Compressor de ar e é apresentada na Figura 33.

## 5.2 AVALIAÇÃO DO MÉTODO POR ESPECIALISTAS E PROFISSIONAIS

Com o objetivo de obter uma análise do método por parte de especialistas da academia e profissionais da indústria que atuam na área de desenvolvimento de produtos foi realizada a aplicação de um questionário envolvendo questões como eficácia, usabilidade e repetibilidade do método, sendo o desenvolvimento desta análise e os respectivos resultados apresentados a seguir.

### 5.2.1 Procedimentos de avaliação

Para realizar a aplicação do questionário com especialistas da academia inicialmente foram selecionados 19 pesquisadores com atuação na área de desenvolvimento de produtos. A pesquisa foi realizada por meio eletrônico no período entre dezembro de 2017 e fevereiro de 2018 onde foi obtido o retorno de 12 entrevistados.

Para a pesquisa com profissionais da indústria, foram selecionados 5 colaboradores que atuam no departamento de desenvolvimento de produtos de uma empresa que atua com soluções em ar comprimido. Para realização da pesquisa foi realizado um evento presencial envolvendo os colaboradores e realizada a aplicação em sala do mesmo questionário aplicado aos especialistas da academia.

Antes da aplicação do questionário, os dois grupos receberam uma apresentação do método proposto com base no item 5.1 desta dissertação.

Figura 31 – Diagrama Fluxo de Atividades: Compressão de ar.

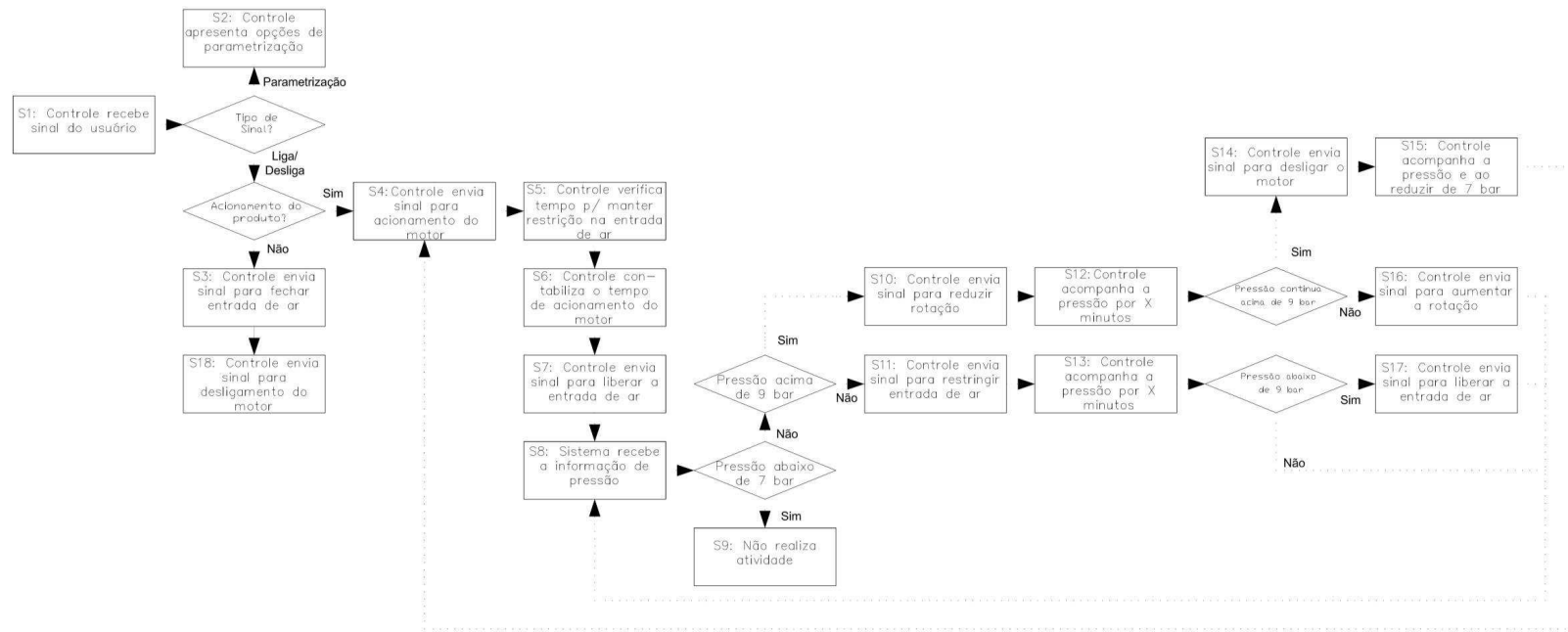


Figura 32 – Modelo funcional Compressor de Ar (Mecânica e Elétrica).

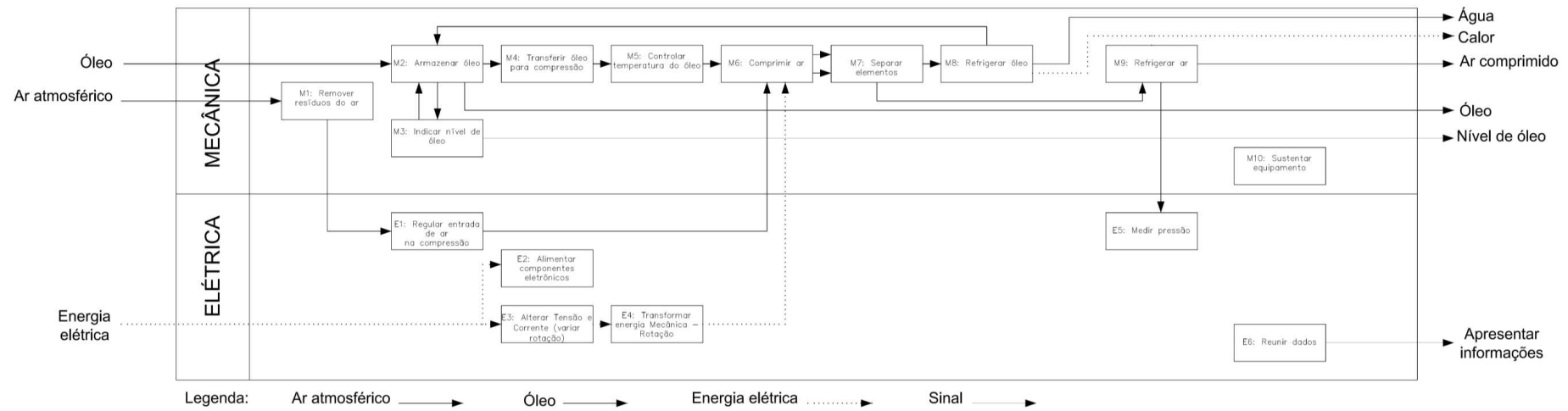
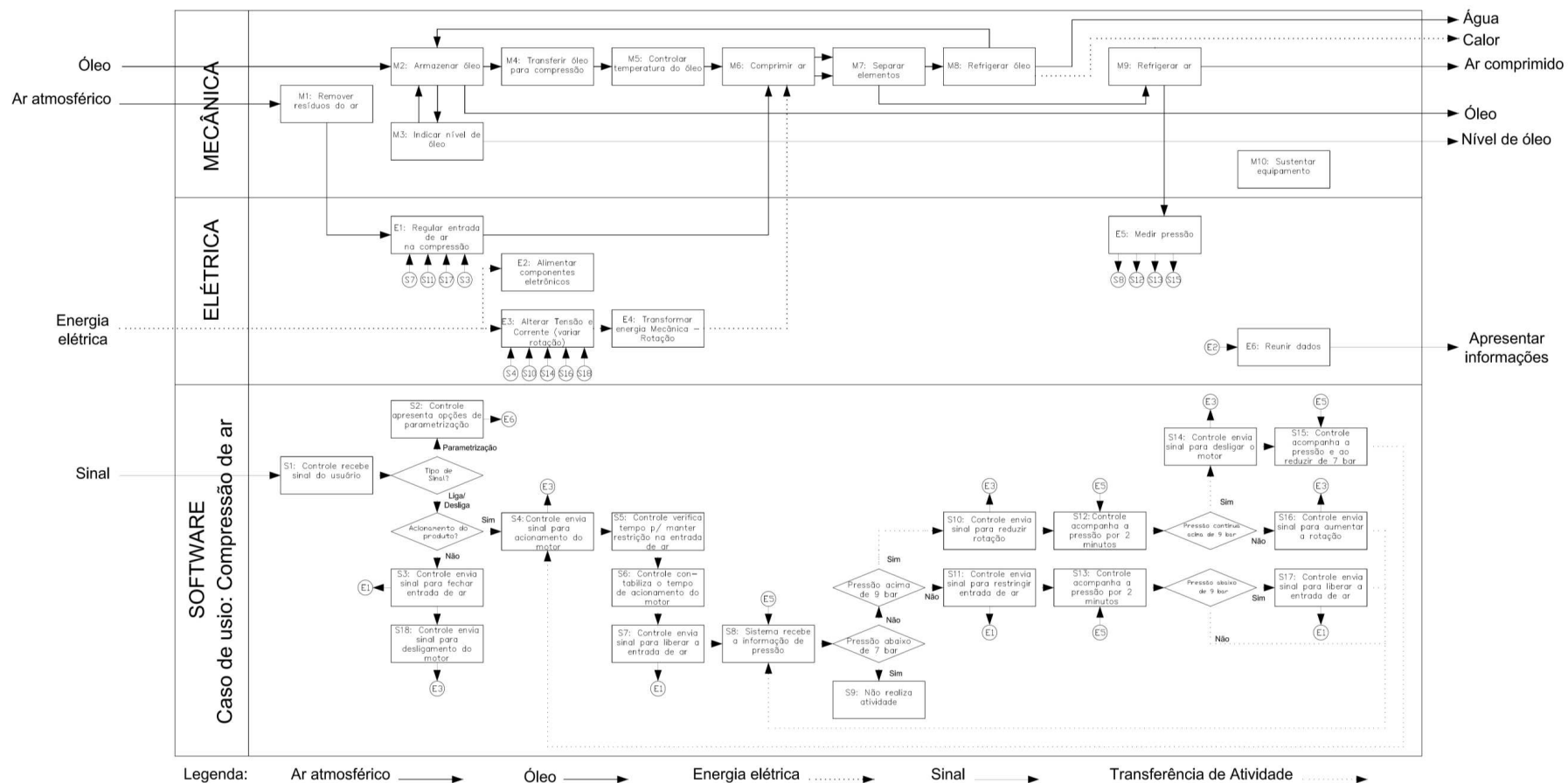


Figura 33 - Modelo funcional final Compressor de Ar.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018





O método, portanto, foi avaliado por um total de 17 pessoas, sendo 12 entrevistados da área acadêmica e 5 entrevistados da área industrial. Os Quadros 16 e 17 realizam uma apresentação dos perfis dos entrevistados para uma melhor caracterização.

Quadro 16 - Caracterização entrevistados área acadêmica.

<b>Participante</b>	<b>Graduação</b>	<b>Área</b>	<b>Instituição</b>
1	Doutor	Desenvolvimento de Produtos	Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Engenharia da Mobilidade
2	Doutor	Projetos de Máquinas	Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica
3	Doutor	Projetos de Máquinas	Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica
4	Doutor	Hidráulica e Pneumática	Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Engenharia da Mobilidade
5	Doutor	Desenvolvimento de Produtos	Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia / Curso de Engenharia de Produção
6	Doutor	Desenvolvimento de Produtos	Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Engenharia da Mobilidade
7	Doutor	Fabricação de máquinas e equipamentos	Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais
8	Doutor	Matemática da Computação	Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Engenharia da Mobilidade
9	Doutor	Projetos de Máquinas	Instituto Federal de Santa Catarina, Departamento de Metal-Mecânica
10	Doutor	Projetos de Máquinas	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Departamento Acadêmico de Metal-Mecânica
11	Doutor	Projetos de Máquinas	Instituto Federal de Santa Catarina, Escola Técnica Federal de Santa Catarina
12	Mestre	Desenvolvimento de Produtos	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Quadro 17 - Caracterização entrevistados área industrial.

Participante	Tempo total de Experiência (anos)	Função
1	13	Especialista em Desenvolvimento de Produtos
2	13	Analista Desenvolvimento de Produtos
3	14	Analista Desenvolvimento de Produtos
4	18	Especialista em Desenvolvimento de Produtos
5	14	Especialista em Desenvolvimento de Produtos

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

### 5.2.2 Questões e respostas

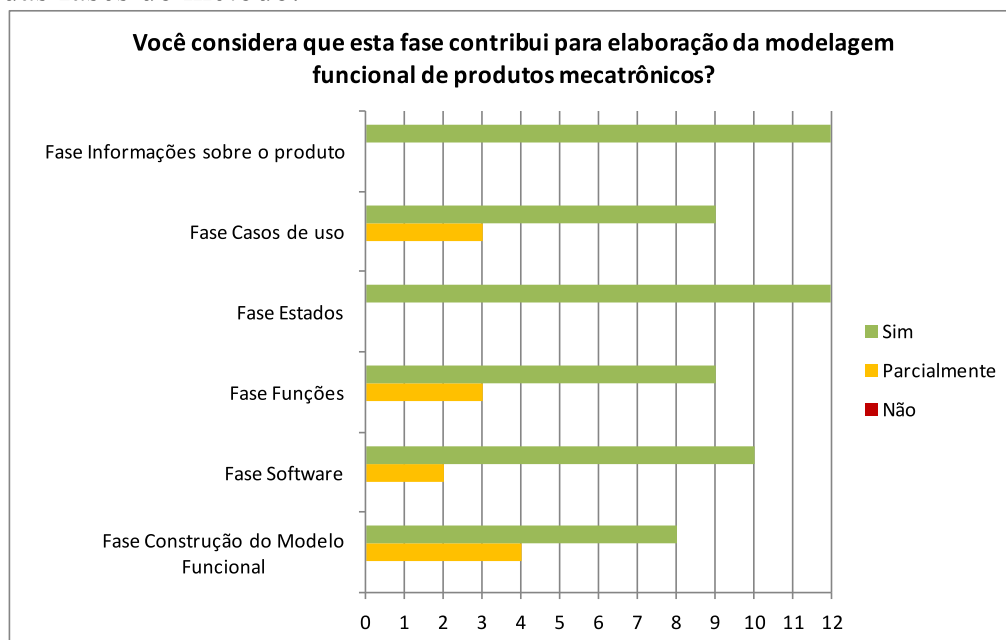
O desenvolvimento do questionário considerou 10 seções onde foram consideradas explicações sobre o método, exemplificação das fases e etapas e 11 questões. O Apêndice – 1 apresenta o questionário na forma integral sendo que a seguir serão explanadas todas as seções, respostas obtidas e conclusões da pesquisa.

A seção 1 do questionário apresenta o objetivo da pesquisa e solicita a captação do endereço de e-mail e o nome do entrevistado.

Na seção 2 é realizada uma apresentação do Método de Modelagem Funcional de Produtos Mecatrônicos com orientação para as fases e etapas do método conforme a Figura 22 existente no capítulo 4.2 desta dissertação. Esta seção não possui questões de integração com o entrevistado.

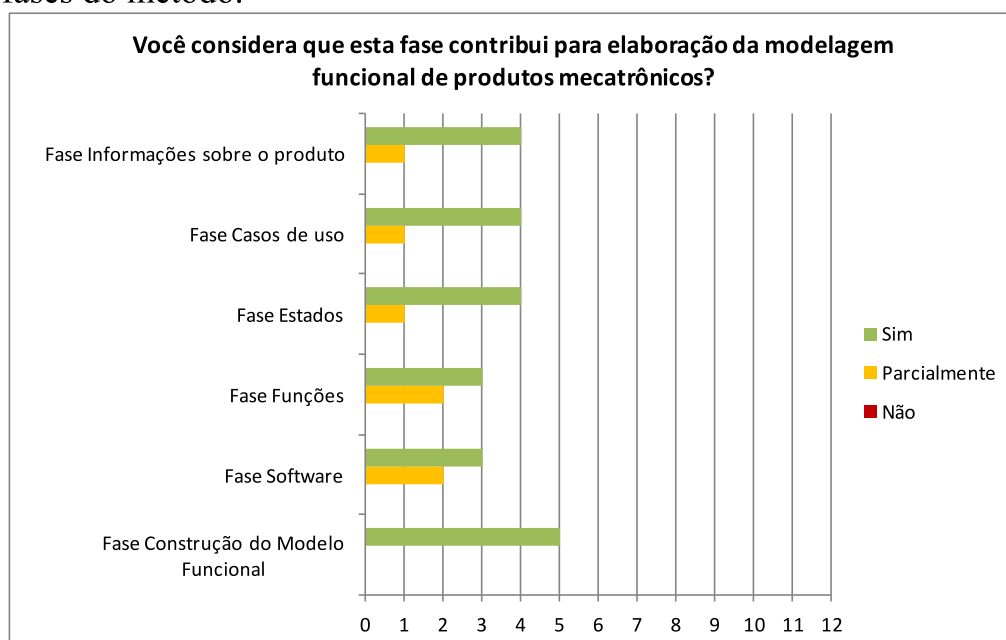
Cada uma das 6 fases do método é detalhada em seções específicas, isto ocorre entre as seções 3 a 8 do questionário. Após uma breve explicação de cada fase e as etapas é realizada a exemplificação dos tópicos conforme a aplicação do método em um compressor de ar, como apresentado no item 5.1 desta dissertação. Ao final de cada seção de 3 a 8 é realizada a pergunta “Você considera que esta fase contribui para elaboração da modelagem funcional de produtos mecatrônicos?” tendo como opções de respostas “Sim”, “Parcialmente” e “Não”, onde os entrevistados podem selecionar apenas uma das opções. As respostas para as seis perguntas relacionadas a contribuição de cada fase na elaboração da modelagem funcional são apresentadas nas Figuras 34 e 35.

Figura 34 – Avaliação especialistas da academia sobre a contribuição das fases do método.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Figura 35 - Avaliação profissionais da indústria sobre a contribuição das fases do método.



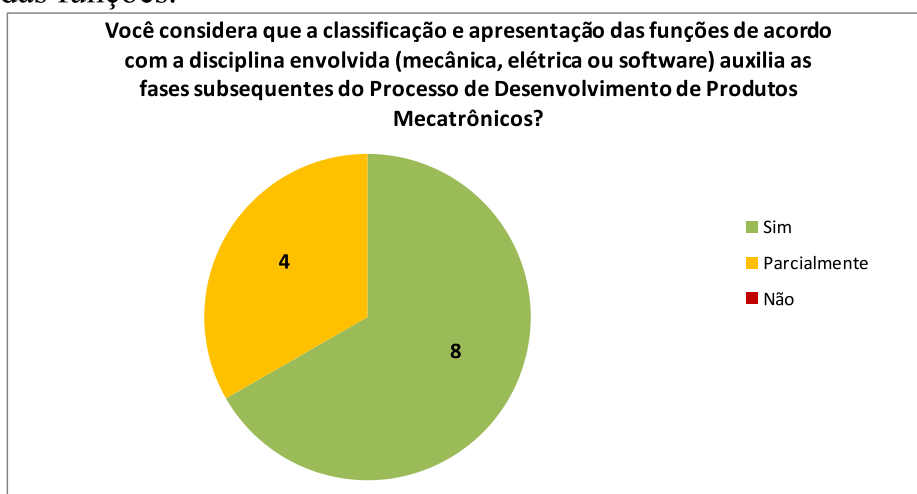
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

As respostas tanto dos especialistas da academia quanto dos profissionais da indústria sobre a contribuição das fases do método para a elaboração da modelagem funcional de produtos mecatrônicos apresentaram variações entre a opção “Sim” e a opção “Parcialmente”, sendo que a opção “Sim” concentra uma

seleção mínima de 60% em cada questão. A opção representando que as fases não contribuem para a elaboração da modelagem funcional de produtos mecatrônicos não foi selecionada por nenhum dos entrevistados. As razões que direcionaram pela opção Parcialmente não foram apresentadas pelos entrevistados.

Na seção 6 do questionário, onde é realizada a explanação da fase sobre Funções do produto mecatrônico, foi inserida uma pergunta além da contribuição da fase. A pergunta “Você considera que a classificação e apresentação das funções de acordo com a disciplina envolvida (mecânica, elétrica ou software) auxilia as fases subsequentes do Processo de Desenvolvimento de Produtos Mecatrônicos?” teve como objetivo verificar se entrevistados entendem que a classificação das funções proposta no método cumpre o papel de aumentar o entendimento sobre o produto e as correlações que este pode ou deve apresentar. As respostas da questão podem ser visualizadas nas Figuras 36 e 37.

Figura 36 - Avaliação especialistas da academia sobre a classificação das funções.

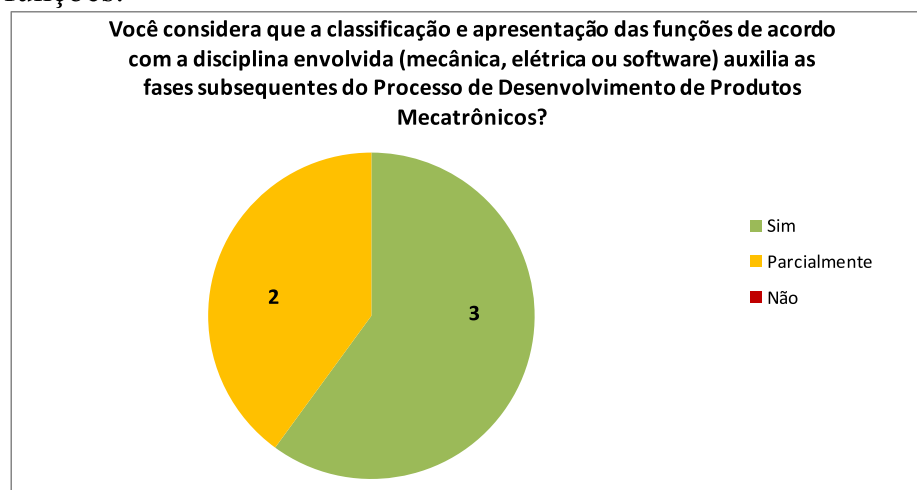


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

As respostas sobre o questionamento sobre o auxílio da classificação das funções de acordo com a disciplina teve comportamento semelhante entre os entrevistados, tanto da área acadêmica quanto da área industrial. Na área acadêmica 67% optaram pela opção “Sim” e na área industrial este valor totaliza 60%. Os demais entrevistados nas duas áreas optaram pela opção “Parcialmente” e a opção que direciona para a negação do auxílio da classificação nas fases subsequentes da modelagem não foi

selecionada. As razões que direcionaram pela opção Parcialmente não foram apresentadas pelos entrevistados.

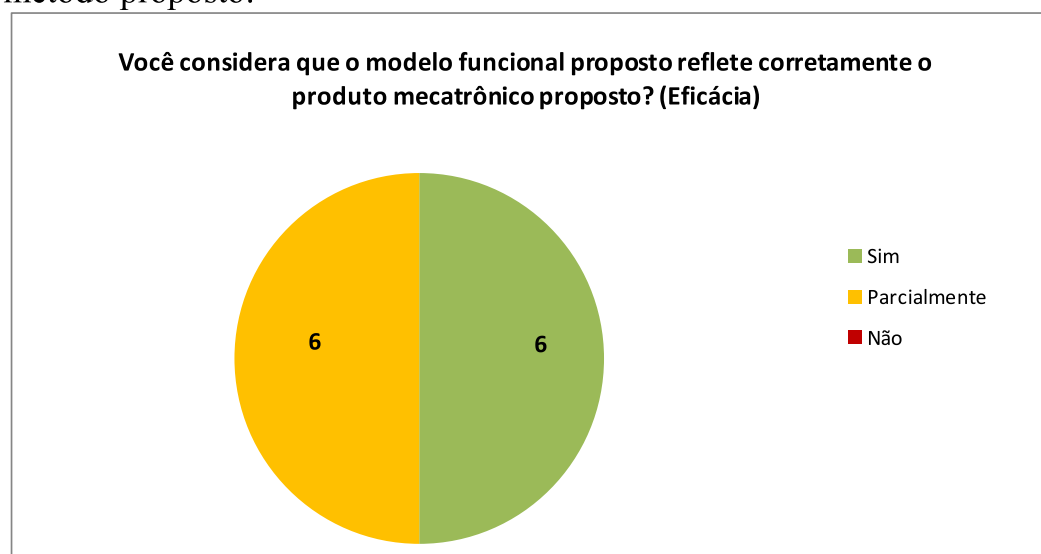
Figura 37 - Avaliação profissionais da indústria sobre a classificação das funções.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

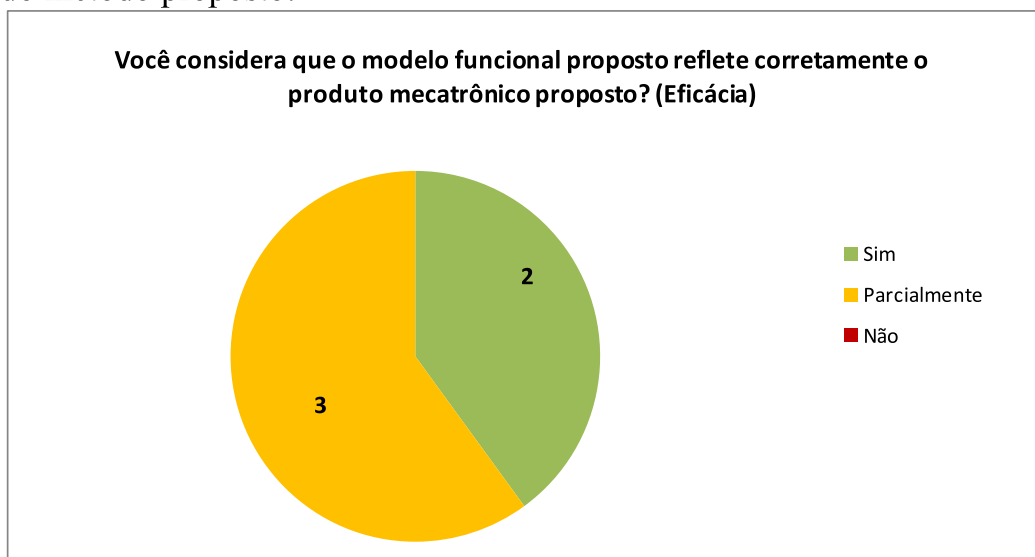
Na seção 8 do questionário, onde é realizada a explanação da fase Construção do Modelo Funcional do produto mecatrônico, foi inserida uma pergunta além da contribuição da fase. A pergunta “Você considera que o modelo funcional proposto reflete corretamente o produto mecatrônico proposto?” teve como objetivo questionar aos entrevistados sobre a eficácia do método proposto. As respostas da questão podem ser visualizadas nas Figuras 38 e 39.

Figura 38 - Avaliação especialistas da academia sobre a eficácia do método proposto.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Figura 39 - Avaliação profissionais da indústria sobre a sobre a eficácia do método proposto.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

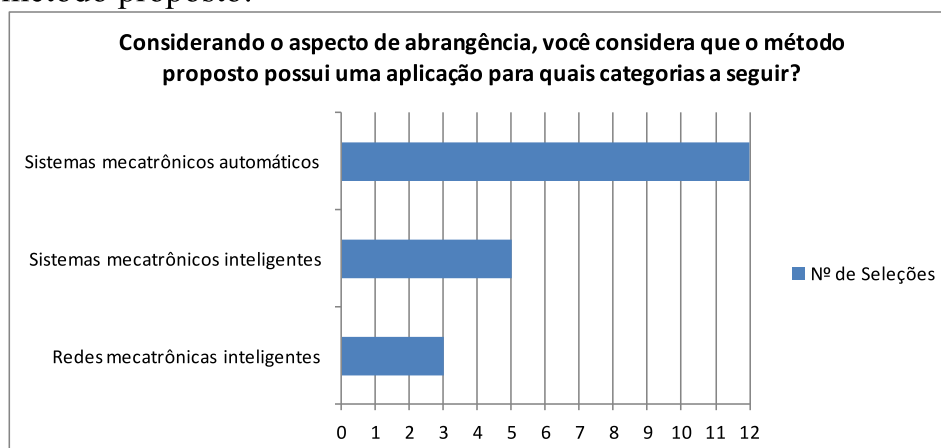
Na questão sobre a eficácia do método, 50% dos entrevistados da área acadêmica optaram pela opção “Sim” e o outros 50% optaram pela opção “Parcialmente. No contexto da indústria, a opção “Sim” foi selecionada por 40% dos entrevistados e a opção “Parcialmente” por 60% dos entrevistados. A opção que direciona para a não eficácia do método não foi selecionada.

Com o objetivo de buscar informações adicionais sobre a eficácia do método, foi solicitado uma justificativa caso o entrevistado selecionasse as opções Parcialmente ou Não. Uma das observações abre um questionamento sobre a necessidade de modelagem funcional para funções do software. Em outras duas observações são direcionadas para a classificação das funções de acordo com a área (mecânica, elétrica e software) sendo que um entrevistado considera que a apresentação das funções no modelo de acordo com a área pode dificultar o entendimento das interações e outro entrevistado menciona que podem existir funções que se enquadram em mais de classificação.

Na seção 9 do questionário foram inseridas 3 questões que buscam verificar a abrangência do método, a usabilidade e a repetibilidade. A primeira questão desta seção apresenta a classificação dos produtos mecatrônicos realizada por Rzevski (2003), conforme descrito no item 2.2.4 desta dissertação e solicita que ao entrevistado “Considerando o aspecto de abrangência, você considera que o método proposto possui uma

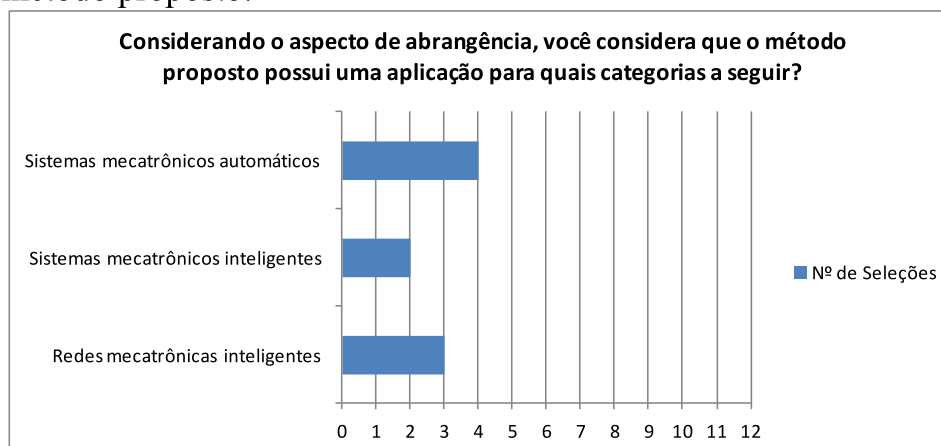
aplicação para quais categorias a seguir?”. As respostas da questão podem ser visualizadas nas Figuras 40 e 41.

Figura 40 - Avaliação especialistas da academia sobre a abrangência do método proposto.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Figura 41 - Avaliação profissionais da indústria sobre a abrangência do método proposto.



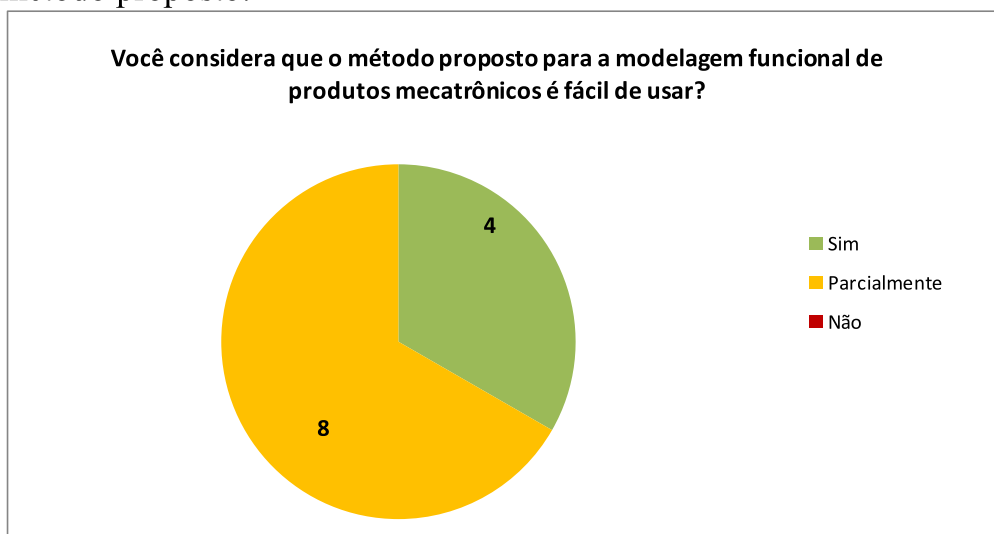
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Para as respostas sobre abrangência do método era permitido a seleção de mais de uma das opções disponíveis, sendo que tanto na área acadêmica quanto na área da indústria houveram seleções de todas as categorias apresentadas, sendo verificado um direcionamento para a categoria de sistemas mecatrônicos automáticos, que representa produtos com grau de complexidade menor em comparação com as categorias de sistemas mecatrônicos inteligentes e redes mecatrônicas inteligentes.

A segunda pergunta que compõe a seção 9 do questionário solicita que o entrevistado transmita o seu

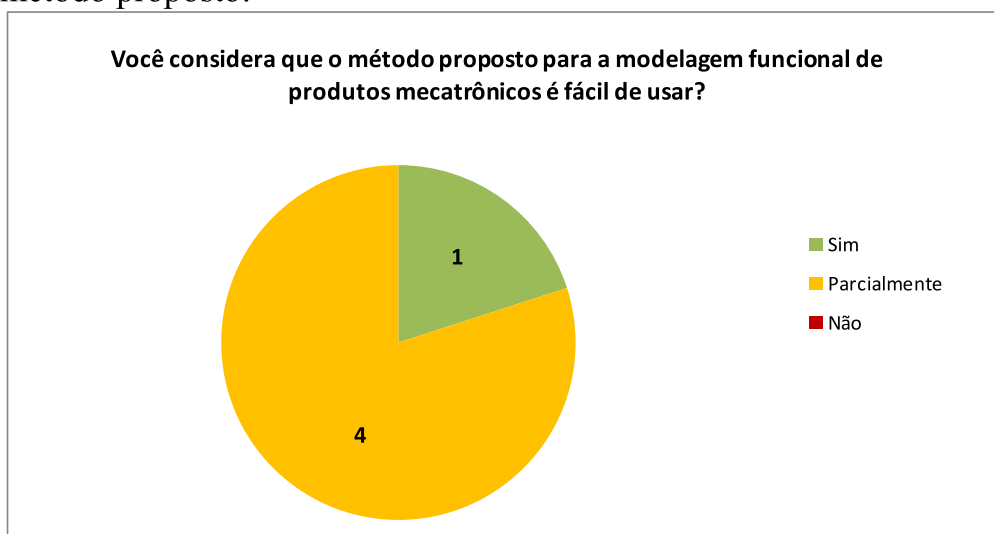
entendimento no método correlacionando com a usabilidade deste. Foi realizada a pergunta “Você considera que o método proposto para a modelagem funcional de produtos mecatrônicos é fácil de usar?” tendo como opções de respostas “Sim”, “Parcialmente” e “Não”, onde os entrevistados podem selecionar apenas uma das opções. As respostas da questão podem ser visualizadas nas Figuras 42 e 43.

Figura 42 - Avaliação especialistas da academia sobre a usabilidade do método proposto.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Figura 43 - Avaliação profissionais da indústria sobre a usabilidade do método proposto.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

A questão que direciona para a usabilidade do método, avaliada pela área da academia, teve 34% das respostas na opção

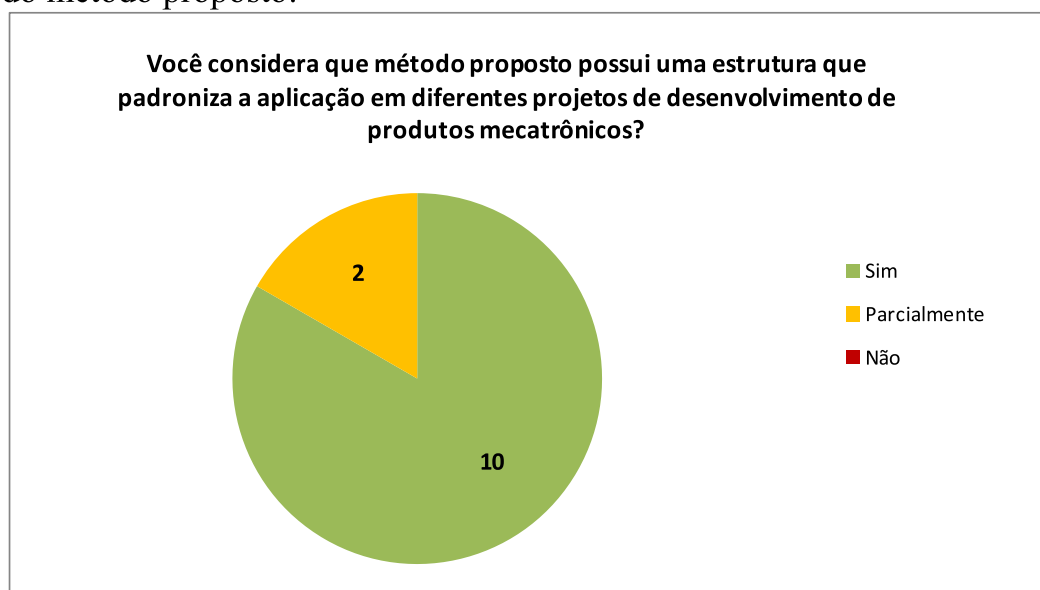


“Sim” e 66% na opção “Parcialmente”. Para a área da indústria os percentuais são 20% e 80% para “Sim” e “Parcialmente” respectivamente. A opção que sugere que o método não é fácil de usar não foi selecionada.

Na intenção de obter levantamentos adicionais sobre a usabilidade do método, foi solicitada uma justificativa caso o entrevistado selecionasse as opções Parcialmente ou Não. Analisando as observações fornecidas pelos entrevistados nas duas áreas, é verificada uma repetição na necessidade de um treinamento para os usuários do método antes da aplicação na elaboração da modelagem funcional de um produto mecatrônico e um dos entrevistados considera que devido a quantidade de informações envolvidas na aplicação do método pode ser melhor gerenciada com um suporte digital.

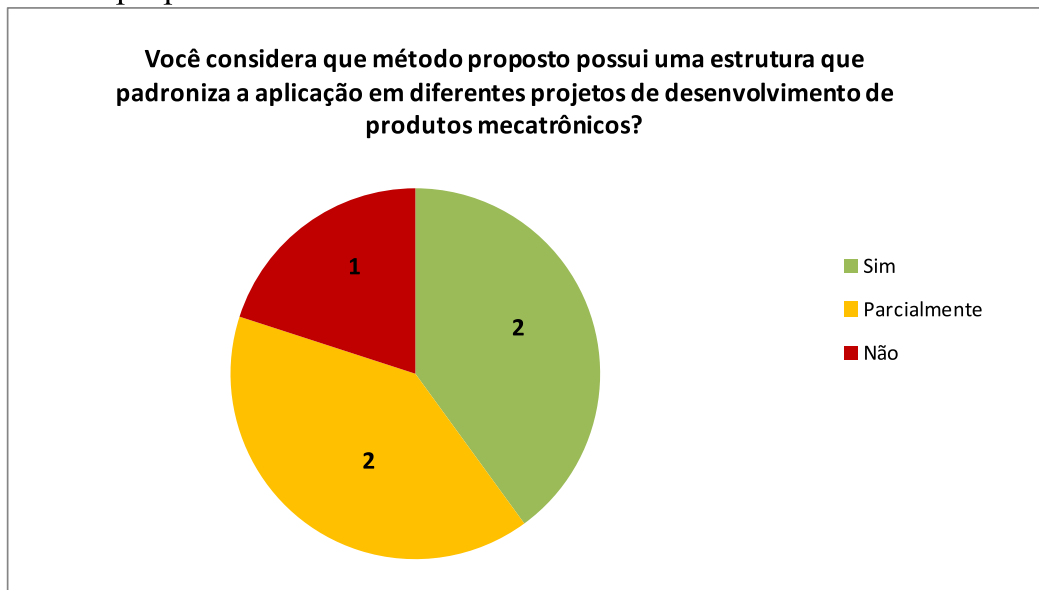
A terceira pergunta que compõe a seção 9 do questionário, solicita que o entrevistado transmita o seu entendimento no método correlacionando com a repetibilidade deste. Foi realizada a pergunta “Você considera que método proposto possui uma estrutura que padroniza a aplicação em diferentes projetos de desenvolvimento de produtos mecatrônicos?” tendo como opções de respostas “Sim”, “Parcialmente” e “Não”, onde os entrevistados podem selecionar apenas uma das opções. As respostas da questão podem ser visualizadas nas Figuras 44 e 45.

Figura 44 - Avaliação especialistas da academia sobre a repetibilidade do método proposto.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Figura 45 - Avaliação profissionais da indústria sobre a repetibilidade do método proposto.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Na avaliação da repetibilidade do método por especialistas da academia, 83% dos entrevistados optaram pela opção “Sim” e 17% pela opção “Parcialmente”, e não houveram seleções para a opção “Não”. Para os profissionais da indústria, 40% selecionaram a opção “Sim”, 40% selecionaram a opção “Parcialmente” e 20% selecionaram a opção “Não”.

Para obter informações adicionais sobre a repetibilidade do método, foi solicitado uma justificativa caso o entrevistado selecionasse as opções Parcialmente ou Não, sendo que observações consideram que a existência de um roteiro já auxilia na sistematização da modelagem funcional, mas o tipo de produto mecatrônico pode ter um impacto na aplicação do método de modo que há a necessidade de realização de outros experimentos para aumentar o entendimento sobre a repetibilidade. O único entrevistado que selecionou a opção “Não” considera que a variedade de produtos mecatrônicos pode influenciar na aplicação do método.

### 5.2.3 Considerações sobre a avaliação

De acordo com as respostas obtidas nas avaliações com os especialistas da área acadêmica e com os profissionais da indústria é possível interpretar que há uma convergência por parte dos entrevistados das duas áreas e a quantidade de repostas “Sim”

e “Parcialmente” direciona para a validade do método no incremento das pesquisas relacionadas com o desenvolvimento da modelagem funcional de produtos mecatrônicos.

Com relação as observações realizadas pelos entrevistados seguem algumas justificativas e complementos:

- Para o questionamento sobre a necessidade da modelagem funcional para funções de software, o método proposto prevê que, a necessidade do detalhamento destas funções em fluxos de atividades de acordo com os casos de uso, tem o objetivo de estabelecer e apresentar as interações com as disciplinas de mecânica e elétrico. Entende-se que a ausência deste detalhamento das funções de software resulta em uma apresentação parcial do modelo funcional do produto fazendo com o método não atenda o objetivo de representar as atividades realizadas pela disciplina de software na sua totalidade;
- Sobre a dificuldade de entendimento das interações entre as disciplinas devido a separação destas no modelo funcional, é considerado que esta separação facilita a apresentação das informações considerando a multifuncionalidade das equipes envolvidas nos projetos de produtos mecatrônicos evitando distorções de interpretações sobre a responsabilidade de cada função em fases de detalhamento e análises dos princípios de solução (ações subsequentes à elaboração do modelo funcional);
- A observação sobre uma determinada função pertencer a mais de uma classificação é tratada pelo método de forma flexível, onde o usuário tendo o conhecimento sobre a função e as informações de contorno realiza a interpretação e classificação da função na disciplina com maior relacionamento com função, mesmo que exista a compatibilidade com mais de uma disciplina. Neste sentido deve ser analisada uma tendência sobre os objetivos e restrições da função avaliando conexões com as informações e requisitos do produto;
- A aplicação do método é direcionada para usuários que já possuem conhecimentos na área de desenvolvimento de produtos sendo que no questionário apresentado aos

entrevistados as fases foram resumidas, e para a correta aplicação do método considera-se imprescindível que o usuário tenha acesso ao conteúdo completo desta dissertação e se possível um treinamento específico. Considera-se ainda que o aumento de eficiência na aplicação do método seja uma consequência de experiências obtidas nas modelagens de forma que a cada produto modelado funcionalmente permita ao usuário aumentar o entendimento sobre o método;

- O desenvolvimento de um suporte digital para gestão das informações relacionadas ao método não foi incluído no escopo da pesquisa sendo que é constatado uma oportunidade para desenvolvimentos futuros a estruturação de um programa eletrônico que forneça um suporte para o método de forma a permitir uma melhor apresentação e revisão e das informações;
- Os direcionamentos realizados para aplicações futuras do método apresentam importância no sentido de amadurecimento das fases e auxiliar na evolução da sistematização. Além a aplicação do método na modelagem funcional do produto compressor de ar, o item 5.3 a seguir apresenta a aplicação do método em um veículo para a inspeção de trilhos ferroviários.

### 5.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO NO PROJETO DO VEÍCULO AUTÔNOMO PARA A INSPEÇÃO DE TRILHOS FERROVIÁRIOS

A terceira e última avaliação do Método de Modelagem Funcional de Produtos Mecatrônicas considera a aplicação deste no projeto de desenvolvimento de um veículo autônomo para a inspeção de trilhos ferroviários, projeto este que está sendo realizado no Laboratório de Estudos Ferroviários (LEF) do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

As informações para atendimento do método na Fase 1 – Obter Informações, foram obtidas com a equipe de projeto, onde são apresentadas a análise sobre as características do produto e análise dos requisitos do produto. No contexto do escopo para o veículo é verificado que com o desenvolvimento do transporte ferroviário surge a necessidade de verificar as condições das vias

de forma a garantir a disponibilidade do sistema. Neste sentido surge a demanda pelo desenvolvimento de um equipamento para captação de informações dos trilhos ferroviários permitindo aos responsáveis pela manutenção identificar as falhas sem se deslocar aos pontos críticos. O veículo em questão deve apresentar estas informações com a captação de imagens dos trilhos, onde é possível identificar falhas visíveis. Outro mecanismo inserido no veículo é o medidor de bitola que acusa problemas de alteração de bitolas, que se não forem resolvidos podem causar descarrilamento de trens. O veículo também conta com um sistema para inspeção por ultrassom dos trilhos, permitindo a verificação de trincas internas e externas.

A análise dos requisitos do veículo é apresentada nos tópicos a seguir:

- O produto é um veículo autônomo para inspecionar trilhos. Deve ser movido exclusivamente por energia elétrica. Suas baterias são carregadas na rede e também pela autogeração, através de painéis fotovoltaicos;
- A inspeção ideal é feita de três formas: vídeo/imagens, medição de bitola, monitoramento ultrassom e; suficientes para detectar qualquer tipo de problema nos trilhos;
- O veículo deve ser programável;
- O veículo deverá ser rápido (atingir velocidade máxima da via);
- O veículo deverá ser leve (carregável pelo máximo de 4 pessoas);
- O veículo deverá emitir sinais sonoros e luminosos;
- O veículo deve utilizar o Sistema Global de Posicionamento (GPS) para realizar as inspeções;
- As especificações de programação do produto devem considerar as leis de trânsito ferroviário, como velocidades máximas e avisos sonoros em perímetro urbano, por exemplo.

Seguindo para a Fase 2 – Definir Casos de uso, são verificados os casos de uso relacionados com o veículo. A aplicação do método considerou 12 casos de uso sendo que estes ainda foram agrupados em 3 classificações considerando a apresentação final do modelo funcional. As 3 classificações consideram o Gerenciamento da Ferrovia, Gerenciamento da

Missão e a Realização da Missão de Inspeção. A lista de casos de uso e as respectivas especificações são apresentadas no Quadro 18.

Quadro 18 - Casos de Uso Veículo.

Casos de uso do produto	Agrupamento dos casos de uso	Especificação do caso de uso
Inserir ferrovia	Gerenciar ferrovia	O sistema do veículo recebe um sinal do usuário para inserir informações sobre uma ferrovia podendo ser uma nova via ou um trecho de uma via. Após o usuário inserir um arquivo com as informações o sistema encaminha as informações para uma base de dados externa ao veículo.
Consultar ferrovia		O sistema do veículo recebe um sinal do usuário para consultar informações sobre uma ferrovia podendo ser uma via ou um trecho de uma via. Após o usuário selecionar em uma lista as opções de vias ou trechos o sistema apresenta as informações detalhadas.
Alterar ferrovia		O sistema do veículo recebe um sinal do usuário para alterar informações sobre uma ferrovia podendo ser uma via ou um trecho de uma via. Após o usuário selecionar em uma lista as opções de vias ou trechos o sistema apresenta as informações detalhadas com opções de alteração, o usuário então carrega os arquivos com as alterações pretendidas e o sistema encaminha as informações para uma base de dados externa ao veículo.
Editar ferrovia		O sistema do veículo recebe um sinal do usuário para editar informações sobre uma ferrovia podendo ser uma via ou um trecho de uma via. Após o usuário selecionar em uma lista as opções de vias ou trechos o sistema apresenta as informações detalhadas com opções de edição, o usuário então edita as informações e o sistema encaminha as informações atualizadas para uma base de dados externa ao veículo.
Cadastrar missão	Gerenciar missão	O sistema do veículo recebe um sinal do usuário para cadastrar uma missão, o sistema então apresenta a lista de arquivos de vias e trechos da base externa ao veículo. Posteriormente o usuário seleciona o arquivo desejado, informa os parâmetros para realização da missão e o sistema de controle envia a missão cadastrada para uma base de dados interna ao veículo.
Consultar missão		O sistema do veículo recebe um sinal do usuário para consultar uma missão, o sistema então apresenta detalhes da missão da base interna ao veículo.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Quadro 18 (continuação) – Casos de Uso Veículo.

Alterar missão	Gerenciar missão	O sistema do veículo recebe um sinal do usuário para consultar uma missão, o sistema então apresenta detalhes da missão da base interna ao veículo com opções de alteração. Posteriormente o usuário realiza as alterações desejadas e o sistema de controle envia as atualizações para a base de dados interna ao veículo.
Excluir missão		O sistema do veículo recebe um sinal do usuário para excluir uma missão, o sistema então apresenta as missões da base interna ao veículo, o usuário seleciona a missão a ser excluída e o sistema de controle elimina o arquivo da base interna do veículo.
Controlar movimento	Realizar missão	O sistema do veículo recebe um sinal do usuário para iniciar o movimento ou parar o movimento. Ao iniciar o movimento o usuário indica a missão cadastrada na base de dados interna ao veículo e que será realizada. O sistema do veículo aciona os componentes necessários e realiza a missão.
Operar ultrassom		O sistema recebe o sinal do caso de uso “Controlar movimento” e o dispositivo de ultrassom é acionado captando informações sobre os trilhos e encaminhando os dados para a base de dados interna ao veículo.
Operar câmera 2		O sistema recebe o sinal do caso de uso “Controlar movimento” e a câmera de captação de imagens do trilho é acionada e encaminha os dados para a base de dados interna ao veículo. Obs.: o caso de uso é denominado como operar câmera 2 devido a existência de uma câmera 1 que monitora o trajeto do veículo
Coletar perfil		O sistema recebe o sinal do caso de uso “Controlar movimento” e o dispositivo de verificação do perfil é acionado captando informações sobre os trilhos e encaminhando os dados para a base de dados interna ao veículo.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Após a identificação e especificação dos casos de uso, são realizadas as etapas de identificação e especificação dos estados que o produto pode apresentar de acordo com a Fase 3 – Definir Estados, conforme apresentado no Quadro 19.

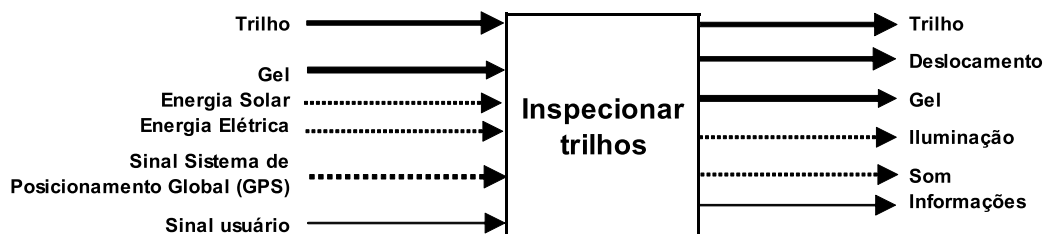
Dando sequência com a Fase 4 – Identificar Funções, são então analisadas as funções do veículo. A primeira etapa é caracterizada com a identificação da Função Global do produto e em sequência a identificação das entradas e saídas com a Função Global. Estas duas etapas são apresentadas na Figura 46.

Quadro 19 - Estados do Veículo.

<b>Estados do produto</b>	<b>Especificação do estado</b>
Desligado	Quando o veículo não está em funcionamento devido ao comando fornecido pelo usuário para desligamento.
Em carregamento	Quando o veículo não está em funcionamento e está conectado a rede de energia elétrica para carregamento das baterias
Parametrização	O veículo não está em funcionamento e o sistema de controle é acessado para gerenciamento das informações sobre vias e trechos das ferrovias na base de dados externa ao veículo
Movimentação	O veículo inicia a movimentação de acordo com os parâmetros da missão selecionada para ser executada
Operação de inspeção	Durante o caso de uso Movimentação, ao atingir os parâmetros da missão o veículo inicia a coleta de dados com o acionamento dos dispositivos de ultrassom, câmera 2 e verificador de perfil dos trilhos
Alerta	Ao identificar qualquer tipo de obstrução o veículo paralisa o movimento e emite sinal de alerta para o usuário

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Figura 46 – Função Global Veículo



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Com a identificação da Função Global e estabelecidos os vínculos com as entradas e saídas do veículo, é realizada a etapa de desdobramento da Função Global em Funções Elementares. Para o veículo, as Funções Elementares identificadas são apresentadas no Quadro 20, junto a classificação entre as disciplinas envolvidas no produto mecatrônico.

Seguindo para a Fase 5 do método proposto são então detalhadas as informações para o desenvolvimento do software que estará contido no veículo. A primeira etapa desta fase



consiste na elaboração de um fluxo de eventos para cada um dos casos de uso.

Quadro 20 - Funções do Veículo.

<b>Funções elementares do produto</b>	<b>Disciplina</b>
Prover estrutura sistema de rodagem	Mecânica
Prover estrutura para baterias	Mecânica
Prover estrutura para sistema ultrassom	Mecânica
Prover estrutura para câmeras e sensores	Mecânica
Prover estrutura perfilômetro	Mecânica
Prover proteção (oxidação)	Mecânica
Armazenar gel ultrassom	Mecânica
Prover rodagem	Mecânica
Estabilizar veículo	Mecânica
Prover parada	Mecânica
Aplicar gel	Elétrica
Posicionar gel ultrassom	Elétrica
Varrer trilho com ultrassom	Elétrica
Captar imagem do trilho	Elétrica
Captar perfil do trilho	Elétrica
Converter energia solar em elétrica	Elétrica
Armazenar energia elétrica	Elétrica
Medir nível das baterias	Elétrica
Alterar tensão e corrente (variar rotação)	Elétrica
Alterar o sentido de rotação	Elétrica
Transformar energia - rotação	Elétrica
Captar sinal Sistema de Posicionamento Global (GPS)	Elétrica
Verificar obstrução perímetro	Elétrica
Captar imagens da via	Elétrica
Emitir sinal sonoro	Elétrica
Emitir iluminação	Elétrica
Medir velocidade	Elétrica
Acionar freios	Elétrica
Reunir dados	Elétrica
Gerenciar arquivos das vias e trechos	Software
Gerenciar arquivos das missões	Software

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Quadro 20 (continuação) – Funções do Veículo.

<b>Funções elementares do produto</b>	<b>Disciplina</b>
Receber comando de acionamento	Software
Receber comando de desligamento	Software
Transferir sinal para partida do motor	Software
Transferir sinal para variar rotação do motor	Software
Transferir sinal para ativar e desativar freios	Software
Transferir sinal para ativar e desativar câmera perímetro	Software
Transferir sinal para ativar e desativar sensores perímetro	Software
Transferir sinal para ativar e desativar iluminação	Software
Transferir sinal para ativar e desativar sirene	Software
Transferir sinal para ativar e desativar sistema ultrassom	Software
Transferir sinal para ativar e desativar câmera inspeção-2	Software
Transferir sinal para ativar e desativar perfilômetro	Software
Comparar posicionamento veículo x GPS	Software
Enviar informações para a base de dados	Software

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Conforme verificado na Fase 2 – Definir Casos de uso, para o veículo foram identificados 12 casos de uso, sendo os fluxos de eventos previstos na etapa Elaborar o fluxo de eventos para os casos de uso da Fase 5 – Modelar Software são apresentados a seguir na forma de tópicos.

Caso de uso - Inserir ferrovia:

1. Considerando o estado de Parametrização do veículo, em um sistema a parte do sistema de controle incorporado no veículo, o usuário envia um sinal para o software para inserir informações sobre uma determinada ferrovia;
2. O software então oferece duas opções, onde o usuário deve selecionar se deseja inserir informações sobre uma via ou sobre um trecho de via;
3. Realizada a seleção, o software disponibiliza um campo para que o usuário carregue o arquivo desejado;
4. O usuário carrega o arquivo;
5. O usuário defini uma nomenclatura para o arquivo;

6. O software realiza o arquivamento na base de dados externa ao veículo.

Caso de uso – Consultar ferrovia:

1. Considerando o estado de Parametrização do veículo, em um sistema a parte do sistema de controle incorporado no veículo, o usuário envia um sinal para o software para consultar informações sobre uma determinada ferrovia;
2. O software então oferece duas opções, onde o usuário deve selecionar se deseja consultar informações sobre uma via ou sobre um trecho de via;
3. Realizada a seleção, o software apresenta os detalhes do arquivo desejado.

Caso de uso – Alterar ferrovia:

1. Considerando o estado de Parametrização do veículo, em um sistema a parte do sistema de controle incorporado no veículo, o usuário envia um sinal para o software para alterar informações sobre uma determinada ferrovia;
2. O software então oferece duas opções, onde o usuário deve selecionar se deseja alterar informações sobre uma via ou sobre um trecho de via;
3. Realizada a seleção, o software disponibiliza o arquivo desejado para alteração;
4. O usuário carrega o arquivo substituto;
5. O software realiza o arquivamento na base de dados externa ao veículo.

Caso de uso – Editar ferrovia:

1. Considerando o estado de Parametrização do veículo, em um sistema a parte do sistema de controle incorporado no veículo, o usuário envia um sinal para o software para editar informações sobre uma determinada ferrovia;
2. O software então oferece duas opções, onde o usuário deve selecionar se deseja alterar informações sobre uma via ou sobre um trecho de via;
3. Realizada a seleção, o software apresenta os detalhes do arquivo desejado para edição;
4. O usuário edita as informações desejadas;

5. O software realiza o arquivamento das edições na base de dados externa ao veículo.

Caso de uso – Cadastrar Missão:

1. Considerando o estado de Parametrização do veículo, em um sistema a parte do sistema de controle incorporado no veículo, o usuário envia um sinal para o software para cadastrar uma missão;
2. O software então apresenta a lista de arquivos de vias, onde o usuário deve selecionar um dos arquivos;
3. Realizada a seleção, o software apresenta um campo para que o usuário parametrize a velocidade da missão;
4. Após de informada a velocidade o software apresenta um campo para que o usuário informe o ponto inicial e ponto final da missão;
5. Definido o ponto inicial e final da missão o software apresenta um campo para que o usuário informe o ponto inicial e final de coleta de dados da missão, que será o trajeto onde serão realizadas as inspeções;
6. Definido o ponto inicial e final da missão o software apresenta um campo para que o usuário selecione quais as inspeções deverão ser utilizadas, considerando ultrassom, inspeção de perfil e inspeção da bitola dos trilhos;
7. O software envia então as informações para a base de dados do sistema de controle que está incorporado ao veículo.

Caso de uso – Consulta missão:

1. Considerando o estado de Parametrização do veículo, no sistema de controle incorporado ao veículo, o usuário envia um sinal para o software para consultar informações sobre uma determinada missão;
2. O software então apresenta uma lista de arquivos de missões já cadastradas;
3. Realizada a seleção, o software apresenta os detalhes do arquivo da missão desejada.

Caso de uso – Alterar missão:

1. Considerando o estado de Parametrização do veículo, no sistema de controle incorporado ao

- veículo, o usuário envia um sinal para o software para alterar uma missão;
2. O software então apresenta a lista de arquivos de missões, onde o usuário deve selecionar um dos arquivos;
  3. Realizada a seleção, o software apresenta um campo para que o usuário avalie a alteração da velocidade da missão;
  4. Após de verificação da velocidade o software apresenta um campo para que o usuário avalie a alteração do ponto inicial e ponto final da missão;
  5. Realizada a verificação do ponto inicial e final da missão o software apresenta um campo para que o usuário avalie a alteração do ponto inicial e final de coleta de dados da missão, que será o trajeto onde serão realizadas as inspeções;
  6. Verificado o ponto inicial e final da missão o software apresenta um campo para que o usuário avalie a alteração das inspeções que deverão ser utilizados, considerando ultrassom, inspeção de perfil e inspeção da bitola dos trilhos;
  7. O software envia então as informações para a base de dados do sistema de controle que está incorporado ao veículo.

#### Caso de uso – Excluir missão:

1. Considerando o estado de Parametrização do veículo, no sistema de controle incorporado ao veículo, o usuário envia um sinal para o software para excluir uma missão;
2. O software então apresenta a lista de arquivos de missões, onde o usuário deve selecionar um dos arquivos e solicitar a exclusão;
3. O software elimina o arquivo da missão da base de dados do sistema de controle que está incorporado ao veículo.

#### Caso de uso – Controlar movimento:

1. O sistema de controle incorporado ao veículo recebe o sinal do usuário para controlar o movimento, podendo ser para parar um movimento já iniciado ou para iniciar o movimento;

2. Caso o sinal seja para parar o movimento, o controle envia um sinal para desligamento do motor do veículo e na sequência envia um sinal para acionamento dos freios do veículo passando o veículo do estado Movimentação para Desligado;
3. Sendo um sinal para iniciar o movimento o usuário informa qual a missão deve ser executada considerando que esta informação está gravada na base de dados do sistema incorporado ao veículo, passando o veículo do estado Desligado para o estado Movimentação;
4. Após a seleção da missão o controle envia sinais para acionamento das luzes de segurança, câmera e sensores de acompanhamento do perímetro;
5. Após acionamento da câmera de acompanhamento do perímetro o controle recebe os sinais do equipamento e retransmite as imagens;
6. O controle recebe o sinal do Sistema Global de Posicionamento;
7. O controle recebe o sinal do sensor de acompanhamento do perímetro e caso seja identificada alguma obstrução o controle interrompe o fluxo de atividades e emite um alerta para o usuário, transferindo o veículo do estado Movimentação para Alerta;
8. Considerando que não foram identificadas obstruções no perímetro, o veículo continua no estado Movimentação e o controle aciona a sirene que permanecerá ligada em todo o percurso da missão;
9. O controle define o sentido de rotação do motor com base na direção que o veículo deverá seguir;
10. Após definir o sentido de rotação, o controle envia o sinal para acionamento do motor;
11. O controle recebe novamente o sinal do sensor de acompanhamento do perímetro e caso seja identificada uma obstrução o controle envia sinal para desligamento do motor, um sinal para acionamento dos freios do veículo, um sinal para desligamento da sirene e emite um alerta para o usuário paralisando o fluxo de atividades. Neste caso

- o veículo passa do estado Movimentação para o estado Alerta;
12. Considerando que não sejam identificadas obstruções, o veículo permanece no estado Movimentação e o controle acompanha o sinal do Sistema Global de Posicionamento até o ponto de coleta inicial dos dados parametrizados na missão;
  13. O controle recebe o sinal com informação sobre a velocidade do veículo. Caso a velocidade esteja acima da programada o controle envia sinal para alteração da tensão e corrente do motor para estabilização da velocidade;
  14. O controle verifica quais os sistemas de inspeção foram selecionados para a missão e envia os sinais para acionamento destes sistemas, passando o veículo do estado Movimentação para Operação de Inspeção;
  15. O controle acompanha as informações do Sistema de Posicionamento Global até o ponto de coleta final;
  16. O controle envia os sinais para desativação dos sistemas de inspeção, passando o veículo do estado Operação de Inspeção para o estado Movimentação;
  17. É realizado o acompanhamento das informações do Sistema de Posicionamento Global até o ponto final da missão;
  18. Ao atingir o ponto final da missão o controle envia um sinal para desligamento do motor e um sinal para acionamento dos freios do veículo;
  19. O controle desliga a sirene. Nesta situação o veículo passa do estado Movimentação para o estado Desligado.

Caso de uso – Operar ultrassom:

1. Durante o caso de uso Controlar movimento, ao atingir o ponto para início ou fim da coleta das informações de ultrassom o sistema envia sinal para o sistema de ultrassom;
2. Considerando o sinal para desativação do ultrassom, o controle envia sinal para bloquear a liberação do gel utilizado no bico de ultrassom e envia um sinal para deslocar o bico de ultrassom, se afastando do trilho;

3. Considerando o sinal para ativação do ultrassom, o controle envia sinal para liberar o gel utilizado no bico de ultrassom;
4. O controle envia o sinal para posicionamento do bico do ultrassom sobre o trilho a ser inspecionado;
5. O controle recebe as informações da operação do sistema de ultrassom;
6. As informações obtidas pelo sistema de ultrassom são enviadas para a base de dados do sistema de controle incorporado ao veículo.

Caso de uso – Operar câmera 2:

1. Durante o caso de uso Controlar movimento, ao atingir o ponto para início ou fim da coleta das informações de imagens o sistema envia sinal para o sistema da câmera;
2. Considerando o sinal para desativação da câmera, o controle envia sinal para desligar a câmera;
3. Considerando o sinal para ativação da câmera, o controle envia sinal para ligar a câmera;
4. O controle recebe as informações obtidas pela câmera;
5. As informações obtidas são enviadas para a base de dados do sistema de controle incorporado ao veículo.

Caso de uso – Coletar perfil:

1. Durante o caso de uso Controlar movimento, ao atingir o ponto para início ou fim da coleta das informações de perfil dos trilhos, o controle envia sinal para o perfilômetro;
2. Considerando o sinal para desativação do perfilômetro, o controle envia sinal para desligar o equipamento;
3. Considerando o sinal para ativação do perfilômetro, o controle envia sinal para ligar o equipamento;
4. O controle recebe as informações obtidas pelo perfilômetro;
5. As informações obtidas são enviadas para a base de dados do sistema de controle incorporado ao veículo.

Considerando a segunda etapa da Fase 5 - Modelar Software, com base nos fluxos de eventos definidos anteriormente, são então elaborados os diagramas de fluxos de atividades para cada caso de uso conforme ilustrado nas Figuras 47 a 50.



Figura 47 – Diagramas Fluxos de Atividades: Gerenciar ferrovia.

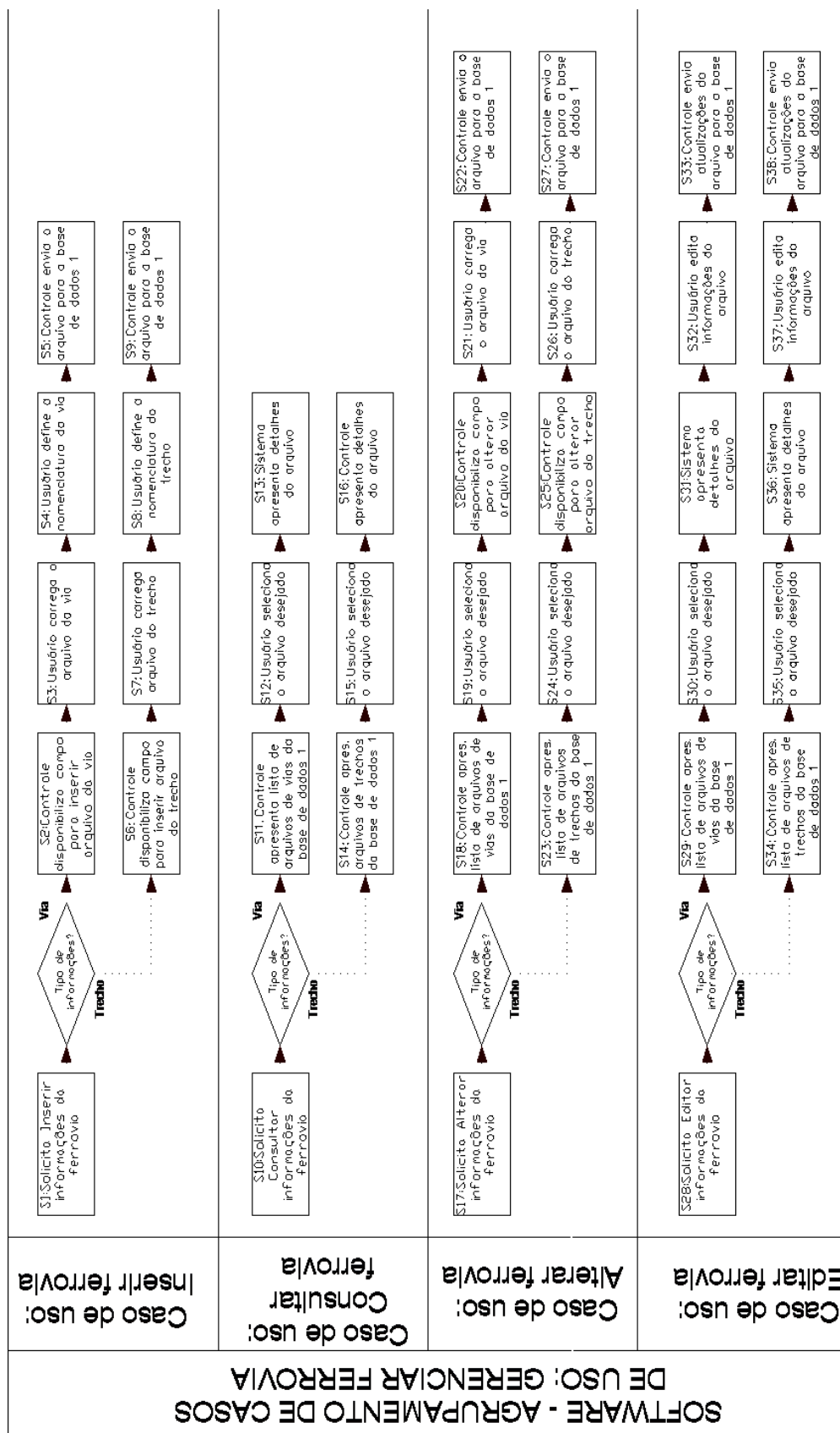


Figura 48 – Diagramas Fluxos de Atividades: Gerenciar missão.

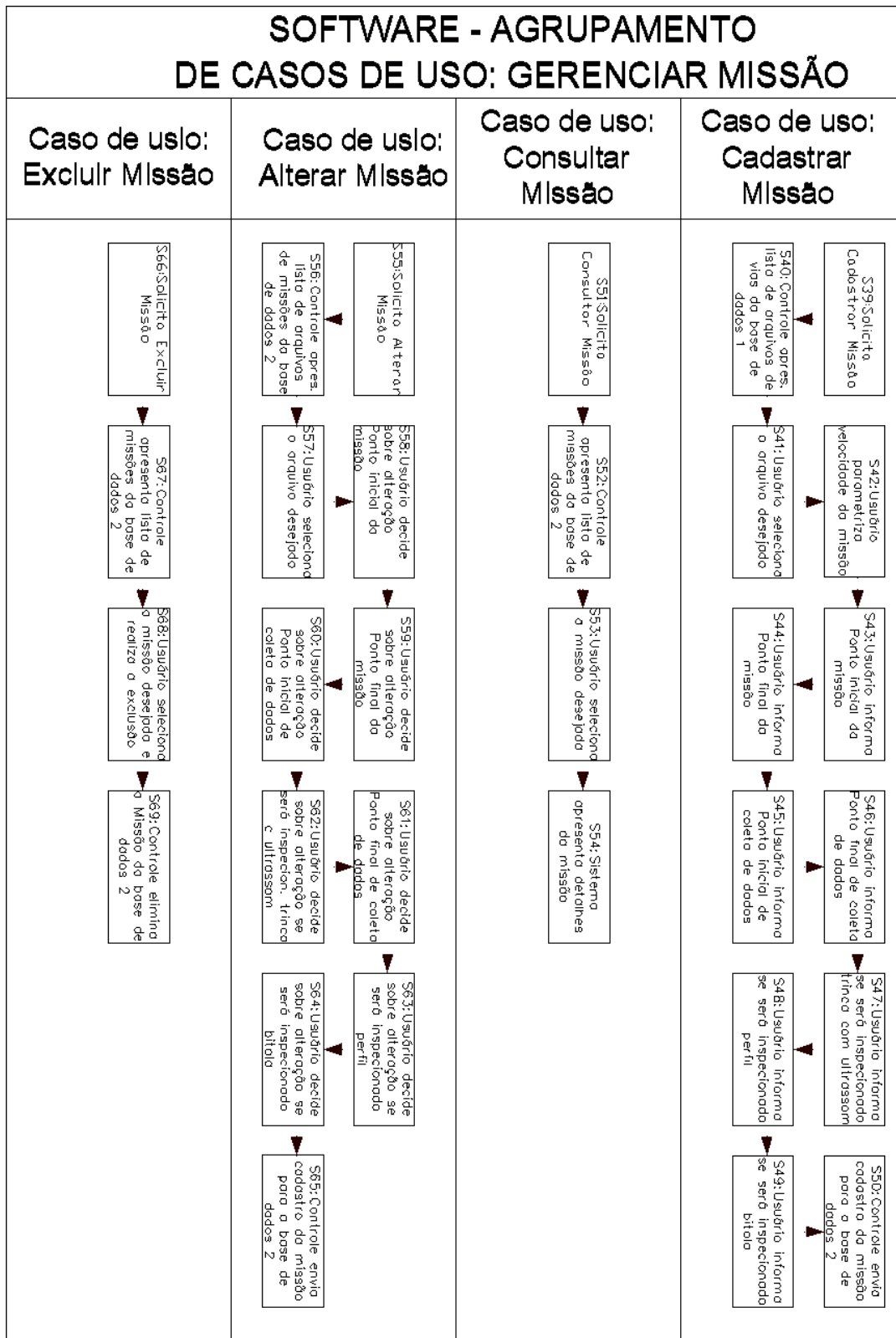
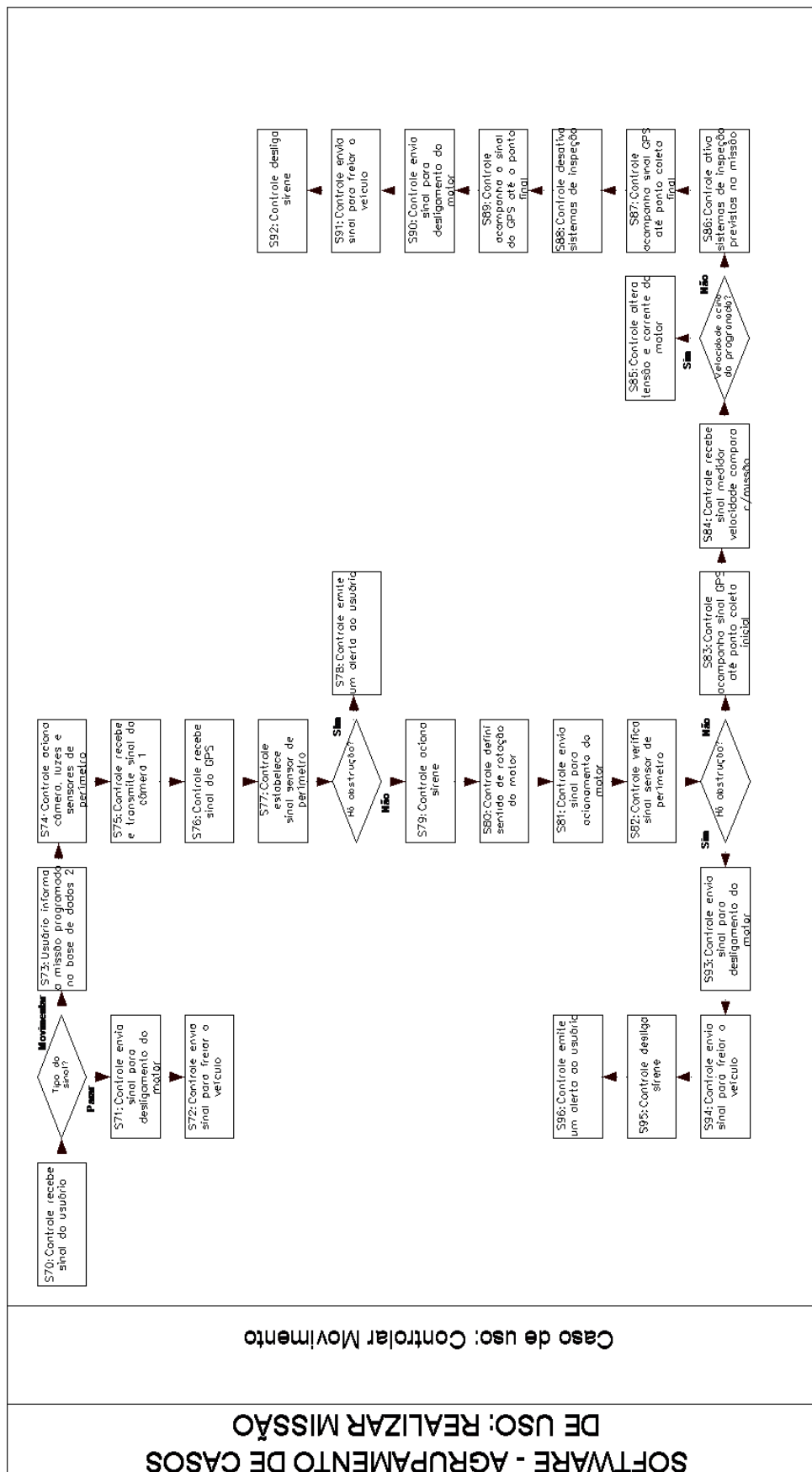
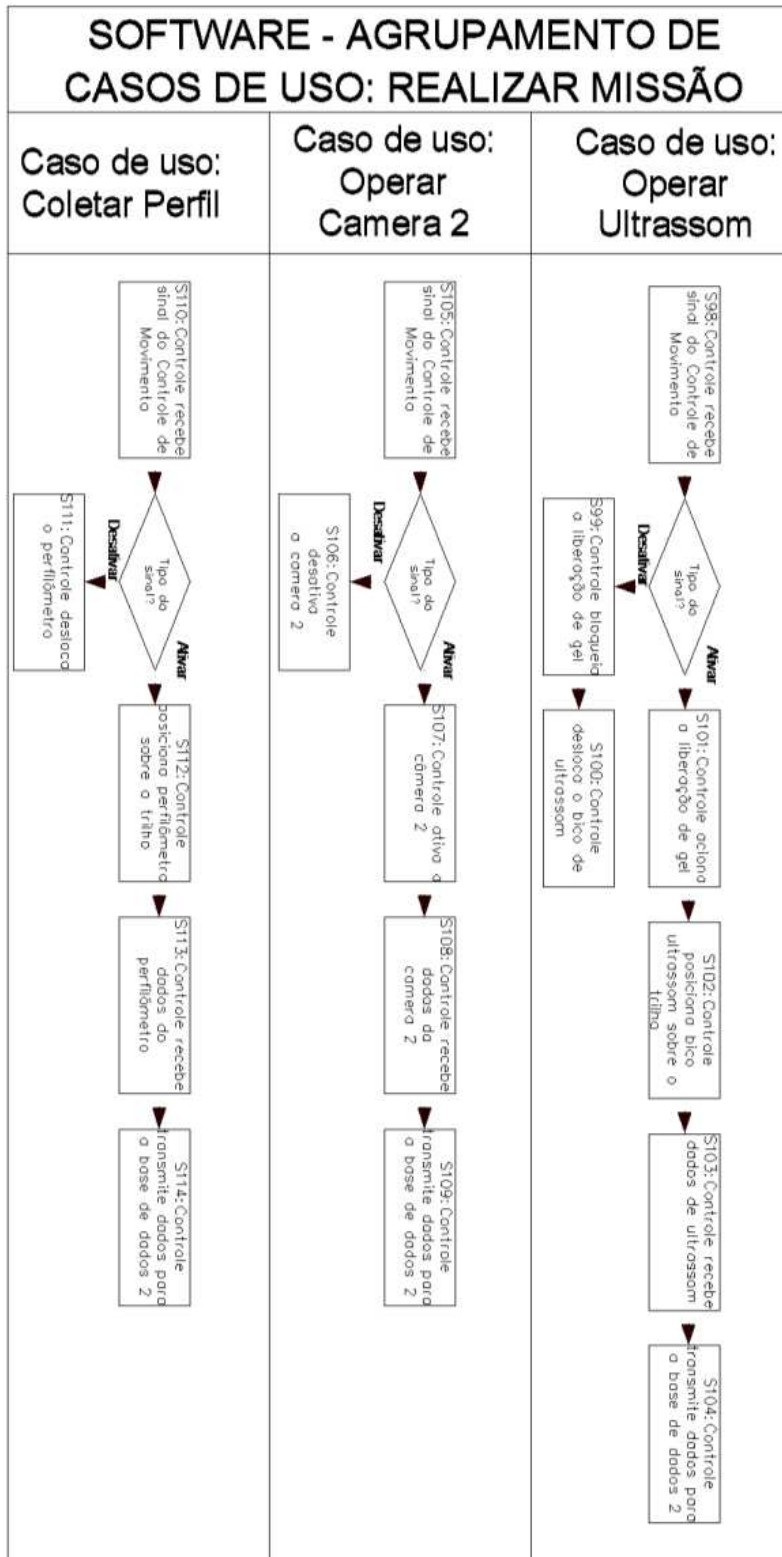


Figura 49 – Diagramas Fluxos de Atividades: Realizar missão I.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Figura 50 – Diagramas Fluxos de Atividades: Realizar missão II.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Seguindo para a Fase 6 – Construir o Modelo Funcional, em uma primeira etapa, é elaborado o modelo funcional considerando as funções do campo da mecânica e da elétrica conforme apresentado na Figura 51.

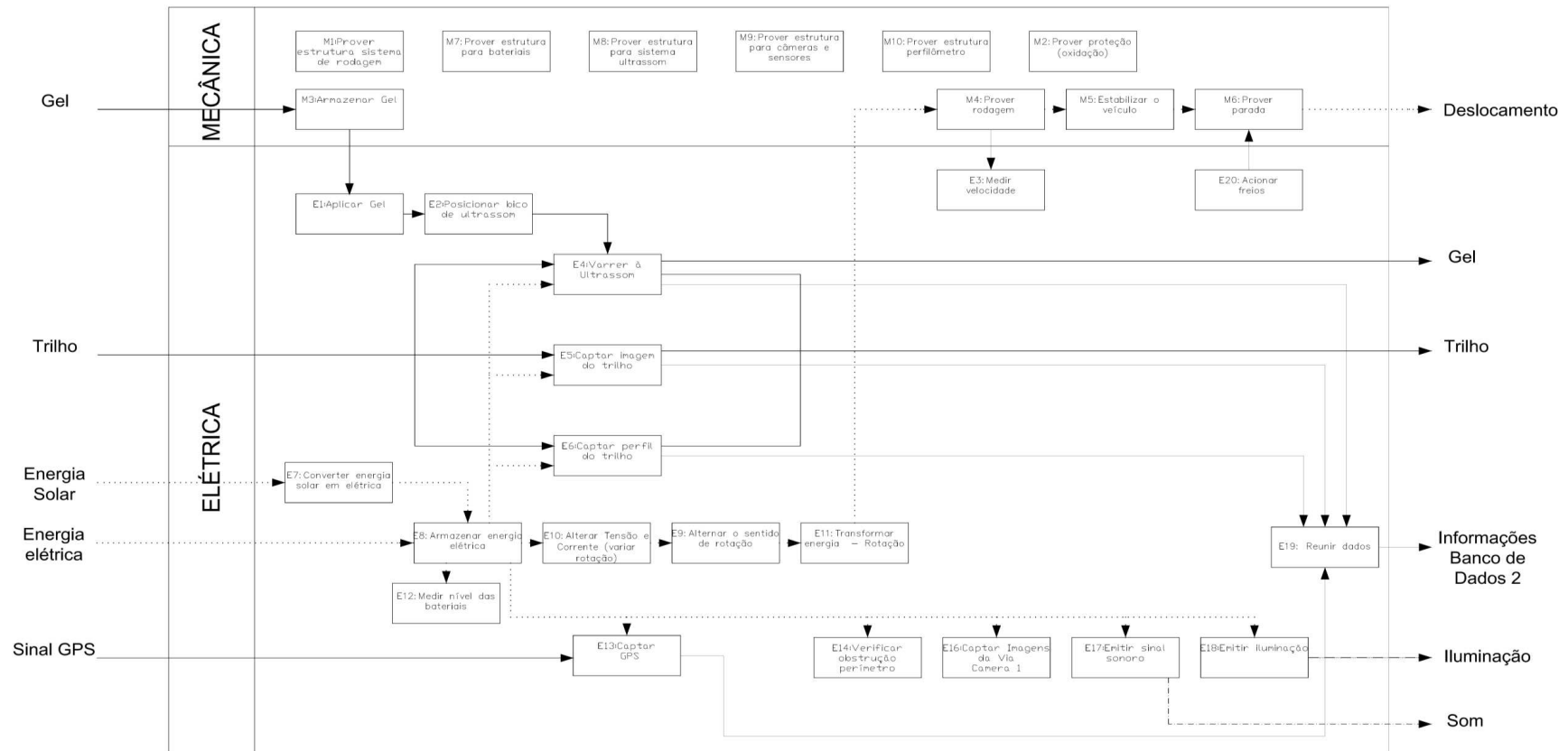
A segunda etapa da Fase 6 realiza a junção do modelo funcional apresentado na Figura 52 com os diagramas de fluxos de atividades apresentadas nas Figuras 47, 48, 49 e 50, indicando as interfaces entre as disciplinas. Esta junção, representa o modelo funcional final do veículo autônomo para inspeção de trilhos e é apresentada na Figura 52. Apenas com o objetivo de facilitar a visualização das integrações no modelo funcional, a Figura 53 faz uma apresentação ocultando os diagramas de fluxos de atividades que são apresentados previamente nas Figuras 47 e 48, considerando que estes são direcionados para o Gerenciamento da Ferrovia e Gerenciamento da Missão e não possuem vínculo direto com as funções de mecânica e elétrica.

O projeto do veículo autônomo para inspeção de trilhos ferroviários desenvolvido no Laboratório de Estudos Ferroviários (LEF) resultou em um outro modelo funcional para o produto o qual é apresentado na Figura 54, sendo que para cada caso de uso identificado para o veículo foi desenvolvido um diagrama a parte utilizando a linguagem UML, onde constam as atividades de software. Uma amostra destes diagramas é apresentada na Figura 55 com o agrupamento dos casos de uso Realizar Missão. (SCALICE, BERKENBROK E ASAFF, 2017)

Realizando uma comparação entre o modelo funcional elaborado pelo LEF (Figuras 54 e 55) e modelo funcional obtido com a aplicação do Método de Modelagem Funcional de Produtos Mecatrônicos apresentado nesta dissertação (Figuras 52 e 53), é possível verificar no modelo do LEF uma dificuldade em representar as relações dos campos de mecânica e elétrica (Sensores) com o controle do veículo, onde no campo superior da Figura 54, descrita como Lógica, foram apenas inseridas funções sem conexões, além da necessidade de um esforço adicional para identificar as ligações existentes entre os diagramas de casos de uso e o modelo funcional do veículo. Ressaltando que para o produto em análise foram caracterizados 12 casos de uso, e com esta representação da modelagem realizada pelo LEF são necessários 13 diagramas (adicionando o modelo funcional). Além de unificar as funções e atividades em um único diagrama, o método proposto visa apresentar de forma visível as ligações existentes entre o campo de software e os campos da mecânica e elétrica, beneficiando a leitura e interpretação do diagrama pelos usuários da ferramenta.

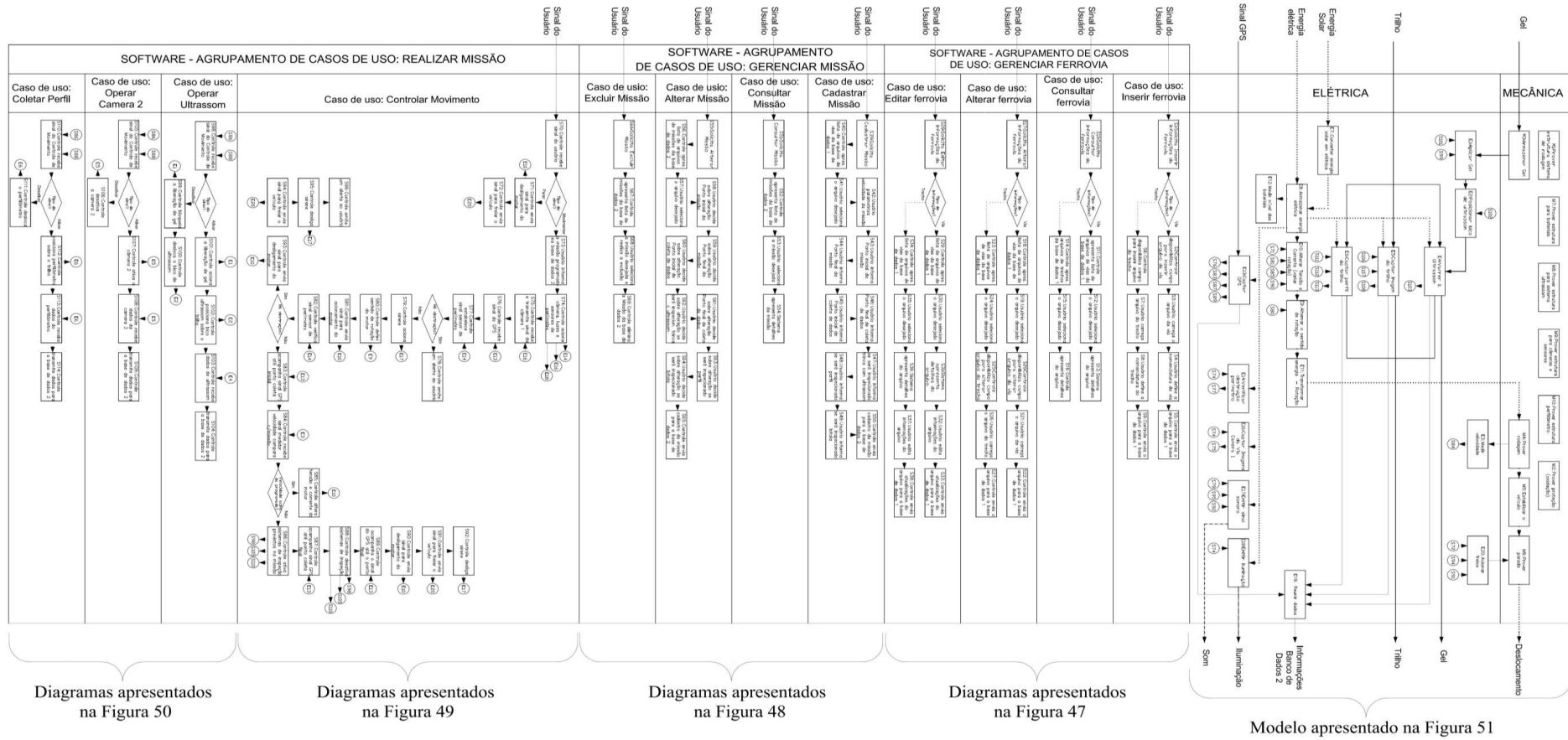


Figura 51 - Modelo funcional Veículo (Mecânica e Elétrica).



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Figura 52 – Modelo funcional final Veículo.



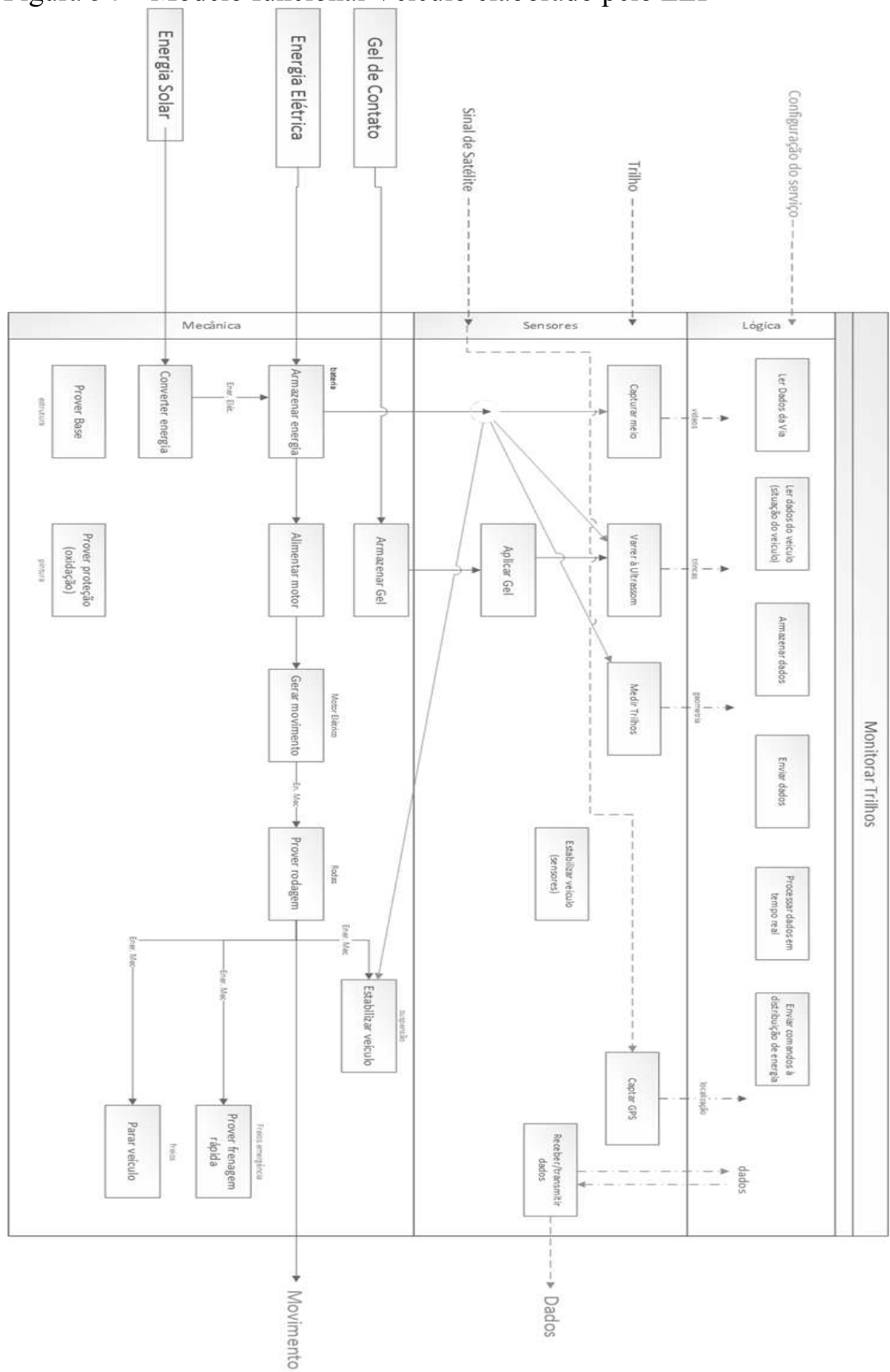
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018





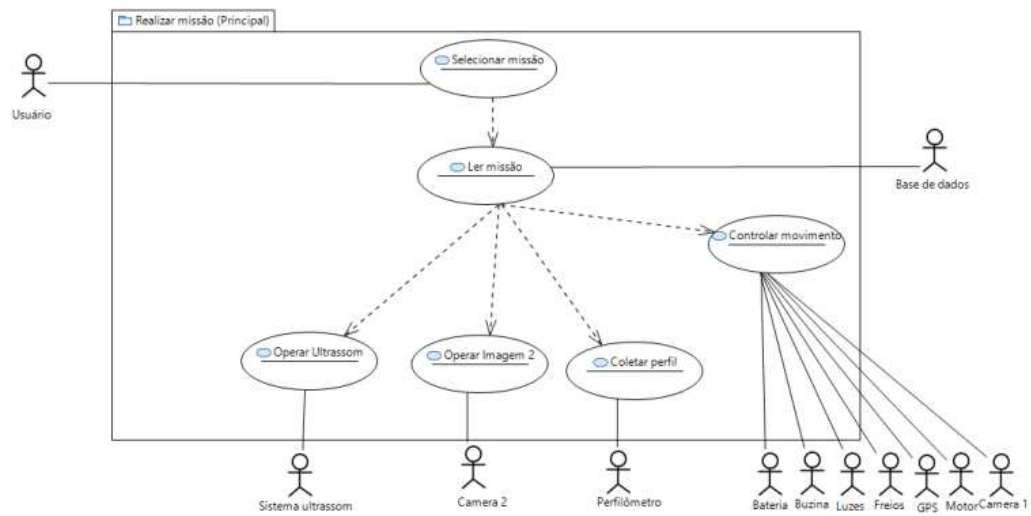


Figura 54 – Modelo funcional Veículo elaborado pelo LEF



Fonte: Scalice, Berkenbrock e Asaff (2017)

Figura 55 – Diagrama caso de uso Realizar Missão - LEF



Fonte: Scalice, Berkenbrock e Asaff (2017)

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A pesquisa teve como objetivo geral desenvolver um método para a modelagem funcional de produtos mecatrônicos. Em correlação com o objetivo geral, o método proposto para a Modelagem Funcional de Produtos Mecatrônicos permite uma apresentação unificada, em um só diagrama, representar as correlações e vínculos entre as três disciplinas envolvidas no projeto do produto, de forma a manter a abstração proposta pela modelagem funcional tradicional, utilizada em outras metodologias.

Em uma análise do objetivo específico identificar o estado da arte para modelagem funcional de produtos mecatrônicos, a pesquisa realiza o atendimento do tópico com a apresentação de publicações com o mesmo foco da dissertação, servindo como estimuladores e direcionadores para o desenvolvimento do método proposto, comprovando a oportunidade de sintetizar ainda mais as fases necessárias para trabalhar a modelagem funcional para produtos mecatrônicos.

O segundo objetivo específico, explicitar quais os aspectos devem ser considerados para o desenvolvimento de uma metodologia para a modelagem funcional de produtos mecatrônicos, os quais são representados com as seis fases consideradas no método proposto, sendo estas classificadas como indispensáveis para a obtenção de uma modelagem que permita servir de base para outras etapas pertinentes ao projeto de produtos mecatrônicos.

Como terceiro objetivo específico e obtendo uma correlação direta com o objetivo geral, elaborar uma proposta para elaborar a modelagem funcional de produtos mecatrônicos, tem o constructo embasado nas informações obtidas com a pesquisa do estado da arte e intimamente relacionado com um produto já existente, o compressor de ar, o qual também foi utilizado para a avaliação do método. Algumas limitações e oportunidades percebidas nas avaliações serão analisadas a diante, sendo que o atendimento do método ao objetivo específico pôde ser comprovado e apresentado nesta dissertação com a obtenção da modelagem funcional de dois produtos, denotando a eficácia do método.

Em um quarto objetivo específico, avaliar a proposta para elaborar a modelagem funcional de produtos mecatrônicos,

considerou além da aplicação do método em dois produtos, uma análise externa por especialistas da área acadêmica e da área industrial, considerando aspectos de eficácia, usabilidade e repetibilidade e assim como os demais objetivos específicos, verifica-se o atendimento deste tópico na avaliação.

Realizando uma abordagem nos três aspectos centrais considerados na avaliação realizada com os especialistas, o método foi confrontado considerando a eficácia, a usabilidade e a repetibilidade. Nas três questões do questionário aplicado que direcionam para estes aspectos houve um direcionamento para opções de respostas “Sim” e “Parcialmente” o que corroboram para a validade do método no contexto para o qual se aplica. A análise do resultado da pesquisa considera a escolha pela opção “Parcialmente” como positivo, sendo que o tópico em questão possui alguma oportunidade de melhoria. Considera-se ainda, que devido a restrições de quantidade das informações a serem inseridas dentro do questionário, os entrevistados não tiveram acesso ao conteúdo completo de aplicação do método, composto pelo capítulo 4, o que direcionaria para um maior entendimento e possivelmente a seleção da opção “Sim”.

Partindo para a contribuição do trabalho para o ambiente acadêmico, é verificado que este segue uma tendência com as pesquisas publicadas considerando produtos complexos compostos por sistemas interdisciplinares. Estas publicações são recorrentes considerando o período dos últimos cinco anos, onde o trabalho desenvolvido agrega uma nova abordagem. A abordagem realizada neste trabalho, o qual realiza adaptações da modelagem funcional para os produtos mecatrônicos, demonstra a ampla aplicabilidade do tema para horizontes além da área mecânica, área de origem do tema. A pesquisa existente nesta dissertação não tem o caráter de suprimir outras abordagens desenvolvidas para análise de funções no contexto de produtos mecatrônicos, mas sim contribuir com uma sistematização que possibilite tornar o processo de desenvolvimento de produtos mais eficiente.

## 6.1 LIMITAÇÕES E OPORTUNIDADES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar dos resultados positivos alcançados, o método proposto na dissertação apresentou algumas limitações que

podem ser traduzidas como oportunidades de desenvolvimento e aperfeiçoamento.

Entre as limitações verificadas, o intuito de compilar todas as informações do modelo funcional em um único diagrama acaba impactando na extensão do modelo, exigindo que este seja apresentado de forma eletrônica ou impressões em formatos acima de A3 para uma melhor visualização. Como exemplo desta limitação, o modelo do veículo para a inspeção de trilhos ferroviários teve que ser desmembrado para apresentação nesta dissertação.

Outro fator identificado após as avaliações está relacionado com a representação da temporalidade no método proposto. Apesar deste fator ser considerado na elaboração do método com a consideração da Fase 3 – Estados, onde são verificados os estados do produto, no momento de elaborar o modelo funcional do produto mecatrônico surge uma oportunidade de aumentar o entendimento das mudanças de estados. Na elaboração prévia do constructo foi analisada a elaboração de um modelo para cada estado do produto com o objetivo de indicar as funções que são atividades ou desativadas em cada estado do produto, sendo que esta linha de raciocínio impactaria no desenvolvimento de vários modelos para o mesmo produto, tornando a representação do produto complexa e extensa.

Outro fator que pode ser traduzido como uma limitação, e que foi sinalizado na avaliação com os especialistas está relacionado com a ausência de um suporte digital para gerenciamento das informações em todas as seis fases existentes no Método de Modelagem Funcional de Produtos Mecatrônicos proposto. Considera-se que o registro manual das informações não contribui para a reanálise das fases e etapas de modo a evoluir no conteúdo obtido sobre o produto e obter um maior detalhamento das funções envolvidas.

O método proposto mantém a base da modelagem funcional tradicional, desenvolvida para a área mecânica, mas busca a adaptação para absorver as áreas de elétrica e software. Neste sentido, considerando a característica multidisciplinar dos produtos mecatrônicos, há um direcionamento para que o método proposto seja aplicado por uma equipe e não apenas por um especialista. É sugerido que a equipe em questão, seja composta por representantes das três áreas, mecânica, elétrica e software,

garantindo assim a identificação das restrições de projeto e obtenção de um modelo funcional consolidado.

Analisando a divisão das três disciplinas proposta pelo método, onde foi designado no modelo funcional um campo para a área de mecânica, um campo para área de elétrica e um campo para área de software, verifica-se a oportunidade de aumentar o número de campos, realizando uma subdivisão no campo de elétrica, considerando ainda o campo da eletrônica, e outra subdivisão no campo do software, segregando atividades do controle do produto. Neste sentido poderia ser avaliado a composição do modelo funcional por cinco campos, sendo estes mecânica, elétrica, eletrônica, software e controle.

Considerando a continuidade da pesquisa contida nesta dissertação, o fator de aplicabilidade do método surge como uma proposta de investigação futura considerando como base a avaliação deste fator perante os especialistas da academia, onde o método teve um maior direcionamento para sistemas mecatrônicos automáticos e menor para sistemas mecatrônicos inteligentes e redes mecatrônicas inteligentes. O aperfeiçoamento do método nestas duas últimas classificações pode ser realizado de forma a incorporar a robustez ao método proposto.

A tema da modelagem funcional pode ainda ter um desdobrando em síntese funcional e análise funcional. Neste sentido é considerado que o método proposto direciona para a síntese funcional, aplicado no projeto de produtos novos, surgindo a oportunidade de elaboração de estudos no contexto da análise funcional, direcionando o método proposto para a engenharia reversa.

Na análise do termo modularidade, a modelagem funcional já é considerada uma ferramenta que incentiva a análise e aplicação do termo sendo que o método proposto ainda pode ser trabalhado para aumento da visibilidade dos módulos e oferecer as equipes de projeto uma ferramenta de apoio para produtos mecatrônicos.



## REFERENCIAS

ABID, H., et al. SysML approach for the integration of mechatronics system within PLM systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* v. 28, n. 9, 2015. p. 972–987.

ATIVIDADE. Dicionário online Michaelis, 15 dez. 2017. Disponível em < <http://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/atividade/>>. Acesso em 15 dez. 2017.

BACK, N., et al. *Projeto integrado de produtos : planejamento, concepção e modelagem*. 1. ed. Barueri, SP: Manole, 2008.

BISHOP, R. H. *Mechatronics: an introduction*. 1. ed. New York: CRC, 2005.

CABRERA, A.A.A., et al. Towards automation of control software: A review of challenges in mechatronic design. *Mechatronics* v. 20, n. 8, p. 876–886 , 2010.

CHAKRABARTI, A. A course for teaching design research methodology. *Ai Edam* v. 24, n. Special Issue 03, p. 317–334 , 2010.

COMPORTAMENTO. Dicionário online Michaelis, 15 dez. 2017. Disponível em < <http://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/comportamento/>>. Acesso em 15 dez. 2017

CONFORTO, E.C.; AMARAL, D.C.; SILVA, S.L.Da. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. 8º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolviemnto de Produto - CNGDP 2011 v. 8, n. 1998, p. 1–12 , 2011.

DIAGRAMA. Dicionário online Michaelis, 15 dez. 2017. Disponível em <<http://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/diagrama/>>. Acesso em 15 dez. 2017.

EIGNER, M., et al. A view-based modeling approach for representing multidisciplinary functions in pdm systems. International Design Conference - Design 2010 p. 1285–1294.

EISENBART, B.; GERICKE, K.; BLESSING, L.T.M. Application of the ifm framework for modelling and analysing system functionality. International Design Conference – Design 2014, p. 153–162.

EISENBART, B., et al. A DSM-based framework for integrated function modelling: concept, application and evaluation. Research in Engineering Design v. 28, n. 1, p. 25–51 , 2017.

EISENBART, B. Supporting interdisciplinary system development through integrated function modelling. 2014, p. 222. Dissertation – Science of Engineering, University of Luxembourg, Luxembourg, 2014.

EISENBART, B.; GERICKE, K.; BLESSING, L.T.M. Taking a look at the utilisation of function models in interdisciplinary design: insights from ten engineering companies. Research in Engineering Design v. 28, p. 299-331 , 2017 .

ENTIDADE. Dicionário online Michaelis, 15 dez. 2017. Disponível em < <http://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/entidade/>>. Acesso em 15 dez. 2017

FERREIRA, M.G.G. Utilização de modelos para a representação de produtos no projeto conceitual. 1997. p. 128, Dissertação – Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

FONSECA, A.J.H.. Sistematização do processo de obtenção das especificações de projeto de produtos industriais e sua implementação computacional. 2000. p. 198. Tese – Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

FOTSO, A.B.; WASGINT, R.; RETTBERG, A. State of the art for mechatronic design concepts. Proceedings of 2012 IEEE/ASME 8th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications. 2012. p. 232–240.

GAUSEMEIER, J., et al. Specification technique for the description of self-optimizing mechatronic systems. *Research in Engineering Design* v. 20, n. 4, p. 201–223, 2009.

KITCHENHAM, B., et al. Systematic literature reviews in software engineering: a tertiary study. *Information and Software Technology* v. 52, n. 8, p. 792–805 . 2010.

KROLL, P; KRUCHTEN, P. The rational unified process made easy: a practitioner's guide to the RUP. 1. ed. Boston: Addison-Wesley, 2003.

KRUSE, B., et al. A model-based functional modeling and library approach for mechatronic systems in sysml. ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE. 2012, p. 1–11.

KRUSE, B., et al. Systematic comparison of functional models in SysML for design library evaluation. 24th CIRP Design Conference v. 21, p. 34–39 , 2014.

LACERDA, D.P., et al. Design Science Research: Método de Pesquisa para o Avanço da Ciência e Tecnologia. *Gestão e Produção* v. 20, 741 - 761 , 2013.

LEU, M.C.; WU, J.C.; LIU, X.F. Axiomatic functional and object-oriented product design framework. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* v. 58, n. 1, p. 147–152 , 2009.

LIU, C., et al. Conceptual design of multi-modal products. *Research in Engineering Design* v. 26, n. 3, p. 219–234 , 2015.

MARIBONDO, J.F. Desenvolvimento de uma metodologia de projeto de sistemas modulares, aplicada a unidades de processamento de resíduos sólidos domiciliares. 2000. p. 277. Tese - Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

MHENNI, F., et al. A SysML-based methodology for mechatronic systems architectural design. *Advanced Engineering Informatics* v. 28, n. 3, p. 218–231 , 2014.

PAHL, Gerhard. et al. *Engineering design: a systematic approach*. 3. ed. New York: Springer, 2007.

PEFFERS, K., et al. A design science research methodology for information systems research. *Source Journal of Management Information Systems* v. 24, n. 3, p. 45–77 , 2007.

ROMME, A.G.L. Making a difference: organization as design. *Organization Science* v. 14, n. 5, p. 558–573 , 2003.

ROZENFELD, H., et al. *Gestão do processo de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo*. 1. ed. São Paulo, SP: Saraiva, 2006.

RZEVSKI, G. On conceptual design of intelligent mechatronic systems. *Mechatronics* v. 13, n. 10 SPEC., p. 1029–1044 , 2003.

SCALICE, R.K.; BERKENBROCK, G.R.; ASAFF, Y.E. Use Case Based Methodology for Conceptual Design of Industrial Mechatronic Products. 2017, Vancouver: International Conference on Engineering Design, ICED17, 2017. p.347–355.

SIMON, H.A. *The sciences of the artificial*. 3. ed. Cambridge: MIT Press, 1996.

SISTEMA. Dicionário online Michaelis, 15 dez. 2017. Disponível em < <http://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/sistema/>>. Acesso em 15 dez. 2017.

VAN BEEK, T.J.; ERDEN, M.S.; TOMIYAMA, T. Modular design of mechatronic systems with function modeling. *Mechatronics* v. 20, n. 8, p. 850–863 , 2010.

WALTERS, R.M.; BRADLEY, D.A.; DOREY, A.P. A conceptual study for a computer-based tool to support electronics design in a mechatronic environment. *Microprocessors and Microsystems* v.24, p. 51–61 , 2000.

WU, J.C.; LEU, M.C.; LIU, X.F. A hierarchical object-oriented functional modeling framework for co-design of mechatronic products. *Concurrent Engineering* v. 17, n. 4, p. 245–256 , 2010.

ZHENG, C., et al. Multidisciplinary interface model for design of mechatronic systems. *Computers in Industry* v. 76, n. C, p. 24–37, 2016.

## APÊNDICE 1 – Questionário para Avaliação do Método de Modelagem Funcional de Produtos Mecatrônicos

### Página 1/8 - Apresentação do Método para Modelagem Funcional de Produtos Mecatrônicos

O método desenvolvido para elaborar a modelagem funcional de produtos mecatrônicos é representado pelo esquema em abaixo, sendo que cada fase relacionada ao método será apresentada nos próximos slides.

Para possibilitar uma melhor avaliação do método proposto, é realizada a aplicação deste em um produto mecatrônico.

O produto selecionado trata-se de um Compressor de Ar Rotativo de Parafusos.

#### Esquema Método para Modelagem Funcional de Produtos Mecatrônicos



## Página 2/8 - Fase 1 - Informações Sobre o Produto

### Explicação do Método:

Para iniciar a modelagem funcional de um produto mecatrônico o método proposto considera a necessidade de conhecer e entender o produto que será modelado. Estas informações podem ser resultantes da aplicação de outras ferramentas na fase do Projeto Informacional do produto. Nesta fase devem ser consideradas a Etapa 1- Analisar características e a Etapa 2 - Analisar requisitos do produto para aumentar o entendimento do projeto antes de dar seguimento nas fases de desenvolvimento do modelo funcional.

### Exemplo:

Escopo do Produto: Compressor de ar rotativo de parafusos com velocidade variável com fornecimento de ar direto

#### Etapa 1 - Analisar Características

Entende-se com o escopo que o compressor de ar deve apresentar uma flexibilidade durante a operação, de forma que ao atingir a pressão desejada o produto não interrompa a compressão de ar, mas possibilite reduzir a compressão até que a pressão da rede, ao qual está acoplado, apresente uma baixa devido ao consumo, e então o produto volte a compressão normal. Esta característica tem como objetivo reduzir o número de partidas do motor presente no compressor e como consequência apresentar menor consumo de energia elétrica. Outra característica verificada no escopo, indica que o produto não possui um reservatório próprio para o armazenamento de ar comprimido, desta forma o compressor estará acoplado diretamente em uma rede de ar a qual poderá ou não possuir um reservatório independente.

#### Etapa 2 - Analisar Requisitos

Para a segunda etapa que compõe a Fase 1 da proposta, Analisar requisitos, são listados os tópicos a seguir:

- O compressor deve operar com energia elétrica;
- O compressor deve possuir um sistema que possibilite variar a rotação do motor;
- O compressor deve realizar uma filtragem do ar captado da atmosfera;
- O compressor deverá fornecer ar comprimido com uma pressão de até 9 bar;
- O compressor deve possuir um sistema para reduzir a temperatura do ar comprimido fornecido para a rede;
- O compressor deve possuir um sistema de controle que possa ser parametrizado pelo usuário;
- O compressor deve possuir uma estrutura metálica para sustentação e proteção dos componentes;

As informações listadas servirão como base para a elaboração das fases subsequentes do método proposto.

Você considera que esta fase contribui para elaboração do modelo funcional de produtos mecatrônicos?

Sim

Parcialmente

Não

### Página 3/8 - Fase 2 - Casos de Uso

Explicação do Método:

Etapa 1 - Identificar os casos de uso

Nesta fase devem ser identificados os casos de uso para os quais o produto mecatrônico se destina. Esta análise permite aprofundar o conhecimento sobre o produto a ser modelado funcionalmente e possibilita visualizar as ocorrências do mesmo processo em diferentes casos de uso.

Para ilustrar a identificação dos casos de uso em um produto mecatrônico Eisenbart et al (2014) utiliza como exemplo uma máquina de venda automática de café, onde são considerados como casos de uso a preparação de uma xícara de cappuccino, a preparação de água quente para chá e a limpeza automática do sistema interno do equipamento.

Etapa 2 - Especificar os casos de uso

Direciona para o detalhamento em parágrafos explicativos, de forma a contextualizar as informações sobre cada estado.

Exemplo:

Analisando o contexto de aplicação do compressor de ar rotativo de parafusos, considera-se a existência de apenas um caso de uso conforme apresentado na Tabela abaixo, contendo a respectiva especificação, atendendo as duas etapas existentes na Fase 2.

Etapas 1 e 2 - Identificar e Especificar os casos de uso (primeira e segunda coluna respectivamente)

Casos de uso do produto	Especificação do caso de uso
Compressão de ar	O compressor recebe o comando do usuário para entrar em funcionamento, ou caso esteja em operação recebe o comando para desligamento. Para entrar em funcionamento, após receber o comando, o motor elétrico inicia a operação, sendo que a entrada de ar para compressão permanece fechada para não sobrecarregar o motor. Após alguns segundos a entrada de ar é liberada e o produto começa a fornecer ar comprimido para a rede de ar na qual o produto está acoplado. O sistema monitora a pressão na saída de ar comprimido do compressor e ao identificar que a pressão está acima de 9 bar a entrada de ar no sistema é bloqueada. Este bloqueio permanece até a redução da pressão para menos de 9 bar devido ao consumo do ar na rede. Havendo redução da pressão a entrada de ar é liberada novamente. Caso a pressão não reduza mesmo com a restrição na entrada de ar, a rotação do motor deverá ser reduzida. Havendo redução da pressão a rotação do motor volta para a condição ideal. Caso a pressão não reduza mesmo com a alteração na rotação do motor elétrico, o motor deve ser desligado. Mesmo com o motor estando desligado por excesso de pressão, a pressão continua sendo monitorada até ser identificada a redução e com isso o motor volta a ser acionado.

Você considera que esta fase contribui para elaboração do modelo funcional de produtos mecatrônicos?

Sim

Parcialmente

Não



### Página 4/8 - Fase 3 – Estados

Explicação do Método:

Etapa 1 - Identificar os estados

Em complemento a fase relacionada com os casos de uso, na fase de Estados devem ser identificados os estados que o produto mecatrônico deve apresentar, de modo a desenvolver o entendimento sobre o comportamento do produto.

Esta etapa deve representar cada estado que produto pode ou deve apresentar. Em uma visualização simplificada, um produto pode apresentar o estado ligado e o estado desligado, sendo que devem ser verificadas possíveis variações como um estado de início de operação, onde algumas atividades são executadas pelo sistema para permitir que o produto atinja o estado de ligado ou em operação total.

Etapa 2 - Especificar os estados

Direciona para o detalhamento em parágrafos explicativos, de forma a contextualizar as informações sobre cada estado.

Exemplo:

Analisando o contexto de aplicação do compressor de ar rotativo de parafusos, considera-se a existência de cinco estados conforme apresentado na Tabela em anexo, contendo a respectiva especificação, atendendo as duas etapas existentes na Fase 2.

Etapas 1 e 2 - Identificar e Especificar os estados (primeira e segunda coluna respectivamente)

Estados do produto	Especificação do estado
Desligado	Quando o compressor não está em funcionamento devido ao comando fornecido pelo usuário para desligamento.
Início de operação	Ao receber o comando do usuário para entrar em operação, o sistema entra em funcionamento sendo que há uma restrição na entrada de ar para evitar uma sobrecarga no motor.
Operação plena	Após o estado de Início de Operação e sem a restrição na entrada de ar o compressor fornece ar comprimido para a rede de ar na qual está acoplado.
Alívio	Ao identificar que a pressão da rede de ar alcançou o valor estabelecido/parametrizado, o sistema realiza uma sequência de ações para estabilizar a pressão.
Espera	Caso as ações realizadas para estabilizar a pressão no estado Alívio não sejam suficientes, o funcionamento do motor é interrompido e o sistema aguarda a redução da pressão na rede para voltar ao estado de Operação plena.

Você considera que esta fase contribui para elaboração do modelo funcional de produtos mecatrônicos?

Sim

Parcialmente

Não

## Página 5/8 - Fase 4 – Funções

Explicação do Método:

Etapa 1 - Identificar a Função Global do Produto

A partir das informações obtidas sobre o produto deve ser identificada qual a Função Global, que o produto deve apresentar.

Etapa 2 - Relacionar as Entradas e Saídas com a Função Global

Após a definição da Função Global tem-se a etapa de identificação das entradas e saídas que estão relacionadas com o produto. Conforme Pahl et al. (2007) o fluxo das entradas e saídas pode ser classificado em Energia, Material e Sinal.

Etapa 3 - Desdobrar a Função Global em Funções Elementares

O desdobramento pode ser realizado até um nível de abstração desejado, mas para o modelo é proposto realizar o desdobramento até uma função que possa ser vinculada com um objeto primitivo conforme o trabalho desenvolvido por Wu, Leu e Liu (2010).

Considerando a característica interdisciplinar dos produtos mecatrônicos, verifica-se como resultado da pesquisa bibliográfica a composição destes em três disciplinas: mecânica, elétrica e software. A disciplina de elétrica deve ser visualizada como uma composição com as funções eletrônicas, e a disciplina de software deve ser visualizada como uma compilação abrangendo as funções de controle dos produtos mecatrônicos.

Para o método proposto, considera-se que as funções elétricas podem ser visualizadas com a mesma facilidade das funções mecânicas, para as quais a modelagem funcional proposta por Pahl et al. (2007) está fundamentada. Tal pressuposto está de acordo com a orientação de Gausemeier et al. (2009) onde as funções do campo da elétrica e eletrônica podem ser relacionadas com sensores ou atuadores.

Para realizar o desdobramento, o método propõe iniciar com as funções do campo da mecânica, seguido pelo campo da elétrica e por final o campo de Software.

Para o campo de software verifica-se que não é possível realizar o desdobramento no mesmo grau de abstração da mecânica e elétrica, visto que não se pode identificar um objeto primitivo no campo de software. Neste sentido é sugerido que nesta etapa seja realizada uma análise prévia das funções que deverão ser exercidas para o controle do produto, sendo que a fase de software tem como objetivo consolidar as informações e desenvolver a interface para com as demais disciplinas envolvidas.

Como resultado da Etapa 3, é sugerido o desenvolvimento de uma lista contendo as Funções Elementares e a respectiva classificação da disciplina que possui relação com cada função.

Exemplo:

Para o produto compressor de ar, a Função Global e as Funções Elementares identificadas com o desdobramento são apresentadas na Figura e Tabela a seguir.

Etapa 1 - Identificar a Função Global do produto / Etapa 2 - Relacionar as Entradas e Saídas com a Função Global



## Etapa 3 - Desdobrar a Função Global em Funções Elementares

<b>Funções elementares do produto</b>	<b>Disciplina</b>
Remover resíduos do ar	Mecânica
Armazenar óleo	Mecânica
Transferir óleo para compressão	Mecânica
Comprimir ar	Mecânica
Separar óleo e ar	Mecânica
Refrigerar óleo	Mecânica
Refrigerar ar	Mecânica
Controlar temperatura óleo	Mecânica
Mostrar nível de óleo	Mecânica
Sustentar equipamento	Mecânica
Alimentar componentes eletrônicos	Elétrica
Regular entrada de ar na compressão	Elétrica
Alterar tensão e corrente (Variar a rotação)	Elétrica
Transformar energia elétrica em mecânica	Elétrica
Medir pressão	Elétrica
Reunir dados para apresentar informações	Software
Receber comando de acionamento	Software
Transferir sinal para controle entrada de ar	Software
Transferir sinal para variar rotação	Software
Transferir sinal para partida do motor	Software
Receber comando de desligamento	Software

Você considera que esta fase contribui para elaboração da modelo funcional de produtos mecatrônicos?

Sim

Parcialmente

Não

Você considera que a classificação e apresentação das funções de acordo com a disciplina envolvida (mecânica, elétrica ou software) auxilia as fases subsequentes do Processo de Desenvolvimento de Produtos Mecatrônicos?

Sim

Parcialmente

Não

## Página 6/8 - Fase 5 – Software

Explicação do Método:

Nesta fase são identificadas e desenvolvidas as informações necessárias para realizar o controle do produto, sendo considerada a representação deste controle com o software. A representação desta fase deve possibilitar a integração do modelo tradicional de modelagem funcional abordada por Pahl et al. (2007) evidenciando a lógica de controle do produto.

Etapa 1 - Elaborar o fluxo de eventos para os casos de uso

Eisenbart et al (2014) relacionam algumas representações que podem ser aplicadas para o desenvolvimento do software e entre estas há um direcionamento para o Rational Unified Process (RUP; Processo Racional Unificado) desenvolvido por Kroll and Kruchten (2003).

Alinhado com o RUP, a fase de software do método de modelagem funcional de produtos mecatrônicos proposto, considera inicialmente a etapa de elaboração do fluxo de eventos para cada caso de uso, sendo que devem estes devem estar sequenciados para que o software realize o controle das funções físicas do produto. Na etapa de elaboração dos fluxo de eventos devem ser considerados os estados do produto, indicando por exemplo no início do diagrama se o sistema já encontra-se em operação ou está desligado.

Etapa 2 - Elaborar os diagramas fluxo de atividades para os casos de uso

Direcionando para o método de modelagem funcional de produtos mecatrônicos proposto, é sugerido que os diagramas de fluxo de atividades sejam elaborados na horizontal para facilitar a interface na fase de construção do modelo funcional.

Exemplo:

Etapa 1 - Elaborar o fluxo de eventos para os casos de uso

Conforme verificado na Fase 2, para o produto Compressor de Ar foi identificado apenas um caso de uso, Compressão de ar, sendo que o fluxo de eventos para este caso é apresentado a seguir na forma de tópicos:

1. Considerando inicialmente que o produto está no estado Desligado, o usuário envia um sinal para o software ligar o produto;
2. O controle transmite o sinal para acionamento do motor elétrico, transferindo o produto para o estado Início de operação;
3. Após enviar o sinal para o motor, o controle contabiliza um tempo para então enviar o sinal para abertura da entrada de ar atmosférico no sistema, direcionando o produto para o estado de Operação plena;
4. O controle recebe a informação sobre a pressão do ar comprimido na saída do produto;
  - a. A pressão estando abaixo do parametrizado, o controle não realiza atividade e mantém o produto no estado de Operação plena;
  - b. A pressão estando acima do parametrizado, o controle analisa o valor excedido e transfere o produto para o estado de Alívio;
    - i. A pressão estando até duas unidades acima do parametrizado, o controle envia um sinal para restringir a entrada de ar atmosférico no sistema;
    - ii. Após enviar o sinal para restrição na entrada de ar o controle acompanha a pressão do ar comprimido na saída do compressor;

iii. A pressão retornando para o valor parametrizado, o controle envia um sinal para liberar a entrada de ar atmosférico no sistema e transfere o compressor para o estado Operação plena, retornando o fluxo para o início do tópico 4;

iv. Caso a pressão continue duas unidades acima do parametrizado, o compressor se mantém no estado de Alívio e o controle envia um sinal para reduzir a rotação do motor, alterando a tensão e a corrente elétrica fornecidos, e em consequência há redução no fornecimento de ar comprimido;

v. Após enviar o sinal para reduzir a rotação do motor, o controle acompanha a pressão do ar comprimido na saída do compressor;

vi. A pressão retornando para o valor parametrizado, o controle envia um sinal para aumentar a rotação do motor e transfere o compressor para o estado Operação plena, retornando o fluxo para o início do tópico 4;

vii. Caso a rotação continue aumentando, o controle envia um sinal para desligamento do motor, transferindo o produto para o estado de Espera;

viii. No caso de desligamento do motor devido ao excesso de pressão, o controle continua acompanhando a pressão as saída do compressor e ao identificar a redução da pressão para o valor parametrizado, envia um sinal para acionamento do motor, retornando o fluxo para o tópico 2;

5. O software deverá apresentar ainda um evento para desligamento do produto por solicitação do usuário e um evento que possibilite ao usuário realizar a parametrização do produto.

Etapa 2 - Elaborar os diagramas de fluxo de atividades para os casos de uso

Seguindo para a segunda etapa da Fase 5, com base no fluxo de eventos definido anteriormente, é então elaborado o diagrama de fluxo de atividades para o caso de uso Compressão de ar conforme ilustrado na figura abaixo.

Caso tenha dificuldade para visualizar a figura abaixo, favor acessar o arquivo compartilhado no Google Drive conforme link: <https://goo.gl/q59qdx>

Devido a quantidade de eventos considerados no fluxo, é considerada uma identificação em cada atividade no diagrama (ex.: S1, S2,..., Sn) com o objetivo de facilitar a Fase 6 do método proposto que prevê o vínculo entre o modelo funcional e o diagrama de fluxo de atividades.

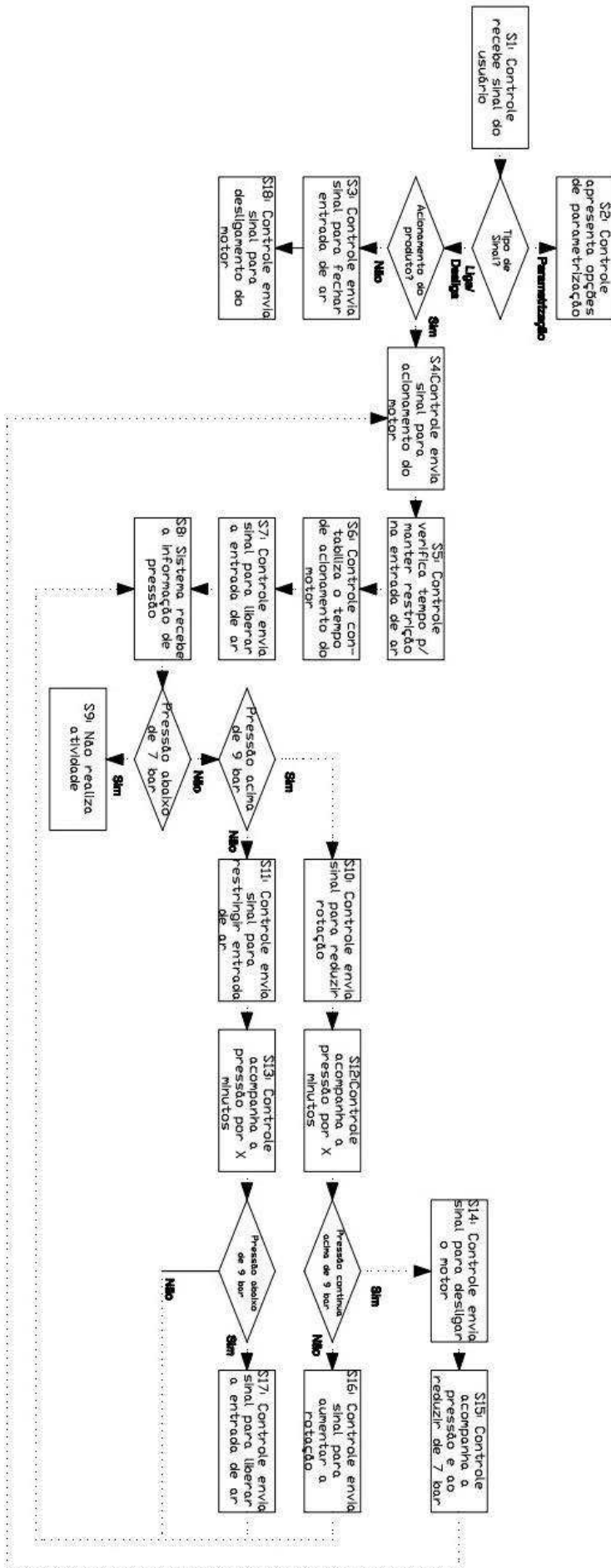
Você considera que esta fase contribui para elaboração da modelo funcional de produtos mecatrônicos?

Sim

Parcialmente

Não

Etapa 2 - Elaborar os diagramas de fluxo de atividades para os casos de uso



## Página 7/8 - Fase 6 - Construção do Modelo Funcional

Explicação do Método:

Etapa 1 - Elaborar o modelo funcional das funções mecânicas e elétricas

Os campos devem ser divididos horizontalmente, sendo que as funções mecânicas ocupam a primeira linha do modelo seguido pelas funções do campo da elétrica. Este modelo inicial já deve contemplar as entradas e saídas identificadas na Fase 4.

Os campos da mecânica e elétrica podem apresentar algumas funções que não possuem interações com as demais, como por exemplo, funções de suporte da estrutura física ou funções de proteção das partes físicas do produto.

Para o método de modelagem funcional de produtos mecatrônicos proposto, considera-se que as funções mecânicas e elétricas são constantes, portanto o arranjo definido nesta etapa será mantido até a apresentação do modelo funcional final, independente das variações de estados ou casos de uso do produto.

Etapa 2 - Vincular o modelo funcional com os diagramas de fluxo de atividades para os casos de uso

Seguindo a organização das disciplinas horizontalmente, a proposta orienta a apresentação do software, na forma dos casos de uso, em linhas abaixo das funções mecânicas e elétricas de forma que os diagramas de fluxo de atividades estejam interagindo com as funções das duas linhas iniciais conforme o comportamento esperado para o produto.

O posicionamento do campo da elétrica entre os campos da mecânica e software denota que a disciplina da elétrica realiza uma interface entre as outras, realizando a interface entre o controle e ações físicas do produto.

Na modelagem proposta, o usuário do produto ou outros sistemas que poderão ser integrados ao produto são nomeados como entidade e encontram-se fora das fronteiras do modelo funcional, sendo que os sinais iniciais de controle representados no início dos casos de uso do software são originados por estas entidades.

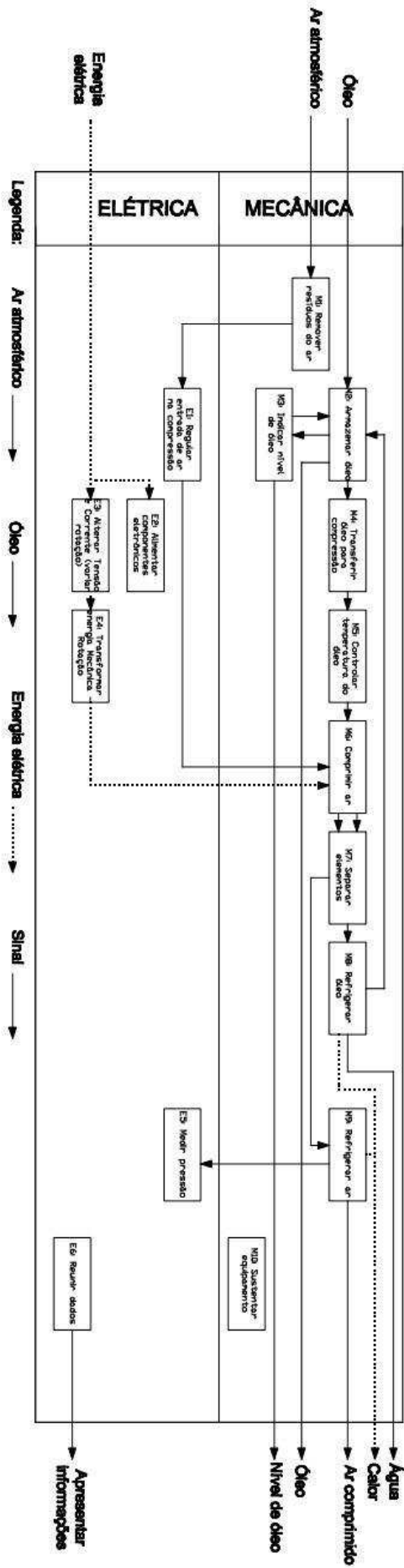
O método proposto permite uma flexibilização destes fluxos de entrada e saída do produto. Considera-se como exemplo que o fluxo de material e energia pode apresentar entradas e saídas tanto no campo da mecânica como da elétrica. Já para o fluxo de sinal, considera-se que a entrada ocorra apenas no campo de software, indicando o controle sobre as demais funções, sendo que as saídas de sinal podem ocorrer nos três campos existentes no modelo funcional.

Exemplo:

No produto Compressor de ar, a elaboração do modelo funcional considerando as funções do campo da mecânica e da elétrica é apresentado na primeira figura abaixo, e a segunda etapa da Fase 6 que visa vincular o modelo funcional com o diagrama de fluxo de atividades apresentado na Fase 5, é apresentado na segunda figura abaixo, indicando as interfaces entre as disciplinas. Esta junção, representa o modelo funcional final do produto Compressor de ar.

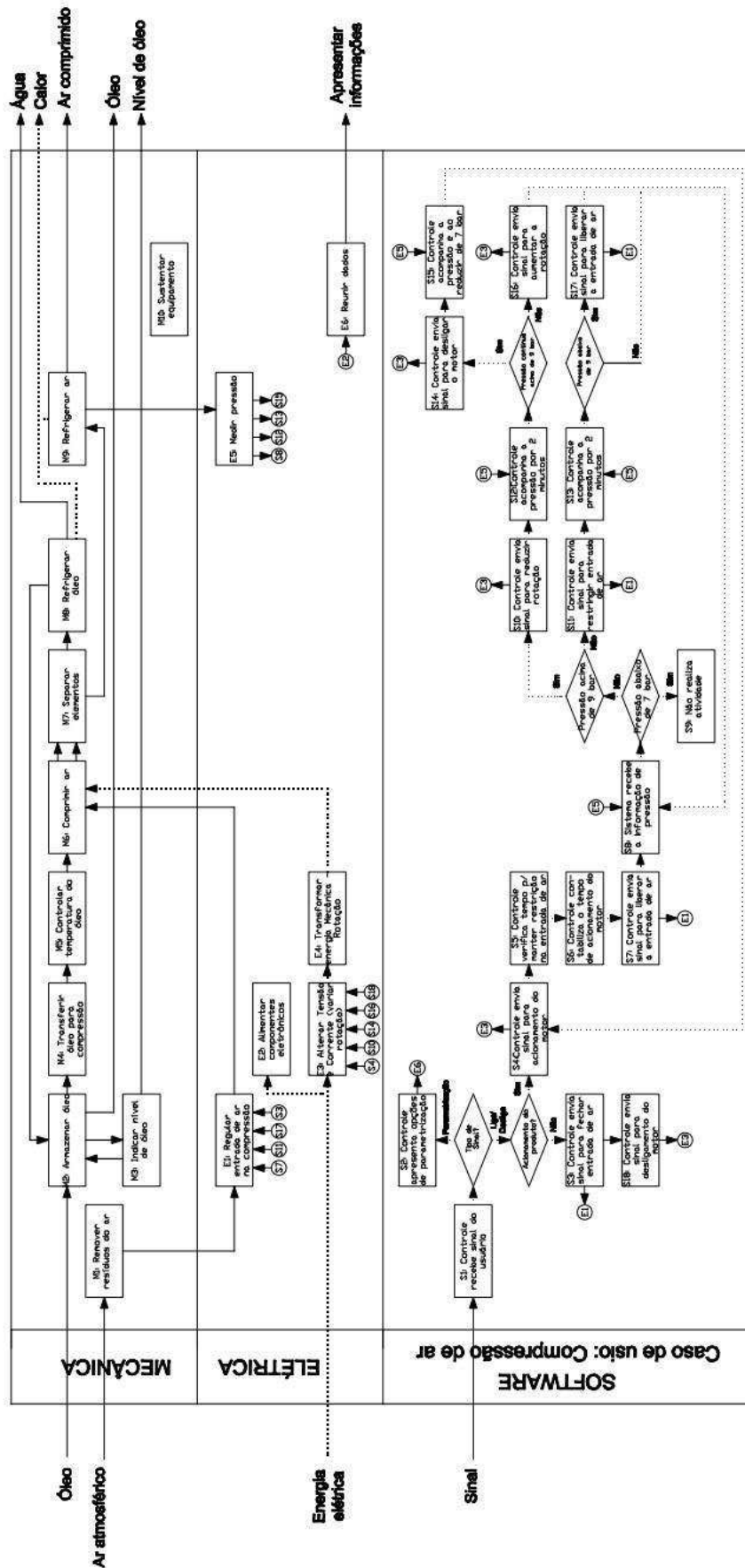
Caso tenha dificuldade para visualizar as figuras abaixo, favor acessar os arquivos compartilhados no Google Drive conforme link: <https://goo.gl/q59qdx>

Etapa 1 - Elaborar o modelo funcional das funções Mecânicas e Elétricas





Etapa 2 - Vincular o modelo funcional com os diagramas de fluxo de atividades para os casos de uso



Você considera que esta fase contribui para elaboração da modelo funcional de produtos mecatrônicos?

Sim

Parcialmente

Não

Você considera que o modelo funcional proposto reflete corretamente o produto mecatrônico proposto? (Eficácia)

Sim

Parcialmente (Justifique)

Não (Justifique)

Justificativa:

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**Página 8/8 - Avaliação Geral do Método Proposto para Modelagem Funcional de Produtos Mecatrônicos**

Considerando o aspecto de abrangência, você considera que o método proposto possui uma aplicação para quais categorias a seguir?

- Sistemas mecatrônicos automáticos: são caracterizados pela capacidade de manusear materiais e energia, possuem uma comunicação com o ambiente onde operam, capacidade de se auto regular devido a existência de respostas pré programadas ao identificar mudanças no ambiente. Ex.: máquinas ferramenta com controle numérico, drives de velocidade variável em máquinas de manufatura; máquina de costura moderna, sistemas de fabricação automatizados, relógio digital, indústria de automação e setor de robótica, fotocopiadoras, lavadoras e secadoras inteligentes, fogões e fornos automáticos, e os sistemas de imagens médicas;
- Sistemas mecatrônicos inteligentes: são capazes de atingir objetivos em condições de incerteza. O projeto destes sistemas permite a resposta à mudanças ocorridas no ambiente de operação sem que haja necessidade de reprogramação. Ex.: veículos rodoviários autônomos, sistema de estacionamento próprio em veículos, aeronaves sem piloto e mísseis com busca de objetivos;
- Redes mecatrônicas inteligentes: são caracterizadas pela capacidade de tomar decisões sobre o próprio comportamento, sendo compostas por vários sistemas mecatrônico inteligente. Como diferenciação, neste tipo de sistema, há a capacidade de melhorar o desempenho com a auto organização. Ex.: frotas de espaçonaves, colônias de máquinas agrícolas inteligentes e sistemas de manufatura inteligentes.
- Outros: \_\_\_\_\_

Você considera que o método proposto para a modelagem funcional de produtos mecatrônicos é fácil de usar? (Usabilidade)

- Sim
- Parcialmente (Justifique)
- Não (Justifique)

Justificativa:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Você considera que método proposto possui uma estrutura que padroniza a aplicação em diferentes projetos de desenvolvimento de produtos mecatrônicos? (Repetibilidade)

- Sim
- Parcialmente (Justifique)
- Não (Justifique)

Justificativa:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_