

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**IZABELLA MORRÉ RODRIGUES
OCTAVIO DIEGOLI NETTO**

**IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES DE MELHORIA AMBIENTAL
EM UM PRODUTO DO SETOR AUTOMOBILÍSTICO POR MEIO DA
APLICAÇÃO DE UM QFD PARA ECODESIGN**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2018

IZABELLA MORRÉ RODRIGUES
OCTAVIO DIEGOLI NETTO

**IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES DE MELHORIA AMBIENTAL
EM UM PRODUTO DO SETOR AUTOMOBILÍSTICO POR MEIO DA
APLICAÇÃO DE UM QFD PARA ECODESIGN**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, do Departamento de Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Neves Puglieri

PONTA GROSSA

2018

	<p>Ministério da Educação UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ CÂMPUS PONTA GROSSA Departamento Acadêmico de Engenharia de Produção</p>	
---	---	---

TERMO DE APROVAÇÃO DE TCC

IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES DE MELHORIA AMBIENTAL EM UM
PRODUTO DO SETOR AUTOMOBILÍSTICO POR MEIO DA APLICAÇÃO DE UM
QFD PARA ECODESIGN

por

Izabella Morré Rodrigues e Octávio Diegoli Netto

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 18 de Junho de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção. Os candidatos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Fábio Neves Puglieri

Prof. Orientador

Profa. Dra. Joseane Pontes

Membro titular

Prof. Dr. Aldo Braghini Junior

Membro titular

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”.

RESUMO

RODRIGUES, Izabella Morré.; NETTO, Octavio Diegoli. **Identifica o de Oportunidades de Melhoria de um Produto por Meio da Aplica o de um QFD para Ecodesign**. 2018. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produ o - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

Os produtos são fundamentais para a sociedade, porém representam uma grande parte da gera o de resíduos e impactos durante todo o ciclo de vida, além da utiliza o de recursos naturais em sua produ o. O ecodesign atua como uma abordagem proativa em rela o a questões ambientais no desenvolvimento de produtos, de forma a minimizar os impactos ambientais no ciclo de vida do produto sem que as características e desempenho do produto sejam alterados. Este trabalho tem como o objetivo identifica o de melhorias no produto através da aplica o de um QFD para ecodesign no desenvolvimento de um produto crítico para a indústria automobilística. Para isso, foi conduzida uma pesquisa bibliográfica sistemática para o conhecimento de métodos de QFDs ambientais e foi realizada a sele o de um método que apresenta uma boa aplicabilidade para então, ser realizada a aplica o prática no desenvolvimento de produto. Como resultado, foram identificadas oportunidades de melhorias ambientais no produto, tais como substitui es de material e melhoria no processo de transporte.

Palavras-chave: QFD. Ecodesign. Setor Automobilístico. Desenvolvimento de Produto.

ABSTRACT

RODRIGUES, Izabella Morr .; NETTO, Octavio Diegoli. **Identification of Product Improvement Opportunities by Applying a QFD for Ecodesign**. 2018. 45 p. Work of Conclusion Course (Graduation in Industrial Engineering) – Federal Technology University of Parana. Ponta Grossa, 2018.

Products are essential for society, however represent a large part of the generation of waste and impacts throughout the life cycle, beyond the use of natural resources during the production. Ecodesign acts as a proactive approach to environmental issues in product development in order to minimize environmental impact on the product life cycle without changing the main features and product performance. This paper's purpose is product improvements identification through the application of a QFD for eco design in the development of a critical product in the automobile industry. For this, a systematic bibliographical research was fulfilled for the knowledge of environmental QFDs methods and also selecting one of which has a good applicability and then a practical application in the product development was done. As a result, were identified environmental and operation improvement opportunities in the product as switching materials and transportation improvements.

Keywords: QFD. Ecodesign. Automotive Sector. Product Development

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva de Comprometimento do Custo do Produto.....	16
Figura 2 – Funil de Desenvolvimento	18
Figura 3 – Modelos de Estágio e Pontos de Decisão para o PDP	18
Figura 4 – Visão Geral do Modelo de Referência.....	19
Figura 5 – DFX – Design for Excellence	23
Figura 6 – Ciclo de vida do produto.....	25
Figura 7 – Fases do desenvolvimento da pesquisa	41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Itens da Etapa de Entrada.....	42
Quadro 2 - Relação Entre as Ferramentas	45
Quadro 3 – Partes Interessadas.....	47
Quadro 4 – Voz do Cliente	48
Quadro 5 – Métricas de Engenharia.....	49
Quadro 6 – Componentes do Produto.....	50

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Diagrama de Pareto.....	51
-------------------------------------	----

LISTA DE SIGLAS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
D4S	Design for Sustainability
DFA	Design for Assembly
DFE	Design for Environment
DFM	Design for Manufacturing
DFMA	Design for Manufacturing and Assembly
DFX	Design for Excellence
EI99	Eco Indicator 99
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Cost
ME	Métricas da Engenharia
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produto
QFD	Quality Function Deployment
QFDE	Quality Function Deployment for Environment
RSP	Receive State Parameter
VOC	Voz do Consumidor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 PROBLEMA DA PESQUISA.....	10
1.2 OBJETIVO GERAL	10
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
1.4 JUSTIFICATIVA.....	11
1.5 DELIMITAÇÃO DO TEMA	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2.1 DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO	13
2.1.1 Características do PDP.....	14
2.1.2 Modelos de Referência.....	16
2.1.2.1 Pré-desenvolvimento	20
2.1.2.2 Desenvolvimento.....	20
2.1.2.3 Pós-desenvolvimento.....	21
2.1.3 DFX – Design for Excellence	22
2.2 ECODESIGN	24
2.3 FERRAMENTAS DE ECODESIGN.....	26
2.3.1 Quality Function Deployment (QFD) para o Ecodesign	28
2.3.1.1 QFDE (<i>Quality Function Deployment for Environment</i>).....	28
2.3.1.2 <i>Environmental</i> QFD.....	29
2.3.1.3 QFD de Hochman e O’Connel	29
2.3.1.4 <i>Ecological Quality Function Deployment</i> de Ernzer e Birkhofer	29
2.3.1.5 GQFD.....	30
2.3.1.6 3D-QFDE	30
2.3.1.7 Eco-VoC.....	31
2.3.1.8 EI2QFD (<i>Eco Indicator to QFD</i>)	31
2.3.1.9 GreenQFD-II	31
2.3.1.10 IGQFD (Integrated Green and Quality Function Deployment)	32
2.3.1.11 Uso combinado do QFDE, LCA e TRIZ	32
2.3.1.12 Uso combinado do QFDE e LCA.....	32
2.3.1.13 QFD-DfE	33
2.3.1.14 QFD de Wozniak e Sedek	33
2.3.1.15 QFD baseado no RSP	33
2.3.1.16 Eco-QFD de Kuo et al.....	34
2.3.1.17 Eco-QFD de Utne	34
2.3.2 Métodos de QFD Ambiental Obtidos Pela Revisão Sistemática.....	35
2.3.2.1 ECQFD (<i>Environmentally Conscious</i> QFD)	35
2.3.2.2 LCA e Function-Component Matrix com E-QFD	36
2.3.2.3 QFD com Modularidade para o Fim de Vida de Família de Produtos	36

2.3.2.4	Uso combinado de QFDE e <i>Fuzzy Analytic Hierarchy Process</i> (FAHP)	37
2.3.2.5	Uso combinado de QFDE com lógica <i>Fuzzy Dematel</i> , <i>Fuzzy Dematel</i> e <i>Fuzzy Analytic Network Process</i> (FANP)	37
2.3.2.6	Uso combinado do ECQFD, TRIZ E AHP	38
3	METODOLOGIA	39
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	39
3.1.1	Abordagem Da Pesquisa	39
3.1.2	Natureza Da Pesquisa	39
3.1.3	Objetivos Da Pesquisa.....	40
3.1.3.1	Procedimentos técnicos da pesquisa.....	40
3.2	PROCEDIMENTOS DA PESQUISA	40
4	RESULTADOS	44
4.1	OPORTUNIDADES DE MELHORIA	51
4.1.1	Eletrônicos	51
4.1.2	Cabeçote	52
4.1.3	Bloco do Motor.....	52
4.1.4	Turbina.....	53
4.1.5	Virabrequim.....	54
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
	REFERÊNCIAS	56
	APÊNDICE A - QFDE FASE 1	60
	APÊNDICE B - QFDE FASE 2	62

1 INTRODUÇÃO

Até a década de 1970, era comum as empresas não adotarem nenhum tipo de controle de emissão de poluentes. Essa postura passiva era totalmente indiferente ao despejo de resíduos do processo produtivo diretamente no meio ambiente, mesmo sem nenhum tratamento. A partir de então, devido ao fortalecimento das legislações ambientais à nível global, a estratégia ambiental das indústrias teve que mudar e as chamadas soluções “fim de tubo” foram adotadas e atuavam apenas no tratamento dos resíduos com a finalidade de diminuir seu potencial poluidor, o que caracteriza uma abordagem reativa (JOHANSSON, 2002).

Através de técnicas como Prevenção à Poluição e a Produção Mais Limpa, as empresas foram capazes de diminuir a geração de resíduos dos processos, seja pela substituição da fonte energética por uma menos poluidora ou pela substituição das linhas de produção por processos mais eficientes, o que caracteriza uma abordagem preventiva. Essa transição possibilitou evidenciar os reais custos associados às soluções de fim de tubo, que vão além do tratamento do resíduo, como perda de matéria prima, desperdício de energia, e custos de inconformidades normativas e legais (BIERMA et al., 1998).

A evolução dessa abordagem preventiva aconteceu quando, por meio de pressão governamental e pública, as empresas passaram a atentar-se sobre a crescente onda do consumismo. Além disso, reconheceram que alguns de seus produtos colocavam em risco a vida ou o ambiente (LEWIS et al., 2001) e assim buscaram adotar a integração das questões ambientais ao desenvolvimento de produto, com foco no controle e prevenção da poluição, não só do processo, mas também do produto e durante todo o seu ciclo de vida. Cria-se assim o conceito de ecodesign, ou seja, desenvolver produtos que sejam ecologicamente sustentáveis desde as fases iniciais do projeto. Desta forma, é possível prevenir os impactos ambientais antes de acontecerem, o que caracteriza uma abordagem proativa (ABNT, 2004).

Porém, essa integração deve ser feita de maneira sistematizada e lógica, para que os resultados obtidos sejam realmente produtos menos poluidores e que ainda atendam a todos os outros critérios propostos pela empresa, como custo, qualidade e desempenho, por exemplo. Isso só é possível de ser feito utilizando ferramentas que sejam capazes de integrar requisitos ambientais aos requisitos de

engenharia do produto, como o *Quality Function Deployment* (QFD) e o *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) ambiental (LEWIS, 2001).

Além dos quesitos das abordagens, o setor escolhido para a aplicação deste trabalho é de grande importância para a economia global. No Brasil, o setor é um dos principais componentes da economia e foi responsável por uma participação de 19,5% no Produto Industrial Bruto (PIB) do país, no ano de 2010. O setor também atingiu o valor de mais de USD 92 bilhões em vendas e gerou mais de 137.000 postos de trabalho diretos (ANFAVEA, 2011).

1.1 PROBLEMA DA PESQUISA

Quais oportunidades de melhoria ambiental podem ser obtidas no projeto de um produto no setor automobilístico por meio do ecodesign?

1.2 OBJETIVO GERAL

Identificar oportunidades de melhorias no desempenho ambiental no desenvolvimento de produto do setor automobilístico utilizando um QFD para ecodesign.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar uma base de conhecimento sobre os temas desenvolvimento de produto e ecodesign.
- Construir o estado-da-arte de métodos de QFD para ecodesign.
- Definir um método de QFD ambiental para aplicação em um produto do setor automobilístico.
- Identificação de pontos de melhoria no desempenho ambiental do produto escolhido.

1.4 JUSTIFICATIVA

Segundo Lewis (2001), está claro para a indústria que a incorporação de questões ambientais no desenvolvimento de produtos por meio do ecodesign está se tornando cada vez mais a chave para o sucesso das corporações que pensam no futuro. Esses conceitos e ferramentas irão revolucionar a forma das indústrias criarem novos produtos e serviços e como os consumidores e governos irão comparar e regulamentar os produtos do dia a dia.

Particularmente, o ecodesign fornece uma oportunidade única para que sejam feitas intervenções críticas nas fases iniciais do processo de desenvolvimento de produto e que permitem eliminar, evitar ou reduzir impactos ambientais negativos. Logo, auxilia na diversificação e busca de estratégias mais ecológicas sem perder de vista os ganhos monetários (LEWIS et al. 2001).

Sua aplicação quando feita por meio de ferramentas baseadas em QFD é de certa forma simples e, normalmente, não exige o consumo de tempo e recursos com treinamentos, visto que o QFD é uma ferramenta já muito difundida na engenharia e suas formas ambientais não se diferem muito da ferramenta original, o que facilita sua aplicação. (PUGLIERI, 2010)

Outro ponto relevante a ser citado é a possibilidade de melhoria do produto no que se refere à sua fase de uso no ciclo de vida. Segundo Manzini e Vezzoli (2002), os produtos podem requerer atividades de serviços, como reparos e manutenção, reparação de danos ou substituição de partes desgastadas para o seu devido funcionamento. Existem muitos casos que o uso do produto absorve recursos materiais e energia, e que por consequência produz resíduo e refugo.

A aplicação deste estudo poderá contribuir para a diminuição desses consumos de energia e materiais em um componente de um veículo, atendendo à tendência mundial de preservação do ambiente ao mesmo tempo em que contribui para a criação de novos conceitos de *design* mais ecológicos, que podem tornar-se oportunidades de diferenciação entre as empresas. Além disso, contribui para o desenvolvimento tecnológico na indústria, na economia, na academia e para a sociedade.

1.5 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho almeja a identificação de pontos de melhoria no desempenho ambiental de um produto significativo no setor automobilístico de uma empresa de grande porte localizada no estado do Paraná.

Para alcançar os pontos de melhoria, é selecionada uma ferramenta baseada no QFD, a qual possui vantagens ambientais, ou seja, práticas de ecodesign para atingir o desenvolvimento de produtos voltados ao bom desempenho ambiental, e operacionais, isto é, práticas de aplicação da ferramenta para desenvolvimento de produto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A presente seção contempla os assuntos principais que serão abordados ao longo do trabalho, como desenvolvimento de produto, ecodesign e QFDs ambientais.

2.1 DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO

Segundo Rozenfeld et al. (2006), devido a internacionalização de mercado, aumento da diversidade de produtos e ciclos de vida menores, o desenvolvimento de produto é considerado crítico no âmbito de competitividade entre as empresas e um fator determinante para o sucesso. Constantemente, produtos diferenciados são solicitados e criados com a intenção de atender seguimentos distintos, integrar com tecnologias, incorporar a produtos já existentes e adequar a padrões novos de consumo e especificações legais. É por meio deste processo que empresas podem se destacar frente aos seus concorrentes, pela criação de produtos mais competitivos e com um menor tempo de resposta para atender as constantes mudanças de mercado, tecnologias e ambiente organizacional (ROZENFELD et al., 2006). Outro ponto citado por Clark e Fujimoto (1991) é que os clientes estão cada vez mais exigentes em relação a produtos, e com maior capacidade de escolha, o que leva as empresas à constante busca por atender e suprir essas mudanças de necessidades, da melhor forma possível, para que o produto se torne atrativo e agregue valor ao cliente.

Para Clark e Fujimoto (1991), o processo de desenvolvimento de produto (PDP) está relacionado com a transformação de dados sobre possibilidades e oportunidades potenciais de mercado em informações e recursos para a produção de produtos. Já de acordo com Florenzano (1999), o desenvolvimento de produto está ligado com um amplo conteúdo que envolve ambiente competitivo, desempenho e organização. O desempenho do Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) contribui para a competitividade e interage com a organização interna e a estratégia da empresa, além disso, o PDP deve garantir a

“manufaturabilidade”, ou seja, a capacidade que um produto tem em ser produzido, atendendo a exigências de qualidade e custo.

Por fim, segundo Rozenfeld et al. (2006), o PDP significa atingir especificações do projeto e de manufatura necessárias para a produção, a partir do desenvolvimento de um conjunto de atividades, considerando as restrições de tecnologia, necessidades dos clientes e estratégias competitivas da empresa.

As atividades do PDP se concentram nas adequações e aperfeiçoamento de produtos já desenvolvidos nos países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil. Em certos seguimentos como automóveis, eletrônicos e produtos farmacêuticos, os novos produtos tendem a serem aprimorados na maioria das vezes, nos países desenvolvidos, pois estão localizados os centros de pesquisa de desenvolvimento e os mercados possuem maior poder de aquisição. Depois disso são disseminados para os outros países através da transmissão internacional de tecnologia (ROZENFELD et al., 2006).

O Brasil precisa exportar produtos de valor agregado ao invés de matérias-primas para que ocorra a geração de excedentes na conta externa e conseqüentemente o equilíbrio na economia. Esse fato demanda uma maior capacitação e investimentos no PDP, para que os produtos brasileiros se elevem ao nível dos produtos internacionais, ou seja, de acordo com Rozenfeld et al. (2006), é fundamental que o Brasil eleve os conhecimentos sobre as práticas de gerenciamento e estruturação do processo de desenvolvimento de produto.

2.1.1 Características do PDP

O PDP tem diversas singularidades comparadas a outros processos de negócio¹. Essas características fazem com que o processo seja diferente dos demais na organização, o que resulta na necessidade da gestão adequada, perfil e qualificação dos funcionários que atuam no PDP. Diferente de atividades rotineiras da organização, o lançamento de novos produtos necessita de grandes e longos esforços que envolvem equipes multidisciplinares com implicação na sobrevivência e manutenção da empresa no mercado. Assim, uma característica marcante do PDP é

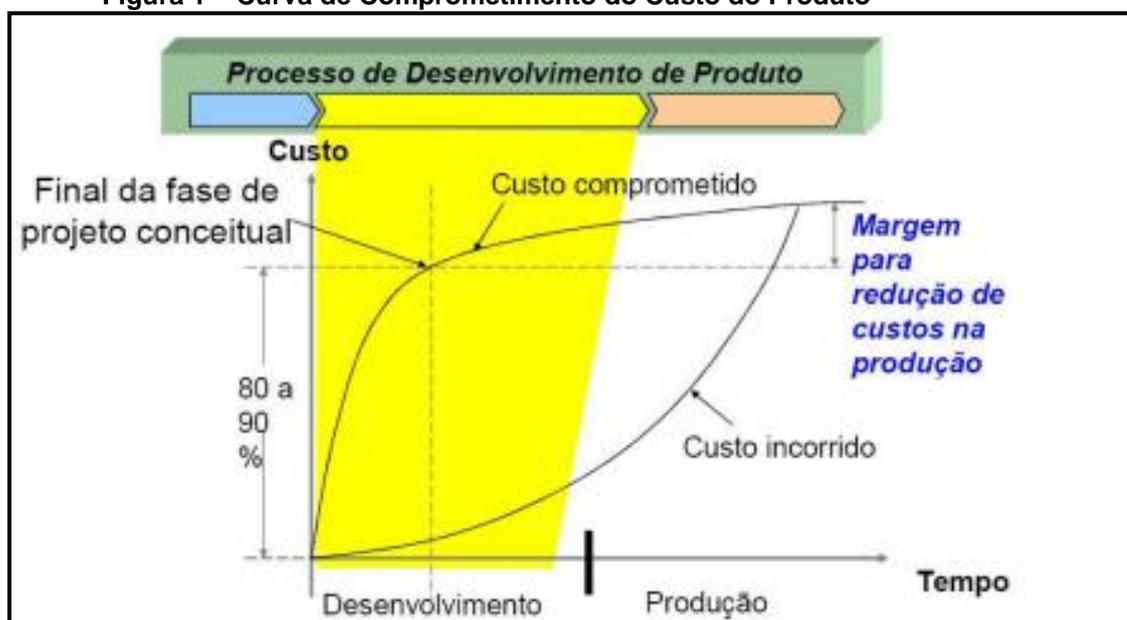
¹ Processos de negócio são atividades associadas às informações que manipulam recursos, estrutura e organização da empresa que os utilizam para obter como resultado um conjunto de informações valiosas, produtos ou serviço que geram valor (ROZENFELD et. al., 2006).

a integração de informação entre muitos setores da empresa e isso aumenta significativamente a importância do gerenciamento e comunicação entre os setores interfuncionais (ROZENFELD et al., 2006).

De acordo com Rozenfeld et al. (2006), existe um grande volume de informação de entrada no PDP, como por exemplo, exigências de mercado, exigências legais, cadeia de suprimentos e homologação. Essas informações derivam-se de diversas fontes internas e externas das empresas e são relacionadas a todas as etapas do ciclo de vida do produto. Essa tomada de decisão inicial é equivalente a 85% do custo no produto final, ou seja, todas as decisões tomadas após o início do ciclo de desenvolvimento definem apenas 15% do custo final. Isso significa que as etapas de definições de faixa de desvio aceitável do produto, desenvolvimento e teste de protótipos, desenvolvimento de fornecedores, definição do arranjo físico da produção, criação de campanhas de marketing e assistência técnica exercem menor influência no preço final do produto em relação a etapas iniciais como definição dos materiais, manufatura e tecnologia.

A Figura 1 mostra a relação dos custos com as fases de desenvolvimento e produção. Na fase de desenvolvimento, os custos incorridos são baixos em relação ao custo final do produto, porém, o custo de comprometimento é bastante crítico, sendo assim difícil reduzi-los na fase de produção, pois se trata de características já designadas ao produto (ROZENFELD et al., 2006).

Figura 1 – Curva de Comprometimento do Custo do Produto



Fonte: Rozenfeld et al. (2006)

Segundo Rozenfeld et al. (2006), a fase que são tomadas as decisões mais críticas do produto em relação ao preço final, é a etapa que existe o maior grau de incerteza sobre as características do produto final. Ao longo do projeto surgem mudanças no desenvolvimento e a incerteza vai diminuindo, porém, o custo de mudança aumenta gradativamente de acordo com o andamento do das fases de desenvolvimento. A chave para ser mais assertivo nessa fase é garantir a qualidade das informações e estabelecer controles das exigências e mudanças do negócio.

2.1.2 Modelos de Referência

Para que um PDP seja eficiente, deve ser apresentado resultados ao final, que estejam alinhados com as necessidades e expectativas de mercado bem como incorporados na estratégia organizacional da empresa. Por isso, o estabelecimento de um modelo de gestão e elaboração promove que as áreas multifuncionais do PDP estejam alinhadas no processo. A utilização de um modelo auxilia as organizações na gestão do PDP, no qual uma sequência de etapas é estabelecida para todos os produtos, sendo assim, é definido um padrão de desenvolvimento (ROZENFELD et al., 2006).

De acordo com Back et al. (2008), o modelo de referência colabora para que as empresas executem um PDP mais padronizado e organizado, no qual esteja

integrado ao processos e equipes multifuncionais da empresa. O modelo contribui para que as empresas desenvolvam novos produtos de sucesso para entrarem no mercado ou se manterem competitivas nos mercados já existentes. Com isso, é de suma importância a adoção de um modelo de referência que oriente a gestão do processo e seja adequado as exigências da empresa, considerando a relevância do processo de desenvolvimento de produto.

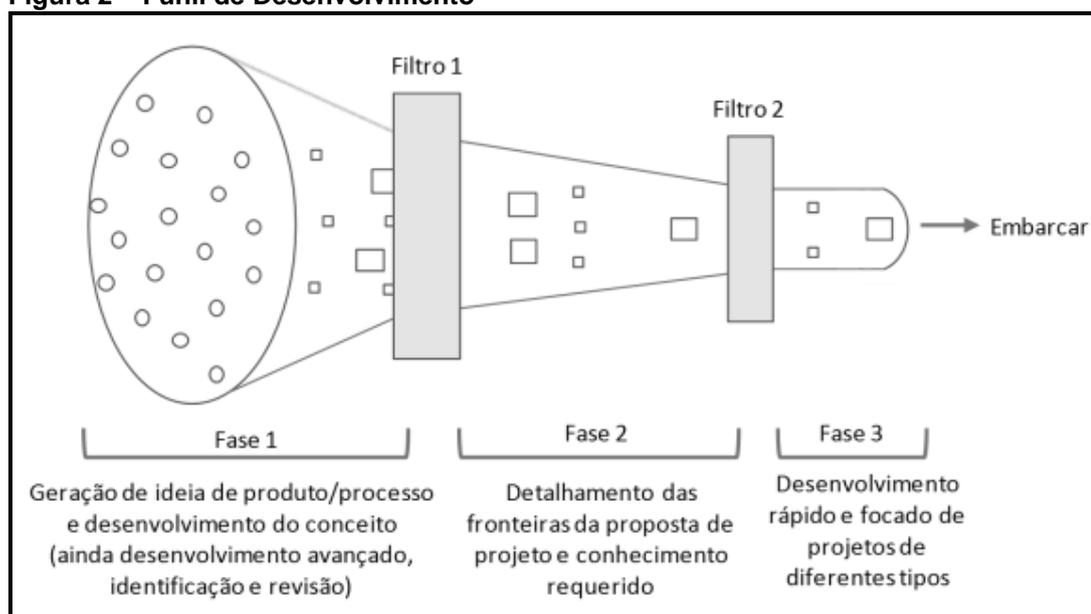
Foram desenvolvidos e adaptados diversos modelos de PDP na literatura. De acordo com Amaral (2002), esses modelos são divididos em:

- Modelos de referência: São elaborados baseados em boas práticas do PDP e apresentam aplicações mais genéricas que podem ser utilizadas como orientação para o desenvolvimento de modelos específicos.
- Modelos específicos: A partir de um modelo de referência genérico, a empresa é capaz de adaptar para um modelo específico, baseado nas suas próprias necessidades e requisitos, e serve de base para a especificação de projetos de desenvolvimento de produtos.

Entre os modelos de referência, o modelo pioneiro desenvolvido e que serviu de base para diversas variações de abordagens, foi o modelo de Wheelwright e Clark (1992). Wheelwright e Clark (1992) desenvolveram a abordagem do funil de desenvolvimento. O projeto de desenvolvimento começa na concepção do produto e isso vai caminhando para um produto final que atenda às necessidades de mercado e restrições da empresa. O método é iniciado com o levantamento grande de ideias que vão sendo aprimoradas para que o resultado seja projetos potenciais que serão desenvolvidos no mercado (WHEELWRIGHT; CLARK, 1992).

Essa abordagem caracterizou o início do PDP e é chamada de gestão de portfólio, a qual o objetivo é transformar e selecionar diversas ideias de produto para que apenas os produtos com maior chance de obter bons resultados prossigam com o desenvolvimento. Wheelwright e Clark (1992) representaram método na forma de um funil, como pode ser observado na Figura 2. O objetivo principal do funil é identificar os melhores projetos que estão alinhados com a estratégia da empresa e possuem mais vantagens competitivas em relação a outras ideias iniciais.

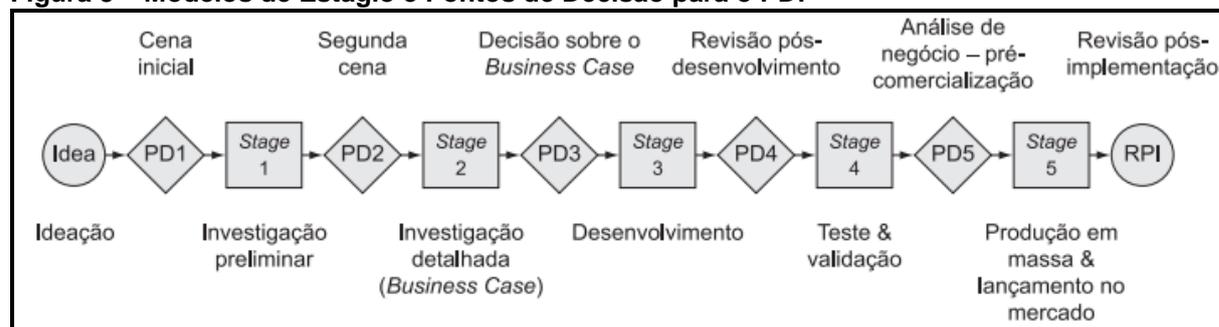
Figura 2 – Funil de Desenvolvimento



Fonte: Wheelwright e Clark (1992)

Outro modelo de referência foi proposto por Cooper (1993), o qual é introduzido à ideia de estágios e definição de pontos de decisão, de acordo com a Figura 3, para que os projetos sejam guiados no desenvolvimento da melhor forma possível.

Figura 3 – Modelos de Estágio e Pontos de Decisão para o PDP



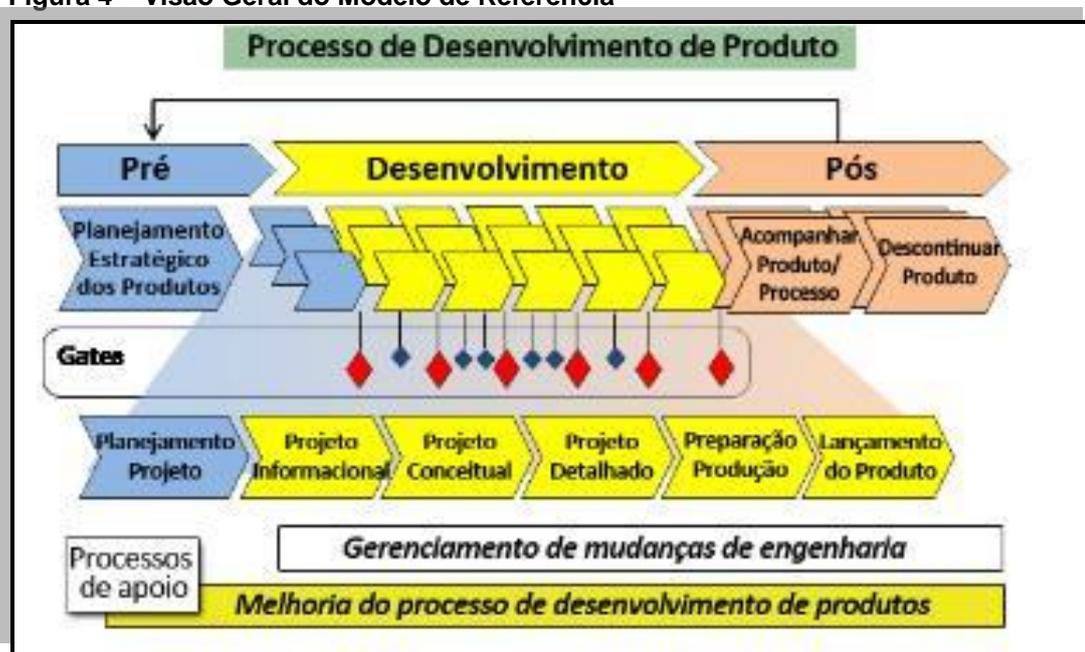
Fonte: Cooper (1993)

O modelo, conforme a figura 3, é dividido em: investigação preliminar; investigação detalhada; desenvolvimento; teste e validação e produção em massa e lançamento no mercado. Essas fases são divididas em *gates* que separam o processo em etapas distintas entre si. Em cada *gate*, existe a possibilidade de tomada de decisão sobre prosseguir, alterar, pausar ou cancelar o projeto. Com isso, cada *gate* se torna uma oportunidade de revisão do portfólio de ideias. O modelo tem como principal objetivo promover flexibilidade no projeto, a partir da

introdução de pontos de decisão que são capazes de definir o futuro do projeto (COOPER, 1993).

Existem muitos modelos de referência na literatura, porém o modelo unificado do PDP, proposto por Rozenfeld et al. (2006), é muito difundido e utilizado no Brasil. Para Rozenfeld et al. (2006), o PDP está dividido em três macrofases, como mostra a Figura 4: Pré-desenvolvimento, Desenvolvimento e Pós-desenvolvimento. Essas macrofases abrangem etapas de planejamento estratégico do produto até a descontinuação da produção.

Figura 4 – Visão Geral do Modelo de Referência



Fonte: Rozenfeld et al. (2006)

A fase de pré-desenvolvimento está relacionada com o planejamento estratégico adotado pelas empresas e em um horizonte de tempo, leva dias para a elaboração. O desenvolvimento varia de acordo com a complexidade e grau de dificuldade de cada produto, mas normalmente demora meses para criação. Já a fase de pós-desenvolvimento prolonga-se até o produto ser descontinuado do mercado (ROZENFELD et al. 2006).

2.1.2.1 Pré-desenvolvimento

A macrofase de pré-desenvolvimento, a partir da estratégia organizacional, demarcação das limitações dos recursos, informações sobre os *stakeholders* e tendências tecnológicas, engloba tarefas de definição do projeto de desenvolvimento. Sendo assim, a macro fase deve garantir a direção estratégica no desenvolvimento do produto, com suas oportunidades e limitações mapeadas para o subsequente detalhamento do projeto (ROZENFELD et al. 2006).

De acordo com Rozenfeld et al. (2006), é no pré-desenvolvimento que ocorre a ligação entre os objetivos da empresa e os produtos que serão desenvolvidos posteriormente, o que possibilita uma boa definição de escopo, análise de riscos e prevenção de problemas futuros. Existem dois objetivos principais:

- 1) Assegurar a melhor escolha de portfólio de produtos levando em consideração a estratégia da empresa e tendências de mercados e tecnologias.
- 2) Assegurar a clareza sobre o objetivo de cada projeto, garantindo o alinhamento de toda a equipe sobre as metas do projeto bem como a função que cada um deles exerce sobre o portfólio, de forma que qualquer desvio seja evitado.

2.1.2.2 Desenvolvimento

Essa fase se inicia após o planejamento dos projetos e estabelecimento do portfólio de produtos. A equipe é constituída por funcionários de áreas distintas como marketing, engenharia e produção, a qual é responsável por identificar todos os envolvimento durante o ciclo de vida do produto (assistência técnica, clientes, manufatura e etc.) e assim, determinam e documentam todas as especificações-meta do produto para que as necessidades sejam supridas. Com base nessas especificações, é definida a estrutura funcional do produto, ou seja, todas as funções que ele deve possuir para atender as necessidades dos clientes em todo o ciclo de vida do produto (ROZENFELD et al. 2006).

Todas as informações técnicas reunidas são utilizadas novamente para a tomada de decisão sobre o futuro do projeto do produto. Uma nova análise de viabilidade é feita para que seja atualizada a avaliação do retorno financeiro do produto. Após essa análise, segundo Rozenfeld et al. (2006), o processo Projetar-Constuir-Testar-Otimizar é realizado até que a homologação do produto aconteça. O time então planeja como será o lançamento do produto no mercado e desenvolve os manuais dos usuários, e técnicos, bem como o sistema de apoio ao setor de vendas.

Os processos de manufatura são desenvolvidos, contendo informação como parâmetros das máquinas, materiais e métodos e requisitos de fabricação e toda a cadeia de suprimentos é desenvolvida para que o produto seja lançado com sucesso no mercado.

Em resumo, o desenvolvimento inicia a partir das informações que foram levantadas e documentadas na macrofase anterior, e ao longo da fase, produz informações técnicas detalhadas, tanto de produção quanto comerciais, relacionadas ao produto, criação e avaliação de protótipos, definição e compra dos recursos necessários para a manufatura, comercialização e suporte técnico do produto, bem como o alinhamento das informações com toda a cadeia de suprimentos. Nessa macrofase são produzidos alguns lotes piloto de produtos e validados quanto à qualidade, seguida do lançamento do produto no mercado e desenvolvimento de atendimento ao cliente (ROZENFELD et al. 2006).

2.1.2.3 Pós-desenvolvimento

A duração da macrofase de pós-desenvolvimento é muito superior em relação as anteriores. Quando é comparado o tempo de cada uma delas, pode-se perceber facilmente que um produto permanece no mercado por muito mais tempo do que ele foi desenvolvido, principalmente hoje em dia, em que os produtos precisam ser lançados muito mais rápido como forma de competitividade entre as empresas (ROZENFELD et al. 2006).

Após o início da produção, o time de desenvolvimento é desfeito, e um novo time composto por membros que participaram do desenvolvimento, somado a pessoas relacionadas à produção e marketing, integram o novo time de

acompanhamento. Esse time é de suma importância caso o produto apresente falha em campo e também quando existe a necessidade de mudanças de engenharia (ROZENFELD et al. 2006).

Em relação ao acompanhamento, ocorre a avaliação de satisfação dos usuários e controle de desempenho do produto. A avaliação do grau de satisfação dos clientes é realizada por equipes das áreas comercial e marketing e é uma forma da empresa ir até o cliente e analisar como o usuário se sente em relação ao produto que foi desenvolvido. Já o controle do desempenho do produto é feito a partir dos dados coletados das áreas de atendimento ao cliente e assistência técnica (ROZENFELD et al. 2006).

Assim como nas outras fases, se devem registrar todas as lições aprendidas durante o pós-desenvolvimento do produto, como forma de armazenar o conhecimento adquirido em outros projetos, de forma que a equipe consiga evitar a ocorrência dos mesmos erros. É necessária ainda a definição dos parceiros para que o serviço de reposição e atendimento ainda seja oferecido quando o momento de a descontinuação da produção do produto chegar. Além disso, a empresa deve consultar no planejamento as informações para reutilização e/ou descarte do produto. No fim da macrofase, é adicionado um documento formal sobre o fim de vida do produto, no qual contem informações reais do retorno do produto para a empresa, podendo assim fazer a comparação em cima do que foi planejado (ROZENFELD et al. 2006).

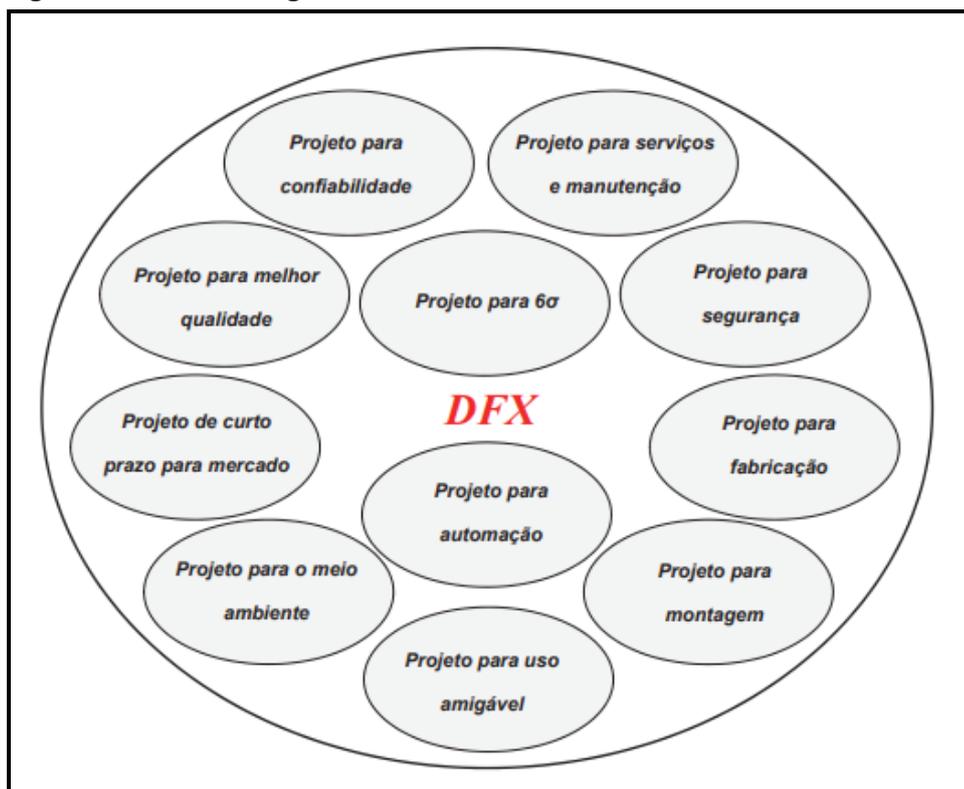
2.1.3 DFX – Design for Excellence

Como citado anteriormente por Rozenfeld et al. (2006), para as empresas se destacarem frente aos seus concorrentes, é necessário lançar produtos com atributos que agregam valor ao cliente e que atendam às necessidades de mercado que estão cada vez mais exigentes. Nessas circunstâncias, surgiu o conceito de *Design for Excellence* (DFX), o qual significa projetar o produto de forma que se aproxime o máximo possível das características requisitas, como por exemplo, qualidade, fácil manutenção, fácil manuseio e até mesmo sustentabilidade e meio ambiente (BRALLA, 1996). De acordo com Barbosa (2012), o DFX é uma metodologia que tem como objetivo desenvolver métodos e procedimentos no intuito

de orientar os desenvolvedores no PDP, de forma que o produto atenda as exigências dos clientes da melhor maneira possível.

A característica na qual o projeto desenvolvido deve priorizar, ou seja, o requisito que deve ser priorizado no projeto, é indicado pela letra “X”, como pode-se ver na Figura 5 (BARBOSA, 2012).

Figura 5 – DFX – Design for Excellence



Fonte: Barbosa (2012)

O conceito que prioriza as características do ponto de vista de fabricação é o *Design for Manufacturing* (DFM). O DFM tem como objetivo desenvolver os produtos de forma que facilite a manufatura dos componentes através da simplificação dos processos envolvidos na produção, devendo atender todos os requisitos funcionais e contribuir para diminuição dos custos de manufaturabilidade. Em relação a montagem, existe o conceito de *Design for Assembly* (DFA), cujo objetivo é facilitar o processo de montagem dos produtos, através redução de número de peças e etapas de montagem e desenvolvimento de um produto funcional, a partir da análise de cada uma das peças separadamente nos quesitos de função, material, formato e montagem (BARBOSA, 2012).

Segundo Barbosa (2012), embora manufatura esteja relacionada com a fabricação das peças e montagem com o encaixe das peças do produto, os conceitos de DFM e DFA devem ser utilizados simultaneamente, com o objetivo de reduzir a o processo complexo e número de componentes no produto. O uso combinado dos conceitos resulta no *Design for Manufacturing and Assembly* (DFMA), no qual agrega vantagens ao produto como melhorias na qualidade, simplificação do processo de produção, confiabilidade, redução de custos e padronização do produto.

Existem outras abordagens, como é o caso do *Design for Environment* (DFE), ou ecodesign, cujo objetivo é a orientação dos projetos voltada para características ambientalmente responsáveis e eliminação de poluição e danos ambientais (BARBOSA, 2012).

Segundo Barbosa (2012), com o avanço da urbanização e crescimentos das cidades, o problema relacionado ao meio ambiente vem crescendo significativamente, como por exemplo, desmatamento das florestas, poluição do ar e poluição da água. Com isso, a necessidade de desenvolver produtos com responsabilidade ambiental, levando em consideração todo o ciclo de vida do produto é cada vez maior. O ecodesign contribui para projetos com essas características ambientais, nos quais existe a exigência de desenvolver produtos que diminuem os impactos ambientais, incluindo a extração de matéria-prima, produção, uso e descarte.

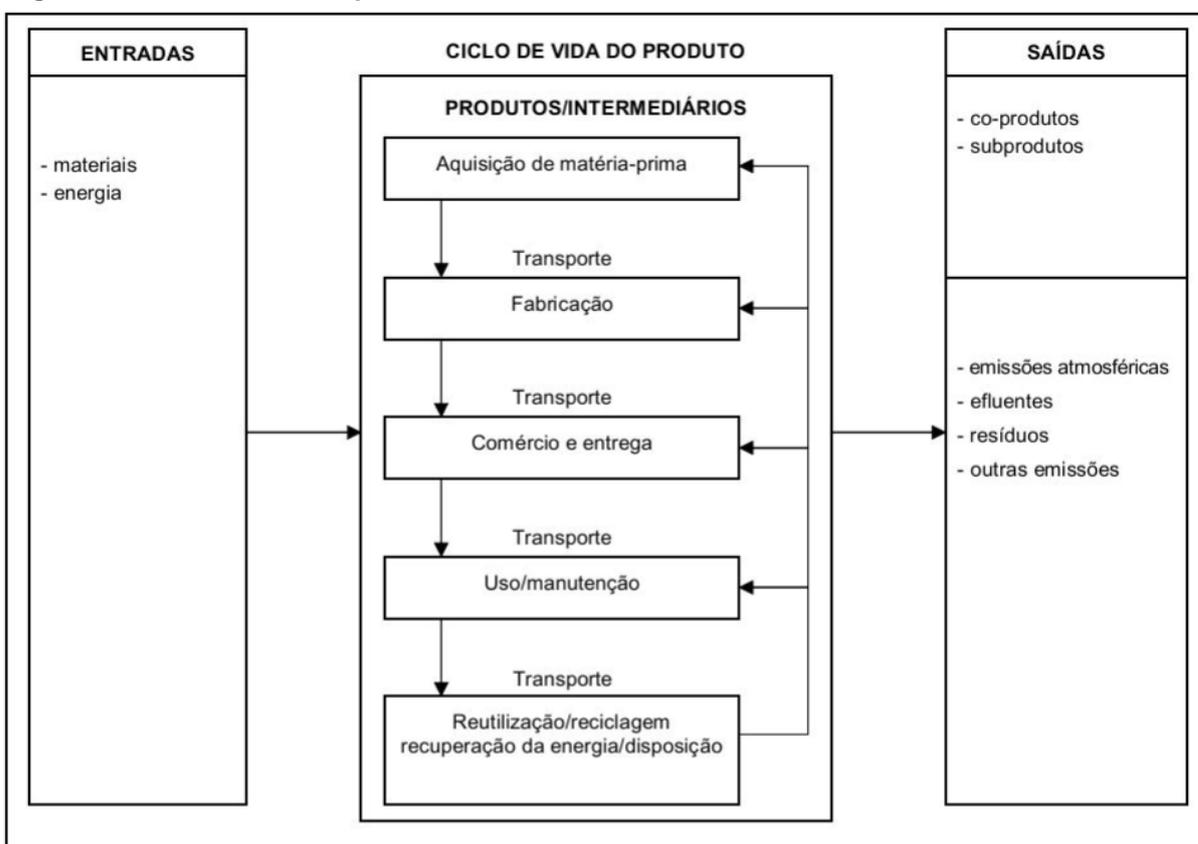
2.2 ECODESIGN

Ecodesign ou *Design for Environment* (DFE) como definido por Bakker (1995), é aplicar requisitos focados em redução de impactos ambientais dentro do desenvolvimento de produto, por todo o seu ciclo de vida. Outras definições de ecodesign levam em consideração aspectos como o não comprometimento de aspectos essenciais ao produto, como sua estética ou o seu desempenho, nem da sua qualidade e custo, e ainda integram ao desenvolvimento de produto o que é ecologicamente necessário socialmente aceitável e tecnicamente possível diante da percepção crescente de que é preciso preservar o ambiente e buscar um

desenvolvimento sustentável (WEENEN, 1995; JOHANSSON, 2002;). Segundo Crul e Diehl (2006), o ecodesign também pode envolver o *Design for Sustainability* (D4S), tornando-se muito mais que fazer um produto ecologicamente correto, e tem evoluído para englobar questões de cunho social e da necessidade de desenvolver novas maneiras de atender as necessidades dos consumidores com um menor uso de recursos.

Entendem-se como ciclo de vida todos os estágios consecutivos e interligados de um sistema de produto ou serviço, desde a obtenção de matéria prima até sua destinação final. Esses estágios incluem projeto, produção, transporte e entrega, uso e tratamento de fim de vida (ABNT, 2004), conforme figura 6:

Figura 6 – Ciclo de vida do produto



Fonte: Adaptado de ABNT (2004)

Como é possível observar, o processo produtivo requer ao menos dois tipos de entradas: material e energia. As entradas de energia são indispensáveis na maioria dos estágios da vida do produto, e suas fontes podem ser renováveis ou de combustíveis fósseis, ambas de aspectos ambientais identificáveis. As entradas de

material podem conter produtos de tóxicos aos seres humanos, bem como contribuir para a geração e acúmulo de resíduos.

Quanto às saídas, são exemplos de impacto ambiental adverso: a disposição final do próprio produto, as saídas geradas durante o processo produtivo como descargas de efluentes, os coprodutos e subprodutos, as emissões atmosféricas e ruído (ABNT, 2004).

Como foi discutido até aqui, é possível afirmar que todas as etapas do ciclo de vida possuem impactos ambientais que são passíveis de quantificação, o que possibilita determinar o desempenho ambiental de qualquer produto. O desempenho ambiental nada mais é que a soma dos impactos ambientais positivos e negativos de todo seu ciclo de vida. Dentro da abordagem do ciclo de vida existem as ferramentas de ecodesign, que auxiliam de forma sistematizada na tomada de decisão e buscam facilitar o trabalho e tornar o processo de desenvolvimento mais confiável, ao mesmo tempo em que melhora o desempenho ambiental do produto (LEWIS et al., 2001).

2.3 FERRAMENTAS DE ECODESIGN

Existem diversas ferramentas e métodos de ecodesign, como por exemplo a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que consiste em determinar os potenciais impactos ambientais de um produto analisando todo o seu ciclo de vida. Essa ferramenta pode fornecer um nível de informação elevado em relação ao impacto final do produto e seus componentes, bem como identificar oportunidades de melhora no desempenho ambiental do mesmo e ainda auxiliar na seleção de indicadores de desempenho ambiental que sejam relevantes para o projeto. O estudo de ACV ocorre em quatro fases: definição do nível de detalhamento do estudo, coleta de dados, avaliação dos impactos de cada componente e discussão das saídas do estudo (ABNT, 2009).

Existem também outras abordagens para melhoria de desempenho ambiental que são derivadas de ferramentas da engenharia de produção, adaptadas para que sejam incluídos os parâmetros de cunho ambiental, como por exemplo, o FMEA e o QFD que serviram como norte para a criação do E-FMEA e o QFDE.

O E-FMEA ou *Environmental Failure Mode and Effect Analysis* é uma adaptação do FMEA tradicional, pois não só enfatiza os riscos de falhas potenciais, mas também permite que o produto se torne mais ambientalmente correto ainda nas fases iniciais do projeto, visto que este auxilia na identificação e avaliação dos potenciais impactos ambientais em todas as fases do seu ciclo de vida sem que seja necessário o produto estar em avançado estágio de desenvolvimento (PUGLIERI, 2010). Sua aplicação se dá por uma sequência de passos nos quais serão levantados os aspectos ambientais envolvidos, e então quais impactos serão esperados do produto, enquanto durante as fases de seu projeto é feita uma busca por melhoria de desempenho ambiental para os pontos críticos encontrados, levando em consideração a possibilidade de melhoria e os esforços necessários (como custos, tempo e necessidades técnicas).

Pode ser citada ainda como outra adaptação do FMEA a integração da ferramenta TRIZ a ele, criando o sistema FMEA-TRIZ. Sua aplicação consiste em identificar as falhas ambientais potenciais para todas as fases do ciclo de vida do produto, e então os de risco mais elevado devem ter prioridade na tomada de decisão (PUGLIERI, 2010).

As ferramentas baseadas no *Quality Function Deployment* (QFD) são frequentemente citadas pela literatura de ecodesign. O QFD tradicional consiste em analisar as funções desejadas de um produto ou os requerimentos que a estrutura desse produto deve ser capaz de realizar (AKAO; MAZUR, 2003). Isso é possível pois o QFD tem a capacidade de incluir a voz do cliente (VoC) dentro do processo de design, assegurando que o produto será capaz de atender seus requisitos de uma forma satisfatória.

Sua aplicação se dá pelo levantamento dos requisitos do cliente e encontrando uma correlação destes com as características da qualidade do produto e então deve ser feita uma análise para identificar as correlações entre essas características da qualidade e as características da engenharia, como a estrutura e componentes, com o objetivo de encontrar oportunidades de reinventar o produto de forma que gere mais lucro ou melhore sua funcionalidade (SAKAO, 2007).

Todavia, não é esperado das empresas que desenvolvam produtos apenas visando funcionalidade ou ganhos econômicos. O crescimento populacional, aliado ao consumismo derivado do aumento da qualidade de vida por todo o mundo, foram fatores responsáveis por elevar os níveis de emissões de poluentes e consumo de

energia a patamares que demandam atenção, seguindo a vertente de que é necessário que se preserve o ambiente (DEVANATHAN et al., 2010).

Logo, não só a voz do cliente em relação ao uso do produto, mas também quanto ao seu desempenho ambiental deve ser levado em consideração, o que é possível de ser feito através de QFDs que incluam esses requisitos ambientais quanto ao ciclo de vida do produto no seu projeto.

2.3.1 Quality Function Deployment (QFD) para o Ecodesign

Para que se atenda aos requisitos ambientais dos clientes, um novo grupo de ferramentas de ecodesign foi desenvolvido, como o QFD-E, o *Green Quality Function Deployment* e a *House of Ecology*. Em geral, suas aplicações são similares a aplicação do QFD tradicional, e se iniciam pela coleta dos requisitos do cliente quanto ao seu funcionamento, mas agora busca-se também entender qual o desempenho ambiental desejado, como uma certa facilidade de reciclagem, a minimização do uso de componentes provenientes de fonte não renováveis e melhorar seu impacto ao fim da vida (SAKAO, 2007).

Puglieri (2010) realizou uma revisão sistemática da literatura e de acordo com o autor, foram encontrados 17 tipos QFDs ambientais publicados até o ano de 2010. Esses métodos serão brevemente discutidos a seguir. Além destes, serão também discutidos os seis métodos encontrados pela revisão bibliográfica sistemática realizada pelos autores.

2.3.1.1 QFDE (*Quality Function Deployment for Environment*)

Esta ferramenta apresenta uma lista de VoCs 15 itens e outra de Métricas de Engenharia também com 15 itens que abrangem a grande maioria dos problemas ambientais do produto. A primeira fase, como no QFD tradicional, consiste em transformar os requisitos do consumidor em características da engenharia e então, na segunda fase, fazer com que estas se tornem as características dos componentes do produto. A partir disso, devem ser atribuídos pesos de relação entre as métricas de engenharia encontradas com os requisitos do cliente, tanto as tradicionais como funcionalidade, custo e desempenho quanto às de cunho

ambiental. Feitas as relações, multiplica-se esta pelo peso que o consumidor deu para tal requisito, e então será encontrado o peso total desse requisito em relação aos componentes do produto. Os que obtiveram os maiores pesos deverão ser priorizados como foco de melhoria durante o projeto (PUGLIERI, 2010).

2.3.1.2 *Environmental QFD*

De acordo com Puglieri (2010), essa metodologia é baseada em uma matriz de QFD e na técnica *Quantification Theory type IV*, que permite plotar em um gráfico as saídas do QFD e a correlação e análise de afinidades entre dois objetos, o que facilita a visualização. Devido ao uso da dessa técnica, a operacionalização desse método fica comprometida por necessitar de recursos financeiros para que sejam feitos treinamentos e a aquisição do software, o que desestimularia sua utilização.

2.3.1.3 QFD de Hochman e O'Connel

Este método inicia-se pela identificação dos requisitos primários de projeto, bem como o que os consumidores desejam e ainda sua voz ambiental. Cada característica do consumidor é então relacionada a pelo menos uma característica ambiental e técnica do produto. É possível também que se compare o desempenho do produto em questão ao da empresa concorrente, bem como sua evolução competitiva (PUGLIERI, 2010).

Uma crítica a este método é sua grande similaridade ao QFD tradicional, e se os requisitos ambientais já forem identificados pela voz do consumidor, ele não apresentaria ganhos efetivos em relação à aplicação de um QFD tradicional (PUGLIERI, 2010).

2.3.1.4 *Ecological Quality Function Deployment* de Ernzer e Birkhofer

Conhecido como Eco-QFD, esta ferramenta relaciona na sua matriz os requisitos do produto e os requisitos ambientais com as características de uso, técnicas e visuais. Cada relação recebe um fator de 9, 3 ou 1 quando for forte, moderada e fraca, respectivamente (PUGLIERI, 2010). Como é feito em outros

métodos, aqueles requisitos que resultarem em uma maior nota devem ser priorizados durante o desenvolvimento do produto.

Para Puglieri (2010), este método compromete-se em confiabilidade pois dificulta o entendimento do real valor de cada item da qualidade exigida pelo consumidor, visto que não apresenta a coluna de grau de importância.

2.3.1.5 GQFD

Este método, segundo Puglieri (2010), consiste em relacionar “o que” o cliente espera com “como” isso será refletido dentro do produto. Apesar de não se diferir muito do QFD tradicional, esta ferramenta defende que a voz do consumidor seja obtida de todas as partes interessadas, não só do cliente, mas também do governo e investidores, por exemplo.

Puglieri (2010) destaca que, novamente, se a voz do consumidor ambiental for incluída no QFD tradicional, este método do GQFD não traria ganhos significativos com sua aplicação.

2.3.1.6 3D-QFDE

Diferentemente do QFDE, esta ferramenta permite analisar não só os requisitos do cliente em relação aos componentes do produto, mas também a perspectiva de custo do projeto. Isso possibilita avaliar conjuntamente os produtos que devem ou não, serem descontinuados utilizando uma vista piramidal que relaciona os requisitos de qualidade, ambientais e custo. Dessa forma permite, visualmente, os designers decidirem quais as melhores alternativas de produto (PUGLIERI, 2010).

Este método contribui fortemente com a possibilidade de se comparar diferentes opções de produtos sob as perspectivas de qualidade, custo e ambiental, porém não há qualidade planejada e projetada, o que é uma possível crítica ao método, segundo Puglieri (2010).

2.3.1.7 Eco-VoC

Essa ferramenta auxilia na identificação de quais VoC estão relacionadas a cada componente do produto, que servirão de input para um QFDE simplificado. De acordo com Puglieri (2010), esse processo é útil para a identificação de requisitos ecológicos quando o consumidor não possui nenhuma exigência nesse âmbito, porém a empresa deseja desenvolver produtos de melhor desempenho ambiental.

2.3.1.8 EI2QFD (*Eco Indicator to QFD*)

Esta ferramenta propõe a identificação de requisitos apresentam maior importância para o consumidor e para o meio ambiente por meio da integração do método *Eco-Indicator 99* (EI99), que é aplicado na ACV, com o QFD (PUGLIERI, 2010).

Uma crítica à operacionalização do método para Puglieri (2010) é novamente a necessidade de compra de software e treinamentos para a equipe que desenvolvimento de produtos, além de que o EI99 foi desenvolvido sob a perspectiva europeia de leis e requerimento de clientes, logo pode não ser totalmente aplicável em outros locais.

2.3.1.9 GreenQFD-II

O método proposto consiste em integrar ao GQFD a LCA e a LCC em suas matrizes. Isso permite o desdobramento dos requisitos dos consumidores, de custo e ambientais por todo o processo de desenvolvimento do produto. Sua aplicação se dá em 3 etapas: identificação dos requisitos técnicos através da VOC, os ambientais através do LCA e os de custo através do LCC, então é feita uma análise comparativa entre os requisitos para que se criem alternativas de componentes do produto que ainda satisfaçam a etapa 1 e então a aplicação do QFD de forma tradicional, porém com os requisitos ambientais e de custo também sendo considerados (PUGLIERI, 2010).

De acordo com Puglieri (2010), apesar de permitir a avaliação de todos os impactos ambientais e também os custos no ciclo de vida do produto, essas

ferramentas podem requerer conhecimento especializado não disponível dentro das equipes de desenvolvimento, agregando custos à aplicação de um QFD ambiental.

2.3.1.10 IGQFD (Integrated Green and Quality Function Deployment)

Essa metodologia é focada em qualidade e eco eficiência, e busca confrontar as limitações do Green QFD-II. As matrizes de relação do IGQFD são compostas por quatro blocos, que relacionam primeiramente os requisitos da qualidade com funções da qualidade, e então os requisitos da qualidade com os objetivos ambientais, o próximo relaciona os requisitos ambientais com as funções de qualidade e o último que relaciona os requisitos ambientais com os objetivos ambientais (PUGLIERI, 2010).

Sua aplicação engloba não só os pesos da VoC mas também as opiniões de especialistas e ainda a estratégia de eco eficiência da empresa, porém não há comparação com o produto em desenvolvimento frente aos concorrentes, logo não há uma boa visão sobre a qualidade projetada (PUGLIERI, 2010).

2.3.1.11 Uso combinado do QFDE, LCA e TRIZ

Esse método propõe uma integração das ferramentas ACV, TRIZ e QFD, na busca por melhoria do desempenho ambiental do produto. A ACV fornece os impactos ambientais críticos do produto, o QFD relaciona isso aos requisitos do projeto e a TRIZ ajuda a encontrar soluções técnicas que sejam suficientemente boas para a melhoria dos impactos ambientais bem como o atingimento satisfatório os requisitos de qualidade do produto (PUGLIERI, 2010).

2.3.1.12 Uso combinado do QFDE e LCA

Sabendo que a análise do ciclo de vida do produto necessita de certo grau de informação sobre o mesmo, essa proposta consiste em aplicar o QFDE nos primeiros passos do desenvolvimento do produto, e então realizar a ACV na busca por melhoria de desempenho ambiental assim que o projeto atingir um estágio mais avançado (PUGLIERI, 2010).

Este método e o anterior propõem apenas a integração de outras ferramentas ao QFD e não um novo método de QFD, e segundo Puglieri (2010) ambos requerem um grande volume de dados de entrada e não apresentam informações sobre qualidade planejada e projetada.

2.3.1.13 QFD-DfE

Este método leva em consideração o custo, os requisitos ambientais do produto e ainda os requisitos do consumidor. Ou seja, deve ser aplicado nas fases onde são feitas as relações desses requisitos para a determinação do produto, dos componentes e da estratégia de fim de vida (PUGLIERI, 2010).

Como outros métodos apresentados, Puglieri (2010) argumenta que este método também não apresenta os itens de qualidade planejada e qualidade projetada, e destaca que o processo de produção não é considerado pelos autores.

2.3.1.14 QFD de Wozniak e Sedek

Esse QDF procura solucionar os problemas ecológicos mais cruciais do produto com base em informações sobre seu impacto ambiental e seus requisitos técnicos. Sua aplicação é feita de forma análoga ao QFD convencional, porém leva em consideração os requisitos ecológicos e a estes são atribuídos pesos, e então os requisitos técnicos são relacionados a eles também por meio de pesos e os parâmetros que obtiveram maior resultado deverão ser priorizados (PUGLIERI, 2010).

Uma crítica ao método que Puglieri (2010) destaca é que este assemelha-se mais com uma matriz de relacionamento do que com um desdobramento da qualidade com foco no meio ambiente, pois os desdobramentos nas dimensões de confiabilidade, custo e tecnológicas não são abordadas.

2.3.1.15 QFD baseado no RSP

Esse QFD aplica a consciência ambiental ao projeto do produto por meio do modelo de serviço RSP (*Receive State Parameter*), que é composto por um conjunto

de conceitos que representam um serviço do ponto de vista do consumidor. Sua aplicação se dá pela atribuição de valores para cada um desses conceitos e permite avaliar frente ao usuário final qual deles é o mais importante para o desenvolvimento do produto (PUGLIERI, 2010)

Segundo Puglieri (2010), apesar do RSP representar a voz do consumidor, o efetivo consumidor final do serviço não tem uma participação na distribuição dos pesos dos itens da qualidade exigida e consultá-los poderia ser mais efetivo do que utilizar o RSP que pode exigir conhecimentos mais específicos do time de desenvolvimento.

2.3.1.16 Eco-QFD de Kuo et al.

Esse método programa a lógica *fuzzy* para diminuir a subjetividade do nível de importância dado pelo consumidor para cada requisito. Sua aplicação é semelhante ao QFD convencional, porém tem como saída informações mais precisas sobre os requisitos que devem ser priorizados pelos designers (PUGLIERI, 2010).

Como o método é baseado na lógica *fuzzy*, que é uma ótima ferramenta para a melhor ponderação dos dados, Puglieri (2010) destaca que pode haver uma dificuldade por parte dos *designers* visto que esta requer um nível elevado de conhecimento para sua aplicação.

2.3.1.17 Eco-QFD de Utne

Este método relaciona questões ambientais, de custos e requisitos de *stakeholders* em um QFD destinado ao projeto de navios de pesca. Permite focar nas necessidades das partes interessadas e encontrar o nível de importância de cada uma delas. Os requisitos adotados são risco de acidentes, rentabilidade, capacidade de captura, emissões causadoras de efeito estufa e acidificação entre outros fatores relevantes ao contexto. Os tipos de embarcação recebem nota de 1 a 5 para cada um dos requisitos e então os mesmos requisitos são relacionados a soluções técnicas, o que permite selecionar o melhor tipo de embarcação.

2.3.2 Métodos de QFD Ambiental Obtidos Pela Revisão Sistemática

Como resultado da revisão sistemática da literatura conduzida pelos autores do presente trabalho, foram encontradas na literatura mais 6 aplicações de QFD, para desenvolvimento sustentável de produto, do ano 2009 até outubro de 2017. Suas descrições são como se segue:

2.3.2.1 ECQFD (*Environmentally Conscious QFD*)

Este método consiste em quatro etapas. A primeira é a identificação dos componentes do design do produto, a segunda é a consideração dos requisitos de engenharia sob a abordagem tradicional e ambiental, a terceira é a busca pela melhoria do desempenho ambiental dos componentes e a quarta a determinação da velocidade de melhoria e dos efeitos das mudanças feitas no design (RATHOD G.; VINODH S., 2011)

A aplicação deste QFD é feita de forma análoga ao QFD convencional, e inicia-se pela identificação da voz do cliente (VOC) e das métricas de engenharia (EM) para os componentes do produto. Após essas definições, é feita uma relação desses dois fatores através das notas 1, 3 e 9 (menor relação para maior relação). O resultado da agregação dos fatores é o peso relativo da fase 1, e então na fase dois ele é levado em consideração juntamente com as características dos componentes e as métricas de engenharia, também relacionados pelos pesos 1, 3 e 9.

Na fase 3, é estimado o efeito das mudanças no design do ponto de vista ambiental, e então algumas opções podem ser criadas e avaliadas comparativamente. Por exemplo, uma opção pode levar em conta mais a voz do cliente, e outra pode levar mais em conta os componentes críticos apontados pela fase 2.

A fase 4 consiste em apenas traduzir os efeitos das mudanças de design em requisitos de qualidade.

2.3.2.2 LCA e Function-Component Matrix com E-QFD

Essa ferramenta analisa o impacto ambiental de cada função do produto. A proposta é determinar a partir dos produtos existentes qual sua estrutura, e analisar os impactos ambientais de cada componente e suas características. A partir disso, a matriz Função – Componente é criada, onde para cada componente será preenchido um fator de correlação com cada função, obtendo o impacto total de cada um dos componentes (DEVANATHAN et. al., 2010).

É possível identificar quais os componentes críticos do produto, ou seja, que causam maior impacto adverso no ambiente, logo a voz do cliente ao ser inserida no E-QFD terá também o peso da saída dessa tabela para auxiliar na determinação do componente do produto mais crítico e que deverá ser redesenhado

2.3.2.3 QFD com Modularidade para o Fim de Vida de Família de Produtos

O objetivo desse método é aumentar a variedade, reciclabilidade e reusabilidade de uma família de produtos. Para isso, os eco-módulos são obtidos a partir da análise do QFD estendido (QFDE para o design de uma família de produtos) e os eco-módulos para a família de produtos é identificada pelo *Design Structure Matrix* (DSM) com a lógica fuzzy. A família de eco-produtos é estabelecida pelos eco-módulos e o *Degree of Modular Variety* (DMV), no qual é calculada a partir do método QFD.

O método é dividido em 3 etapas. A primeira delas é expandir o QFD em QFDE para o design de uma família de produtos. A contribuição de cada componente para a família de produtos (DMV) é calculada. O segundo passo é, a partir do método DSM, identificar a variedade e atribuídos sustentáveis de cada componente. E por fim, a terceira etapa é estabelecer uma família de eco-produtos.

Todos os módulos são identificados e mensurados pelo DVM. Os módulos que possuem baixo DVM são os candidatos de módulos comum em uma família de produtos e os que possuem alto DVM são candidatos de uma variedade de módulos. Esse novo método, proposto por Suiran et al. (2015), foi desenvolvido com o objetivo de melhorar o desempenho de fim de vida de uma família de produtos.

2.3.2.4 Uso combinado de QFDE e *Fuzzy Analytic Hierarchy Process* (FAHP)

O objetivo do estudo proposto por Bereketli e Genevois (2013), é prover uma metodologia integrada no desenvolvimento de produto, na priorização da economia, qualidade e questões ambientais e na obtenção de melhorias para o ecodesign, de forma que contribua para a produção sustentável.

Para isso, é utilizada a metodologia do QFDE, não apenas refletindo os usuários finais, mas também os outros *stakeholders* (governo, recicladores, meio ambiente, fornecedores e etc.), no quesito de desenvolvimento sustentável de produto.

O QFDE é implementado no intuito de identificar as estratégias de melhoria em parâmetros relacionados com o desenvolvimento sustentável de produto. Em um QFDE de multi-aspecto, é crucial dar a prioridade correta para os *stakeholders*, levando em consideração que os resultados na casa da qualidade são pouco afetados pelos requisitos dos *stakeholders* (SR). Portanto, para encontrar os SR, é utilizada a técnica FAHP integrada ao QFDE com o objetivo de identificar os pesos dos *stakeholders* e auxiliar na priorização dos mesmos.

Com os resultados encontrados pela lógica FAHP, é implementado um QFDE de 3 fases no intuito de encontrar as estratégias de melhorias mais relevantes para um produto escolhido e aplicado um estudo de caso.

2.3.2.5 Uso combinado de QFDE com lógica *Fuzzy Dematel*, *Fuzzy Dematel* e *Fuzzy Analytic Network Process* (FANP)

O método proposto por Roghanian e Younesi (2015), tem como objetivo fazer a integração entre QFDE, lógica *Fuzzy Dematel* e *Fuzzy Analytic Network Process* (FANP) para o desenvolvimento sustentável de produto, no intuito de auxiliar as empresas a identificar o melhor design para produtos específicos.

Segundo os autores, a desvantagem do QFDE é a omissão da correlação entre atributos dos clientes e requisitos técnicos, como no caso do teto da matriz da casa da qualidade. Para isso, é proposta a utilização da lógica *Fuzzy Dematel* para preencher essa lacuna, complementado pelo algoritmo *Fuzzy Maximum Mean Dentropy* (MMDE), e o FANP é integrado ao QFDE como uma técnica de priorização pelo fato de ser de importância crucial a identificação dos pesos reais dos requisitos

técnicos, combinado com a lógica *Fuzzy Logarithmic Least Square Method* (LLSM), a qual é empregada para encontrar os pesos durante o processo FANP.

O modelo proposto ajuda os projetistas a determinar efetivamente os pontos-chaves de atributos do cliente e requisitos técnicos para o design e a manufatura sustentável dos produtos.

2.3.2.6 Uso combinado do ECQFD, TRIZ E AHP

O método proposto por Vinodh et al. (2014), tem como objetivo a combinação e integração das metodologias de ECQFD, TRIZ e AHP para uma abordagem de design voltada inovação e desenvolvimento sustentável de produto.

Primeiramente, é utilizado o ECQFD para identificar a voz do cliente e convertê-las para opções de design. Em seguida, essas opções de design são correlacionadas em uma matriz de contradição e as mudanças de configuração são incorporadas nas componentes, através da aplicação da TRIZ. Por fim, o melhor design é selecionado através da lógica AHP.

Os resultados do método proposto, indica uma viabilidade prática do modelo, no qual inclui tradução da voz do cliente, ferramenta de inovação de design e escolha da melhor opção de design entre os encontrados pelo método.

3 METODOLOGIA

Esta seção apresenta a base metodológica para a realização da pesquisa. Na primeira subseção são apresentadas as classificações da pesquisa quanto a abordagem, natureza, procedimentos e objetivos. Na segunda subseção são abordados os procedimentos para a condução da pesquisa.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Esse tópico tem como objetivo evidenciar as classificações da pesquisa quanto à abordagem, natureza, objetivos e procedimentos técnicos da pesquisa.

3.1.1 Abordagem Da Pesquisa

As pesquisas científicas podem ser classificadas quanto a sua abordagem em pesquisa qualitativa e quantitativa. A presente pesquisa possui uma abordagem qualitativa, pois embora exista a aplicação de um método de QFD ambiental no desenvolvimento de produto, o qual as necessidades dos clientes e requisitos de engenharia sejam traduzidas em números, não é utilizado técnicas e métodos estatístico para análise dos resultados (SILVA; MENEZES, 2005).

3.1.2 Natureza Da Pesquisa

A natureza de uma pesquisa pode ser classifica em pesquisa pura ou aplicada. De acordo com Gil (2002), a pesquisa pura tem como objetivo a geração de conhecimentos novos de forma que contribuía com os conhecimentos já existentes. Já a pesquisa aplicada tem como objetivo, a partir de maneiras diferentes ou mais eficientes, a geração de novos conhecimentos a partir dos já existentes na literatura.

Dessa forma, a pesquisa realizada é classificada em pesquisa aplicada, pois tem como objetivo a aplicação de conhecimentos já desenvolvidos, no intuito de analisar os resultados e propor melhorias a partir dos mesmos.

3.1.3 Objetivos Da Pesquisa

Quanto aos objetivos, as pesquisas são classificadas em exploratória, descritiva e explicativa. De acordo com Gil (1991), a pesquisa exploratória tem como objetivo proporcionar familiaridade com o problema, envolvendo levantamento bibliográfico e estudo de caso. Dessa forma, a pesquisa é classificada como pesquisa exploratória.

3.1.3.1 Procedimentos técnicos da pesquisa

Em relação aos procedimentos técnicos da pesquisa, de acordo com Gil (1991), as pesquisas podem ser classificadas em pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, pesquisa experimental, levantamento, estudo de caso, pesquisa ex-post-facto, pesquisa-ação e pesquisa participante.

A pesquisa bibliográfica é realizada a partir do levantamento de material publicado na literatura, sendo constituída de livros e artigos de periódicos. Já a pesquisa-ação é aplicada quando existe a associação com a resolução de um problema coletivo e os pesquisadores são representativos no problema envolvido (GIL, 1991).

Dessa forma, a pesquisa é caracterizada por pesquisa bibliográfica e pesquisa-ação, pois é feito o levantamento dos métodos de QFDs ambientais já desenvolvidos e aplicação em um produto, com objetivo de identificar pontos de melhorias no desempenho ambiental.

3.2 PROCEDIMENTOS DA PESQUISA

Nesta sessão são apresentadas as etapas realizadas para atingir o objetivo da pesquisa. As atividades gerais foram divididas em 4 fases, que estão descritas na Figura 7.

Figura 7 – Fases do desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Autoria própria

A primeira fase representa uma contextualização sobre os temas “desenvolvimento de produto” e “ecodesign”, desde as primeiras definições até os dias atuais, através de uma pesquisa exploratória. O objetivo dessa fase foi tomar conhecimento sobre os métodos de desenvolvimento de produto e ecodesign através do levantamento dos modelos propostos pelos autores de referência no assunto.

A segunda fase consiste na análise do Estado da Arte sobre métodos de QFDs ambientais utilizados para desenvolvimento de produtos sustentáveis. A pesquisa foi realizada nas bases de dados *ScienceDirect* e *Web of Science* utilizando-se as *strings* “ECODESIGN + QFD” e “DESIGN FOR ENVIROMENT + QFD”. O método utilizado para filtragem e seleção dos artigos foi baseado no RBS *Roadmap* que foi proposto por Conforto et al. (2011), o qual tem como objetivo a sistematização do procedimento de revisão sistemática voltado especificamente para pesquisas na área de desenvolvimento de produtos. Esse método é constituído de três fases, sendo elas entrada, processamento e saída.

Na etapa de entrada foram definidos os itens necessários para a aplicação do RBS *Roadmap*, que são o problema e objetivo da pesquisa, as strings de busca, os critérios de inclusão e classificação bem como os métodos e ferramentas. Todas essas informações foram todos explicitadas no quadro 1.

Item	Descrição
1. Problema	Quais os métodos de QFD de ecodesign publicados entre 2010 e 2017?
2. Objetivo	Identificar os métodos de QFD para ecodesign publicados entre 2010 e 2017
3. <i>Strings</i> de busca	“ECODESIGN + QFD” e “DESIGN FOR ENVIROMENT + QFD”
4. Critério de inclusão	O artigo em questão deve apresentar um método de QFD ambiental para desenvolvimento de produto
5. Critério de classificação	O artigo em questão deve estar disponível para acessos através das bases disponibilizadas pela universidade
6. Métodos e ferramentas	O horizonte temporal da pesquisa será de 2010 à 2017, e os resultados serão compilados em uma planilha de Excel.

Quadro 1 - Itens da Etapa de Entrada

Fonte: Autoria Própria

Após definidos os itens de entrada, foi possível dar início à pesquisa propriamente dita, que no método de Conforto et al. (2011) é chamada de etapa de processamento.

A etapa de processamento tem com objetivo a busca, análise dos resultados e documentação. A primeira busca considerando os critérios da etapa de entrada retornou 9 resultados na base *Web of Science* e 148 artigos na base *ScienceDirect*. Em seguida, é aplicado três filtros.

- Filtro 1: Leitura do título, resumo e palavras-chave.
- Filtro 2: Leitura da introdução e conclusão.
- Filtro 3: Leitura completa do artigo.

No filtro 1, foram selecionados 15 artigos nas duas bases. No filtro 2, esse número foi reduzido para 7. Por fim, após a leitura completa dos artigos, 6 foram documentados e selecionados para a pesquisa.

A saída consiste na criação de um repositório de artigos relacionados a métodos de QFDs ambientais para o desenvolvimento de produto, o qual compila desenvolvimentos e aplicações desses métodos em estudos de casos.

A terceira fase se dá pela avaliação e seleção quanto à qual método possui melhor aplicabilidade, em relação ao esforço de aplicação do mesmo bem como a abrangência e qualidade de seu resultado. O critério de avaliação dos métodos apresentados foi baseado no método proposto por Puglieri (2010), que consiste em verificar qual método é mais adequado ao uso considerando seu potencial de benefício ambiental e aplicabilidade (operação).

Por fim, a quarta etapa compreende a aplicação do método definido na terceira fase. Definiu-se por limitações de tempo e recursos que será percorrido sobre os cinco componentes mais bem pontuados do QFD. A aplicação foi realizada na empresa do setor automobilístico, no dia 27 de abril de 2018, na região de Ponta Grossa, no estado do Paraná. Para isso, foi agendada uma reunião composta por membros de diversas áreas da empresa, como engenheiros que atuam no desenvolvimento de produto, gestão de projetos e de alteração do produto, manufatura, qualidade, e gestão industrial que, junto aos pesquisadores, auxiliou no levantamento das informações, discussões e obtenção dos resultados.

Com o objetivo de considerar todo o ciclo de vida do produto escolhido, foi incluída uma nova ferramenta de apoio ao método de QFD utilizado. A ferramenta escolhida foi a *Life Cycle Stakeholder*, que tem como objetivo identificar as partes interessadas ao longo do ciclo de vida e suas necessidades e expectativas em relação ao produto (UNEP, 2017). Isso permite gerar *inputs*, isso é, a voz dos *stakeholders*, para o método de QFD, considerando todo o ciclo de vida. A *Life Cycle Stakeholder* é dividida em 4 categorias:

- 1) Cadeia de suprimentos: Partes interessadas que promove os insumos e serviços para o produto/empresa.
- 2) Clientes: Partes interessadas que compram o produto/serviço.
- 3) Interesses profissionais: Partes interessadas que possuem atividades profissionais que podem impactar o produto/negócio.
- 4) Interesses pessoais: Partes interessadas que não possuem interesses profissionais mas possuem interesses pessoais nos impactos gerados.

Após a aplicação do método escolhido, foi realizada uma análise crítica dos resultados encontrados. Com isso, foi possível responder a pergunta problema do estudo.

4 RESULTADOS

Após a apresentação das ferramentas disponíveis na literatura, torna-se necessário a determinação de qual delas será aplicada. Essa seleção representa a terceira fase da metodologia, a qual consiste na avaliação e seleção quanto à qual método possui o melhor potencial de benefício ambiental e de aplicabilidade. Para isso, foi criado um quadro que relaciona todas as 23 possibilidades com os requisitos atendidos por cada uma delas, facilitando a visualização de suas qualidades e fraquezas.

Os requisitos relacionados abaixo foram determinados a partir da leitura do trabalho de Puglieri (2010), o qual permite notar que, grande parte das ferramentas apresenta alguns tipos de fraquezas. Dessa forma, como critérios para a seleção de um método de QFD de ecodesign para aplicação na empresa, foram definidos para que se agreguem as fraquezas:

- Possibilidade de ser aplicada sem a necessidade de treinamentos extensos e custosos;
- Dispensam a necessidade de compra de *softwares* específicos e modelagem matemática que seja complexa dada às competências de um *designer* de produto;
- Permite benefícios ambientais frente à aplicação de um QFD tradicional;
- Considere as necessidades dos *stakeholders* ao longo do ciclo de vida.

A partir de tais critérios, foi possível elaborar o quadro 2.

MÉTODOS	Dispensa treinamentos específicos	Não necessita de softwares de modelagem matemática	Não é apenas uma simples adaptação do QFD original	Inclui todos os <i>Stakeholders</i>
QFDE	x	x	x	x
Environmental QFD			x	x
QFD de Hochman e O'Connel	x	x		x
ECO QFD de Ernzer e Birkhofer		x	x	x
GQFD	x	x		x
3D-QFDE			x	
Eco-VoC	x	x	x	
EI2QFD			x	
GreenQFD-II		x	x	x
IGQFD	x	x	x	
Uso combinado de QFD, LCA e TRIZ	x	x		
Uso combinado de QFD e LCA	x	x		
QFD-DfE	x	x	x	
QFD de Wozniak e Sedek	x	x		
QFD baseado no RSP		x	x	
Eco-QFD de Kuo et. al.				x
Eco-QFD de Utne		x		
ECQFD	x	x	x	
LCA e Function-Component Matrix+E-QFD			x	x
QFD com modularidade para Fim de Vida			x	x
QFDE+FAHP			x	x
QFDE+FANP			x	x
ECQFD, TRIZ e AHP			x	x

Quadro 2 - Relação Entre as Ferramentas

Fonte: Autoria Própria

Os resultados permitem visualizar a grande vantagem que a ferramenta 1, isto é, o QFDE tem sob as outras, sendo a única que atende os quatro requisitos propostos. Sendo assim, esta foi então a ferramenta escolhida para ser aplicada neste trabalho.

Após a seleção, é possível realizar a parte prática do trabalho, ou seja, aplicar a ferramenta selecionada em um produto crítico na indústria de veículos pesados, o motor.

Foi realizada uma visita *in loco* por parte dos autores do presente trabalho na indústria do produto escolhido, uma indústria de veículos pesados no estado do Paraná. Essa visita foi importante para os autores conhecerem mais sobre o produto bem como o processo de manufatura que ele é submetido até o produto final.

Após a visita a linha de montagem da fábrica, foi realizada um *benchmarking / brainstorming* com profissionais que estão diretamente em contato com o produto. Foram selecionados estrategicamente profissionais das áreas de desenvolvimento de produto, qualidade de planta, gestão de projetos, gestão de alteração de produto, engenharia de manufatura e engenharia industrial, com o objetivo de ter uma visão de todo o ciclo de vida do produto, gerando inúmeros ganhos nas discussões e aplicação da ferramenta.

Antes do preenchimento da ferramenta do QFDE, foi utilizada a ferramenta *Life Cycle Stakeholder*, com o objetivo de mapear todas as partes interessadas ao longo do ciclo de vida do motor. Esse mapeamento serviu para dar entrada a voz do cliente (VoC) no QFDE, considerando como cliente não apenas o usuário final do produto, mas sim, todas as partes interessadas ao longo do ciclo de vida. Essa ferramenta possui quatro quadrantes para o mapeamento das partes interessadas: Cadeia de suprimentos, Clientes, Interesses profissionais e Interesses pessoais. No *Brainstorming*, foram levantados os *stakeholders*, conforme o quadro 3.

Supply Chain	Customers	Professional Interest	Personal Interest
Mineração	Produção	Governo	Sociedade em geral
Indústria de Insumos básicos (Metais Ferrosos, Metais não Ferrosos, Não metálicos, Outros (vidros, tintas, resinas))	Donos de Transportadoras	Sindicatos	Residentes próximos à fábrica
Fornecedor de peças de Usinagem	Motoristas	Universidades	
Fornecedor de peças de Fundição	Concessionárias	Laboratórios de Pesquisa e Desenvolvimento	
Fornecedor de partes elétricas	Remanufatura	ANFAVEA (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores)	
Fornecedor de Software	Recicladoras		
Fornecedor de Polímeros	Disposição Final		
Transportadoras			
Desenvolvedores de embalagem			
Importadoras			

Quadro 3 – Partes Interessadas
Fonte: Autoria Própria

A partir da definição dos *stakeholders*, foi possível aplicar a primeira fase do QFDE. Para isso foram levantadas as VoCs ambientais para alimentar a matriz do QFDE, bem como as métricas de engenharia, como pode-se observar nos quadros 4 e 5.

Life Cycle Stakeholder	Voz do Cliente
Supply Chain	Uso de matéria prima de qualidade
	Uso de materiais leves
	Uso de materiais recicláveis
	Uso de materiais reutilizáveis
	Materiais de fácil manuseio
	Aplicação de logística reversa dos componentes
	Uso de embalagem retornáveis
	Consolidação de cargas no abastecimento de peças
	Menor número de componentes
	Menor dimensão dos componentes
	Otimização e centralização dos processos produtivos
Customers	Produto econômico
	Produto leve
	Reparabilidade dos componentes
	Modularidade dos componentes
	Produto de fácil montagem
	Produto de fácil manutenção
	Produto com longo ciclo de vida
	Produto com alta confiabilidade
	Uso da incineração para geração de energia
Professional Interest	Produto com baixas emissões de poluentes
	Parcerias para pesquisa e desenvolvimento
	Utilização de processos menos poluentes na manufatura das peças
Personal Interest	Região livre de poluentes
	Garantia de segurança no local da instalação da fábrica do produto

Quadro 4 – Voz do Cliente
Fonte: Autoria Própria

Métricas de Engenharia
Peso
Volume
Número de componentes
Número de tipos de materiais dos componentes
Qualidade dos componentes
Toxicidade das peças
Consumo total de energia na manufatura do produto
Resistência mecânica das peças
Durabilidade
Tempo de decomposição
Eficiência energética
Índice de emissões do produto final
Montabilidade
Reciclabilidade dos materiais
Massa de poluentes gerados ao longo do ciclo de vida

Quadro 5 – Métricas de Engenharia

Fonte: Autoria Própria

Em seguida, foram analisadas as VoCs e atribuído um “peso do cliente” para cada uma delas, baseado na experiência e intuição dos profissionais presentes. Esse peso varia entre 9 (Muito importante), 3 (Importante) e 1 (Relativamente importante).

Após levantamento das VoCs e métricas de engenharia foi feito o preenchimento da relação entre VoCs e métricas de engenharia, atribuindo pesos que variam entre 9 (Relação forte), 3 (Relativamente forte), 1 (Relação fraca) ou vazio (Nenhuma relação). A partir disso, foi calculado o resultado da multiplicação entre peso do cliente e interação entre as VoCs e métricas de engenharia, resultando no peso relativo. A matriz da fase um do QFDE pode ser observada no Apêndice 1 desta pesquisa.

A segunda fase do QFDE consiste na interação entre métricas de engenharia com componentes do produto. Para isso, no *brainstorming*, foram definidos os principais componentes do motor, de modo que os mesmos representassem a funcionalidade total do produto, de acordo com o quadro 6.

Componentes do Produto
Bloco do motor
Cabecote
Pistão
Biela
Virabrequim
Comando de válvula
Balancin
Válvulas
Filtros
Turbina
Eletrônicos
Óleos
Líquidos Refrigerantes
Bombas
Compressor
Carter
Alternadores
Injetores
Coletores
Polias

Quadro 6 – Componentes do Produto
Fonte: Autoria Própria

Para realizar o cálculo, foram definidas as pontuações das relações entre métricas de engenharia e componentes do produto, da mesma forma que a fase um, e assim multiplicado pelo peso relativo obtido na fase anterior do QFDE. A fase dois do QFDE pode ser observada no Apêndice 2

Como resultado, foram encontrados os principais componentes do motor para aplicação dos conceitos de ecodesign no desenvolvimento de produto, ou seja, quais componentes possuem maiores oportunidades de melhoria ambiental. Foi então elaborado o diagrama de Pareto dos componentes e suas respectivas pontuações, como mostra o gráfico 1.

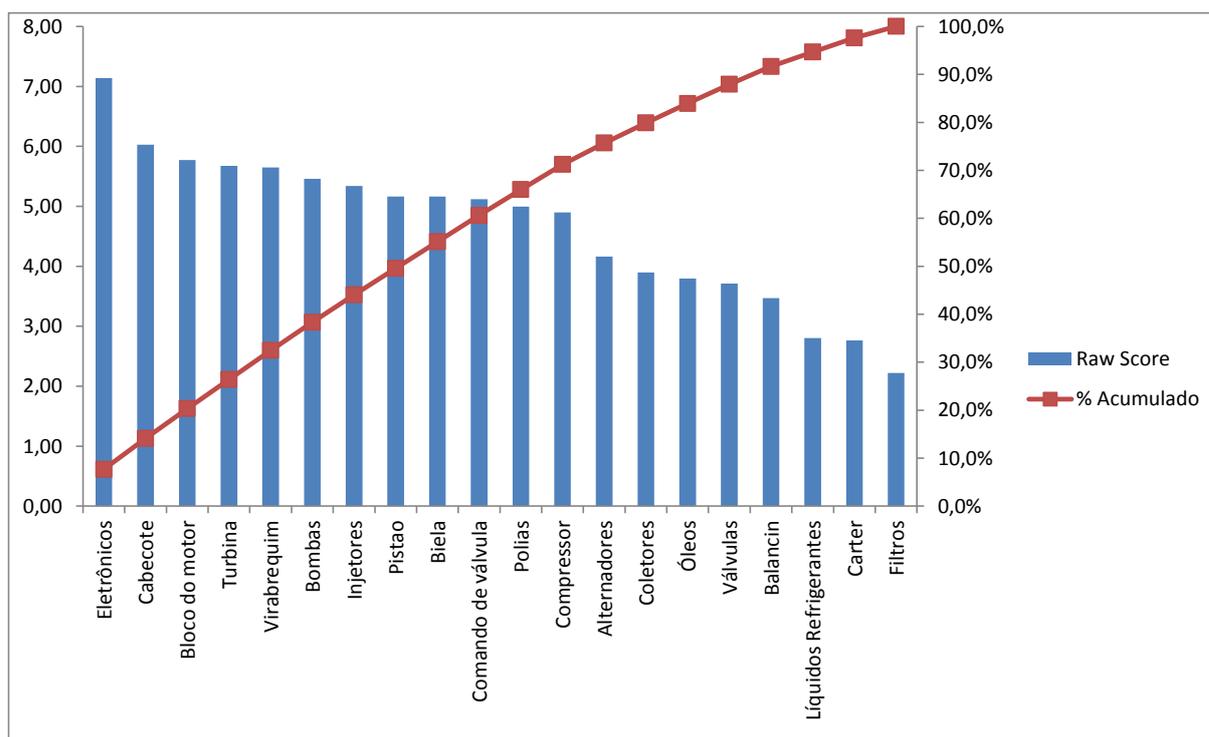


Gráfico 1 - Diagrama de Pareto
Fonte: Autoria Própria

4.1 OPORTUNIDADES DE MELHORIA

Com a ferramenta QFDE aplicada, foi possível identificar quais os principais componentes que gerariam ganhos significativos na aplicação no ecodesign. Foram então selecionados os componentes eletrônicos (7,7%), cabeçote (6,5%), bloco do motor (6,2%), turbina (6,1%) e virabrequim (6,1%), por serem os componentes mais bem pontuados, e discutidos no *brainstorming* possíveis ideias para conseguir melhorias no desempenho ambiental de cada um deles.

4.1.1 Eletrônicos

Os eletrônicos são responsáveis pelo gerenciamento de informações do produto e são componentes que representam toda a parte elétrica do motor, como chicotes, unidade eletrônica, sensores e conectores. Na produção desses componentes, são utilizados condutores de cobre na composição e como oportunidade de melhorias ambientais poderia ser utilizado outro material tanto

condutor quanto, de preço inferior, mais leve e resiste melhor à deformação. Além disso, os materiais utilizados nos componentes eletrônicos (cobre, plástico e elementos químicos) são altamente recicláveis, ou seja, é possível fazer com que esses materiais voltem à cadeia de produção, gerando ganhos ambientais significativos.

Essas ideias relacionadas ao ecodesign reduzem o custo do produto final e aumentam o ciclo de vida do produto.

4.1.2 Cabeçote

O cabeçote direciona toda a função do motor, ou seja, a cabeça do motor. Esse componente é responsável por conduzir a entrada e saída de ar e combustível dos cilindros localizados no bloco do motor, abrigando as válvulas de admissão e escape, bem como as molas de retorno de abertura, os retentores, as chavetas e balancins. É uma peça com um peso elevado, feita de ferro fundido. Como melhoria ambiental, seria possível realizar a troca de material do cabeçote, utilizando um material mais leve que o ferro fundido, diminuindo o peso do produto final e o consumo de combustível. Além disso, poderia ser realizada a otimização do coletor de admissão presente no componente, a partir de alterações no design e acabamentos, para melhorar o fluxo de ar e conseqüentemente diminuir o consumo do produto final. O componente é composto por material que pode ser reciclado quando chega no fim do seu ciclo de vida e utilizado novamente na indústria, gerando ganhos ambientais. Em relação ao transporte do produto até a manufatura, é possível substituir embalagens convencionais por embalagens retornáveis ou embalagens biodegradáveis, diminuindo a geração de resíduos no transporte.

4.1.3 Bloco do Motor

O bloco do motor é a parte interna do produto, representando o corpo do motor. É a maior parte do conjunto de componentes responsável por fazer a sustentação do produto, abrigando os pistões, bielas e virabrequim, além de cilindros e dutos tubulares, que fazem a circulação de água de arrefecimento e óleos de lubrificação. Assim como o cabeçote, é um componente que representa uma

parcela considerável do peso total do motor, feito de ferro fundido. Como melhoria ambiental, poderia substituir o ferro fundido por material mais leve, impactando em benefícios na fase de uso, além da possível redução de volume e custo do produto.

Em relação ao transporte até a indústria, é possível, como no caso do cabeçote, substituir embalagens convencionais por embalagens retornáveis ou embalagens biodegradáveis, diminuindo a geração de resíduos no transporte. Os componentes do bloco podem voltar também para a cadeia de produção, pois são altamente recicláveis.

Outra melhora ambiental para o bloco do motor que surgiu no *benchmarking*, foi à aplicação da tecnologia *downsizing*, ou seja, redução de tamanho. Essa tecnologia significa promover a redução da capacidade cúbica do motor, melhorar a eficiência energética e redução de emissões sem comprometer a potência e o desempenho do motor. Essa tecnologia poderia contribuir tanto para fatores econômicos quanto ambientais.

4.1.4 Turbina

A turbina do motor é responsável por aumentar a quantidade de ar admitida pelo motor, tornando a queima de combustão mais rica. Como melhoria ambiental, poderia utilizar uma tecnologia de variabilidade, ou seja, tornar variável a quantidade de ar que é transferida para dentro do motor, gerando ganhos de tamanho e eficiência.

Como se trata de um produto crítico e que não pode ser contaminado, por exemplo, por poeira, a turbina recebe algumas proteções de plástico que evitam o contato externo com o interno do produto, sendo descartadas quando o motor é conectado ao veículo. Como melhoria, essas proteções poderiam ser reutilizáveis ou feitas com um material menos agressivo que o polímero, como por exemplo, proteções biodegradáveis.

Outro ponto de melhoria seria a substituição de rotores produzidos de titânio para rotores de outro material mais leve e mais barato, para diminuição do peso, volume e custo do produto final. Além disso, os materiais que compõe a turbina são totalmente recicláveis.

4.1.5 Virabrequim

O virabrequim do motor é responsável por transformar a energia gerada pela queima de combustível em torque, ou seja, é responsável por transformar movimento linear em rotativo. É conhecido como árvore de manivelas, se ligando aos pistões, que se movimenta para a produção de energia, para que o veículo seja capaz de se mover.

O componente é muito pesado e trabalha em uma zona muito quente do veículo. Como melhoria, seria possível a troca do material que compõe o produto, por algum que seja mais leve, mais barato, e possua resistência a altas temperaturas. Outro ponto levantado no *brainstorming* é utilizar a tecnologia sem contrapeso do virabrequim, responsável por balancear as vibrações oriundas da combustão e evitar que haja danos ao sistema, a partir da mudança de design, possibilitando a redução no peso do componente de 30% a 40% e aumentando a eficiência do motor.

O virabrequim precisa estar em lubrificação constante para que tenha um bom desempenho. Como melhoria, poderia aperfeiçoar o design do sistema de lubrificação, pois hoje só existe um canal e duplicando-o gerariam ganhos em eficiência e aumento do ciclo de vida.

Como nos demais componentes selecionados, o material que compõe o virabrequim é altamente reciclável, gerando ganhos ambientais a partir do retorno dos materiais à cadeia, bem como a utilização de embalagens retornáveis ou biodegradáveis no transporte do produto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do presente trabalho possibilitou uma análise de um produto crítico do setor automobilístico, o motor, sob a perspectiva do ecodesign. Além disso, propôs o uso combinado de duas ferramentas: *Life Cycle Stakeholders* e QFDE. A primeira para identificar os clientes durante todo o ciclo de vida do produto e a segunda, escolhida após uma extensiva pesquisa bibliográfica e comparações com outros QFDs para ecodesign, foi utilizada para identificar quais os componentes desse produto tem o maior impacto ambiental sobre ele, para auxiliar na identificação de potenciais pontos de melhoria.

Para que fossem atingidos os objetivos desse trabalho, foi realizada uma visita *in loco* dos autores a fábrica de motor para veículos pesados, seguido de um *benchmarking / brainstorming* com profissionais que estão diretamente em contato com o produto final, atuantes nas áreas de desenvolvimento de produto, qualidade de planta, gestão de projetos, gestão de alteração de produto, engenharia de manufatura e engenharia industrial, com o objetivo de ter uma visão de todo o ciclo de vida do produto, gerando inúmeros ganhos nas discussões e aplicação da ferramenta.

Apesar do desconhecimento das ferramentas por parte dos profissionais presentes, todos foram capazes de participar da discussão, evidenciando sua fácil aplicabilidade e interpretação com a possibilidade de identificação dos clientes e suas vozes como entrada para o QFD, bem como aplicação do mesmo.

Dada importância do assunto, os autores recomendam a aplicação dessas ferramentas em outros componentes com o objetivo de identificar, dentro de todo o processo, quais os outros pontos de melhoria na cabine, sistemas de câmbio, iluminação e tração, comparados com os possíveis ganhos descritos neste trabalho.

Como resultado, foi possível identificar os principais componentes que gerariam ganhos significativos na aplicação do ecodesign. Foram então selecionados os componentes eletrônicos (7,7%), cabeçote (6,5%), bloco do motor (6,2%), turbina (6,1%) e virabrequim (6,1%), e discutidos no *brainstorming* possíveis ideias para conseguir melhorias no desempenho ambiental de cada um deles. Assim, foi possível atingir o objetivo do trabalho e responder a pergunta problema do estudo.

REFERÊNCIAS

AMARAL, D. C. **Arquitetura para gerenciamento de conhecimentos explícitos sobre o processo de desenvolvimento de produto**. 2002. 229 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira**. 1 jun. 2012. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/anuario.html>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14062**: Gestão ambiental – Integração de aspectos ambientais no projeto e desenvolvimento do produto. Rio de Janeiro, 2004.

AKAO, Y.; MAZUR, G. H. The leading edge in QFD: past, present and future. **International Journal of Quality & Reliability Management**: Operations, Logistics & Quality, Tóquio, Japão, v. 20, n. 1, p. 20-35, mai. 2003.

BACK, N. et al. **Projeto integrado de produtos**: planejamento, concepção e modelagem. Barueri: Malone, 2008.

BAKKER, C. **Environmental information for industrial designers**. 1995. 223f. Tese (Doutorado) – Delft University of Technology. Delft, Holanda, 1995.

BARBOSA, G. F. **Desenvolvimento de um modelo de análise para implantação de automação na manufatura aeronáutica, orientado pelos requisitos das metodologias de Projeto para Excelência (DFX - Design for Excellence) e Produção Enxuta (Lean Manufacturing)**. 2012. 332p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012.

BIERMA, T.J; WATERSTARAAT, F.L; OSTROSKY, J. **Chapter 13: Shared Savings and Environmental Management Accounting**. The Green Bottom Line. Inglaterra. Greenleaf Publishing, 1998.

BRALLA, J. G. **Design for excellence**, McGraw-Hill, Inc., New York, NY, USA, 1996. 327p.

BEREKELI, I.; GENEVOIS, M.E. An integrated QFDE approach for identifying improvement strategies in sustainable product development. **Jornal of Cleaner Production**, v. 54, n. 11, p. 188-198, 2013.

CLARK, K.B.; FUJIMOTO, T. **Product development performance: strategy, organization and management in the world auto industry**. Boston-Mass., Harvard Business School Press, 1991.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. D. **Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos**. CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO - CBGDP. 8., 2011, Porto Alegre. **Anais**. Porto Alegre: UFRGS, 2011. p.1-12.

COOPER, R. G. **Winning at new products: accelerating the process from idea to launch**. New York: Addison-Wesley Publishing, 1993.

CRUL, M. R. M.; DIEHL, J. C. **Design for Sustainability: A practical approach for developing economies**. Delft, Holanda: United Nations Environment Programme, 2006.

DEVANATHAN, S.; RAMANUJAN, D.; BERNSTEIN, W. Z.; ZHAO, F.; RAMANI, K. Integration of Sustainability Into Early Design Through the Function Impact Matrix. **Journal of Mechanical Design**, Lafayette Oeste, Indiana, v. 132, p. 132-140, 2010.

FLORENZANO, M. C. **Gestão do desenvolvimento de produtos: estudo de casos na indústria brasileira de autopeças sobre divisão de tarefas, capacidade e integração interunidades**.1999. 135 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 1999.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1991.

Gil, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas S/A, 2002.

JOHANSSON, G. Success factors for integration of Ecodesign in product development: A review of state of the art. **Environmental Management and Health**, v. 13, n. 1, p. 98 –107, 2002.

LEWIS, H; GERTSAKIS, J; GRANT, T; MORELLI, N; SWEATMAN, A. **Design + environment - a global guide to designing greener goods**. United Kingdom: Greenleaf Publishing Ltd, 2001. p. 200.

MANZINI, E; VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de produtos Sustentáveis**. Os requisitos ambientais dos produtos industriais. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

PIGOSSO, D. C. A. **Integração de métodos e ferramentas de Ecodesign ao processo de desenvolvimento de produtos**. 2008. 167 f. Monografia (Graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

PUGLIERI, F. N. **Revisão e análise ambiental e operacional de métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA**. 2010. 180f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

RATHOD, G.; VINODH, S. Application of ECQFD for enabling environmentally conscious design and sustainable development in an electric vehicle. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 13, n. 2, p. 381-396, 2011.

ROGHANIAN, E.; YOUNESI, M. A Framework for Sustainable Product Design: A Hybrid Fuzzy approach Based on Quality Function Deployment for Environment. **Jornal of Cleaner Production**, v. 108, n. 15, p. 385-394, 2015.

ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F.A.; AMARAL, D.C.; TOLEDO, J.C.; SILVA, S.L.; ALLIPRANDINI, D.H.; SCALICE, R.K. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006.

SAKAO, T. A QFD-Centred design methodology for environmentally conscious product design. **International Journal of Production Research: Sustainable design and manufacture**, Valparaiso, Chile, v. 45, n. 18-19, p. 4143-4162, 2007.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 4 ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

SUIRAN, Y.; YANG Q.; TAO J.; XU X. Incorporating Quality Function Deployment with modularity for the end-of-life of a product Family. **Jornal of Cleaner Production**, v. 87, n. 8, p. 423-430, 2015.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Eco-i Manual: Eco-innovation implementation process**. 2017.

VAN WEENEN, J. C. Towards sustainable product development. **Journal of Cleaner Production**, v. 3, n. 1 – 2, p. 95 – 100, 1995.

VINODH, S; KAMALA, V; JAYAKRISHNA, K. Integration of ECQFD, TRIZ, and AHP for innovative and sustainable product development. **Applied Mathematical Modelling**, v. 38, n. 13, p. 2758-2770, 2014.

WHEELWRIGHT, S. C.; CLARK, K. B. **Revolutionizing product development: Quantum leaps in speed, efficiency and quality**. New York: The Free Press, 1992.

APÊNDICE A - QFDE Fase 1

QFD for Environment		Engineering Metrics															
		Peso	Volume	Número de componentes	Número de tipos de materiais dos componentes	Qualidade dos componentes	Toxicidade das peças	Consumo total de energia na manufatura do produto	Resistência mecânica das peças	Durabilidade	Tempo de decomposição	Eficiência energética do produto	Índice de emissões do produto final	Montabilidade	Reciclabilidade dos materiais	Massa de poluentes gerados ao longo do ciclo de vida	
Supply Chain	Uso de matéria prima de qualidade	9		3	9		9	9	9		3	3		3	3		
	Uso de materiais leves	3	3	3							9		3				
	Uso de materiais recicláveis	3		3			9			9				9	9		
	Uso de materiais reutilizáveis	3		3			9			9				9	9		
	Materiais de fácil manuseio	3	9										3				
	Aplicação de logística reversa dos componentes	1	3	3	3	1				9		9		9	9	9	
	Uso de embalagem retornáveis	1				1				9				9	9	9	
	Consolidação de cargas no abastecimento de peças	9															9
	Menor número de componentes	9	9	9				9		9		1		3			9
	Menor dimensão dos componentes	3	9	1			3			3				3			3
Customers	Otimização e centralização dos processos produtivos	3		1	9		9		1	1						9	
	Produto econômico	9		1	9	1		9	9	9	9	1				9	
	Produto leve	9	3	3							9			3			
	Reparabilidade dos componentes	3		3	9	1		9	9	3				3	9	9	
	Modularidade dos componentes	3	3	9			9		1	9	3	3		9	3	3	
	Produto de fácil montagem	9	9	9	9	3		9						9			
	Produto de fácil manutenção	9	9	9	9	3		9		1				9			
	Produto com longo ciclo de vida	9		3	9			9		9	3	3	1				3
	Produto com alta confiabilidade	9		1	9	9		9		9	9						
	Uso da incineração para geração de energia	3	9	9	9	9		1		3	9						9
Professional Interest	Produto com baixas emissões de poluentes	9	1	1	1	9		9			9			9	9		9
	Parcerias para pesquisa e desenvolvimento	3	1	1	1		9	3	9	9	9			9	9		9
	Utilização de processos menos poluentes na manufatura das peças	3	1	3	3				1					9	9		9
Personal Interest	Região livre de poluentes	9				3	9							9			9
	Garantia de segurança no local da instalação da fábrica do produto	9				3	9							9			9
Raw Score		459	387	414	459	603	428	468	606	405	363	441	423	279	540	657	6932
Relative Weight		0,066	0,056	0,060	0,066	0,067	0,062	0,068	0,067	0,058	0,052	0,064	0,061	0,040	0,078	0,095	1

APÊNDICE B - QFDE Fase 2

Phase 2

QFD for Environment		Component Characteristics																				
		Bloco do motor	Cabecote	Pistão	Biela	Virabrequim	Comando de válvula	Balancin	Válvulas	Filtros	Turbina	Elétronicos	Óleos	Líquidos Refrigerantes	Bombas	Compressor	Carter	Alternadores	Injetores	Coletores	Polias	
Engineering Metrics	Peso	9	9	9	9	9	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	3	3	
	Volume	9	9							3	3	3						3		3	3	
	Número de componentes		3						3	1	9	9								3	3	
	Número de tipos de materiais dos componentes								3	3	9	9			3							
	Qualidade dos componentes	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	3	3	9	9	3	9
	Toxicidade das peças											9	9									
	Consumo total de energia na manufatura do produto	9	9	9	9	9	9	3	3	1	9	9	9	3	9	9	3	9	9	9	9	9
	Resistência mecânica das peças	9	9	9	9	9	9	9	9	3	9	3				9	9	9	9	9	9	9
	Durabilidade	9	9	9	9	9	9	9	9	1	9	9	1	1	9	9	9	9	9	9	9	9
	Tempo de decomposição									9			9	9								
	Eficiência energética	3	3	9	9	9	9				9	9	3	9	9	9	9		3	9	1	
	Índice de emissões do produto final	3	3	3	3	3	3	3			9	9								9		
	Montabilidade	1	3	3	3	1	1	3	9	1	3	9	1			9				9	3	9
	Reciclabilidade dos materiais	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	1			9	9	9	9	3	9	9
	Massa de poluentes gerados ao longo do ciclo de vida	9	9	9	3	9	9	3	3	1	9	9	9	1	9	9	9	3	9	9	3	9
Raw Score	5,77	6,03	5,16	5,16	5,65	5,12	3,47	3,71	2,22	5,67	7,14	3,80	2,80	5,46	4,90	2,76	4,16	5,34	3,90	5,00	93,2	
Relative Weight	0,062	0,065	0,055	0,055	0,061	0,055	0,037	0,040	0,024	0,061	0,077	0,041	0,030	0,059	0,053	0,030	0,045	0,057	0,042	0,054	1	