

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA PRODUÇÃO

FÁBIO EDUARDO HUKAI

**A utilização da abordagem do *Axiomatic Design* no desenvolvimento de produto: um estudo de caso aplicado a um sistema de transmissão automotivo**

São Paulo  
2018

FÁBIO EDUARDO HUKAI

**A utilização da abordagem do *Axiomatic Design* no desenvolvimento de produto: um estudo de caso aplicado a um sistema de transmissão automotivo**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Gestão da Qualidade.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Araújo Calarge

São Paulo  
2018

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**A utilização da abordagem do *Axiomatic Design* no desenvolvimento de produto: um estudo de caso aplicado a um sistema de transmissão automotivo**

FABIO EDUARDO HUKAI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Gestão da Qualidade.

Membros da Banca:

---

Prof. Dr. Felipe Araújo Calarge  
(Orientador – Universidade Nove de Julho – Uninove - PPGE)

---

Prof. Dr. Fernando Tobal Berssaneti  
(Membro da Banca – Universidade Nove de Julho – Uninove - PPGE)

---

Prof. Dr. Robisom Calado  
(Membro da Banca – Universidade Federal Fluminense)

São Paulo  
2018

## **Agradecimentos**

Agradeço a meus pais Kuniaki Hukai e Matilde Ferri Hukai, à minha irmã Melissa Hukai Madi e à minha parceira Laira Augusta Freitas Castro, por me apoiarem e incentivarem neste passo importante do meu desenvolvimento profissional e intelectual.

Também agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Felipe Araújo Calarge, aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, especialmente o Prof. Dr. Fernando Tobal Berssaneti e Prof. Dr. José Carlos Curvelo Santana, por me orientarem, incentivarem e guiarem nesta empreitada; ao Prof. Dr. Robisom Calado pelas orientações e proposições de melhoria deste trabalho; ao diretor do Programa, Prof. Dr. Milton Vieira Júnior e ao Diretor das Graduações em Exatas I, Prof. Me. Marcos Antônio Naldi, por guiar e incentivar em meu desenvolvimento pessoal, intelectual e profissional.

Por fim, agradeço à Universidade Nove de Julho pelo Programa e pelos incentivos ao desenvolvimento da comunidade científica brasileira.

## Resumo

A gestão da qualidade tem sido considerada uma das maiores prioridades competitivas de organizações a fim de serem bem-sucedidas no atual mercado, que se apresenta cada vez mais competitivo. Nesse contexto, a gestão da qualidade deve ser um conceito existente em todos os setores de empresas e organizações, principalmente na fase de projeto de novos produtos, sistemas e processos.

A fase de projeto tem maior impacto no ciclo de vida do produto, portanto a melhoria da qualidade do produto nesta fase de projeto é mais significativa. Portanto, este trabalho de pesquisa propõe uma estrutura de trabalho com foco na melhoria da qualidade de produtos em sua fase de projeto que utiliza filosofias que constituem um método de desenvolvimento de produto consagrado e amplamente explorado no meio científico e empresarial, os Princípios do *Axiomatic Design*.

Para tanto, o método de pesquisa utilizado envolve três partes, uma pesquisa bibliográfica, a fim de coletar dados secundários que suportam o estudo de caso, e a aplicação dos Princípios do *Axiomatic Design* em dois momentos, primeiro a fim de avaliar um produto e, em segundo lugar, a fim de propor melhorias que impactam positivamente sua qualidade.

Dessa forma, esta pesquisa exploratória conduz um estudo teórico e conceitual que envolve a melhoria de qualidade de uma caixa de câmbio de variação contínua (CVT), atualmente comercializada. Os Princípios do *Axiomatic Design* foram aplicados neste desenvolvimento com o objetivo de propor uma estrutura de trabalho para melhoria de qualidade de produto na fase de projeto e o desenvolvimento teórico de um câmbio CVT.

**Palavras-chave:** *Axiomatic Design*, melhoria de qualidade, gestão da qualidade.

## Abstract

Quality management is considered one of the highest priorities for organizations to succeed in today's ever more competitive market. In this context, quality management should be a concept that exists in all sectors of companies and organizations, especially in the design phase of new products, systems, services and processes. The design phase has a greater impact on the product life cycle, so the improvement of product quality at this stage is more significant. Therefore, this research proposes a framework focused on improving the quality of products in its design phase, this framework uses philosophies that constitute a method of product development consecrated and widely explored in the scientific and business environment, the Principles of *Axiomatic Design*.

To do so, the research method used involves three parts, a bibliographical research, to collect secondary data that support the case study, and the application of the Principles of *Axiomatic Design* in two moments, first to evaluate a product and second to improvements that positively impact their quality.

Thus, this exploratory research leads a theoretical and conceptual study that involves the quality improvement of a continuously variable transmission (CVT) currently commercialized. The *Axiomatic Design* Principles were applied in this development with the objective of proposing a framework for product quality improvement in the design phase and the theoretical development of a CVT gearbox.

**Keywords:** *Axiomatic Design*, quality improvement, quality management.

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Citação e qualificação das referências bibliográficas _____	20
Tabela 2 - Importância relativa na satisfação global do cliente _____	41
Tabela 3 - O principal significado de qualidade _____	52

## Lista de figuras

Figura 1 - Pesquisa bibliográfica, primeira fase _____	19
Figura 2 - Pesquisa bibliográfica, segunda fase _____	20
Figura 3 - Desdobramento dos níveis hierárquicos _____	23
Figura 4 - Função densidade de probabilidade de um FR _____	26
Figura 5 - Componentes do subsistema que compõem uma transmissão automotiva _____	34
Figura 6 - a) Mapa simplificado do funcionamento de um motor de combustão interna sem caixa de câmbio; b) Mapa simplificado do funcionamento de um motor de combustão interna com caixa de câmbio _____	35
Figura 7 - Caixa de câmbio CVT _____	36
Figura 8 - Funcionamento da CVT toroidal _____	37
Figura 9 - Funcionamento da CVT de polias _____	38
Figura 10 - Objetivos principais no desenvolvimento de uma transmissão automotiva _____	39
Figura 11 - Árvore da experiência de direção _____	40
Figura 12 - Média do modelo APEAL de JD Power _____	42
Figura 13 - Quebra por fadiga de engrenagem cilíndrica de dentes retos _____	45
Figura 14 - Forças arbitrárias que atuam sobre um veículo _____	47
Figura 15 - Mapa do motor, consumo específico $b_e$ , em g/kWh _____	49
Figura 16 - Estrutura da pesquisa _____	55
Figura 17 - Estrutura de desdobramento dos FRs e DPs _____	57
Figura 18 - Diagrama de funcionamento do CVT de referência _____	64
Figura 19 - Vista de seção da CVT de referência _____	65
Figura 20 - Árvore de projeto _____	75



## Abreviações

A – Matriz de projeto

a – Aceleração

$a_c$  – Distância entre centros

ABNT – Associação brasileira de normas técnicas

AD – *Axiomatic design* - Projeto Axiomático;

$b_e$  – Funcionamento do motor em regime constante

C – Grau de dependência

CA – *Customer attributes* - Atributos do Cliente;

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CVT – *Continuously variable transmission* - Caixa de cambio de variação contínua;

D – *Drag* - Arrasto aerodinâmico

DFA – *design for assembly* – Projeto para montagem

DFM – *Design for manufacturing* – Projeto para manufatura

DFMA – *Design for manufacturing and assembly* - Projeto para manufatura e montagem

DP – *Design parameter* - Parâmetros de projeto;

FAD – Projeto Axiomático Nebuloso;

$F_i$  – Força inercial

$f_r$  – coeficiente de perdas

FR – *Functional requirements* - Requisitos funcionais;

g – Aceleração da gravidade

h – Altura em relação ao plano

I – Inércia

IATF – International Automotive Task Force – Força tarefa internacional automotiva

$i_C$  – Restrições de entrada;

$I_G$  – Relação de transmissão

$I_i$  – Quantidade de informação

$m$  – Massa

$M$  – Momento

$m_G$  – estimativa de massa do cambio

$n$  – relação de transmissão

NBR – Norma braseira

nFR – *non-functional requirements* - Requisitos não funcionais;

OC – *Optimisation criteria* - Critérios de otimização;

P – Potência

$P_i$  – Densidade de probabilidade

PV – *Process Variable* – Variáveis de processo

QFD – *Quality Function Deployment* – Desdobramento da função qualidade

$r_{dyn}$  – Raio dinâmico do conjunto roda-pneu

$R_h$  – Força de arrasto no ponto de engate

RSP – *relative sales price* – Preço relativo de venda

sC – *Sistem constraints* - Restrições de sistema;

SC – *Selection criteria* - Critérios de seleção;

T – Torque

W – Força normal em cada roda

$z$  – número de velocidades do cambio

$\alpha$  – Aceleração angular

$\alpha_{st}$  – Inclinação do plano de referência

$\omega$  – Velocidade angular

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1. Objetivos	15
1.2. Justificativa da pesquisa	15
1.3. Estruturação dos capítulos	17
1.4. Resultados deste trabalho	17
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>19</b>
2.1. Pesquisa Bibliográfica: Procedimentos Adotados	19
2.2. <i>Axiomatic Design</i> (AD): Conceitos e Fundamentos	22
2.2.1. Axioma 1: Axioma da Independência	24
2.2.2. Axioma 2: Axioma da informação	25
2.2.3. <i>Fuzzy Axiomatic Design</i> (FAD)	27
2.2.3.1. Axioma 1: axioma da independência, para FAD	27
2.2.3.2. Axioma 2: axioma da informação, para FAD	28
2.2.4. Critérios de seleção (SCs) e critérios de otimização (OCs)	28
2.3. Aplicações do <i>Axiomatic Design</i> (AD) em distintas áreas	29
2.3.1. Projeto de processos e de produtos	29
2.3.2. Projeto de sistemas de manufatura	30
2.3.3. Gestão de cadeia de suprimentos	31
2.3.4. Logística	31
2.3.5. Projeto de software	32
2.3.6. Qualidade na engenharia ambiental	32
2.3.7. Pesquisas teóricas considerando os Princípios do <i>Axiomatic Design</i>	33
2.4. Projeto de sistemas de transmissão: Automóvel, <i>Powertrain</i> e Caixa de Câmbio	34
2.4.1. Fundamentos da caixa de câmbio CVT	36
2.4.2. Principais elementos do projeto de caixas de câmbio automotivo	38
2.4.3. Variáveis internas de caixas de câmbio automotivo	42
2.4.4. Fatores Fundamentais da Performance de caixas de câmbio automotivo	43
2.4.4.1. Confiabilidade e tempo de serviço	43
2.4.4.2. Distância entre centros	44
2.4.4.3. Características de massa	44
2.4.4.4. Custo e valor	45
2.4.4.5. Ruídos	45
2.4.4.6. Eficiência e perdas	46
2.4.4.7. Oferta e demanda de potência	47
2.4.4.8. <b>Adaptação do fluxo de potência</b>	<b>50</b>
2.5. Métodos de Melhoria da Qualidade	51
<b>3. METODOLOGIA DE PESQUISA</b>	<b>54</b>
3.1. Método de pesquisa utilizado	55
<b>4. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA</b>	<b>59</b>
4.1. Definição dos atributos do cliente (CAs)	59
4.2. Definição das restrições de entrada (iCs)	60
4.3. Definição dos critérios de seleção (SCs)	61
4.4. Definição dos critérios de otimização (OCs)	61
4.5. Definição dos requisitos não funcionais (nFRs)	62

4.6. Desenvolvimento da matriz de projeto da caixa de câmbio de referência	63
4.6.1. Modelo do câmbio de referência	64
4.6.2. Desdobramento dos FRs e DPs do câmbio de referência	65
4.6.3. Matriz do projeto do câmbio de referência	67
4.7. Desenvolvimento da caixa de câmbio melhorada	68
4.7.1. Primeiro nível hierárquico: FRn e DPn	69
4.7.2. Segundo nível hierárquico: FRnn e DPnn	70
4.7.3. Terceiro nível hierárquico: FRnnn e DPnnn	72
4.7.4. Árvore de projeto: estrutura hierárquica do projeto	74
4.7.5. Matrizes de projeto da caixa de câmbio melhorada	75
<b>5. ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>77</b>
5.1. Matrizes de projeto do CVT de referência e CVT desenvolvido	77
<b>6. CONCLUSÕES</b>	<b>79</b>
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>80</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>82</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O conceito de qualidade é, constantemente, um foco de discussão no desenvolvimento de projetos e tem sido prioridade para empresas bem-sucedidas em um mercado competitivo.

Esse termo representa um conjunto de valores os quais exprimem competitividade, tempo de entrega, custos, excelência, política corporativa, produtividade, lucros, qualidade do produto, volumes, resultados, serviços, segurança, conscientização ambiental e foco nos clientes (Brandolese, 1994).

No setor automotivo, a gestão da qualidade é implementada segundo a norma IATF 16949:2016, um conjunto de especificações técnicas; e o padrão de gestão de qualidade para tal indústria está baseado na norma ISO 9001:2015.

A IATF 16949:2016 contém requisitos complementares específicos para a indústria automotiva, mas não configura sistema de gestão da qualidade completo, por isso se refere às normas ISO 9001:2015 e ISO 9000:2015 para a definição de conceitos de qualidade. Segundo a ISO 9000:2015, o conceito de qualidade dos produtos é determinado pela capacidade de satisfazer os clientes e pelo impacto pretendido e não pretendido nas partes interessadas pertinentes.

Portanto, a qualidade contida em um produto tem dois significados: a presença de fatores que levam a satisfação do cliente e a confiabilidade destes fatores (JURAN, 1992).

Dessa forma, a qualidade contida em um produto é reflexo de todas as atividades envolvidas no ciclo de vida do produto, sendo que, dentro desta cadeia, a atividade com mais influência na qualidade do produto é o ciclo de desenvolvimento na fase de projeto. Esta fase influencia em até 70% do custo total do seu ciclo de vida (DAETZ, 1987; SHELDON, 1990; Suh, 1990).

Por causa desta relação entre o custo total do ciclo de vida do produto e o desenvolvimento, a fase de projeto, incluindo as atividades do desenvolvimento do produto, tem atraído a atenção da comunidade científica e empresarial, com enfoque na melhoria da qualidade do produto que afeta diretamente no custo total do ciclo de vida do produto e no sucesso do produto no mercado. Por conta desse grande impacto, a fase de projeto é o melhor momento para detectar oportunidades de melhoria e implementar essas melhorias.

Na engenharia da qualidade, busca-se um equilíbrio entre custo e qualidade. Dessa forma, a principal pergunta que pode ser feita neste cenário é: melhorar a qualidade de alguns dos componentes do produtor modifica a relação custo-benefício se comparado com o anterior? (MORADINAFTCHALI *et al.*, 2016).

A atividade de desenvolvimento de projetos, englobando a criação de produtos e serviços, envolve a tomada de decisão em um cenário repleto de incertezas, dotado de informações qualitativas de difícil comparação. Por esse motivo, melhoria de qualidade neste cenário apresenta grande dificuldade, tanto na busca de oportunidades de melhoria como na definição destas melhorias.

Portanto, para suprir esta lacuna, este trabalho propõe uma estrutura de trabalho para melhoria de qualidade na fase de projeto utilizando um método de projeto que possua foco no consumidor; que promova formas de detecção de oportunidades de melhoria; que tenha meios de comparação tangíveis e que definam de forma clara critérios de melhoria.

Um método que atende a estas necessidades é o proposto por Nam Pyo Suh (1990) que é um método de desenvolvimento de produto guiado por axiomas que norteiam este processo. Os Princípios do *Axiomatic Design* (AD) - que pode ser traduzido para Princípios do Projeto Axiomático - são um conjunto de filosofias que constituem um método de desenvolvimento de produto consagrado e amplamente explorado no meio científico e empresarial.

Este método é fundamentado em um par de axiomas, estes são verdades aceitas, porém não comprováveis e que ainda não foram refutadas. Os axiomas foram determinados através de extensa pesquisa envolvendo o desenvolvimento de projetos, inicialmente foram delimitadas as principais regras que influenciam a qualidade dos resultados de uma atividade projetual.

Em seguida estas regras foram refutadas uma a uma, até que se encontrasse um conjunto de regras impossível de ser refutado, dando origem aos axiomas do *AD* (Suh, 1990).

O *AD* auxilia na escolha do melhor caminho que o projeto pode tomar de acordo com as necessidades do cliente, mostra quais as melhores soluções de projeto, além de guiar o aprimoramento e a atualização de produtos norteando o seu processo de desenvolvimento, utilizando os axiomas de independência e o de informação (SOZO *et al.*, 2001).

Estes axiomas determinam que um projeto ideal terá mais qualidade quanto mais próximo estiver desse estado de independência entre seus requisitos funcionais, além de ser minimalista em sua complexidade, favorecendo soluções mais enxutas.

Portanto, a proposta de uma estrutura de trabalho para a melhoria de qualidade na fase de projeto apresentada neste trabalho usa os Princípios do AD. Como forma de demonstrar sua aplicação é apresentada um estudo de caso teórico utilizando uma caixa de câmbio automotiva.

### **1.1. Objetivos**

O objetivo geral do trabalho é o de propor um procedimento estruturado de melhoria da qualidade de um componente automotivo, através da melhor adequação de características técnicas utilizando os Princípios do *Axiomatic Design*, observando seu comportamento em projetos sistematicamente dependentes em sua funcionalidade.

Os objetivos específicos são a aplicação dos Princípios do *Axiomatic Design* na melhoria da qualidade de um produto; a proposição de um método de melhoria de qualidade de produto em sua fase de projeto; e o desenvolvimento conceitual deste produto até uma fase pertinente às necessidades desta pesquisa.

### **1.2. Justificativa da pesquisa**

A norma IATF 16949:2016 (conjunto de especificações técnicas e padrão de gestão de qualidade para a indústria automotiva) aborda a necessidade de processo para a criação, implementação e melhoria da eficácia de um sistema de gestão de qualidade para aumentar a satisfação do cliente pelo atendimento de seus requisitos (IATF 16949:2016).

Os Princípios do *Axiomatic Design* utilizam como ponto inicial os requisitos do cliente, sendo uma ferramenta de desenvolvimento de projetos estruturada que possui foco no cliente e promove o auxílio de tomada de decisão em um ambiente de desenvolvimento de projetos.

Porém, uma ferramenta comumente associada ao desenvolvimento de produtos no setor automotivo é o *Quality Function Deployment (QFD)*, um método de

projeto de produtos desenvolvido no Japão em 1966 com o foco de transformar a voz do cliente (*voice of the customer*) em características de projeto. O QFD foi desenvolvido por Yoji Akao e é uma ferramenta importante no desenvolvimento de produtos que aumenta a satisfação do cliente. Entretanto, muitas dificuldades são encontradas na aplicação desta ferramenta, como: a dificuldade na interpretação da voz do cliente, definir e priorizar características de qualidade (CARNEVALLI *et al.*, 2010).

Alguns autores propuseram o uso do *AD* a fim de sanar as dificuldades encontradas na aplicação do QFD, a exemplo de Carnevalli *et al.* (2010), os quais propuseram a aplicação do *AD* para facilitar a determinação da voz do cliente; ou então, Gonçalves-Coelho *et al.* (2005), que aplicaram *AD* com o objetivo de melhorar o uso do QFD.

Ainda, o *AD* é utilizado como ferramenta para reduzir dificuldades no desenvolvimento de projetos complexos (KANDJANI *et al.*, 2015). Portanto, tem o potencial de ser uma ferramenta válida no desenvolvimento de produtos para a indústria automotiva, principalmente porque estabelece uma estruturação mais direta dos requisitos do cliente, separando-os em atributos, restrições, critérios de escolha e seleção, que visam a facilitar a interpretação e o uso desta informação no projeto do projeto, podendo ser um método alternativo de desenvolvimento de produtos.

A fim de observar o comportamento desta ferramenta, um produto de grande importância do setor automotivo foi escolhido para ser desenvolvido: a caixa de câmbio do tipo CVT.

Tendo em vista o tipo de geração de potência utilizada atualmente nos automóveis, o motor de combustão interna, caixas de câmbio são indispensáveis, e este produto é responsável pela maior parcela de percepção de qualidade e satisfação global do cliente com relação ao automóvel (RINKEVICH *et al.*, 2004).

A escolha deste produto como objeto de estudo foi consequência da grande influência desse item na satisfação global do automóvel. Segundo o modelo APEAL de J.D. Power e associados (2016), os atributos relacionados ao trem de força e, em consequência, à caixa de câmbio, são os de maior influência no grau de satisfação global do cliente com relação ao automóvel, num índice de mais de 22% (Rinkevich & Samson, 2004).

Caixas de câmbio automotivos também são fabricados num sistema de produção em massa, com alto grau de complexidade técnica e tecnológica; são



classificadas como tecnologia altamente desenvolvidas, as quais não passam mais por evoluções pequenas, de modo a observar uma evolução gradual e contínua desse produto (NAUNHEIMER *et al.*, 2010).

Tal processo é caracterizado pelo pensamento sistemático focado nos fatores meio ambiente  $\Leftrightarrow$  trânsito  $\Leftrightarrow$  veículo  $\Leftrightarrow$  motor/transmissão e pelo uso de controles eletrônicos e sensores. Esses fatores trazem a necessidade de o desenvolvimento de transmissão automotiva ser rápido, orientado ao mercado, às preferências do cliente (especialmente em veículos comerciais) e de forma flexível (NAUNHEIMER *et al.*, 2010).

A caixa de câmbio automotiva com mais alto grau de desenvolvimento tecnológico atualmente presente no mercado são as *continuously variable transmissions* (CVT), ou transmissão de variação contínua. Este tipo de caixa de câmbio permite que o motor do veículo trabalhe em uma velocidade de rotação fixa enquanto a velocidade de rotação das rodas varia, aumentando a eficiência energética do sistema (RINKEVICH *et al.*, 2004).

### **1.3. Estruturação dos capítulos**

A primeira seção apresenta os assuntos abordados nesta pesquisa, situando o contexto do trabalho e justificando sua importância; em seguida, há na segunda seção a pesquisa bibliográfica, detalhando os resultados da pesquisa transversal efetuada e os conceitos pertinentes ao estudo. Na terceira seção, é abordado o método de pesquisa utilizado, abordando os passos seguidos para a construção desse trabalho. Na quarta seção, é explicitado o desenvolvimento da pesquisa, com a apresentação das discussões propostas e o desenvolvimento dos produtos. A seguir, na quinta seção, são demonstrados os resultados da pesquisa; e por fim, as conclusões em relação ao estudo – partindo da correlação entre pesquisa bibliográfica e conceitual, a coleta e a análise dos dados e os seus resultados – são expostas na sexta seção.

### **1.4. Resultados deste trabalho**

A estrutura de trabalho proposta por essa pesquisa resultou na melhoria da qualidade do produto estudado, o que é observável na comparação das matrizes de

projeto de ambos: enquanto o produto de referência viola o axioma da independência, o produto melhorado não o faz; tais resultados são discutidos em maiores detalhes no capítulo 5.

Este fato aponta para o sucesso da estrutura de trabalho de desenvolvimento de produto automotivo utilizando os Princípios do *Axiomatic Design*.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o melhor entendimento da pesquisa e seus resultados, os conceitos envolvidos no trabalho foram pesquisados e aprofundados. (MARCONI *et al.*, 2006).

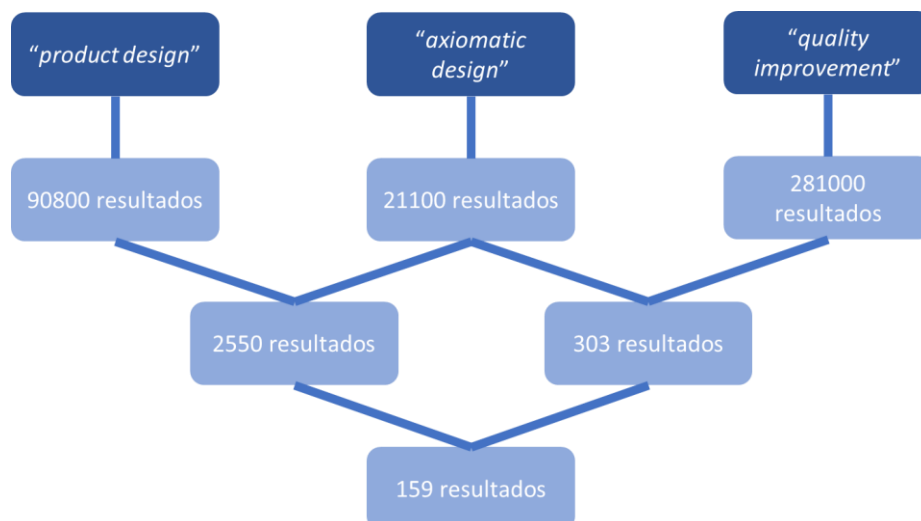
### 2.1. Pesquisa Bibliográfica: Procedimentos Adotados

No desenvolvimento da pesquisa bibliográfica foram consultadas as bases de dados eletrônicas *SCOPUS*, *Emerald Insight*, *Science Direct*, Portal Capes, *ProQuest* e *IEEE*. Foram pesquisados artigos acadêmicos, livros e manuais os quais 56% referem-se aos últimos 10 anos (2007-2017) e predominam os artigos internacionais, com 82% ao total.

As palavras-chave utilizadas na pesquisa foram “*axiomatic design*”, “*product design*” e “*quality improvement*”, tanto separadamente como em conjunto. Os resultados então foram filtrados, limitando a busca ao campo de palavras-chave contendo os termos “*product design*”, “*quality*”.

A pesquisa realizada com a palavra-chave “*axiomatic design*” retornou 21100 resultados, enquanto “*product design*” retornou 90800; “*quality improvement*”, por sua vez, retornou 281000 resultados. Quando relacionadas, as três palavras-chave retornaram quantidades diferentes de resultados, conforme o diagrama da Figura 1.

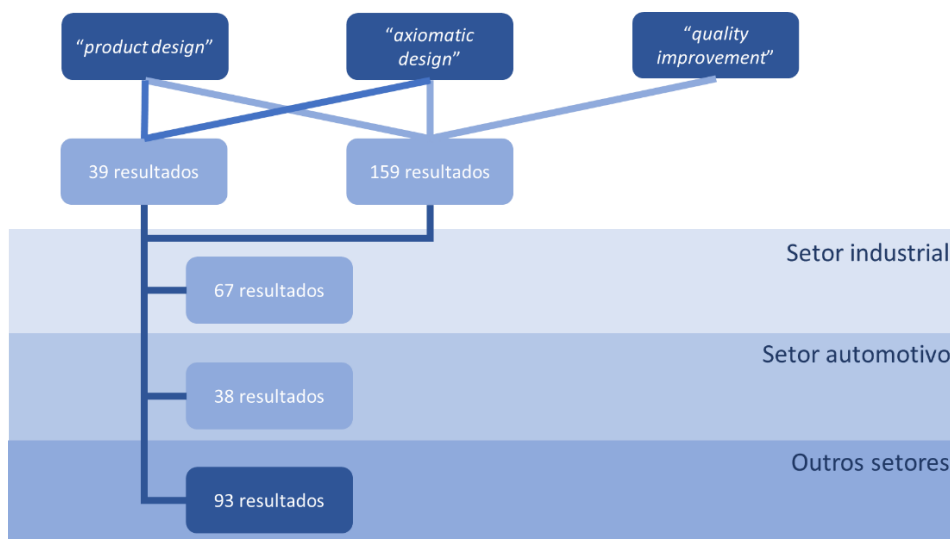
Figura 1 - Pesquisa bibliográfica, primeira fase



Destes resultados foram colhidos 198 trabalhos, os 159 que contêm as três palavras-chaves simultaneamente e 39 que contêm somente “*product design*” e “*axiomatic design*” simultaneamente, mas que discutem os Princípios do AD no desenvolvimento de produtos.

Estes 198 trabalhos foram avaliados com foco em seu conteúdo, portanto descartados os que não tinham aderência ao tema de pesquisa do trabalho, ou pertenciam a áreas diversas do setor automotivo ou industrial, como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Pesquisa bibliográfica, segunda fase



Foram descartados os 93 artigos de outros setores não relacionados a este trabalho. Os demais foram classificados de acordo com seu conceito Qualis Capes e seu fator de impacto JCR, de acordo com a tabela 1.

Tabela 1 - Citação e qualificação das referências bibliográficas

Trabalhos de pesquisa	Número de citações	Qualis	JCR 2016
BAE, S.; LEE, J. M.; CHU, C. N. Axiomatic design of automotive suspension systems. <b>CIRP Annals-Manufacturing Technology</b> , v. 51, n. 1, p. 115-118, 2002.	41	-	2,893
BRANDOLESE, A. The problems of total quality. <b>Production planning &amp; Control</b> , v. 5, n. 4, p. 330-336, 1994.	7	B1	2,369
CARNEVALLI, J. A.; MIGUEL, P. A. C.; CALARGE, F. A. Axiomatic design application for minimising the difficulties of QFD usage. <b>Int. J. Production Economics</b> , v. 125, n. 1, p. 1-12, 2010.	34	A1	3,493
CELIK, M.; CEBI, S.; KAHRAMAN, C.; ER, D. Application of axiomatic design and TOPSIS methodologies under fuzzy environment for proposing competitive strategies on Turkish container ports in maritime transportation network.. <b>Expert Systems with Applications</b> , v. 36, n. 3, p. 4541-4557, 2009.	97	A1	3,928
CHEN, K.-Z. Integration of design method software for concurrent engineering using axiomatic design. <b>Integrated manufacturing systems</b> , v. 9, n. 4, p. 242-252, 1998.	19	-	2,77

CHEN, K.-Z. Development of integrated design for disassembly and recycling in concurrent engineering. <b>Integrated manufacturing systems</b> , v. 12, n. 1, p. 67-79, 2001.	45	-	2,77
CHEN, X.; LI, Z.; FAN, Z.-P.; ZHOU, X.; ZHANG, X. Matching demanders and suppliers in knowledge service: A method based on fuzzy axiomatic design. <b>Information Sciences</b> , v. 346, p. 130-145, 2016.	9	A1	4,832
COLLEDANI, M.; TOLIO, T. Impact of quality control on production system performance. <b>CIRP Annals-Manufacturing Technology</b> , v. 55, n. 1, p. 453-456, 2006.	69	-	2,893
DU, Y.; CAO, H.; CHEN, X.; BENTAO, W. Reuse-oriented redesign method of used products based on axiomatic design theory and QFD. <b>Journal of Cleaner Production</b> , v. 39, p. 79-86, 2013.	32	A1	5,715
FARID, A. M. Measures of reconfigurability and its key characteristics in intelligent manufacturing systems. <b>Journal of Intelligent Manufacturing</b> , p. 1-17, 2014.	18	A2	3,035
FARID, A. M.; MCFARLANE, D. C. Production degrees of freedom as manufacturing system reconfiguration potential measures. <b>Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture</b> , v. 222, n. 10, p. 1301-1314, 2008.	37	B1	1,366
FARID, A. M.; SUH, N. P. <b>Axiomatic Design in Large Systems: Complex Products, Buildings and Manufacturing Systems</b> . [S.l.]: Springer, 2016.	4	-	-
FREDERIKSSON, B. Holistic Systems Engineering in Product Development. <b>MILITARY TECHNOLOGY</b> , v. 19, p. 48-48, 1995.	52	-	-
GILLESPIE, T. D. <b>Fundamentals of vehicle dynamics</b> . SAE Technical Paper. [S.l.]. 1992.	152	-	-
GONÇALVES-COELHO, A. M.; MOURÃO, A. J.; PEREIRA, Z. L. Improving the use of QFD with Axiomatic Design. <b>Concurrent Engineering</b> , v. 13, n. 3, p. 233-239, 2005.	38	B1	1,000
GONÇALVES-COELHO, A. M.; NESTIAN, G.; CAVIQUE, M.; MOURÃO, A. Tackling with redundant design solutions through axiomatic design. <b>International Journal of Precision Engineering and Manufacturing</b> , v. 13, n. 10, p. 1837-1843, 2012.	9	A2	1,497
HUANG, G. Q.; JIANG, Z. Web-based design review of fuel pumps using fuzzy set theory. <b>Engineering Applications of Artificial Intelligence</b> , v. 15, n. 6, p. 529-539, 2002.	18	A2	2,894
JURAN, J. M. <b>Juran on quality by design: the new steps for planning quality into goods and services</b> . [S.l.]: Simon and Schuster, 1992.	1235	-	-
KANDJANI, H.; TAVANA, M.; BERNUS, P.; WEN, L.; MOHTARAMI, A. Using extended Axiomatic Design theory to reduce complexities in Global Software Development projects. <b>Computers in Industry</b> , v. 67, p. 86-96, 2015.	8	B1	2,691
KANNAN, D.; GOVINDAN, K.; RAJENDRAN, S. Fuzzy Axiomatic Design approach based green supplier selection: a case study from Singapore. <b>Journal of Cleaner Production</b> , v. 96, p. 194-208, 2015.	92	A1	5,715
KHANDEKAR, A. V.; CHAKRABORTY, S. Application of fuzzy axiomatic design principles for selection of non-traditional machining processes. <b>The International Journal of Advanced Manufacturing Technology</b> , v. 83, n. 1-4, p. 539-543, 2016.	7	B1	2,209
KIM, S.-J.; SUH, N. P.; KIM, S.-G. Design of software systems based on axiomatic design. <b>Robotics and Computer-Integrated Manufacturing</b> , v. 8, n. 4, p. 243-255, 1991.	114	A2	2,846
KULAK, O.; CEBI, S.; KAHRAMAN, C. Applications of axiomatic design principles: A literature review. <b>Expert Systems with Applications</b> , v. 37, n. 9, p. 6705-6717, 2010.	123	A1	3,928
KULAK, O.; DURMUŞOĞLU, M. B.; KAHRAMAN, C. Fuzzy multi-attribute equipment selection based on information axiom. <b>Journal of materials processing technology</b> , v. 169, n. 3, p. 227-245, 2005.	182	A1	3,147
KULAK, O.; KAHRAMAN, C. Multi-attribute comparison of advanced manufacturing systems using fuzzy vs. crisp axiomatic design approach. <b>International Journal of Production Economics</b> , v. 95, n. 3, p. 45-424, 2005.	197	A1	3,493
LINKE, B. S.; DORNFELD, D. A. Application of axiomatic design principles to identify more sustainable strategies for grinding. <b>Journal of manufacturing Systems</b> , 2012.	20	A2	2,77
MALDONADO, A.; GARCIA, J. L.; ALVARADO, A.; BALDERRAMA, C. O. A hierarchical fuzzy axiomatic design methodology for ergonomic. <b>International Journal of Advanced Manufacturing Technology</b> , v. 66, p. 171-186, 2012.	37	B1	2,209
MALDONADO, A.; GARCIA, J. L.; REYES, R. M.; HERNANDEZ, J. Application of a fuzzy axiomatic design methodology for ergonomic. <b>Procedia Manufacturing</b> , n. 3, p. 5770-5776, 2015.	2	-	-
MORADINAFTCHALI, V.; WANG, X.; SONG, L. Enhancement in quality and productivity: a riskless approach based on optimum selection of tolerance and improvement strategies. <b>International Journal of Production Research</b> , 2016.	1	A2	1,693
NAUNHEIMER, H.; BERTCHE, B.; RYBORZ, J.; NOVAK, W. <b>Automotive transmissions: fundamentals, selection, design and application</b> . 2. ed. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2010.	234	-	-
NG, N. K.; JIAO, J. A domain-based reference model for the conceptualization of factory loading allocation problems in multi-site manufacturing supply chains. <b>Technovation</b> , v. 24, n. 8, p. 631-642, 2004.	19	A1	3,265
NGO, V. D.; HOFMAN, T.; STEINBUCH, M.; SERRARENS, A. Gear shift map design methodology for automotive transmissions. <b>Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering</b> , v. 228, n. 1, p. 50-72, 2014.	8	B1	1,253

OGNJANOVIĆ, M.; MILUTINOVIĆ, M. S. Design for reliability based methodology for automotive gearbox load capacity identification. <b>Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering</b> , v. 59, n. 5, p. 311-322, 2013.	9	-	0,914
OGNJANOVIĆ, M.; RISTIĆ, M.; ŽIVKOVIĆ, P. Reliability for design of planetary gear drive units. <b>Meccanica</b> , v. 49, n. 4, p. 829-841, 2014.	10	B1	2,196
PUJK, E.; TELGEN, D.; MOERGESTEL, L. V.; CEGLAREK, D. Assessment of reconfiguration schemes for Reconfigurable. <b>Robotics and Computer-Integrated Manufacturing</b> , v. 43, p. 30-38, 2017.		A2	2,846
RAO, S. S.; TJANDRA, M. Reliability-based design of automotive transmission systems. <b>Reliability Engineering &amp; System Safety</b> , v. 46, n. 2, p. 159-169, 1994.	19	-	3,153
REXEIS, M.; HAUSBERGER, S. Trend of vehicle emission levels until 2020–Prognosis based on current vehicle measurements and future emission legislation. <b>Atmospheric Environment</b> , v. 43, n. 31, p. 4689-4698, 2009.	66	A1	3,629
RINKEVICH, D. J.; SAMSON, F. P. <b>An improved powertrain attributes development process with the use of design structure matrix</b> . Tese de Doutorado. [S.l.]: Massachusetts Institute of Technology, 2004.	9	-	-
SCHMITT, R.; LINDER, A. Technical complaint management as a lever for product and process improvement. <b>CIRP Annals-Manufacturing Technology</b> , v. 62, n. 1, p. 435-438, 2013.	7	-	2,893
SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. <b>Administração da produção</b> . São Paulo: Atlas, 2009.	6	-	-
SOZO, Valdeon; FORCELLINI, Fernando; OGLIARI, André. Axiomatic approach application during the product conceptual design phase. In: <b>Proceedings of International Conference Mechanika 2001</b> . 2001. p. 267-272	8	-	-
SUH, N. P. <b>The Principles of Design</b> . New York: Oxford University, 1990.	4287	-	-
SUH, N. P. Axiomatic design theory for systems. <b>Research in Engineering</b> , v. 10, n. 4, p. 189-209, 1998.	478	C	2,297
SUH, N. P. <b>Axiomatic Design</b> . New York: Oxford University, 2001.	255	-	-
TANG, D.; ZHANG, G.; DAI, S. Design as integration of axiomatic design and design structure matrix. <b>Robotics and Computer-Integrated Manufacturing</b> , v. 25, n. 3, p. 610-619, 2009.	53	A2	2,846
THOMPSON, M. K. A classification of procedural errors in the definition of functional requirements in axiomatic design theory, Worcester, 2013.	35	-	-
VINODH, S.; KAMALA, V.; JAYAKRISHNA, K. Application of fuzzy axiomatic design methodology for selection of design alternatives. <b>Journal of Engineering, Design and Technology</b> , v. 13, n. 1, p. 2-22, 2015.	2	-	-
WENG, F.-T.; JENQ, S.-M. Application integrating axiomatic design and agile manufacturing unit in product evaluation. <b>The International Journal of Advanced Manufacturing Technology</b> , v. 63, n. 1, p. 181-189, 2012.	9	B1	2,209

Dessa forma, foram incluídos os artigos com conceito Qualis Capes acima e incluído a partir de B1 ou fator de impacto JCR superior e incluído a 0,900, com exceção de alguns artigos e livros que apresentavam pesquisas com informações ou resultados interessantes a esta pesquisa, resultando em 48 trabalhos citados.

## 2.2. Axiomatic Design (AD): Conceitos e Fundamentos

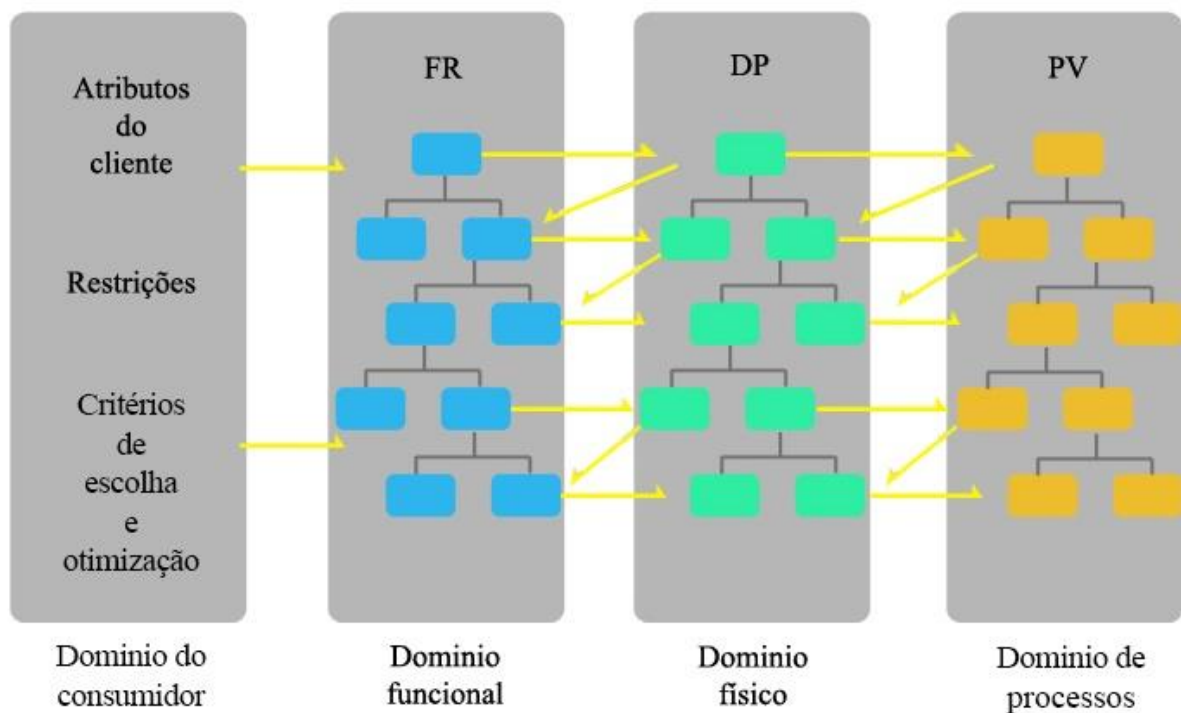
AD é um método científico de suporte ao desenvolvimento de projeto amplamente difundido na indústria e na comunidade científica segundo Kulak *et al.* (2010), que suporta a criação e a melhoria de soluções para um conjunto de necessidades. Esse método propõe uma estrutura de trabalho que guia o desdobramento das necessidades apresentadas pelo cliente e suas respectivas soluções, criando um modelo que permite o desenvolvimento do projeto de forma documentada e organizada, além de auxiliar a tomada de decisão, já que é possível

a comparação de vários modelos do mesmo projeto contendo soluções distintas. Essa comparação permite observar as diferenças no aspecto de qualidade do produto.

Suh (2001) divide o processo de desenvolvimento de projeto em quatro domínios, grupos de mesma natureza organizados em uma estrutura hierárquica: o do consumidor, que contém os atributos do cliente ou *customer attributes* (CA); o funcional, que apresenta requisitos funcionais ou *functional requirements* (FR); o físico, com parâmetros de projeto ou *design parameters* (DP), e o de processos, com variáveis de processo ou *process variables* (PV).

Esses domínios são naturalmente independentes, mas durante o desenvolvimento do projeto, relacionam-se obedecendo à árvore hierárquica. O processo se desdobra em ziguezague, passando horizontalmente entre os domínios e os elementos do mesmo nível hierárquico e, posteriormente, retornam ao domínio anterior; porém, num nível hierárquico abaixo, fazendo com que cada nível hierárquico se ramifique no nível inferior, como ilustrado pela Figura 3. Dessa forma, um PV nasce de um DP correspondente (que nasce de um FR, definido pelo conjunto de CA).

Figura 3 - Desdobramento dos níveis hierárquicos



Esse processo de desdobramento envolve a seleção das soluções mais adequadas ao projeto. Norteando o processo de tomada de decisão, estão os *selection criteria* (SC), traduzido em critérios de seleção para auxiliar a determinar a melhor alternativa de projeto, e os critérios de otimização, *optimization criteria* (OC), determinando onde os esforços de melhoria devem ser focalizados (Thompson, 2013).

A fim de determinar as fronteiras do projeto, *constraints* (C), ou *restrições*, são atribuídas, baseadas nas limitações apresentadas pelo cliente. E estas podem ser de diversas naturezas, delimitando o projeto aceitável; portanto, expressam obrigações atribuídas às soluções, ou seja, como o projeto não pode ser.

Existem dois tipos de restrições: os *input-constraints* (iC), que especificam objetivos abrangentes do projeto e delineiam grande parte do seu escopo; e os *system-constraints* (sC), que são consequências de decisões tomadas durante o desdobramento dos níveis hierárquicos. Estes surgem de um DP ou PV determinado, que é limitado por diversos fatores (Suh, *Axiomatic Design*, 2001).

Outro elemento presente nos Princípios do *Axiomatic Design* é o requisito não funcional ou *non functional requirements* (nFR), que descreve como o projeto deve ser (qualidades e atributos que o produto deve apresentar). O conjunto de nFRs descreve o caráter do produto e é necessário para a aceitação do projeto e o seu uso pelos clientes (Thompson, 2013).

Esse processo de desdobramento resulta em um modelo organizado em domínios fundamentais e níveis hierárquicos compostos pelos elementos do projeto de forma detalhada; tais elementos podem ter conteúdo qualitativo ou quantitativo, dependendo da natureza do projeto e do projetista. O modelo, então, é analisado ao redor dos axiomas 1 (independência) e 2 (informação).

### 2.2.1. Axioma 1: Axioma da Independência

O primeiro axioma determina a independência entre os FRs e seus respectivos DPs. Matematicamente a relação de dependência entre DPs e FRs são descritas pela equação 1:

$$\{FR\} = |A|\{DP\} \quad (1)$$



Em que  $\{FR\}$  é o vetor que descreve os FRs;  $\{DP\}$  é o vetor que descreve os DPs; e  $|A|$  é a matriz que caracteriza o projeto.

Em um modelo com elementos qualitativos, a análise de dependência é baseada em evidências documentais e empíricas, além da experiência da equipe de projeto. Quando não existe dependência entre FR e DP, o elemento  $a_{ij}$  é 0; quando existe dependência entre FR e DP o elemento  $a_{ij}$  é 1 ou X, permitindo a análise do formato da matriz de projeto. Em modelos com elementos quantitativos, a análise pode ser feita matematicamente por meio de seu determinante – ou observando o formato da matriz:

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ \vdots \\ FRn \end{Bmatrix} = \begin{vmatrix} x & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & x \end{vmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ \vdots \\ DPn \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ \vdots \\ FRn \end{Bmatrix} = \begin{vmatrix} x & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x & \cdots & x \end{vmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ \vdots \\ DPn \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ \vdots \\ FRn \end{Bmatrix} = \begin{vmatrix} x & \cdots & x \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x & \cdots & x \end{vmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ \vdots \\ DPn \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Em geral, cada  $a_{ij}$  de  $|A|$  vem de uma relação entre o FR correspondente com seu DP. Se a matriz  $|A|$  resultante deste projeto for diagonal, o projeto é chamado de *uncoupled*, representado na matriz 1. Se esta for uma matriz triangular, o projeto é denominado *decoupled*, representado na matriz 2. Por fim, se for uma matriz tradicional, o projeto é caracterizado como *coupled*, conforme a matriz 3. Para satisfazer o axioma da independência, o projeto deve ser *uncoupled* ou *decoupled*.

### 2.2.2. Axioma 2: Axioma da informação

O segundo axioma determina a minimização do conteúdo de informação das soluções apresentadas no projeto, o que implica a escolha de soluções mais enxutas. O conteúdo da informação para um dado DP é avaliado de acordo com a probabilidade que essa solução tem de suprir o FR correspondente e é definido pela equação 2:

$$I_i = \log_2 \left( \frac{1}{P_i} \right) \quad (2)$$

Onde  $I_i$  é a quantidade de informação condita no  $DP_j$ , medida em bits, e  $P_i$  é a probabilidade que um  $DP_j$  tem de atender um  $FR_i$ .

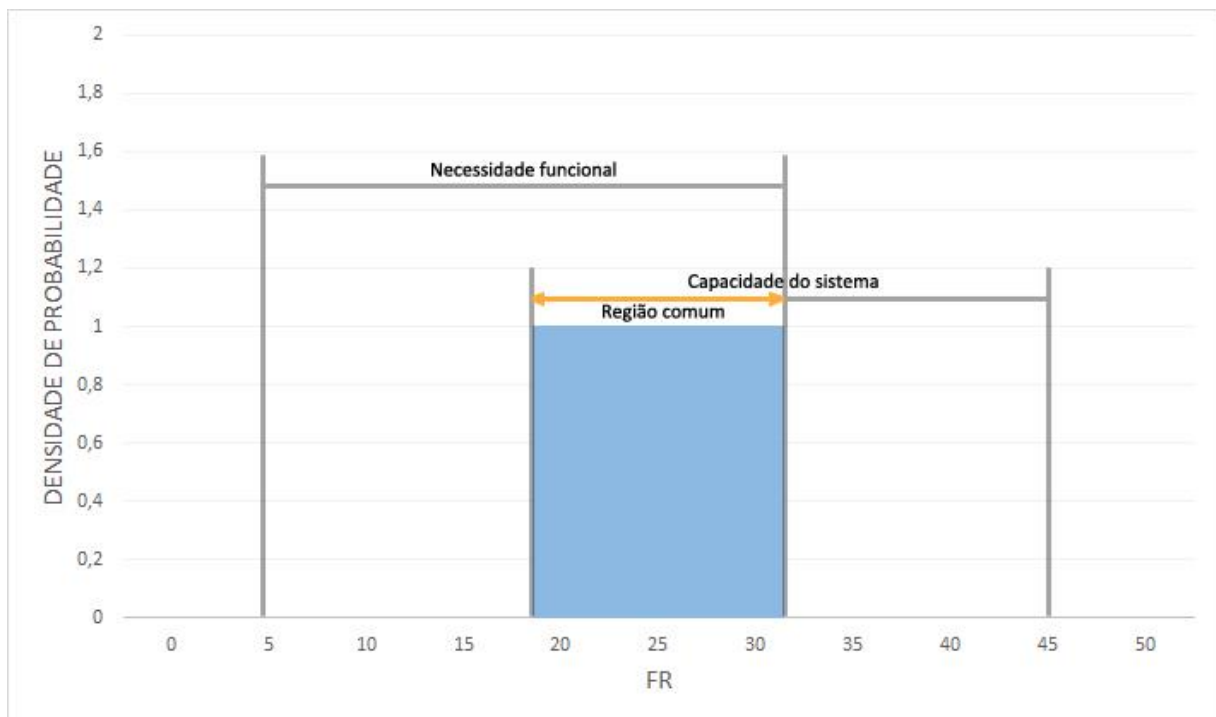
Em qualquer situação de projeto, a probabilidade de sucesso é dada pela tolerância que o projetista deseja alcançar e pelo que a solução proposta é capaz de atender (KULAK *et al.*, 2010). Como pode ser visto na Figura 4, de forma simplificada, a região comum resultado da sobreposição entre a necessidade funcional determinada pelo projetista e a capacidade funcional do sistema, esta região é onde uma solução aceitável existe, assim:

$$P_i = (\text{região comum}/\text{capacidade do sistema})$$

Portanto o conteúdo da informação pode ser descrito como:

$$I_i = \log_2 (\text{capacidade do sistema}/\text{região comum}).$$

Figura 4 - Função densidade de probabilidade de um FR



Fonte: Adaptado de Kulak *et al.* (2010).

A probabilidade  $P_i$  de atender com sucesso o dado  $FR_i$  dentro da capacidade do sistema,  $CS$ , se  $FR_i$  for contínua, pode ser descrita pela área sob a região comum do gráfico, que pode ser obtida integrando a função densidade de

probabilidade,  $P_s$ , para  $FR_i$  (Kannan, Govindan & Rajendran, 2015; Kulak & Kahraman, 2005), como mostra a equação 3:

$$P_i = \int_{cs^i}^{cs^u} P_s(FR_i) dFR_1 \quad (3)$$

A proposta de condução desta pesquisa não contempla a avaliação detalhada do Axioma 2, portanto o mesmo não será explorado nesse trabalho.

### 2.2.3. Fuzzy Axiomatic Design (FAD)

Existem situações de projeto em que é impossível determinar discretamente a dependência entre  $FR_i$  e  $DP_j$ , assim como a probabilidade de sucesso que  $DP_j$  tem de atender  $FR_i$ . Para várias destas situações é possível utilizar os Conjuntos *Fuzzy* de Zadeh (1965), em associação com os Princípios do *AD*.

#### 2.2.3.1. Axioma 1: axioma da independência, para FAD

No FAD, o Axioma 1 é analisado por meio de funções que utilizam como base o Delta de Kronecker para analisar a dependência entre  $FR_i$  e  $DP_j$ . Com a Notação Indicial, são descritos como  $FR_i$  e  $DP_j$ ; dessa forma  $DP_j$  corresponde a  $FR_i$ .

Assim, a dependência entre dois elementos é descrita por um número variando entre 0 e 1. Afim definir este número, é necessário determinar uma sequência de FRs, para isso são utilizadas as equações 4 e 5.

$$S_{FRi} = \sum_{j=1}^n a_{ij}^m \quad (4)$$

$$S_{DPj} = \sum_{i=1}^m a_{ij}^m \quad (5)$$

Nestas equações,  $a_{ij}^m$  é um valor médio do número *Fuzzy* triangular que mostra a relação entre  $FR_i$  e  $DP_j$ . FRs são organizados respeitando a sequência de  $S_{FRi}$ . Se existir alguma igualdade entre os valores de  $S_{FRi}$ , então, para estes elementos, são usados os valores de  $S_{DPj}$  (KULAK, CEBI & KAHRAMAN, 2010).

Em seguida, o grau de dependência  $C$  é calculado utilizando a equação 6, um vetor cujos elementos variam entre 0 e 1.

$$C = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m a_{ij}^m}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m 1} \quad (6)$$

Quanto mais próximo de 0, maior a independência entre FR e DP. Também é possível determinar o grau de importância dos elementos para definir qual par de FR<sub>i</sub> DP<sub>j</sub> tem maior grau de dependência.

### 2.2.3.2. Axioma 2: axioma da informação, para FAD

A fim de analisar a quantidade de informação contida nas alternativas de projeto, é possível utilizar conjuntos *Fuzzy*, com o intuito de englobar de forma completa coberta pela capacidade do sistema até mesmo utilizando informações incompletas. Para tanto são utilizados números *Fuzzy* triangulares ou trapezoidais (KANNAN, GOVINDAN & RAJENDRAN, 2015).

Ao invés de utilizar a capacidade do sistema para medir a quantidade de informação contida na solução, usa-se um número *fuzzy* triangular (NFT), como mostra a equação 7 (KANNAN, GOVINDAN & RAJENDRAN, 2015).

$$I_i = \log_2 \left( \frac{\text{NFT da capacidade do sistema}}{\text{Area comum}} \right) \quad (7)$$

A proposta de condução desta pesquisa não contempla a aplicação de FAD, portanto o mesmo não será mais explorado neste trabalho.

### 2.2.4. Critérios de seleção (SCs) e critérios de otimização (OCs)

Todo o processo de desdobramento dos FRs a partir dos CAs, e o desdobramento dos DPs que são definidos pelos FRs, parte de um processo de seleção que determina quais DPs são os mais adequados para atender às necessidades de seus correspondentes FRs e as áreas nas quais os esforços de melhoria devem ser aplicados (Thompson, 2013).

Diferentes dos Cs, os SCs demandam uma ordem de importância, que é determinada pela equipe de projeto baseado nos interesses dos clientes e direciona a escolha dos DPs para o melhor de acordo com os SCs, é normalmente

determinado por um adjetivo junto de um superlativo ou verbo transitivo (Thompson, 2013).

### **2.3. Aplicações do *Axiomatic Design* (AD) em distintas áreas**

O *AD* tem sido extensamente pesquisada e aplicada em diversas áreas, provando-se muito versátil, aplicada ao projeto de produto, soluções de melhoria de qualidade e até mesmo ao auxílio de tomada de decisões. Algumas aplicações de sucesso desta ferramenta se concentrando nas áreas detalhadas a seguir.

#### **2.3.1. Projeto de processos e de produtos**

Os Princípios do *Axiomatic Design* também podem ser aplicados a desenvolvimento de processos, além do projeto de produto. Chen (2001) pesquisou o desenvolvimento de produtos com foco no processo de desmontagem, reuso e reciclagem, seguindo uma linha de ação que presa pela sustentabilidade de produtos na engenharia atual, assim como Du *et al.* (2013), que propõe um método de *redesign* de produtos após o final de sua vida útil, integrando o *Axiomatic Design* e o *Quality Function Deployment*, para promover o uso de produtos.

Weng e Jenq (2012) desenvolveram um método de seleção de processos dentro de uma unidade de manufatura ágil, utilizando o *Axiomatic Design* como suporte para uma estrutura de trabalho que considera a qualidade, o tempo e o custo do processo para produção de determinado produto, maximizando o ganho sobre o investimento e a agilidade da produção. A ferramenta ainda mostra de forma direta a correlação e as influências entre índices de todos os níveis e finalmente o resultado da quantidade de informação (relacionado ao axioma 2). Na seleção da estrutura de tomada de decisão, é utilizada para verificar a efetividade e viabilidade do modelo.

Khandekar e Chakraborty (2016) propuseram uma forma de selecionar métodos não tradicionais de usinagem para geometrias complexas e materiais de alta performance, que aplicam os Princípios do *Fuzzy Axiomatic Design*. Avanços no campo da tecnologia dos materiais apresentam desafios no campo da usinagem, afinal, materiais de alto desempenho são de difícil usinagem, demandando inovações nesses processos. A escolha do método de usinagem não tradicional

para geometrias complexas envolve diversos aspectos qualitativos e quantitativos que são conflitantes; nesse sentido, a ferramenta proposta por Khandekar e Chakraborty (2016) auxilia neste processo. Os autores compararam dois processos e, comparando-os com o trabalho de especialistas da área, apresentaram resultados positivos.

### **2.3.2. Projeto de sistemas de manufatura**

À época da proposição dos Princípios do *Axiomatic Design*, Suh (1998) enxergava o potencial de sua ferramenta para a aplicação no projeto de sistemas, por utilizar um método matricial para análise sistemática da transformação das necessidades contidas nos problemas em soluções de projeto, de modo que a aplicação do *Axiomatic Design* neste campo do conhecimento tem sido extensamente explorada (FARID *et al.*, 2016).

O projeto de sistemas de manufatura é uma estrutura de trabalho que se define durante a criação do sistema. Ela contém ferramentas, métodos e processos aplicáveis ao sistema de manufatura em desenvolvimento (KULAK *et al.*, 2010).

Dessa forma, tal processo de criação é bastante complexo e interdependente. Ao utilizar os Princípios do *Axiomatic Design*, é possível desenvolver um sistema de manufatura focado nas necessidades do produto. Kulak e Durmusoglu (2005), por exemplo, propuseram esta aplicação substituindo um sistema de manufatura orientado ao processo por um sistema de manufatura orientado a células de produção.

Kulak e Kahraman (2005) também criaram uma ferramenta de suporte à tomada de decisão, introduzindo o axioma da informação em ambiente nebuloso, onde a avaliação das alternativas e definição dos FRs foram feitos utilizando números nebulosos triangulares.

Maldonado *et al.* (2015) aplicaram *Fuzzy Axiomatic Design* com o objetivo de avaliar tecnologias de manufatura avançada, com foco em ergonomia, procurando selecionar máquinas CNC de moldagem de plástico. Assim, foi utilizada uma perspectiva multiatributo do *Axiomatic Design* como suporte à seleção da tecnologia de manufatura avançada e mais ergonomicamente adequada em um estudo de caso como forma de comprovar o método usado.

Atualmente, sistemas de manufatura tem uma nova demanda que engloba principalmente a capacidade de reconfiguração rápida, sistemas versáteis atendem a demandas de mercado com maior facilidade, rapidez e menor custo. Puik *et al.* (2017) analisaram um sistema de manufatura reconfigurável com um método de desenvolvimento baseado nos Princípios do *Axiomatic Design* proposto por Farid (2008, 2014), utilizado para determinar os graus de liberdade do sistema e suas características-chave.

### **2.3.3. Gestão de cadeia de suprimentos**

Ng e Jiao (2004) pesquisaram a equalização de cadeias de suprimentos em redes de manufatura, desenvolvendo um modelo baseado em domínios com o *Axiomatic Design*, de forma a facilitar a conceptualização de problemas de alocação de carregamento de fabricas.

A pesquisa de Kannan, Govidan e Rajendran (2015) envolveu o *Fuzzy Axiomatic Design* no gerenciamento de cadeias verdes de suprimentos, buscando melhorias de qualidade em diversos aspectos, além de auxiliar na escolha de fornecedores verdes.

Chen *et al.* (2016), por sua vez, buscaram melhorar a qualidade no relacionamento entre fornecedor e cliente no campo de tecnologia da informação, de maneira a propor uma nova forma de calcular o grau de compatibilidade entre cliente e fornecedor com o *Fuzzy Axiomatic Design* como base.

### **2.3.4. Logística**

Celik *et al.* (2009) aplicaram *Fuzzy Axiomatic Design* e *Fuzzy Technique For Order Performance By Similarity To Ideal Solution* (TOPSIS) de forma integrada, como ferramentas de suporte à tomada de decisão na administração do porto da Turquia e em novas empresas no mercado marítimo da Turquia, conduzindo um estudo de caso no qual o sistema recomendava ações aos gestores do porto e estes eram responsáveis pela decisão final.

### **2.3.5. Projeto de software**

Nas décadas de 80 e 90 e de uma forma simplificada, o desenvolvimento de softwares se iniciava com a definição do foco e das características destes. O código era planejando, com base num plano que apresentava as soluções que o software deveria suprir, sendo projetado de forma semelhante a produtos, partindo dos Princípios do *Axiomatic Design*. Assim, um modelo conceitual da ferramenta foi proposto e usado com foco no desenvolvimento de softwares, aproveitando-se desse paralelo com a criação de produtos e sistemas (CHEN, 1998; KIM *et al.*, 1991).

Depois da virada do milênio, os sistemas computacionais foram tornando-se mais complexos. Teve início, nesse contexto, a extensão do método, utilizando conjuntos de teorias *fuzzy*, com a aplicação de números e operações matemáticas nebulosos no processo de revisão do projeto (HUAN *et al.*, 2002).

Atualmente, softwares se tornaram mais complexos e, com eles, as técnicas de desenvolvimento de softwares – como o *Global Software Development*, que podem ser entendidos como sistemas adaptativos, não mais como sistemas projetados. Estes sistemas estão relativamente livres de um controle. Em sua produção, o *Axiomatic Design* é utilizado com a Estimativa de Complexidade de Kolmoforov (como ferramenta de redução de complexidade). Desse modo, o axioma da informação passa a ser encarado como axioma da complexidade, determinando que sistemas com menor complexidade terão maior qualidade (KANDJANI *et al.*, 2015).

### **2.3.6. Qualidade na engenharia ambiental**

Linke e Dornfeld (2012) defendem que a importância de implementar uma cultura sustentável no projeto de ferramentas e processos tem aumentado, mas os modelos existentes para avaliar sustentabilidade de processos de usinagem por abrasão só levam em consideração aspectos isolados. Por isso, os autores propuseram um modelo utilizando *Axiomatic Design* para melhoria da sustentabilidade neste tipo de processo.

A sustentabilidade passa a ter papel de grande relevância no processo de fabricação. O trabalho de Du *et al.* (2013), citado anteriormente, por exemplo também faz parte do campo de conhecimento da engenharia ambiental, uma vez



que propõe melhorias na sustentabilidade do produto promovendo o seu reuso e/ou reciclagem.

### **2.3.7. Pesquisas teóricas considerando os Princípios do *Axiomatic Design***

Além da aplicação do AD, muitos autores pesquisam-na de forma teórica, explorando os seus limites e testando sua integração com outras ferramentas que aumentam a abrangência de ambos, como nos exemplos a seguir.

Tang, Zhang e Dai (2009) analisaram as desvantagens do AD e do método de projeto matricial. Para os autores, o AD auxilia a equipe de projeto a encontrar DPs aceitáveis para os FRs correspondentes, mas falha em exprimir a dependência entre os DPs, incluindo geometria, layout e até mesmo interfaces. Um modelo de projeto em forma de matriz ajuda o projetista a documentar e visualizar o projeto, mas é uma estrutura de trabalho bastante difícil quando se está fazendo algo novo, devido às grandes incertezas relacionadas ao resultado esperado.

Vinodh, Kamala e Jayakrishna (2015) conduziram uma pesquisa que propôs a utilização de *Fuzzy AD*, com ambiente nebuloso de forma analítica e hierárquica, para comparar diversas alternativas de DPs para os correspondentes FRs – selecionando o conjunto de DPs que fosse a melhor solução para o projeto. Num caso como este, muitas incertezas acumulam-se e a comparação dos DPs torna-se muito trabalhosa e, por vezes, impossível; no entanto, o *Fuzzy AD* oferece uma solução a essa lacuna, por meio da inteligência computacional. Porém, os autores ressaltam que a ferramenta necessita de extenso treino em diversos casos para conseguir efetivamente selecionar a melhor solução para o projeto.

Por fim, Ognjanović, Ristić e Živković (2014) abordaram a integração do AD com *robust design* e *property based design* seguindo um *V-model* aplicado em projeto de sistemas técnicos, adaptados ao projeto de engrenagens planetárias, com o foco em melhorar a confiabilidade, tendo o objetivo de aumentar a qualidade e eficiência do produto. No estudo, os autores utilizam o AD para determinar corretamente os parâmetros de design para componentes como engrenagens e rolamentos, mostrando a possibilidade do uso dessa ferramenta como suporte para outras estruturas de trabalho.

A aplicação dos Princípios do AD em diversas áreas do conhecimento e o seu estudo teórico está demonstrando a sua tenacidade, em expansão para outras

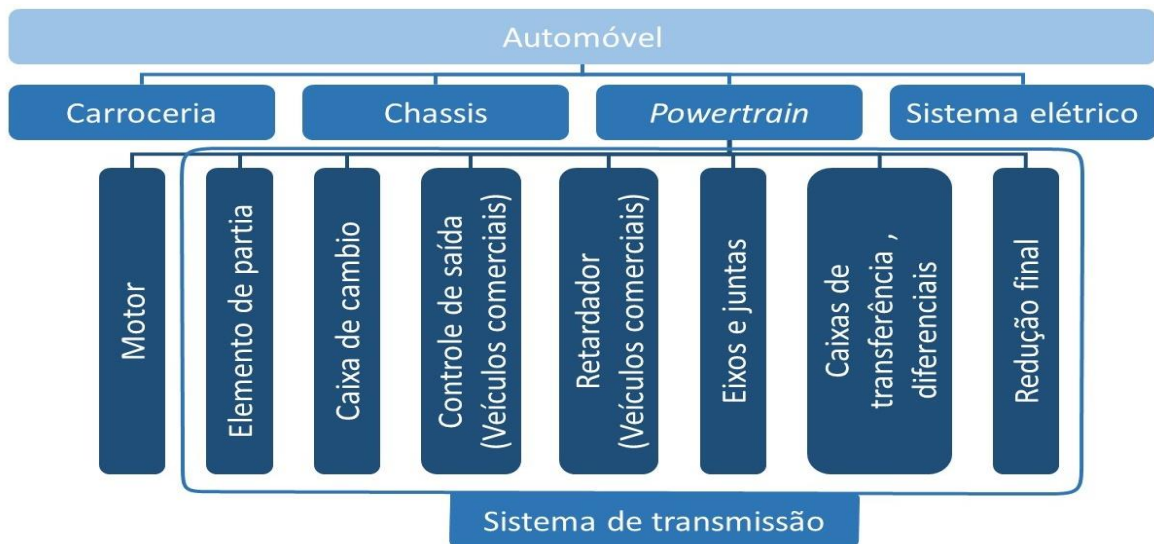
disciplinas, incluindo softwares e grandes sistemas complexos nos últimos anos. O crescimento do *AD* no projeto de sistemas de grande escala sugere um grau de universalidade do *AD* enquanto teoria (FARID *et al.*, 2016).

#### 2.4. Projeto de sistemas de transmissão: Automóvel, *Powertrain* e Caixa de Câmbio

Todo o veículo é composto de subsistemas que, juntos, cumprem as funções do automóvel, quais sejam: carroceria, chassis, *powertrain* e sistema elétrico. Cada subsistema tem seus componentes (também subsistemas de componentes menores), conforme a

Figura 5.

Figura 5 - Componentes do subsistema que compõem uma transmissão automotiva



Fonte: adaptado de Naunheimer *et al.* (2010).

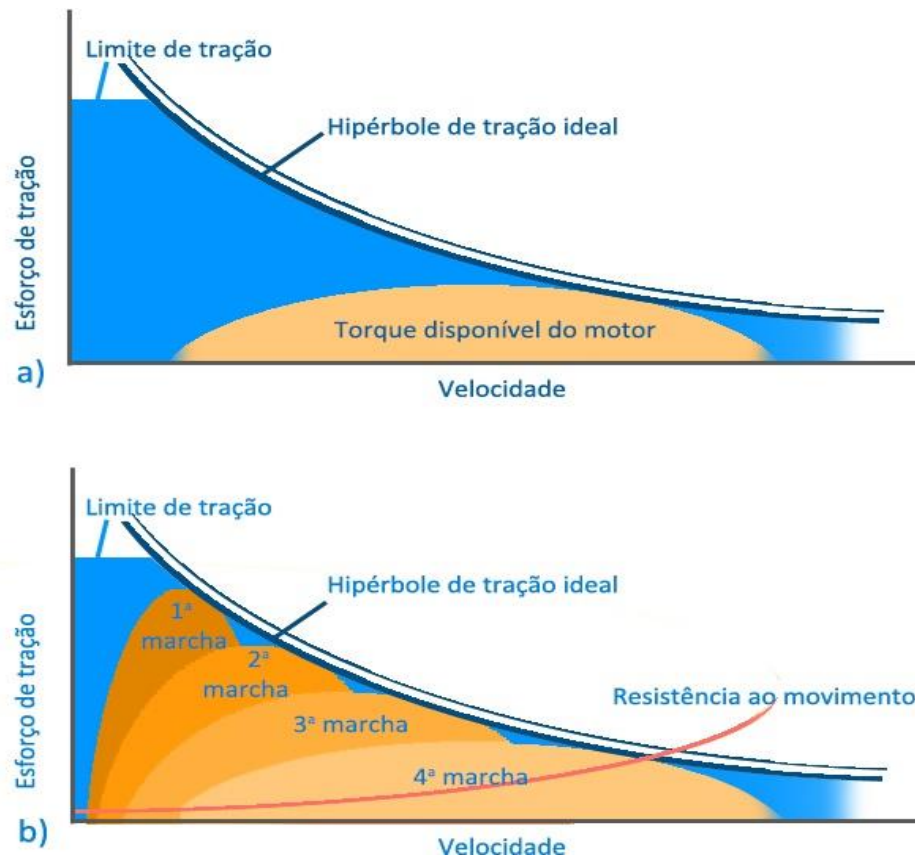
O termo *powertrain* provém do inglês e pode ser traduzido como trem de força de um veículo, composto pelo motor e pelo sistema de transmissão formado por elemento de partida (embreagem ou conversor de torque), caixa de câmbio, controle de saída (sistema que impede o movimento reverso, presente somente em veículos comerciais), eixos e juntas, caixas de transferência e redução final. Todos esses componentes são responsáveis pela movimentação do veículo.

O sistema de transmissão é necessário, pois a maioria dos veículos comercializados atualmente é movida por motores de combustão interna exclusivamente ou em conjunto com motores elétricos. Os primeiros são incapazes de produzir torque a partir do repouso. Sua potência máxima está restrita em uma determinada rotação e o consumo de combustível é muito influenciado pelo regime de funcionamento.

Devido a esses fatores, uma parte do sistema de transmissão, o câmbio automotivo, varia a relação de redução entre o motor e as rodas, buscando manter o motor próximo de um regime ótimo de funcionamento enquanto varia a velocidade de deslocamento do veículo, como ilustrado pela

Figura 6.

Figura 6: a) Mapa simplificado do funcionamento de um motor de combustão interna sem caixa de câmbio; b) Mapa simplificado do funcionamento de um motor de combustão interna com caixa de câmbio



Fonte: adaptado de Naunheimer *et al.* (2010).

Para determinar as características desta caixa de câmbio é necessário considerar diversos aspectos do próprio veículo, do condutor, da utilização do automóvel e de seu fabricante.

#### **2.4.1. Fundamentos da caixa de câmbio CVT**

Diferentemente de caixas de câmbio manuais, com número fixo de velocidades ou marchas, as caixas de câmbio de variação contínua (CVT), mostrada na Figura 7, funcionam variando de forma contínua a relação de redução da transmissão, transmitindo potência de forma ininterrupta enquanto a relação de redução é variada. Uma característica das CVTs é a capacidade de acelerar a velocidade de rotação das rodas sem variar significativamente a velocidade de rotação do motor.

Figura 7 - Caixa de câmbio CVT

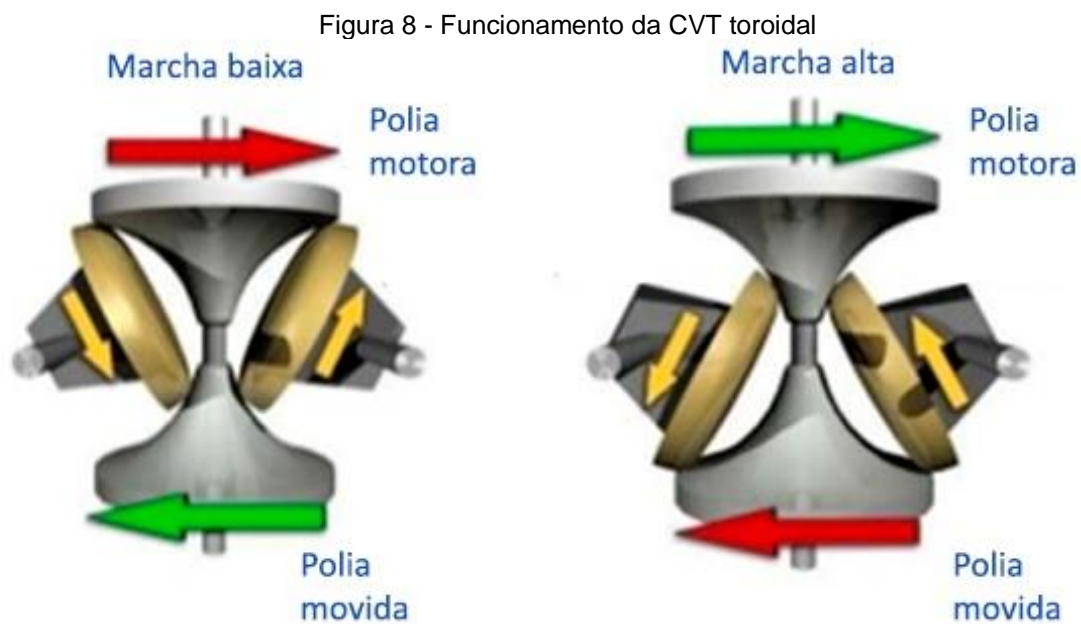


Fonte: Jacto Transmissions (2015).

Atualmente dois tipos de CVT são comercialmente utilizadas, a de polias de diâmetro variável e a toroidal com rodas de atrito.

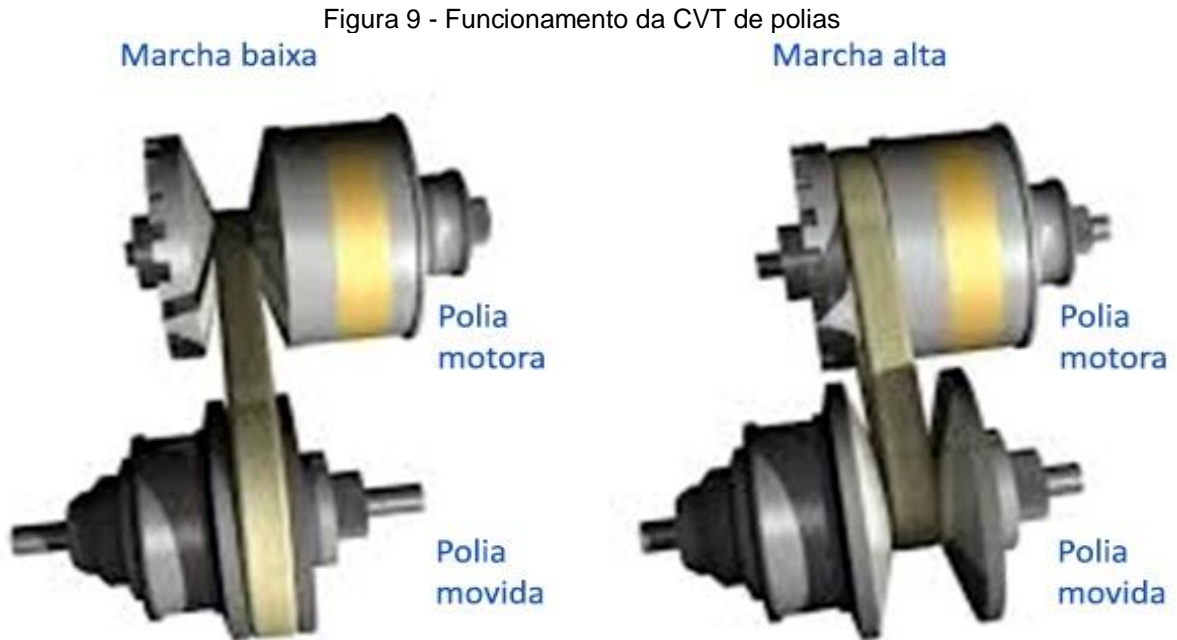
CVTs toroidais utilizam formas geométricas revolucionadas para transmitir a potência utilizando atrito, representado na

Figura 8. Esse tipo de transmissão tornou-se possível graças ao desenvolvimento de um fluido lubrificante multifásico e não newtoniano, capaz de produzir atrito somente nas regiões necessárias, onde o fluido sofre grande pressão. O principal limitante desta tecnologia é a capacidade de transmitir torque, limitada pelo coeficiente de atrito dos elementos de transmissão.



Fonte: Adaptado de Zohdy (2013).

Já a CVT com polias de diâmetro variável transmite a potência por meio de uma polia de perfil trapezoidal e varia a relação de redução aproximando e afastando as faces da polia de forma que altere o diâmetro do trajeto da correia, como ilustrado na Figura 9. Essa tecnologia também está limitada ao coeficiente de atrito entre a polia e a correia, mas pode transmitir muito mais torque – haja vista o abraçamento da correia na polia aumentar tal capacidade do conjunto para transmitir torque.



Para este trabalho, o modelo de CVT utilizado como referência é o de polias de diâmetros variáveis, por ser a tecnologia mais difundida atualmente nos veículos comercializados da categoria estudada.

#### 2.4.2. Principais elementos do projeto de caixas de câmbio automotivo

No desenvolvimento de uma caixa de câmbio, é necessário definir claramente o tipo de veículo que será equipado com este produto e seu uso; essas características serão utilizadas para determinar os fatores-chave do projeto de câmbio (sentido de rotação, as relações de redução e o torque).

Essa classificação dos automóveis de passageiros exprime a necessidade de considerar diferentes variações do produto no projeto, visto que a exigência de performance sobre o sistema de transmissão é diferente em cada caso.

Para tanto, as principais funções de uma caixa de câmbio automotivo são:

- Adaptar o fluxo de potência que envolve: converter torque de saída e velocidade e permitir reverso;
- Permitir transmissão de potência ininterrupta que engloba: potência positiva ou freio-motor transmitidos com mínimo de perda.

Caixas de câmbio automotivos também são produtos de produção em massa, de alto grau de complexidade técnica e tecnológica, classificadas como tecnologia

altamente desenvolvida, um sistema que não passa mais por evoluções pequenas, é observada uma evolução gradual e contínua deste produto. Este processo é caracterizado pelo pensamento sistemático focado nos fatores meio ambiente  $\Leftrightarrow$  transito  $\Leftrightarrow$  veículo  $\Leftrightarrow$  motor/transmissão e pelo uso de controles eletrônicos e sensores. Estes fatores trazem a necessidade de o desenvolvimento de transmissão automotiva ser rápido, orientado ao mercado, às preferencias do cliente (especialmente em veículos comerciais) e de forma flexível.

Como cliente, são citados tanto o consumidor final comprador do veículo, como a fabricante/montadora detentora da marca, esta última buscando competitividade técnica e econômica como consequência do mercado no qual o produto está inserido. A

Figura 10 mostra os principais objetivos no desenvolvimento do câmbio automotivo e do subsistema ao qual este faz parte.

Figura 10 - Objetivos principais no desenvolvimento de uma transmissão automotiva



Fonte: Adaptado de Rinkevich e Samson (2004).

Desta forma, além das necessidades fundamentais do veículo, existem papéis que um sistema de transmissão também deve cumprir, conhecidos como *requisitos de operação*, que afetam sua competitividade. Em veículos de passageiro, Rinkevich e Samson (2004) destacam algumas necessidades críticas no desenvolvimento de uma caixa de câmbio:

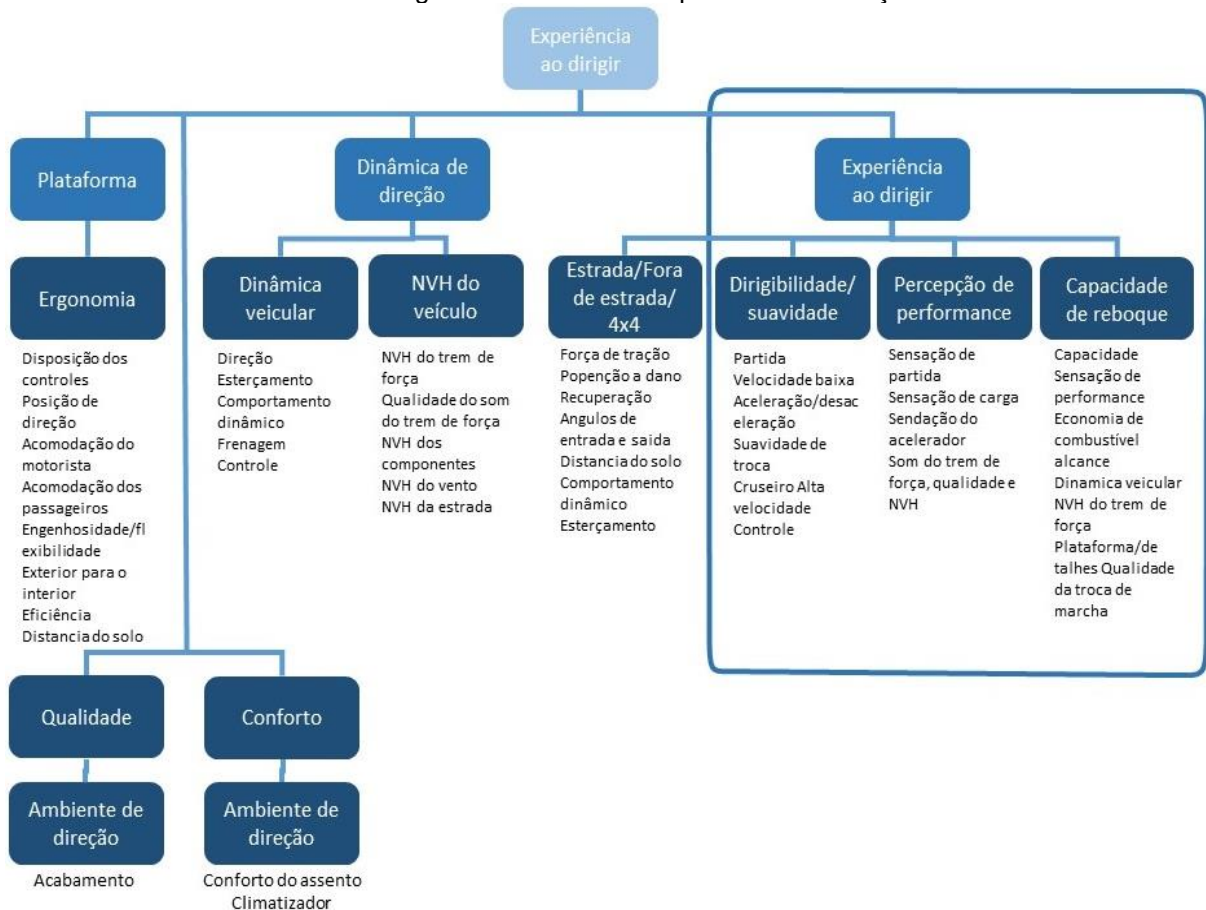
- Percepção de performance;
- Dirigibilidade;
- Capacidade de reboque;

- Economia de combustível.

Outra necessidade muito importante para este componente diz respeito às as características da marca, comumente chamadas de “DNA da marca”, termo utilizado pelos fabricantes de automóveis que exprime o caráter do veículo, o conjunto de características do produto que representam a imagem, a visão da marca e o nome que o veículo carrega. O *powertrain*, a dinâmica de direção e a plataforma do veículo são os elementos que mais influenciam esta experiência de direção (Rinkevich & Samson, 2004).

Portanto, a experiência de direção de cada marca é diferente, assim como de cada segmento de veículos com seus diferentes modelos e aplicações. A Figura 11 demonstra os atributos críticos para atingir a estratégia de produtos das diferentes marcas.

Figura 11 - Arvore da experiência de direção



Fonte: adaptado de Rinkevich e Samson (2004).

Além do “DNA da marca”, a experiência ao dirigir é o fator que mais influencia a percepção de qualidade do veículo pelo consumidor, mais especificamente a



satisfação relacionada ao *powertrain*, segundo os dados mostrados pela regressão de J. D. Power (2016).

O modelo APEAL (*Automotive Performance Execution and Layout*) (J. D. Power, 2016), que pode ser traduzido como desempenho, execução e layout automotivo, é um modelo de regressão linear que exprime a importância de nove atributos-chave os quais determinam a satisfação global e, conseqüentemente, a percepção da qualidade dos consumidores sobre determinado veículo.

Baseado neste modelo, Rinkevich e Samson (2004) compilaram um quadro, apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, que mostra a importância relativa de cada atributo na percepção total de qualidade do produto, nos oito diferentes segmentos de veículos que foram utilizados como referência nesta pesquisa.

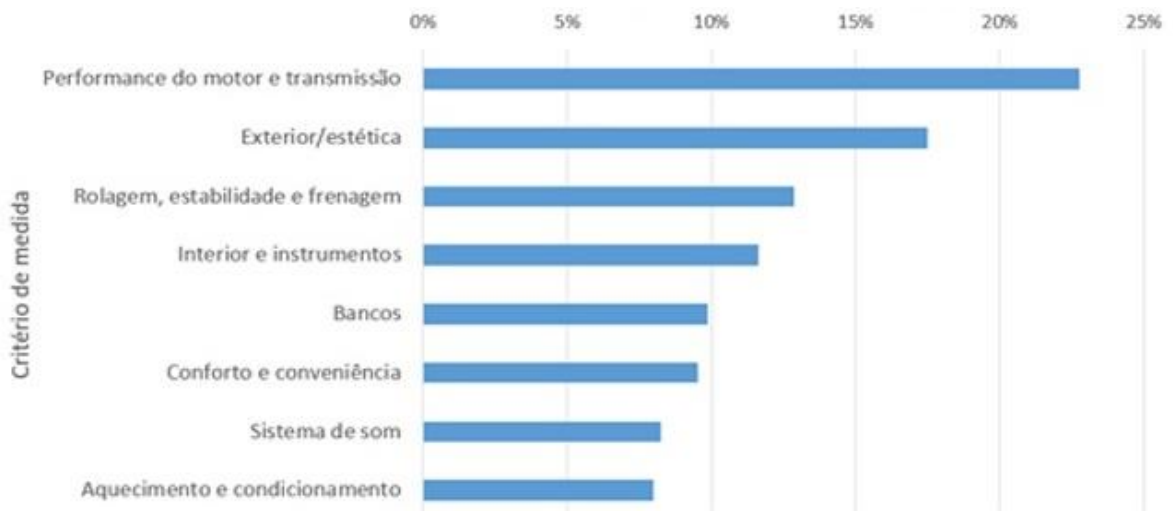
Tabela 2 - Importância relativa na satisfação global do cliente

	Segmento do veículo							
	Compacto	Médio	Grande	Luxo	Esportivo	picape	SUV	Van
Performance do motor e transmissão	22%	18%	26%	22%	26%	28%	21%	19%
Exterior/estética	19%	16%	19%	15%	20%	18%	18%	15%
Rolagem, estabilidade e frenagem	10%	17%	10%	15%	12%	13%	15%	11%
Interior e instrumentos	13%	13%	12%	14%	13%	8%	11%	9%
Bancos	9%	10%	6%	10%	11%	7%	10%	16%
Conforto e conveniência	10%	8%	10%	9%	5%	9%	10%	15%
Sistema de som	8%	9%	10%	8%	7%	9%	8%	7%
Aquecimento e condicionamento	9%	9%	8%	7%	7%	7%	8%	9%

Fonte: Adaptado de Rinkevich e Samson (2004).

Em seguida, Rinkevich e Samson (2004) extraíram a média dos valores dos oito segmentos e compilaram-na no gráfico da Figura 12, mostrando a importância do conjunto sistema de transmissão e motor sobre a qualidade do produto final.

Figura 12 - Média do modelo APEAL de JD Power



Fonte: Adaptado de Rinkevich e Samson (2004).

Como a caixa de câmbio é o elemento responsável pela adaptação do fluxo de potência, a melhoria de qualidade deste item traduz-se diretamente no aumento da percepção de qualidade que o consumidor tem sobre o veículo.

### 2.4.3. Variáveis internas de caixas de câmbio automotivo

Todo o conjunto de necessidades que a caixa de câmbio deve suprir são resumidas em algumas variáveis as quais são o ponto de partida do desenho deste produto: direção de rotação, relações de transmissão e torque.

A direção de rotação em uma caixa de câmbio é definida como positiva quando o elemento gira no sentido horário e negativa quando gira no sentido oposto, utilizando como referência um sistema cartesiano no qual o eixo x tem sentido positivo apontando para o oposto do sentido de deslocamento do veículo. Dessa forma, quando existe inversão na rotação, há a inversão do sinal. Normalmente, o sinal que indica o sentido da rotação acompanha a velocidade de rotação do elemento (Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010).

A relação de transmissão é dada por  $i_G$ , que é a relação entre as velocidades angulares do eixo de entrada  $\omega_1$  e de saída  $\omega_2$  do elemento.

$$i_G = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (8)$$

A partir da Equação 8 e das regras de sinal apresentadas acima, as seguintes características podem ser encontradas:

- $i_G > 0$  – entrada e saída da transmissão giram no mesmo sentido;
- $i_G < 0$  – mudança no sentido de rotação de transmissão;
- $|i_G| > 1$  – relação de redução de velocidade;
- $|i_G| < 1$  – relação de aumento de velocidade.

O fator mais importante que afeta uma caixa de câmbio é o torque e a direção de sua ação. A direção do toque é definida pelo sinal que acompanha sua magnitude – e é independente da direção de rotação do elemento, sendo definido como positivo quando ocorre no sentido horário, com a mesma referência cartesiana do sentido de rotação. Portanto, a potência  $P$  absorvida é positiva e a dissipada é negativa. Pode ser determinada pelo produto da velocidade de angular pelo torque do elemento, conforme a equação 9 (Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010):

$$P = T\omega \quad (9)$$

#### **2.4.4. Fatores Fundamentais da Performance de caixas de câmbio automotivo**

Além dos fatores internos do funcionamento de uma caixa de câmbio, existem expectativas que este tipo de produto deve atender a fim de ser um item vendável: a adequação a seu propósito, boa relação custo-benefício e sustentável tanto no âmbito ambiental como no funcional e no comercial (Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010).

Para caixas de câmbio automotivas, as expectativas podem ser traduzidas em fatores de performance: confiabilidade e tempo de serviço; distância entre centros; características de massa; custo e valor; ruídos; e eficiência e perdas.

##### **2.4.4.1. Confiabilidade e tempo de serviço**

O veículo equipado com uma caixa de câmbio tem uma expectativa de longevidade dentro do seu ciclo de vida, que deve atender a demandas de mercado. Dentro do veículo, existem peças de desgaste natural que devem ser substituídas periodicamente, para garantir o bom funcionamento do veículo – ao passo que existem componentes os quais devem durar toda a vida do veículo, como a caixa de câmbio.

Uma falha ou desgaste precoce deste produto impede a disponibilidade para uso do veículo, reduzindo sua eficiência econômica. Assim, um pequeno superdimensionamento na caixa de câmbio pode ser traduzido como um grande aumento no tempo de serviço do veículo. O superdimensionamento de 10%, por exemplo, dobra esse tempo (Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010).

Para carros de passageiros, o tempo de serviço de caixas de câmbio é de 150.000 quilômetros rodados. Para que este valor possa ser alcançado, fatores externos como o perfil de direção, tipo de pavimentação, estilo de trânsito e o tipo de *powertrain* do veículo devem ser considerados – o que demanda cálculos e análises precisas durante a fase de projeto (Rinkevich & Samson, 2004).

#### 2.4.4.2. Distância entre centros

As dimensões físicas da caixa de câmbio são fatores de extrema importância no projeto de veículos, pelo fato de possuírem partes variadas que precisam ocupar um espaço restrito. O elemento que mais influencia o tamanho da caixa de câmbio é a distância entre eixos da árvore principal (a parte da caixa de câmbio que contém as diversas reduções necessárias para seu funcionamento).

$$a = 52,201 T_2^{0.103} \quad (3)$$

A distância entre centros  $a_c$  é calculada em função do torque de saída da caixa de câmbio,  $T_2$ , e deve comportar a relação de máxima redução; ao mesmo tempo, é necessário que seja menor possível, pois a relação mais reduzida é a que mais multiplica o torque fornecido pelo propulsor  $i_{Gmax}$  (primeira marcha).

#### 2.4.4.3. Características de massa

A massa do produto  $m_G$  influi em diversos aspectos do veículo: o custo da caixa de câmbio pode ser estimado por meio de sua massa, que também influencia na massa final do veículo equipado com ela. A massa pode ser estimada baseada no torque de entrada  $T_1$ , maior relação  $i_{Gmax}$  e número de velocidades  $z$ .

$$m_G = 0,199(T_2^{0.669} z^{0.334}) \quad (4)$$

#### 2.4.4.4. Custo e valor

Sabe-se que o custo do produto pode ser previsto com base na estimativa de massa, determinando o preço de venda. Essa medida permite avaliar se a performance e eficiência da caixa de câmbio são condizentes com seu custo, além de permitir uma estimativa de preço do produto final na fase de planejamento do produto (Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010).

Para tanto é utilizado um parâmetro de comparação chamado de preço relativo de venda  $RSP$ , que compara o preço do projeto a uma referência. Sendo assim, para  $T_1=350$  Nm,  $z=6$ ,  $i_{Gmax}=5,5$  e o  $RSP=1$ .

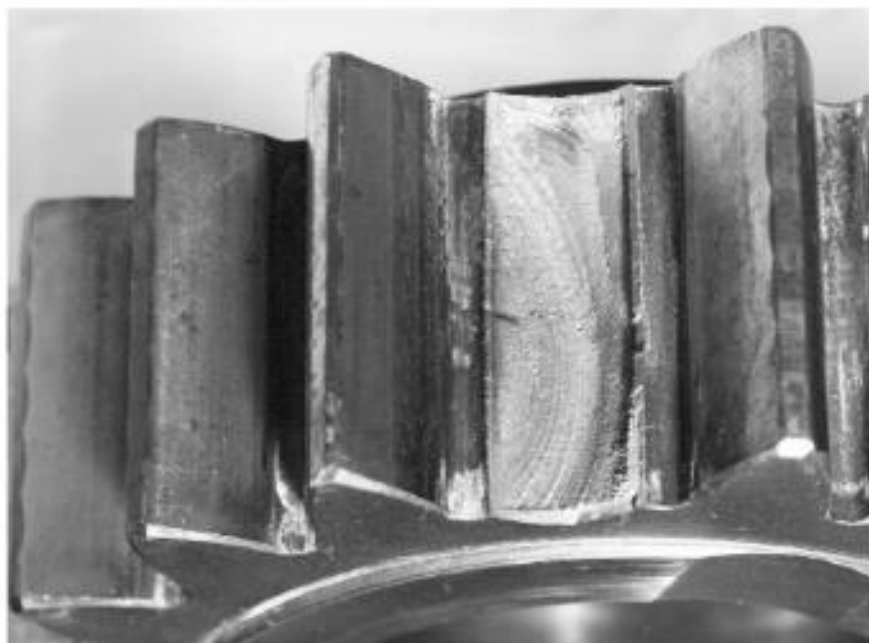
$$RSP = 0,0183 T_2^{0,512} z^{0,256} \quad (5)$$

#### 2.4.4.5. Ruídos

A caixa de câmbio gera a maior parte do ruído de um veículo, devido à grande quantidade de partes moveis que possui e por ser a principal ligação entre o motor e as rodas. Ainda, somado aos ruídos de espectro amplo, este produto produz ruídos discretos bastante incômodos (Rinkevich & Samson, 2004).

O ruído pode causar falha prematura das partes do câmbio devido ao acúmulo de estresse na peça, de acordo com a Figura 13.

Figura 13 - Quebra por fadiga de engrenagem cilíndrica de dentes retos



Fonte: Naunheimer *et al.* (2010).

Dessa forma, dispositivos de redução de ruído são necessários na fase de projeto, assim como a especificação das engrenagens e polias devem levar em consideração a produção de ruído.

Por conta de sua importância, o ruído da transmissão está sujeito a regulamentações rígidas. Exemplo disso é o CONAMA número 252, de 01 de fevereiro de 1999, que estabelece limites máximos de ruídos de poluentes e ruídos emitidos por veículos automotores.

#### **2.4.4.6. Eficiência e perdas**

Como parte do esforço de redução de emissão de poluentes por veículos automotores, a questão da eficiência global do veículo é considerada. A caixa de câmbio é um protagonista na eficiência global, por efetuar a conexão direta do motor para as rodas, transmitindo todo o esforço de movimento. A eficiência da caixa de câmbio é calculada a partir de suas perdas, resultado do inverso da soma das perdas das engrenagens, dos rolamentos, dos selos (e outras perdas, como as de bombas de óleo, por exemplo).

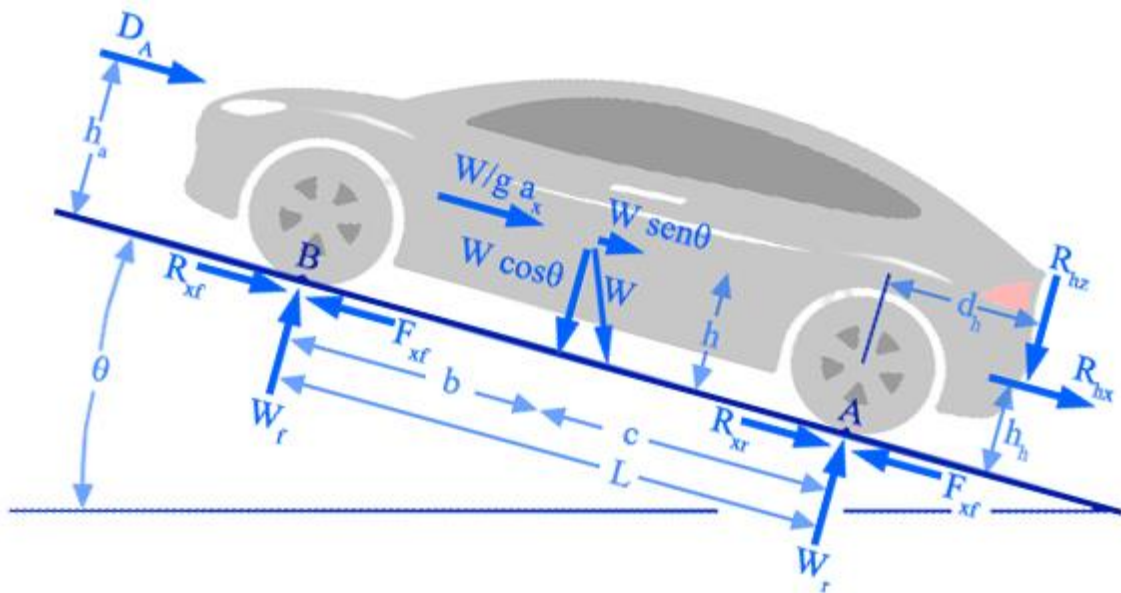
Tendo em vista toda a cadeia de valor deste produto, o conjunto mais eficiente que existe atualmente para transmissão de torque é um conjunto direto de engrenagens (Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010).

O uso de transmissões hidramáticas, hidrostáticas, ou CVT de polia ou CVT toroidal apresenta eficiências inferiores.

#### **2.4.4.7. Oferta e demanda de potência**

Com a finalidade de se movimentar, o veículo deve vencer toda a resistência ao movimento (a chamada “resistência à rolagem”, uma variável relevante no projeto de um câmbio). A resistência à rolagem é composta da soma da resistência das rodas, da resistência do ar, da resistência gradiente e da resistência à aceleração. Na Figura 14, estão ilustradas as principais forças que atuam sobre um veículo em movimento.

Figura 14 - Forças arbitrárias que atuam sobre um veículo



Fonte: Adaptado de Gillespie (1992).

- $W$  é a massa do veículo agindo no seu centro de massa, medida em Newtons (N) e apresentando duas componentes: uma normal à pista e outra paralela à pista (GILLESPIE, 1992).
- Se o veículo está acelerando ao longo da pista, existe uma força inercial contrária à aceleração conhecida como *Força de D'Alembert*, mostrada na equação 10, que atua no centro de gravidade (GILLESPIE, 1992).

$$F_i = \frac{W}{g \cdot a_x} \quad (10)$$

- Os pneus sofrerão forças normais à pista, representados por  $W_f$  e  $W_r$ , a carga dinâmica infringida em cada eixo (GILLESPIE, 1992).
- Forças de tração  $F_{xf}$  e  $F_{xr}$  ou forças de resistência à rolagem  $R_{xf}$  e  $R_{xr}$  podem agir no plano da pista (GILLESPIE, 1992).
- $D_A$  é a força de arrasto aerodinâmico, agindo na carroceria do veículo. Pode ser representada num ponto acima do solo, indicado pela altura  $h_a$ , ou como uma força de mesma magnitude, sobre a pista, dotada de momento, expressa pela equação 11 (GILLESPIE, 1992):

$$M_{D_A} = D_A \cdot h_A \quad (11)$$

- $R_{hz}$  e  $R_{hx}$  são forças verticais e longitudinais agindo no ponto de engate, caso o veículo esteja engatado a um reboque (GILLESPIE, 1992).

A lei fundamental sobre a qual a maioria das análises de dinâmica veicular se dá é a Segunda Lei de Newton. Essa análise é efetuada por meio do estabelecimento de uma fronteira entre o corpo analisado e mundo exterior, sendo que as forças externas são representadas dentro do sistema analisado sem a presença de suas fontes.

Dentro do sistema linear, a soma das forças externas agindo sobre o corpo (veículo) em uma dada direção é igual ao produto de sua massa e a aceleração nesta direção, expressa pela equação 12.

$$\sum F_x = M \cdot a_x \quad (12)$$

$\sum F_x$  corresponde à somatória de todas as forças atuantes no eixo  $x$  adotado,  $M$  corresponde à massa do veículo e  $a_x$ , à aceleração resultante no eixo  $x$ .

No sistema rotacional, a soma do torque agindo sobre o corpo em torno de um eixo é igual ao produto do momento tissor da inércia e da aceleração rotacional sobre este eixo, expressa pela equação 13:

$$\sum T_x = I_{xx} \cdot \alpha_x \quad (13)$$

Onde  $T_x$  corresponde aos torques sobre o eixo  $x$ ,  $I_{xx}$  corresponde ao momento de inércia sobre o eixo  $x$  e  $a_x$  a aceleração sobre o eixo  $x$ . Para que o veículo inicie o movimento, a somatória de todos os torques deve ser positiva e diferente de zero, de forma a resultar numa aceleração positiva.

O trabalho necessário para que este movimento se inicie é realizado pela fonte de energia do veículo, o motor (pelas suas características de funcionamento, tem potência e torque relacionados à sua velocidade de funcionamento, medida pela rotação do eixo de saída).

Existem duas curvas características que descrevem o funcionamento de um motor de combustão interna: uma é a curva torque/velocidade em carga total (acelerador completamente aberto); a outra é a curva potência/velocidade, também em carga total.

Essas curvas, apesar de caracterizarem o motor, não mostram detalhes do seu funcionamento em diferentes regimes; para isso, é utilizado o *throttle map* (que pode ser traduzido como *mapa do acelerador*), uma superfície descrita pelo torque, velocidade e porcentagem de abertura do acelerador. Assim, é possível analisar o



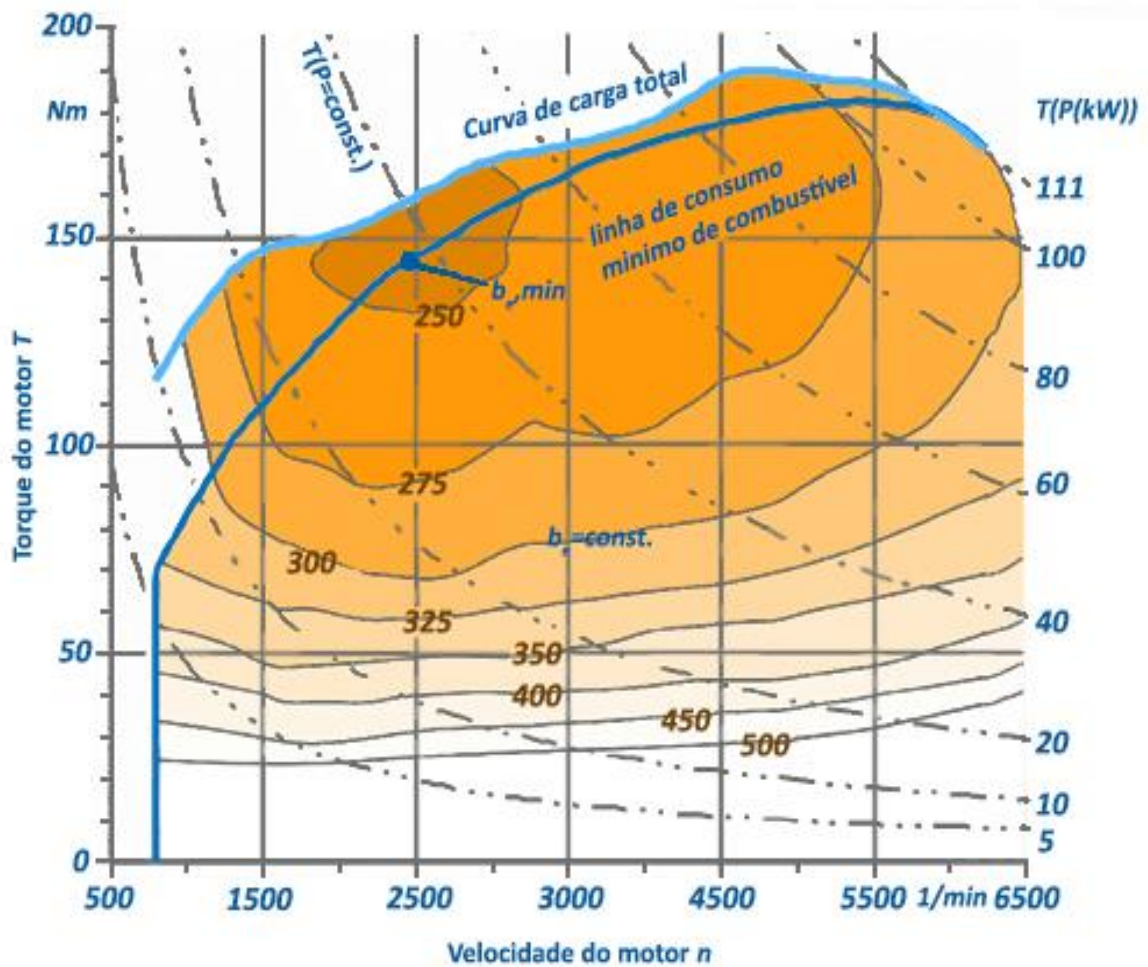
torque e a potência disponível para cada instante de funcionamento do motor e determinar a melhor forma de mediar a demanda e a oferta de torque e potência.

Outro aspecto do motor que também influencia no projeto da caixa de câmbio é o consumo de combustível do motor. O consumo de motores de combustão interna pode ser representado em função da velocidade do motor e seu torque.

Em todas as hipérbolas de potência, existem um ponto de menor consumo de combustível em uma determinada relação de torque e velocidade. Utilizando esses pontos como referência, é possível plotar uma curva de consumo mínimo de combustível do motor.

A Figura 15 mostra em linhas de relevo a superfície que descreve o consumo específico de combustível em regime constante  $b_e$ , junto da curva de torque/velocidade de rotação do motor em regime constante  $T$  ( $P=\text{constante}$ ).

Figura 15 - Mapa do motor, consumo específico  $b_e$ , em g/kWh



Fonte: Nauenheimer *et al.* (2010).

#### 2.4.4.8. Adaptação do fluxo de potência

A partir da demanda e da oferta de potência e das características do motor é possível precisar a curva de funcionamento da caixa de câmbio. Inicialmente, é necessário determinar a relação de maior redução  $i_{Amax}$  expressa na equação 14, que relaciona o torque máximo entregue pelo motor  $T_{Mmax}$  multiplicado pelo seu rendimento  $\eta_{tot}$ , com a necessidade de torque do veículo.

$$i_{Amax} = \frac{r_{dyn} m_F g (f_R \cos \alpha_{St} + \sin \alpha_{St})}{T_{Mmax} \eta_{tot}} \quad (14)$$

$r_{dyn}$  é o raio dinâmico da rodagem, dado em metros (m);  $m_f$ , a massa total do veículo;  $f_r$ , um coeficiente de perdas; e  $\alpha_{st}$ , a inclinação máxima admitida da superfície.

Já a relação de maior velocidade  $i_{Amin}$  é expressa na equação 15, que relaciona a velocidade máxima alcançada pelo veículo e a velocidade máxima de rotação do motor multiplicada pelo perímetro dinâmico da roda.

$$i_{Amin} = \frac{3,6 \frac{\pi}{30} n_{Mmax} r_{dyn}}{v_{max}} \quad (15)$$

$n_{Mmax}$  é a rotação máxima do motor dado em 1/min e  $v_{max}$  a velocidade do veículo em km/h.

Em CVTs, o fluxo de potência é variado, o que possibilita aproveitar de forma mais eficiente a potência do motor.

A relação de câmbios CVT é normalmente descrita em termos de capacidade de ajuste ao invés da relação total. A velocidade de ajuste do câmbio é um fator decisivo no funcionamento correto do produto, sendo definido pela equação 16, a velocidade de ajuste do câmbio é a relação entre a variação da relação de redução pela variação do tempo multiplicada pela velocidade de rotação de saída.

$$\dot{n} = \frac{dn_M}{dt} = n_{Output} \frac{di}{dt} \quad (16)$$

A energia necessária para a variação da relação do câmbio vem do movimento do câmbio. Assim, se a troca for feita muito rapidamente, haverá perda de energia cinética, o que causará uma impressão ruim ao condutor do veículo.

## 2.5. Métodos de Melhoria da Qualidade

A sociedade está imersa em tecnologias que colocam cada consumidor à mercê de uma contínua operação de produtos e serviços que tornam tal sociedade possível; tal operação depende absolutamente da qualidade contida nesses produtos e serviços (JURAN, 1992).

Neles, a qualidade pode ser definida como “fazer as coisas de forma correta”, de acordo com Slack, Chambers e Johnston (2009); entretanto, as coisas que a produção precisa “fazer certo” variam de acordo com o tipo de operação – conseqüentemente o tipo de produto, temos, assim, as características do produto. (JURAN, 1992).

Slack, Chambers e Johnston (2009) apontam que existem tantas definições de qualidade quanto pessoas escrevendo sobre elas; dado o vasto alcance do termo, provavelmente não existe consenso sobre estas definições, a não ser em sua forma mais fundamental.

De acordo com Juran (1992), as duas definições mais importantes deste termo são: (a) quanto melhores as características do produto, melhor sua qualidade; e (b) ausência de defeitos. Esses dois tipos de qualidade são bastante diferentes: a primeira afeta diretamente a competitividade do produto, com efeitos sobre suas vendas; a segunda afeta o custo do produto dado, visto que menos defeitos refletem-se em menor custo. Pelo motivo de afetar o produto de diversos modos, são ilustrados na tabela posterior.

Tabela 3 - O principal significado de qualidade

Atributos dos produtos que atendem as necessidades do consumidor	Ausência de defeitos
<b>Alta qualidade permite a empresa a:</b>	<b>Alta qualidade permite a empresa a:</b>
Aumentar satisfação do consumidor	Reduzir incidência de erros
Tomar o produto vendável	Reduzir retrabalho, desperdício
Tomar competitivo	Reduzir falhas em campo, custos com garantia
Aumentar participação de mercado	Reduzir dissatisfação dos clientes
Aumentar vendas	Reduzir testes e inspeções
Manter preços Premium	Reduzir tempo de lançamento do produto
Maior efeito nas vendas	Aumentar capacidade
Usualmente, maior qualidade custa mais	Melhorar logística
	Maior efeito está no custo
	Usualmente, maior qualidade custa menos

Fonte: Adaptado de Juran (1992).

Como observado, a qualidade contida em um produto é reflexo de todas as decisões tomadas durante o seu desenvolvimento, fase esta que compromete em até 80% o custo total de ciclo de vida do produto e conseqüentemente sua qualidade, segundo Frederiksson (1995). Por conta dessa relação entre o custo total do ciclo de vida do produto e seu ciclo de desenvolvimento, o projeto de produto com foco em qualidade tem atraído o interesse de pesquisadores e empresas de bens de consumo e serviços. A qualidade do produto é vista como um dos diferenciais críticos em um mercado globalizado (COLLEDANI & TOLIO, 2006).

Diversas empresas utilizam programas de melhoria de qualidade como *Six Sigma*, *Total Quality Management*, *Kaizen*, *DFMA*, *DFA* e *DFM*, a fim de aumentar sua competitividade estratégica no mercado, melhorando a qualidade dos processos e produtos da empresa. Todos esses programas têm um foco em comum: sintonizar as organizações e as necessidades do consumidor, para produzir produtos com maior qualidade (SCHMITT & LINDER, 2013).

Todos os trabalhos pesquisados foram relevantes para esta pesquisa, porém os mais relevantes são Thompson (2013), que esclarece os principais erros na aplicação dos Princípios do *AD*; Suh (1990, 1998), com os trabalhos que primeiro apresentaram os Princípios do *AD* como método de desenvolvimento de projetos; Rinkevich e Samson (2013) e Naunheimer *et al.* (2010) detalharam o projeto de um

câmbio automotivo permitindo o embasamento de todos os aspectos relacionados às necessidades dos clientes e às necessidades técnicas; Kulak, Cebi e Kahraman (2010), Kulak, Durmuşođlu e Kahraman (2005) e Kulak, Kahraman (2005) aprofundaram os conhecimentos e aplicações dos Princípios do *AD*, mostrando diferentes aplicações e extensões deste método; por fim, Khandekar, Chakraborty e Maldonado (2016) e Garcia, Reyes e Hernandez (2015) apresentaram as mais atuais formas de aplicação do *AD*.

### 3. Metodologia de Pesquisa

Esta pesquisa propõe uma estrutura de trabalho para a melhoria da qualidade de produtos na fase de projeto utilizando os Princípios do *Axiomatic Design*, utilizando como exemplo de aplicação um estudo de caso teórico envolvendo o desenvolvimento de uma caixa de câmbio automotiva do tipo CVT.

Portanto a proposta de estrutura de trabalho apresentada neste trabalho é um estudo teórico/conceitual (Martins, 2012; Nakano, 2012). Este estudo tem objetivo exploratório, e a aplicação da estrutura de trabalho em um estudo de caso de natureza aplicada com abordagem qualitativa (Marconi & Lakatos, 2006).

Como método de coleta de dados, afim de suportar o desenvolvimento conceitual do projeto, foi realizada uma pesquisa bibliográfica, com a finalidade de mensurar a produção científica, aprofundar o entendimento dos assuntos pesquisados e obter informação para conduzir o estudo de caso (Marconi & Lakatos, 2006).

Como objeto de estudo, foi utilizado um câmbio automotivo (tipo CVT), parte do sistema de transmissão que integra o trem de força de veículos atualmente comercializados, cuja função é converter o torque disponível da unidade de força em tração, de forma que possa deslocar o automóvel, vencendo as necessidades de torque exigidas do sistema pelo próprio veículo, pela estrada, pelo motorista e passageiros e pelo ambiente.

A escolha deste produto como objeto de estudo foi consequência da grande influência desse item na satisfação global do automóvel. Segundo o modelo APEAL de J.D. Power e associados (2016), os atributos relacionados ao trem de força e, em consequência, à caixa de câmbio, são os de maior influência no grau de satisfação global do cliente com relação ao automóvel, num índice de mais de 22% (Rinkevich & Samson, 2004).

Além disso, caixas de câmbio são produtos de alta complexidade, dotadas de um sistema mecânico com diversos componentes. Por esses fatores, caixas de câmbio estão passando por uma evolução gradual, e um dos frutos dessa evolução é o surgimento da CVT – atualmente, o único conceito de caixa de câmbio que consegue atender de melhor forma as limitações de motores de combustão interna: varia a velocidade e o torque de saída de forma contínua e mantém o motor no ponto de maior eficiência (ou maior potência).

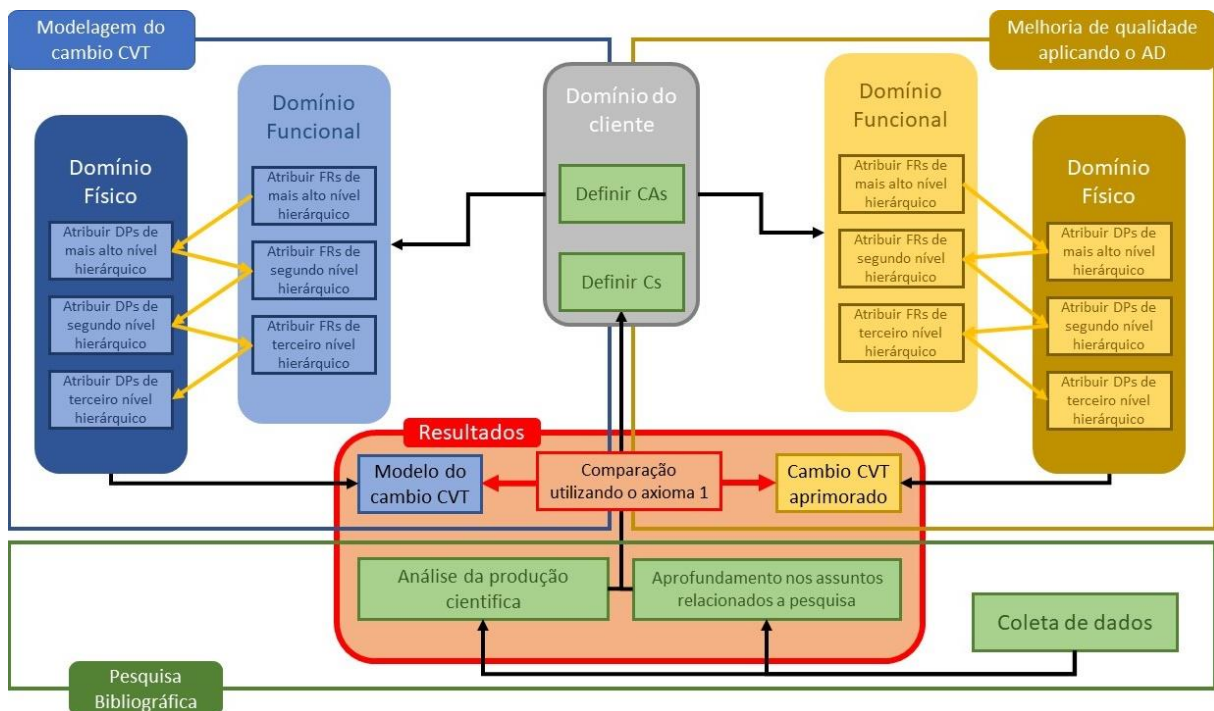
Para esta pesquisa, foi analisado um sistema de transmissão para veículos terrestres, de passageiros, para uso em estrada ou fora dela. Existem diversos tipos de automóveis, classificados de forma orientada ao sistema de transmissão, por tipo de veículo e seu uso. Os veículos de passageiros, por exemplo, são divididos entre: com potência abaixo de 75kW; com potência acima de 75 kW e vans com PBT de até 3,5 t (Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010).

### 3.1. Método de pesquisa utilizado

Esta pesquisa foi desenvolvida em três partes, conforme a

Figura 16: uma pesquisa bibliográfica acerca do referencial teórico e do desenvolvimento conceitual; a modelagem, seguindo os Princípios do *Axiomatic Design*, de um câmbio automotivo CVT que compõe veículos atuais; e a aplicação dos Princípios do *Axiomatic Design* como método de melhoria de qualidade.

Figura 16 - Estrutura da pesquisa



A pesquisa bibliográfica também foi necessária para aprofundar os conhecimentos nos assuntos abordados neste estudo e coletar os dados secundários para o desenvolvimento dos modelos matriciais utilizados no estudo.

Os Princípios do *AD* foram aplicados em dois momentos: no desenvolvimento do modelo matricial da caixa de câmbio e na estrutura de trabalho para melhoria de qualidade na fase de projeto.

Por se tratar de produtos do mesmo segmento, com mesmo público-alvo, mesma aplicação e mesmos clientes, os CA (atributos do cliente), SCs (critérios de seleção), OCs (critérios de otimização), e nFRs (requisitos não funcionais) são os mesmos, assim como o processo de desdobramento de FRs e DPs.

Porém, a matriz resultante destes desenvolvimentos e os vetores que descrevem FR e DP são diferentes. Estas matrizes foram organizadas a partir dos elementos determinados pelo processo de desdobramento do projeto, em ziguezague. Os FRs e DPs foram decompostos em níveis hierárquicos, até que o projeto seja concluído ou esteja completamente detalhado (Suh, *Axiomatic Design*, 2001).

A decomposição em ziguezague dos FRs e DPs que criam seus níveis hierárquicos é uma parte importante do processo do *AD*. O nível hierárquico mais alto contém a principal função do projeto sendo desenvolvido. Neste trabalho, o primeiro nível hierárquico possui o FR1: adaptar o fluxo de potência (uma função extraída de fontes secundárias da pesquisa bibliográfica).

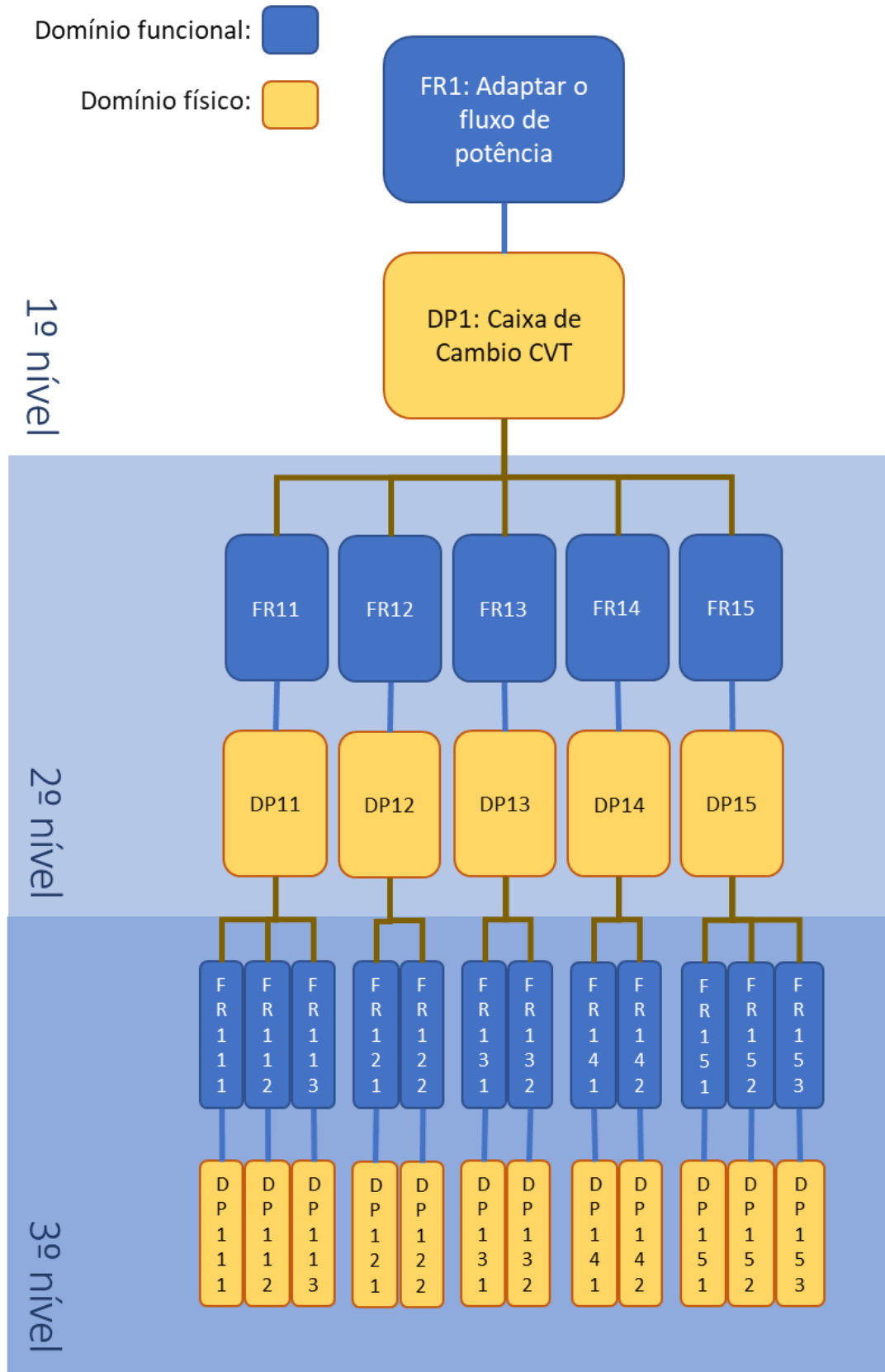
O FR1 não pode ser decomposto em outros FRs até o DP que satisfaça o requisito funcional FR1 ser determinado. Dessa forma, o DP1 precisa ser escolhido para que o projeto possa avançar para o segundo nível hierárquico.

Nesse contexto, o DP do primeiro nível hierárquico recebe seu conjunto de FRs, que também são satisfeitos por DPs.

A figura 17 mostra o processo de desdobramento de FRs e DPs apresentado de uma forma diferente da tradicionalmente apresentada, enfatizando a ordem do processo de desdobramento dos FRs e DPs.



Figura 17 - Estrutura de desdobramento dos FRs e DPs



Depois de determinados todos os elementos do projeto, um vetor (cujos elementos são todos os FRs) e outro vetor (cujos elementos são todos os DPs) são descritos e relacionados por meio de uma matriz  $|A|$ , chamada de matriz de projeto, segundo a equação 1.

Este trabalho analisa e compara a matriz  $|A_r|$  da caixa de câmbio de referência com a matriz  $|A_d|$  do câmbio desenvolvido, observando se o projeto atende a determinação axiomática de independência funcional, colocada pelo primeiro axioma.

Assim, a relação entre  $FR_i$  e  $DP_j$  é dada pelo elemento  $A_{ij}$  da matriz  $|A|$ , a fim de descrever a relação entre  $FR_i$  e  $DP_j$ ; escrevendo a equação 1 de forma diferencial, chegamos à equação 17:

$$\{dFR\} = |A|\{dDP\} \quad (17)$$

O elemento  $A_{ij}$  é igual à razão entre as derivadas parciais nos elementos de cada vetor, como visto na equação 18.

$$A_{ij} = \frac{\partial FR_i}{\partial DP_j} \quad (18)$$

Com essa análise, é possível determinar a qualidade do projeto em desenvolvimento, pois um projeto que atende o axioma 1 é significativamente mais robusto, confiável, funcional e viável (Suh, 2001).

## 4. Desenvolvimento da Pesquisa

Tanto os compradores quanto as montadoras detentoras das marcas de veículos automotores que possuem caixas de câmbio têm expectativas com relação a este produto, que foram traduzidas de forma estruturada em relação aos elementos de entrada do modelo matricial do projeto de acordo com os Princípios do AD.

Essas expectativas foram isoladas de dados secundários colhidos por meio da pesquisa bibliográfica e utilizadas na definição dos atributos do cliente (CAs), restrições de entrada (iCs), critérios de seleção (SCs), critérios de otimização (OCs) e requisitos não funcionais (nFRs), que formam o escopo do projeto e foram utilizados no desenvolvimento dos modelos utilizados neste estudo.

Foram desenvolvidas duas matrizes de projeto, uma de um câmbio de referência e um do câmbio com qualidade melhorada, foco dessa pesquisa. Como mencionado anteriormente, tendo em vista que ambos os produtos são de mesma natureza, com mesmos clientes e mesma aplicação, o conjunto de CAs, iCs, SCs, OCs e nFRs são idênticos e apresentados a seguir.

### 4.1. Definição dos atributos do cliente (CAs)

CAs são os requisitos do cliente com relação a este projeto e traduzem as principais expectativas com relação ao funcionamento fundamental do produto, normalmente descritos com um verbo. Abaixo, há o elenco dos CAs deste projeto:

**CA1: Mediar ofertas e demandas de potência:** como consequência das características dos motores comumente utilizados, o câmbio deve assumir a responsabilidade de mediar a oferta e a demanda de potência do veículo; dessa forma, deve converter o torque e a velocidade de rotação da saída do motor de acordo com as exigências da estrada e variar a velocidade de rotação das rodas segundo a necessidade do condutor (Ngo, Hofman, Steinbuch & Serrarens, 2014; Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010; Rinkevich & Samson, 2004);

**CA2: Permitir movimento reverso:** geralmente, veículos automotores são grandes em dimensões e pesados. Para que seja possível guardar o veículo, este precisa ser capaz de se movimentar, tanto no sentido de tráfico normal, quanto no

sentido oposto (NGO, Hofman, Steinbuch & Serrarens, 2014; Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010; Rinkevich & Samson, 2004);

**CA3: Transmitir a potência de forma ininterrupta:** o fluxo de potência deve ser uniforme e ininterrupto, seja do motor para as rodas, seja das rodas para o motor, de modo que o operador tenha total controle sobre o comportamento do veículo nestes aspectos (Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010; Rinkevich & Samson, 2004);

**CA4: Controlar a equalização de potência:** mais um papel da caixa de câmbio é o de equalizar a potência disponibilizada pelo motor com a demanda de potência, consequência da média das condições de direção. Em CVTs, essa equalização é feita de forma automática pelo sistema do câmbio, com exceção do neutro e do reverso, ainda controlados pelo operador (Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010; Rinkevich & Samson, 2004).

#### **4.2. Definição das restrições de entrada (iCs)**

Os iCs delimitam o projeto aceitável, portanto, expressam limitações atribuídas às soluções, quais sejam:

**iC1: Limites de emissões:** o funcionamento de todo veículo deve manter níveis de emissões que são regulamentadas por normas de qualidade. De acordo com a Resolução nº 252, de 01 de fevereiro de 1999, veículos de passageiros de até nove lugares e de uso misto derivado do automóvel com motor dianteiro não devem ter nível de ruído superior a 95dB, e de motor traseiro de 103dB. A norma ISO 5128 regula níveis de níveis de ruído no interior do veículo, a velocidades constantes, sendo que a melhor pontuação é de menos de 64dB para veículos da categoria M1 (veículos de passageiro). Vazamentos de fluidos, por exemplo, não deverão existir (BRASIL, 1999; ISO 5128:1980);

**iC2: Limite de Dimensões de instalação e massa:** as dimensões e a massa da caixa de câmbio influenciam no custo de produção e na aplicação deste produto, seguindo as equações (3) e (4), de forma que dimensões muito grandes e massa muito elevada impedem que o produto equipe veículos compactos (Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010; Rinkevich & Samson, 2004).

### 4.3. Definição dos critérios de seleção (SCs)

Crítérios de seleção (SC) compõem um conjunto, em ordem de importância, utilizados para seleção da melhor DP para um certo FR, e são determinados de acordo com as necessidades do cliente. Estes critérios são:

**SC1: Custo mais competitivo:** o custo de cada câmbio varia significativamente e impacta diretamente o preço final do veículo. O custo pode ser previsto de diversas formas – e a solução com custo mais competitivo é a preferida, pois implica uma caixa de câmbio menor e mais leve (Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010; Rinkevich & Samson, 2004);

**SC2: Melhor eficiência energética:** toda energia consumida que não contribui para o propósito do veículo é considerada perda. Reduzir tais perdas significa aumentar a eficiência que auxilia a adequação a regulamentações internacionais de consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub>, por isso alternativas mais eficientes são preferidas (Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010; Rinkevich & Samson, 2004; Rexeis & Hausberger, 2009; Grubb, Vrolijk & Brack, 1997).

### 4.4. Definição dos critérios de otimização (OCs)

Crítérios de otimização (OC) são definidos na otimização do projeto, que ocorre depois da determinação de todos os elementos envolvidos no produto. Estes exprimem os principais critérios buscados na fase de otimização ou no processo de melhoria de qualidade do produto, que são, para este projeto:

**OC1: Maior eficiência:** o movimento do sistema de transmissão consome energia. Esta energia consumida não contribui para o propósito do veículo, por isso é considerado perda. A redução dessas perdas diz respeito a um aumento de eficiência, que auxilia na adequação a regulamentações internacionais de consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub> (Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010; Rinkevich & Samson, 2004; Rexeis & Hausberger, 2009; Grubb, Vrolijk & Brack, 1997);

**OC2: Maior desempenho técnico:** a caixa de câmbio é o elemento mediador entre o motor e a superfície da estrada. Portanto, é papel deste produto adaptar a tração disponível à potência demandada, assegurando o desempenho desejado. Por

isso, uma faixa de velocidade de rotação do motor é mapeada para uma certa velocidade de rotação das rodas, da mesma forma que uma determinada faixa de torque do motor é mapeada para uma faixa de tração dos pneus. O desempenho deste item está relacionado à capacidade desse mapeamento de forma correta, permitindo que o motor trabalhe em sua zona de eficiência máxima (Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010).

**OC3: Conforto vibracional superior:** o conceito de conforto em veículos é relacionado ao ruído vibracional, resultado do funcionamento e tráfego deste (Bae, Lee & Chu, 2002).

O aspecto do funcionamento do câmbio pode ser analisado, em relação a vibrações e emissões relacionadas ao seu funcionamento e à sua operação; à previsibilidade; e à progressividade das ações e da correta equalização da oferta e demanda de potência do veículo. (Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010).

#### **4.5. Definição dos requisitos não funcionais (nFRs)**

Os nFRs são itens que descrevem como o projeto deve ser, as qualidades e atributos que precisa possuir para satisfazer os clientes. O conjunto de nFRs descreve o caráter do produto e são necessários para que o projeto seja aceito e usado pelos clientes, sendo, para este projeto:

**nFR1: Ser tecnicamente competitivo:** o produto precisa ser tecnologicamente avançado, empregando soluções inovadoras que podem ser utilizadas com a finalidade de agregar valor intangível ao veículo (Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010; Rinkevich & Samson, 2004);

**nFR2: Ser confiável em sua operação:** o câmbio deve cumprir seu papel durante toda sua longevidade, sem apresentar falhas ou faltas, sistemas de detecção de falhas devem existir; nos casos em que a falha potencial tenha consequências desastrosas, o sistema de detecção deve ser redundante (Rinkevich & Samson, 2004; Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010; Rao & Tjandra, 1994; Ognjanović & Milutinović, 2013; Ognjanović, Ristić & Živković, 2014);

**nFR3: Ser fácil de reparar:** O produto deve ser projetado de forma a facilitar reparos, caso existam falhas ou faltas, algumas formas de traduzir esta necessidade é o fácil acesso às partes que tem potencial de falha e sofram desgaste. O reparo e troca dessas partes devem ser efetuados com ferramentas de fácil acesso e esses

procedimentos devem ser à prova de falhas, aplicando conceitos de *poka-yoke* (Rinkevich & Samson, 2004; Rao & Tjandra, 1994; Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010; Ognjanović & Milutinović, 2013; Ognjanović, Ristić & Živković, 2014);

**nFR4: Ser adaptável:** todo fabricante/montadora automotiva possui uma estratégia para seus produtos; uma dessas estratégias é o “DNA da marca”, o conjunto de características que definem o caráter do veículo, exprimindo a imagem, a visão da marca e nome que o veículo carrega. As características do *powertrain* que variam, com a finalidade de se adaptar ao “DNA da marca”, são percepção de performance, dirigibilidade, suavidade e capacidade de reboque. Estas características influenciam as relações internas de redução, assim como a curva de funcionamento do câmbio (tendência de redução curta ou longa, por exemplo) (Rinkevich & Samson, 2004);

**nFR5: Ser durável:** carros de passageiros necessitam de uma longevidade maior ou igual à do automóvel que compõem. Normalmente, o uso de todo veículo é misto, em vários tipos de terrenos e condições climáticas. A definição atribuída pelo padrão CARLOS (*Car Loading Standard*, traduzido como *padrão de carga sobre carro*) define a carga de uso que o veículo deve suportar, baseado em algumas grandezas: estilo de direção, massa do veículo, tipo de estrada e fatores acidentais. Seus resultados são extrapolados utilizando simulações de computador e retornam algumas necessidades técnicas da caixa de câmbio (Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010; Rinkevich & Samson, 2004).

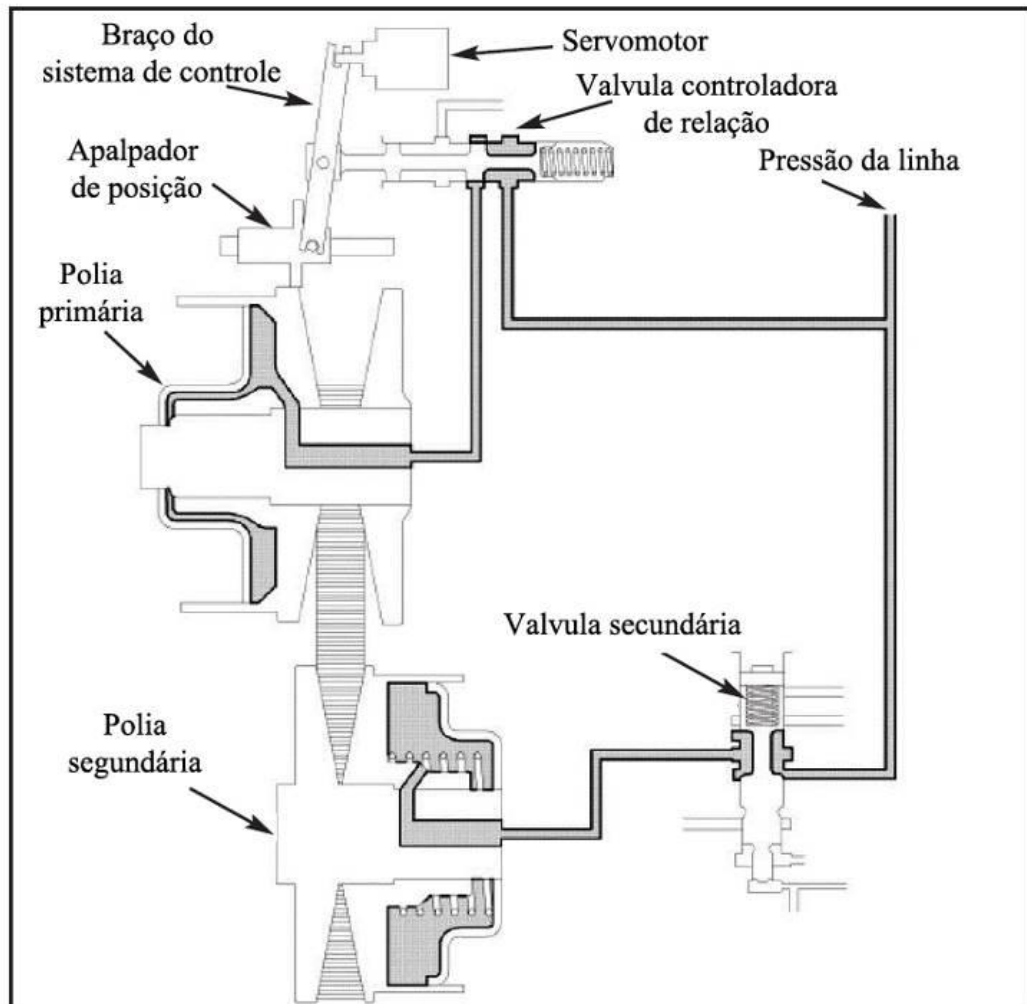
#### 4.6. Desenvolvimento da matriz de projeto da caixa de câmbio de referência

Para avaliar o verdadeiro impacto da aplicação dos Princípios do *AD* como ferramenta de melhoria da qualidade na fase de desenvolvimento do projeto conceitual de um produto, é necessário compará-lo como um produto da mesma natureza que atualmente é utilizado em veículos de categoria idêntica.

O diagrama apresentado na

Figura 18 contém os principais componentes responsáveis pelo funcionamento do câmbio de referência.

Figura 18 - Diagrama de funcionamento do CVT de referência



Fonte: Aamco Transmissions (2015).

#### 4.6.1. Modelo do câmbio de referência

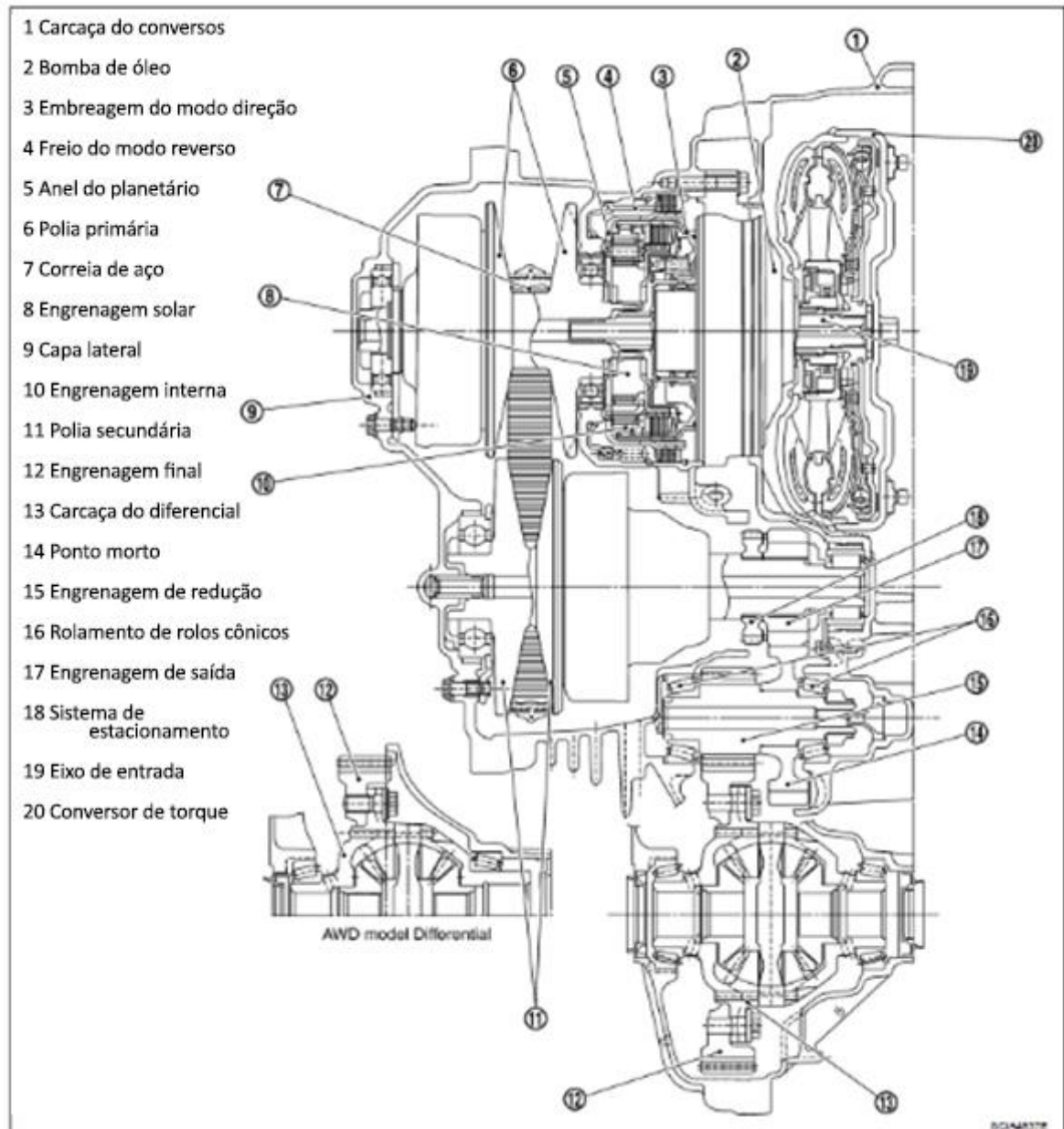
O funcionamento do produto tomado como referência do presente estudo foi analisado a partir dos Princípios do AD; os constructos de entrada que são CAs, iCs, OCs, SCs nFRs foram apresentados no item 4.5.

Os FRs foram determinados a partir dos constructos de entrada e de dados secundários colhidos na pesquisa bibliográfica e os DPs foram determinados a partir de dados secundários obtidos dos manuais de funcionamento e reparo do câmbio de referência. A



Figura 19 mostra uma vista em corte deste produto, com seus componentes.

Figura 19 - Vista de seção da CVT de referência



Fonte: adaptado de Nissan (2006).

#### 4.6.2. Desdobramento dos FRs e DPs do câmbio de referência

Como não é o objetivo deste trabalho o desenvolvimento deste câmbio, mas sim a melhoria da qualidade dos parâmetros de projeto apresentados por ele, os

FRs e DPs foram listados em caráter de referência e a relação funcional entre seus FRs não foi discutida.

Os FRn e DPn de maior nível hierárquico estão listados a seguir:

FR1: Adaptar o fluxo de potência;

DP1: Caixa de Câmbio CVT.

Seguindo o desdobramento dos FRn e DPn, no segundo nível hierárquico estão os FRnn e DPnn listados a seguir.

FR11: Selecionar tipo de deslocamento;

FR12: Equalizar fluxo de potência;

FR13: Permitir reverso;

FR14: Desacoplar eixo de entrada (Neutro);

FR15: Bloquear o movimento das rodas;

DP11: Seletor de tipo de deslocamento;

DP12: Sistema de relações de transmissão;

DP13: Relação de reverso;

DP14: Conjunto de freio atuando na engrenagem solar do conjunto de entrada;

DP15: Bloqueio mecânico do sistema de transmissão.

Posteriormente, no terceiro nível hierárquico estão os FRnnn e DPnnn listados a seguir.

FR111: Selecionar modo de direção;

FR112: Alterar modo de direção;

FR113: Transmitir o comando de alteração do modo de direção;

FR121: Oferecer maior torque;

FR122: Oferecer maior velocidade;

FR123: Variar relação de redução;

FR131: Inverter rotação;

FR132: Limitar velocidade reversa;

FR141: Engastar eixo de entrada;

FR142: Separar eixo de entrada;

FR151: Bloquear movimento do câmbio;

FR152: Libertar movimentação do câmbio;

FR153: Acionar bloqueio no modo de estacionamento;

FR154: Não bloquear acidentalmente;

- DP111: Alavanca de seleção de modo de direção;
- DP112: Sistema de acionamento eletro-hidráulico;
- DP113: Sistema de cabos e sensores;
- DP121: Polias de paredes cônicas com diâmetro variável;
- DP131: Relação planetária de redução de engrenagens cilíndricas de dentes retos;
- DP132: Fluxo de torque reverso montado separadamente;
- DP141: Conjunto de embreagem atuando no anel externo acionada hidráulicamente;
- DP142: Posição neutra acionada por válvula de desvio;
- DP151: Conjunto pino e rasgo para bloqueio da relação final;
- DP152: Mola de retração do pino de bloqueio;
- DP153: Acionamento por cabo;
- DP154: Trava do pino de bloqueio acionada no moro de direção.

A partir desses FRs e DPs, foram descritas as matrizes deste projeto, apresentadas no item seguinte.

#### 4.6.3. Matriz do projeto do câmbio de referência

As matrizes deste projeto foram analisadas de forma discreta. Assim, onde o elemento  $A_{ij}$  demonstra uma relação entre  $FR_i$  e  $DP_j$ , o valor do elemento  $A_{ij}$  é igual a 1; de modo contrário, o elemento tem valor nulo.

A matriz de projeto referente ao primeiro nível hierárquico está representada pela matriz 4. No primeiro nível hierárquico, o projeto não apresenta dependência funcional. É possível observar que a matriz é diagonal e que seu determinante depende somente da diagonal principal da matriz. Neste nível hierárquico, portanto, o projeto é *uncoupled*.

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \end{Bmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

A matriz de projeto referente ao segundo nível hierárquico está representada pela matriz 5. No segundo nível hierárquico, o projeto ainda não demonstra dependência funcional. Observa-se que a matriz ainda é diagonal e que seu determinante depende somente da diagonal principal da matriz; dessa forma, no segundo nível hierárquico, o projeto também é *uncoupled*.

$$\left\{ \begin{array}{l} FR11 \\ FR12 \\ FR13 \\ FR14 \\ FR15 \end{array} \right\} = \left| \begin{array}{ccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right| \left\{ \begin{array}{l} DP11 \\ DP12 \\ DP13 \\ DP14 \\ DP15 \end{array} \right\} \quad (5)$$

A matriz de projeto referente ao terceiro nível hierárquico, o último desenvolvido neste trabalho, está representada pela matriz 6. No terceiro nível hierárquico, o projeto apresenta problemas de dependência, se torna um projeto redundante.

$$\left\{ \begin{array}{l} FR111 \\ FR112 \\ FR113 \\ FR121 \\ FR122 \\ FR123 \\ FR131 \\ FR132 \\ FR141 \\ FR142 \\ FR151 \\ FR152 \\ FR153 \\ FR154 \end{array} \right\} = \left| \begin{array}{cccccccccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{array} \right| \left\{ \begin{array}{l} DP111 \\ DP112 \\ DP113 \\ DP121 \\ DP131 \\ DP132 \\ DP141 \\ DP142 \\ DP151 \\ DP152 \\ DP153 \\ DP154 \end{array} \right\} \quad (6)$$

Existe uma solução de projeto, um sistema que atende a necessidade funcional de três requisitos: o FR121, FR122 e FR123 são atendidos pelo DP 121. O fato do vetor funcional possuir mais elementos que o vetor físico implica a redundância do projeto, o que causa uma inevitável dependência, violando o primeiro axioma (não será, pois, um projeto ideal) (Gonçalves-Coelho, Nestian, Cavique & Mourão, 2012).

Esta região de redundância do projeto é onde a maior parte dos esforços de projeto devem estar concentrados para melhorar a qualidade do produto que este projeto conceberá.

#### 4.7. Desenvolvimento da caixa de câmbio melhorada

A definição dos requisitos funcionais (FRs) é uma das fases mais críticas no desenvolvimento do projeto segundo os Princípios do AD, visto que os FRs representam o objetivo e a intenção do projetista (Suh, 1990; Suh, 2001).

A partir dos FRs de maior nível hierárquico, são determinados os parâmetros de design DPs, soluções de projeto que traduzem fisicamente a função determinada pelos FRs. Os DPs correspondem ao mesmo nível hierárquico do seu respectivo FR. Este processo de desdobramento em ziguezague forma uma árvore de projeto dividida em níveis hierárquicos mostrados na figura 20.

Alguns elementos do conjunto de CAs referem-se a funções diretas da caixa de câmbio, que conseqüentemente atendem às necessidades do cliente.

#### **4.7.1. Primeiro nível hierárquico: FRn e DPn**

Dado início ao processo de desenvolvimento deste projeto e semelhante ao câmbio de referência, são determinados os FR e DP de maior nível hierárquico, por terem a função principal e mais abrangente de uma caixa de câmbio.

**FR1: Adaptar o fluxo de potência:** esta função atende à necessidade CA2 (mediar ofertas e demandas de potência) e CA3 (permitir movimento reverso), pois, ao adaptar o fluxo de potência, no sentido do motor às rodas e das rodas ao motor, a caixa de câmbio está combinando a demanda de potência sofrida pelo sistema com a oferta disponibilizada pelo motor, de forma que tanto o torque como a rotação estejam equiparadas. Isto inclui o movimento reverso do veículo, que levará à troca do sentido de rotação das rodas.

A solução de projeto que supre o FR1 (Adaptar o fluxo de potência) é DP1 (Caixa de Câmbio CVT).

**DP1: Caixa de Câmbio CVT:** a fim de cumprir sua função de adaptar o fluxo de potência, a caixa de câmbio CVT precisa cumprir diversas funções que derivam do seu papel principal. Para selecionar a direção com a qual se deseja que o veículo se movimente, a caixa de câmbio deve permitir que o condutor selecione entre deslocamento positivo (no mesmo sentido e direção do eixo x positivo), deslocamento negativo (na mesma direção, mas em sentido oposto ao eixo x positivo) ou deslocamento neutro – por isso é definido o FR11 (Selecionar tipo de deslocamento).

Quando for selecionado o deslocamento positivo, a caixa de câmbio desempenha o papel de mediar ofertas e demandas de potência além de atender ao CA5 (Controlar a equalização de potência), portanto FR12 (Equalizar fluxo de potência).

No sentido reverso, o veículo precisa viajar no sentido oposto ao deslocamento positivo. Dessa maneira, as rodas também devem girar no sentido reverso, sendo assim, FR13 (Permitir reverso).

Por causa do tipo de propulsor utilizado nestes veículos, é preciso que o sistema de transmissão seja completamente desacoplado do motor, por questões de usabilidade e de segurança, atendendo ao CA6 (Permitir permanência em repouso), portanto FR14 (Desacoplar eixo de entrada).

Existem também situações nas quais o veículo não pode se movimentar, mas existe tendência de movimento. É necessário, pois, que o câmbio possua uma forma de bloquear o movimento das rodas, para contribuir que o veículo permaneça sem se movimentar, também atendendo ao CA6 (Permitir permanência em repouso), levando a FR15 (Bloquear o movimento das rodas).

#### **4.7.2. Segundo nível hierárquico: FRnn e DPnn**

Com o desdobramento dos requisitos funcionais e parâmetros de projeto, o segundo nível hierárquico é determinado baseado nas necessidades funcionais do nível hierárquico superior, dessa forma, do DP1 nasceram os FRnns discutidos a seguir.

**FR11: Selecionar tipo de deslocamento:** esta função é cumprida por um sistema de seleção que acopla o sistema o qual o condutor deseja utilizar, para movimentar o veículo ou fazer com que permaneça em repouso, portanto DR11 (Seletor).

**FR12: Equalizar fluxo de potência:** o papel principal do câmbio é relacionado a esta função; dessa forma, é o elemento interno que possui maiores dimensões e massa. Com o objetivo de variar torque e velocidade de rotação das rodas com relação aos do motor, é necessário um sistema de relações que possibilite a variação da velocidade e do torque de saída do câmbio de forma interdependente da velocidade e do torque do eixo de entrada, portanto DP12 (Sistema de relações de transmissão).

**FR13: Permitir reverso:** o veículo não deve alcançar altas velocidades quando viajando no sentido negativo e deve possuir torque suficiente para transpor a inércia do repouso em acíves. Assim, a relação de reverso é separada do sistema de cruzeiro e é composta somente de uma relação de redução, limitando a

velocidade de reverso e garantindo torque necessário, invertendo o sentido de rotação das rodas, conduzindo a DP13 (Relação de reverso).

**FR14: Desacoplar eixo de entrada:** a função é necessária quando o veículo tiver de permanecer em repouso. Com o motor funcionando, a forma mais direta de atender a esta função é possuir um engaste mecânico deslizante, que permita ao motor ser conectado ao sistema interno do câmbio sem escorregamentos, mas que possa ser liberado dependendo da necessidade do operador. Dessa forma, DP14 (Engaste mecânico).

**FR15: Bloquear o movimento das rodas:** como esta função será aplicada quando o veículo estiver em repouso e o motor desligado, a maneira mais eficiente de atender a esta função é bloqueando completamente qualquer movimento do sistema de transmissão, portanto DP15 (Bloqueio mecânico do sistema de transmissão).

**DP11: Seletor:** possui a função de selecionar o sentido do movimento, neutro ou modo de bloqueio da caixa de câmbio, ou seja, os quatro modos de direção (dirigir, reverso, neutro e estacionado); assim, FR111 (Selecionar modo de direção).

O seletor também deve cumprir o papel de receber o comando do condutor, a fim de identificar qual modo de direção o condutor deseja utilizar, portanto FR112 (Receber o comando do condutor).

Além de receber o comando do condutor, este item também precisa transmitir o comando para o câmbio, para selecionar o modo de direção. Desse modo, FR113 (Transmitir o comando do condutor).

**DP12: Sistema de relações de transmissão:** este elemento transmite a potência do motor ao restante do sistema de transmissão, para atender as necessidades do cliente CA1 (Permitir o veículo sair do repouso). A relação de maior redução do câmbio deve ser suficiente para vencer a inércia de veículos com até 3,5t, de acordo com o escopo do projeto, e vencer aclives de até 30°, que é a inclinação máxima de vias públicas e acessos para veículos, considerando ainda que o motor foi dimensionado adequadamente (DNER, 1999; DNIT, 2010; Naunheimer, Bertche, Ryborz & Novak, 2010; Rinkevich & Samson, 2004). Portanto, FR121 (Otimizar maior torque).

Considerando o iC1 (Limites de emissões) e SC2 (Eficiência energética), a caixa de câmbio tem a função de alcançar velocidades de cruzeiro mantendo o

motor em regime de ótimo de eficiência, na região de consumo mínimo de combustível, exemplificado na Figura 15.

Velocidades de cruzeiro são as que o veículo trafega por longos períodos. As vias dedicadas para este tipo de deslocamento são classificadas em quatro classes; dentre estas, a velocidade máxima prevista por lei nas Rodovias Classe 0 (vias expressas com mais elevado padrão técnico, pista dupla e controle total de acesso) é de 120 km/h. Contudo, as classes de estradas mais comuns no Brasil são das classes I, II e III, com velocidade diretriz de 100km/h e 80km/h (DNER, 1999).

Nesse sentido, o veículo deve ser capaz de alcançar estas velocidades, dessa forma, FR122 (Otimizar maior velocidade).

Este item também é responsável pela transição entre a maior e a menor relação do câmbio. Nesta função, é preciso considerar também os SC1 (Custo competitivo), e SC2 (Eficiência energética), assim como OC1 (Maior eficiência) e OC2 (Maior desempenho técnico), portanto, FR123 (Variar relação de redução).

**DP13: Relação de reverso:** este parâmetro de projeto precisa atender às mesmas necessidades da relação de maior redução do câmbio, portanto, FR131 (Otimizar o torque reverso).

Porém, este conjunto deve inverter a rotação do eixo de saída, para isso ocorrer, FR132 (Inverter rotação).

**DP14: Engaste mecânico,** este elemento do projeto precisa engastar o sistema, de modo que não haja escorregamento ou risco de desengaste, portanto FR141 (Engastar mecanicamente). Além disso, também deve permitir o desengaste sem engaste acidental; para isso, FR142 (Separar mecanicamente).

**DP15: Bloqueio mecânico do sistema de transmissão,** o bloqueio mecânico do sistema de transmissão tem a função de não permitir qualquer movimento do sistema, mesmo com o motor desligado, conduzindo a FR151 (Bloquear qualquer movimento mecanicamente).

Porém, deve permitir o movimento quando desbloqueado, de forma que não seja acidentalmente bloqueado, assim, FR152 (Libertar movimentação do câmbio); por causa da necessidade de segurança do sistema, FR153 (Não bloquear acidentalmente).

#### **4.7.3. Terceiro nível hierárquico: FRnnn e DPnnn**

Avançando ainda mais no desdobramento dos requisitos funcionais e parâmetros de projeto, o terceiro nível hierárquico, e o último discutido neste



trabalho, é determinado com base nas necessidades funcionais do nível hierárquico superior, dessa forma, dos DPnn do segundo nível hierárquico, nasceram os FRnns correspondentes do terceiro nível hierárquico, discutidos a seguir.

**FR111: Selecionar modo de direção:** esta função é cumprida por uma alavanca de acionamento que possui as posições *dirigir*, *neutro*, *estacionado* e *reverso*. Portanto, DP111 (Alavanca de seleção).

**FR112: Alterar modo de direção:** a fim de alterar o modo de direção para o desejado, um pivô é girado, que movimenta uma coroa de engaste mecânico, a qual seleciona o modo de direção; assim, DP112 (Balanço da coroa de engaste).

**FR113: Transmitir o comando de alteração do modo de direção:** para que o comando da alavanca chegue no balanço da coroa, um cabo de acionamento bidirecional liga os dois elementos. Para isso, DP113 (Cabo de acionamento bidirecional).

**FR121: Otimizar maior torque:** para que seja cumprida tal função, são necessários elementos de transmissão de potência. As que melhor atendem ao SC2 (Eficiência energética) são engrenagens cilíndricas; as que observam de melhor forma o iC1 (Limite de emissões) e OC3 (Conforto vibracional superior), quando se trata de vibração, são as engrenagens helicoidais.

Dessa forma, DP121 (Relação de maior redução de engrenagens cilíndricas helicoidais). Este tipo de engrenagem é dimensionado com a utilização das equações (9) e (14).

**FR122: Otimizar maior velocidade:** para este item, são considerados os mesmos aspectos do FR121. Temos, então, DP122 (Relação de menor redução de engrenagens cilíndricas helicoidais).

**FR123: Variar relação de redução:** a variação entre a relação de redução deve ser analisada considerando CA4 (Transmitir a potência de forma ininterrupta); iC1 (Limites de emissões) e iC2 (Limite de Dimensões de instalação e massa); e os critérios de otimização OC1 (Maior eficiência), OC2 (Maior desempenho técnico) e OC3 (Conforto vibracional superior).

Portanto, para variar a relação de redução serão utilizadas engrenagens cilíndricas helicoidais, dispostas em um sistema diferencial planetário de engrenagens, o que leva a DR123 (sistema diferencial planetário de engrenagens). Esse elemento é dimensionado por meio da equação (16).

**FR131: Inverter rotação:** para inverter a rotação, é adicionada uma engrenagem ao conjunto de redução, portanto, DP131 (Engrenagem de inversão).

**FR132: Limitar velocidade reversa:** com a finalidade de cumprir esta função, são necessários elementos de transmissão de potência. As que melhor atendem ao SC2 (Eficiência energética) são engrenagens cilíndricas. Como o reverso é usado esporadicamente, o ruído gerado pelo funcionamento das engrenagens não é relevante, por isso são utilizadas engrenagens cilíndricas de dentes retos. Dessa forma, DP132 (Relação de redução fixa de engrenagens cilíndricas de dentes retos). Este elemento é dimensionado utilizando as equações (8) e (9).

**FR141: Engastar eixo de entrada:** para engastar mecanicamente o sistema, tanto no modo de direção, quanto no modo reverso, é preciso uma coroa de engate com dentes oblíquos de inclinação entre um e três graus. Portanto, DP141 (Coroa de engate).

**FR142: Separar eixo de entrada:** para separar mecanicamente o sistema de transmissão do motor, a coroa do engate deve apresentar uma posição afastada de ambos os engates, de forma que não se movimente. Para isso, DP142 (Posição neutra com sulco radial e esferas carregadas com mola).

**FR151: Bloquear movimento do câmbio:** para bloquear o movimento das rodas, é necessário bloquear o movimento do eixo de saída do câmbio, o que leva a DP151 (Pino deslizante de bloqueio).

**FR152: Libertar movimentação do câmbio:** a fim de liberar a movimentação do câmbio, o pino de bloqueio deve ser afastado do sistema. Dessa maneira, tem-se DP152 (Mola de retração do pino de bloqueio).

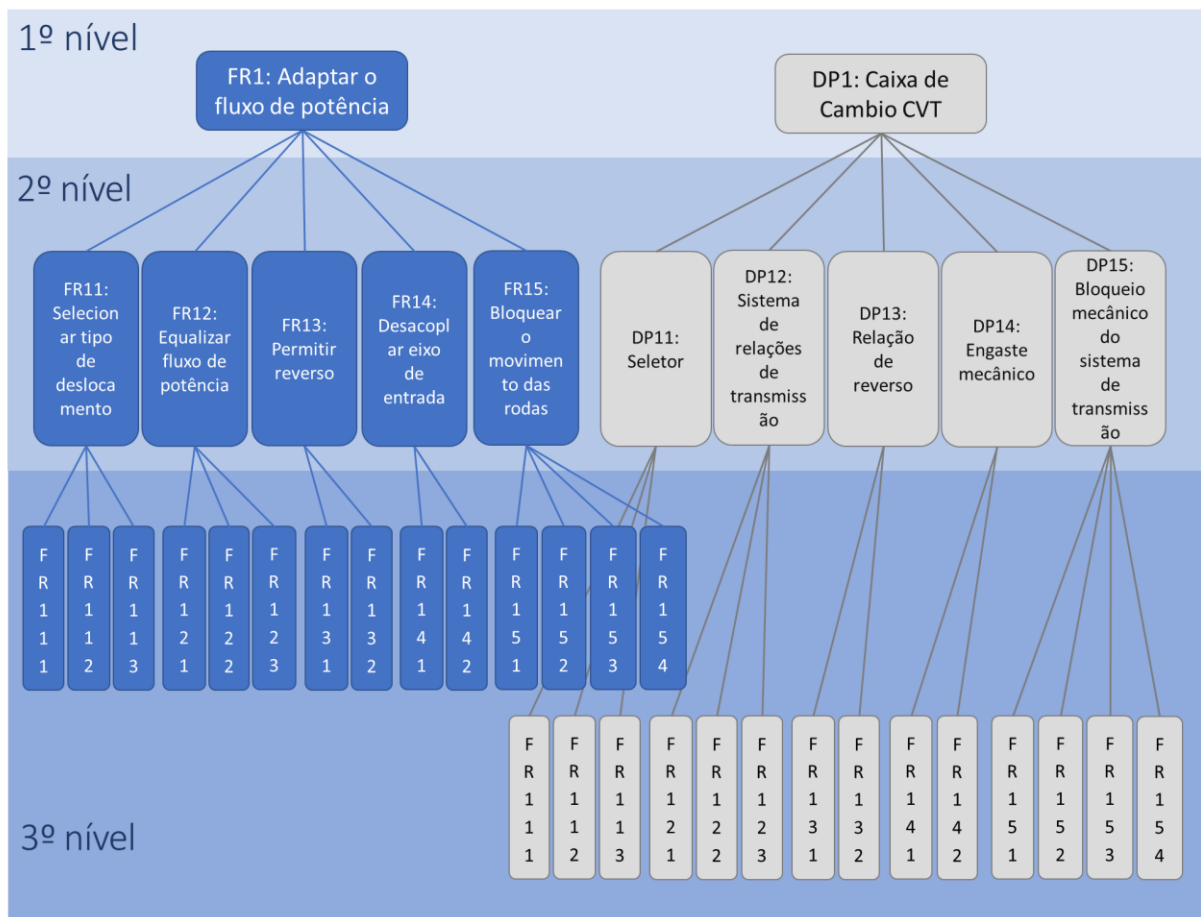
**FR153: Acionar bloqueio no modo estacionamento:** o sistema de bloqueio de movimento do câmbio tem a função de evitar o movimento indesejado do veículo quando estacionado. Assim, deve ser acionado quando a alavanca de seleção for colocada no modo estacionamento por vias mecânicas, as quais não possam ser afetadas por falta na alimentação elétrica. Portanto, DP153 (Acionamento por cabo).

**FR154: Não bloquear acidentalmente:** caso o pino de bloqueio seja acionado com o veículo em movimento, o sistema entraria em colapso com consequências desastrosas, sendo de extrema necessidade uma salvaguarda. Assim, DP154 (Trava do pino de bloqueio acionada no modo de direção).

#### 4.7.4. Árvore de projeto: estrutura hierárquica do projeto

O desdobramento dos FRs em DPs segue uma ordem lógica em ziguezague, dentro de uma estrutura em formato de árvore e separadas em níveis hierárquicos, mostrada na Figura 20, onde se pode ver de forma ordenada o desdobramento descrito nesta seção.

Figura 20 - Arvore de projeto



#### 4.7.5. Matrizes de projeto da caixa de câmbio melhorada

Utilizando como referência a árvore hierárquica de FRs e DPs, o projeto pode ser descrito com o uso de matrizes que permitem a análise da dependência entre os DPs e FRs de acordo com o primeiro axioma, o da independência.

A matriz de projeto do mais alto nível hierárquico é apresentada na matriz 7. No primeiro nível hierárquico, o projeto não apresenta dependência funcional. A matriz é diagonal; seu determinante depende somente da diagonal principal da matriz – portanto, neste nível hierárquico, o projeto é *uncoupled*.

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \end{Bmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

A matriz de projeto referente ao segundo nível hierárquico está representada pela matriz 8. No segundo nível hierárquico, o projeto também não demonstra dependência funcional. Novamente, a matriz ainda é diagonal, seu determinante depende somente da diagonal principal da matriz; logo, no segundo nível hierárquico o projeto ainda é *uncoupled*.

$$\begin{Bmatrix} FR11 \\ FR12 \\ FR13 \\ FR14 \\ FR15 \end{Bmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{Bmatrix} DP11 \\ DP12 \\ DP13 \\ DP14 \\ DP15 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

A matriz de projeto referente ao terceiro nível hierárquico, o último desenvolvido neste trabalho, está representada pela matriz 9. No terceiro nível hierárquico, o projeto apresenta algumas regiões de dependência.

$$\begin{Bmatrix} FR111 \\ FR112 \\ FR113 \\ FR121 \\ FR122 \\ FR123 \\ FR131 \\ FR132 \\ FR141 \\ FR142 \\ FR151 \\ FR152 \\ FR153 \\ FR154 \end{Bmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} \begin{Bmatrix} DP111 \\ DP112 \\ DP113 \\ DP121 \\ DP122 \\ DP123 \\ DP131 \\ DP132 \\ DP141 \\ DP142 \\ DP151 \\ DP152 \\ DP153 \\ DP154 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

A matriz da região da árvore de projeto com os requisitos funcionais que representam o papel de variação do fluxo de potência possui relações de dependência fora da diagonal principal. Porém, mesmo com tais dependências, a matriz de projeto ainda é triangular, fazendo com que o projeto seja caracterizado como uma matriz *decoupled*.

## 5. Análise dos Resultados

O critério de comparação utilizado neste trabalho, para indicar a melhoria de qualidade do projeto, é com relação ao primeiro axioma, que consiste na comparação das matrizes de projeto de ambos os casos.

### 5.1. Matrizes de projeto do CVT de referência e CVT desenvolvido

Comparando ambos os câmbios, é possível observar significantes diferenças na área estudada na matriz resultante do desenvolvimento dos projetos. A matriz 10 é a correspondente ao câmbio de referência. Ela demonstra redundância no projeto, o que causa dependência entre os requisitos funcionais, fazendo com que viole a independência funcional determinada pelo primeiro axioma.

$$\begin{matrix} \left. \begin{matrix} FR111 \\ FR112 \\ FR113 \\ FR121 \\ FR122 \\ FR123 \\ FR131 \\ FR132 \\ FR141 \\ FR142 \\ FR151 \\ FR152 \\ FR153 \\ FR154 \end{matrix} \right\} & = & \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} & \left. \begin{matrix} DP111 \\ DP112 \\ DP113 \\ DP121 \\ DP131 \\ DP132 \\ DP141 \\ DP142 \\ DP151 \\ DP152 \\ DP153 \\ DP154 \end{matrix} \right\} \end{matrix} \quad (10)$$

Já a matriz 11, referente ao câmbio desenvolvido neste trabalho, demonstra dependência entre alguns elementos abaixo da diagonal principal da matriz. Por isso, o projeto é caracterizado como *decoupled*, atendendo ao primeiro axioma.

$$\begin{array}{c}
 \left. \begin{array}{l}
 FR111 \\
 FR112 \\
 FR113 \\
 FR121 \\
 FR122 \\
 FR123 \\
 FR131 \\
 FR132 \\
 FR141 \\
 FR142 \\
 FR151 \\
 FR152 \\
 FR153 \\
 FR154
 \end{array} \right\} = \begin{array}{cccccccccccccccc}
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{array} \begin{array}{c}
 \left. \begin{array}{l}
 DP111 \\
 DP112 \\
 DP113 \\
 DP121 \\
 DP122 \\
 DP123 \\
 DP131 \\
 DP132 \\
 DP141 \\
 DP142 \\
 DP151 \\
 DP152 \\
 DP153 \\
 DP154
 \end{array} \right\}
 \end{array} \quad (11)
 \end{array}$$

As análises das matrizes de projeto de ambos os câmbios mostram que houve melhoria na qualidade dos projetos, por meio da alteração de alguns de seus parâmetros.

## 6. Conclusões

Este estudo, que envolveu a proposição de uma estrutura de trabalho para melhoria da qualidade, englobando uma pesquisa bibliográfica e um estudo de caso, contribuíram à ampliação e ao aprofundamento teórico-prático a respeito do tema, com a possibilidade de uma pequena contribuição acadêmica acerca de tal assunto.

A atividade de desenvolvimento de projetos, com a criação de produtos e serviços, envolve a tomada de decisão em um cenário repleto de incertezas, dotado de informações qualitativas de difícil comparação. Por esse motivo, o método científico é muito aplicado nessas atividades, a busca de conhecimento e a capacidade de solução de problemas que foi desenvolvido neste estudo foram, certamente, de grande valia.

Além disso, é bastante difícil identificar os elementos que demandam concentração de esforços e que terão significativo impacto na melhoria de qualidade do projeto. A utilização dos Princípios do *Axiomatic Design* neste trabalho, ferramenta até então inédita para o autor, possibilitou que esses fatores fossem determinados e tratados.

Ao desenvolver o modelo do produto estudado, criando as matrizes de projeto, pôde-se identificar problemas que violaram o axioma 1. Dessa forma, melhorar a qualidade do produto, de acordo com os Princípios do *AD*, implica um projeto que atende aos axiomas da independência e da informação, significativamente mais robusto, confiável, funcional e viável (Suh, 2001).

Portanto, tratar a relação de dependência funcional do projeto sendo desenvolvido implica melhoria de robustez, confiabilidade, funcionalidade e viabilidade do projeto. O primeiro axioma também determina que um projeto tem maior chance de sucesso quando seus FRs são independentes (Suh, 1990).

## 7. Considerações finais

A estrutura de trabalho desta pesquisa possibilitou a identificação de uma região com problemas de dependência funcional e permitiu a concentração de esforços de melhoria de qualidade nessa região. Ao tratar uma pequena região do projeto, com grande grau de dependência entre seus requisitos funcionais, por conta de uma redundância de projeto, foi possível melhorar a qualidade deste produto, na fase de projeto, utilizando menos recursos e tempo, uma vez que os itens que sofreram modificação foram menores em número.

O desenvolvimento foi feito de forma teórica, a fim de simular um ambiente de projeto de produto. Se a melhoria da qualidade do produto for conduzida nesta fase, existe uma grande economia de recursos uma vez que investimentos de maquinário, matéria prima e outros ainda não foram feitos. Um produto que melhor atende as necessidades do cliente também contribui na satisfação do cliente, aumentando consideravelmente valores intangíveis como a imagem da marca.

O trabalho apresentou limitações, principalmente relativas à falta de acesso aos produtos e à infraestrutura necessária para fabricação e testes do projeto melhorado. Tal fato conduziu os resultados do estudo à avaliação teórica, segundo as ferramentas utilizadas. Outra limitação foi o uso de dados secundários para o desenvolvimento do estudo de caso, o que reduziu a extensão do desenvolvimento dos modelos de projeto, devido à ausência de detalhes disponíveis publicamente sobre o produto estudado.

Mais um fator a ser ressaltado sobre este estudo é o de que o desenvolvimento de um projeto de produto é, na maioria dos casos, de aspecto qualitativo e bastante dependente da equipe de projeto, de forma que o mesmo produto – se desenvolvido por duas equipes diferentes – pode não alcançar o mesmo resultado. Assim, compreende-se a dependência da experiência da equipe, da qualidade das pesquisas e das informações coletadas e das decisões tomadas durante o desenvolvimento.

Uma proposta de extensão desse estudo é a possibilidade do uso desta estrutura de trabalho em um ambiente de desenvolvimento de projeto real, na forma de uma pesquisa-ação, na qual o protagonista da pesquisa possa aplicar e desenvolver um produto, utilizando métricas para validar os benefícios observados



nesse trabalho e identificar novos benefícios impossíveis de serem concluídos com a presente pesquisa.

Uma recomendação para trabalhos futuros é o uso do *Fuzzy Axiomatic Design* dentro dessa mesma estrutura de trabalho, além de técnicas de *Design Thinking* para a proposição de DPs.

## Referências Bibliográficas

- AAMCO Transmissions. (2015). *JF010/11E CVT*.
- BAE, S., LEE, J. M. & CHU, C. N. (2002). Axiomatic design of automotive suspension systems. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 51(1), pp. 115-118.
- BRANDOLESE, A. (1994). The problems of total quality. *Production planning & Control*, 5(4), pp. 330-336.
- CARNEVALLI, J., MIGUEL, P. & CALARGE, F. (2010). Axiomatic design application for minimising the difficulties of QFD usage. *Int. J. Production Economics*, 125(1), pp. 1-12.
- CELIK, M., CEBI, S., KAHRAMAN, C. & ER, D. (2009). Application of axiomatic design and TOPSIS methodologies under fuzzy environment for proposing competitive strategies on Turkish container ports in maritime transportation network. *Expert Systems with Applications*, 36(3), pp. 4541-4557.
- CHEN, K.-Z. (1998). Integration of design method software for concurrent engineering using axiomatic design. *Integrated manufacturing systems*, 9(4), pp. 242-252.
- CHEN, K.-Z. (2001). Development of integrated design for disassembly and recycling in concurrent engineering. *Integrated manufacturing systems*, 12(1), pp. 67-79.
- CHEN, X., Li, Z., FAN, Z.-P., ZHOU, X. & ZHANG, X. (2016). Matching demanders and suppliers in knowledge service: A method based on fuzzy axiomatic design. *Information Sciences*, 346, pp. 130-145.
- COLLEDANI, M. & TOLIO, T. (2006). Impact of quality control on production system performance. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 55(1), pp. 453-456.
- CONAMA. Brasil. (Fevereiro de 1999). Resolução nº 252. *Determina limites máximos de ruídos de poluentes e ruídos emitidos por veículos automotores*.
- DAETZ, D., 1987, The effect of product design on product quality and product cost. *Quality Progress*, 20, 63–67.
- DNER. (1999). *Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais*. Rio de Janeiro.
- DNIT. (2010). *Manual de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas*. Rio de Janeiro.
- DU, Y., CAO, H., CHEN, X. & BENTAO, W. (2013). Reuse-oriented redesign method of used products based on axiomatic design theory and QFD. *Journal of Cleaner Production*, 39, pp. 79-86.

- FARID, A. M. (2014). Measures of reconfigurability and its key characteristics in intelligent manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, pp. 1-17.
- FARID, A. M. & MCFARLANE, D. C. (2008). Production degrees of freedom as manufacturing system reconfiguration potential measures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222(10), pp. 1301-1314.
- FARID, A. M. & SUH, N. P. (2016). *Axiomatic Design in Large Systems: Complex Products, Buildings and Manufacturing Systems*. Springer.
- GILLESPIE, T. D. (1992). *Fundamentals of vehicle dynamics*. SAE Technical Paper.
- GONÇALVES-COELHO, A. M., MOURÃO, A. J. & PEREIRA, Z. L. (2005). Improving the use of QFD with Axiomatic Design. *Concurrent Engineering*, 13(3), pp. 233-239.
- GONÇALVES-COELHO, A. M., NESTIAN, G., CAVIQUE, M. & MOURÃO, A. (2012). Tackling with redundant design solutions through axiomatic design. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(10), pp. 1837-1843.
- GRUBB, M., VROLIJK, C. & BRACK, D. (1997). *The Kyoto Protocol: a guide and assessment*. London: Royal Institute of International Affairs Energy and Environmental Programme.
- HUANG, G. Q. & JIANG, Z. (2002). Web-based design review of fuel pumps using fuzzy set theory. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 15(6), pp. 529-539.
- IATF 16949:2016. (s.d.). *Automotive Quality Management System*.
- ISO 5128:1980 *Acoustics -- Measurement of noise inside motor vehicles*.
- ISO 9000:2015. (s.d.). *Gestão da Qualidade*.
- ISO 9001:2015. (s.d.). *Gestão da Qualidade*.
- J.D.POWER. (2016). *Automotive Performance Execution and Layout Study*. Disponível em: <<http://www.jdpower.com/cars>>. Acesso em: 14 jul. 2016.
- JURAN, J. M. (1992). *Juran on quality by design: the new steps for planning quality into goods and services*. Simon and Schuster.
- KANDJANI, H., TAVANA, M., BERNUS, P., WEN, L. & MOHTARAMI, A. (2015). Using extended Axiomatic Design theory to reduce complexities in Global Software Development projects. *Computers in Industry*, 67, pp. 86-96.

- KANNAN, D., GOVINDAN, K. & RAJENDRAN, S. (2015). Fuzzy Axiomatic Design approach based green supplier selection: a case study from Singapore. *Journal of Cleaner Production*, 96, pp. 194-208.
- KHANDEKAR, A. V. & CHAKRABORTY, S. (2016). Application of fuzzy axiomatic design principles for selection of non-traditional machining processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1-4), pp. 539-543.
- KIM, S.-J., SUH, N. P. & KIM, S.-G. (1991). Design of software systems based on axiomatic design. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 8(4), pp. 243-255.
- KULAK, O. & KAHRAMAN, C. (2005). Multi-attribute comparison of advanced manufacturing systems using fuzzy vs. crisp axiomatic design approach. *International Journal of Production Economics*, 95(3), pp. 45-424.
- KULAK, O., CEBI, S. & KAHRAMAN, C. (2010). Applications of axiomatic design principles: A literature review. *Expert Systems with Applications*, 37(9), pp. 6705-6717.
- KULAK, O., DURMUŞOĞLU, M. B. & KAHRAMAN, C. (2005). Fuzzy multi-attribute equipment selection based on information axiom. *Journal of materials processing technology*, 169(3), pp. 227-245.
- LINKE, B. S. & DORNFELD, D. A. (2012). Application of axiomatic design principles to identify more sustainable strategies for grinding. *Journal of Manufacturing Systems*, 31(4), 412-419.
- MALDONADO, A., GARCIA, J. L., ALVARADO, A. & BALDERRAMA, C. O. (2012). A hierarchical fuzzy axiomatic design methodology for ergonomic. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66, pp. 171-186.
- MALDONADO, A., GARCIA, J. L., REYES, R. M. & HERNANDEZ, J. (2015). Application of a fuzzy axiomatic design methodology for ergonomic. *Procedia Manufacturing*(3), pp. 5770-5776.
- MARCONI, M. D. & LAKATOS, E. M. (2006). *Técnicas de Pesquisa*. São Paulo: Atlas S.A.
- MARTINS, R. A. (2012). Abordagens Quantitativa e Qualitativa. In: MIGUEL, P. A. *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações* (2ª ed.). São Paulo: Elsevier.
- MORADINAFTCHALI, V., WANG, X. & SONG, L. (2016). Enhancement in quality and productivity: a riskless approach based on optimum selection of tolerance and improvement strategies. *International Journal of Production Research*, 54(15), 4418-4429.

- NAKANO, D. N. (2012). Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. In: MIGUEL, P. A. *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações* (2ª ed.). São Paulo: Elsevier.
- NAUNHEIMER, H., BERTCHE, B., RYBORZ, J. & NOVAK, W. (2010). Automotive transmissions: fundamentals, selection, design and application (2ª ed.). In: *Science & Business Media*. Springer.
- NG, N. K. & JIAO, J. (2004). A domain-based reference model for the conceptualization of factory loading allocation problems in multi-site manufacturing supply chains. *Technovation*, 24(8), pp. 631-642.
- NGO, V. D., HOFMAN, T., STEINBUCH, M. & SERRARENS, A. (2014). Gear shift map design methodology for automotive transmissions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 228(1), pp. 50-72.
- NISSAN. (2006). *2006 Murano CVT Section Manual*.
- OGNJANOVIĆ, M. & MILUTINOVIĆ, M. S. (2013). Design for reliability based methodology for automotive gearbox load capacity identification. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 59(5), pp. 311-322.
- OGNJANOVIĆ, M., RISTIĆ, M. & ŽIVKOVIĆ, P. (2014). Reliability for design of planetary gear drive units. *Meccanica*, 49(4), pp. 829-841.
- PUIK, E., Telgen, D., Moergestel, L. V. & Ceglarek, D. (2017). Assessment of reconfiguration schemes for Reconfigurable. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 43, pp. 30-38.
- RAO, S. S. & TJANDRA, M. (1994). Reliability-based design of automotive transmission systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 46(2), pp. 159-169.
- REXEIS, M. & HAUSBERGER, S. (2009). Trend of vehicle emission levels until 2020—Prognosis based on current vehicle measurements and future emission legislation. *Atmospheric Environment*, 43(31), pp. 4689-4698.
- RINKEVICH, D. J. & SAMSON, F. P. (2004). An improved powertrain attributes development process with the use of design structure matrix. *Tese de Doutorado*. Massachusetts Institute of Technology.
- SCHMITT, R. & LINDER, A. (2013). Technical complaint management as a lever for product and process improvement. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 62(1), pp. 435-438.
- SHELDON, D. F., PERKS, R., JACKSON, M., MILES, B. L. and HOLLAND, J., 1990, Designing for whole life costs at the concept stage. *Journal of Engineering Design*, 1, 131–145.

- SLACK, N., CHAMBERS, S. & JOHNSTON, R. (2009). *Administração da produção*. São Paulo: Atlas.
- SOZO, V., FORCELLINI, F. & OGLIARI, A. (2001). Axiomatic approach application during the product conceptual design phase, pp. 267-272.
- SUH, N. P. (1990). *The Principles of Design*. New York: Oxford University.
- SUH, N. P. (1998). Axiomatic design theory for systems. *Research in Engineering*, 10(4), pp. 189-209.
- SUH, N. P. (2001). *Axiomatic Design*. New York: Oxford University.
- TANG, D., ZHANG, G. & DAI, S. (2009). Design as integration of axiomatic design and design structure matrix. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(3), pp. 610-619.
- THOMPSON, M. K. (2013). A Classification Of Procedural Errors In The Definition Of Functional Requirements In Axiomatic Design Theory. *Proceedings of ICAD2013*. The Seventh Conference on Axiomatic Design. Worcester, jun. 2013.
- VINODH, S., KAMALA, V. & JAYAKRISHNA, K. (2015). Application of fuzzy axiomatic design methodology for selection of design alternatives. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 13(1), pp. 2-22.
- WENG, F.-T. & JENQ, S.-M. (2012). Application integrating axiomatic design and agile manufacturing unit in product evaluation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63(1), pp. 181-189.
- ZADEH, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Control*, 8, pp. 338-353.
- ZOHDY, Z. (2013). *CVT, continous variable transmission*. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/ZOTTY/cvt-22405389>>. Acesso em: 18 jul. 2016.