UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

FABIO NEVES PUGLIERI

Revisão e análise ambiental e operacional de métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA

V. 1

São Carlos
2010

FABIO NEVES PUGLIERI

Revisão e análise ambiental e operacional de métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Processos e Gestão de Operações
Orientador: Prof. Dr. Aldo Roberto Ometto

V.1

São Carlos
2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

P978r

Puglieri, Fabio Neves
Revisão e análise ambiental e operacional de métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA / Fabio Neves Puglieri; orientador Aldo Roberto Ometto. -- São Carlos, 2010.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Área de Concentração em Processos e Gestão de Operações) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Ecodesign. 2. Critérios. 3. QFD. 4. FMEA. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Engenheiro **FÁBIO NEVES PUGLIERI.**

Dissertação defendida e julgada em 15.09.2010 perante a Comissão Julgadora:

APROVADO

Prof. Dr. **ALDO ROBERTO OMETTO – (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **DANIEL CAPALDO AMARAL**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **SERGIO LUIS DA SILVA**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Prof. Associado **AQUILES ELIE GUIMARÃES KALATZIS**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção

Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

Dedico este trabalho a todos que me auxiliaram, à minha família, à minha namorada e em memória de meu pai, Antônio Domingos Puglieri.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Aldo Roberto Ometto pela atenção dada aos anos de mestrado e confiança depositada em mim.

À CAPES pelo apoio financeiro concedido e auxílio prestado pelo programa PROCAD, permitindo me dedicar exclusivamente à pesquisa desenvolvida no mestrado.

Aos amigos e colegas do Grupo de Engenharia de Ciclo de Vida, do laboratório de Processos e Gestão de operações, do Núcleo de Manufatura Avançada (NUMA) e das disciplinas cursadas pelo período de convívio e aprendizado.

Aos professores Fernando Antônio Forcellini, Paulo Cauchick Miguel e Marcelo Gitirana e aos colegas do Grupo de Engenharia do Produto e Processo (GEPP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pelas recomendações para o desenvolvimento deste trabalho e pela recepção e convívio durante o mês de intercâmbio em Florianópolis.

Aos professores Daniel Capaldo Amaral e Sérgio Luís da Silva por terem aceitado participar desta banca e pelas sugestões dadas durante o exame de Qualificação.

À minha mãe, Nair Maria Neves Puglieri, que apesar das limitações sempre me incentivou a continuar estudando.

À minha namorada, Thaís Juliana Medeiros, pelo carinho, incentivo e apoio nos momentos de dúvidas.

Ao Santo Expedido e acima de tudo a Deus, que me permitiu superar todos os desafios e adversidades da vida.

RESUMO

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

A partir da década de 1990, iniciou-se uma difusão de métodos e ferramentas direcionadas à adequação ambiental de produtos, cuja aplicação é realizada em determinadas fases do seu desenvolvimento. Porém muitos destes métodos publicados não integram questões ambientais importantes, como a perspectiva de ciclo de vida, resultando muitas vezes no desenvolvimento de produtos ineficientes do ponto de vista do ecodesign. Assim, este trabalho tem por objetivo analisar alguns destes métodos de modo que possam garantir o desenvolvimento de produtos ambientalmente mais adequados. Para isto foi realizada uma revisão sistemática sobre requisitos para métodos de ecodesign, o que permitiu identificar características que o ecodesign deve atender, tanto do ponto de vista ambiental quanto do operacional. Por meio destes requisitos foram propostos critérios utilizados na análise de 19 métodos de ecodesign baseados no FMEA e no QFD. Como resultado da análise, identificou-se que a grande maioria dos métodos analisados não estão de acordo com o que a literatura sugere.

Palavras – chave: Ecodesign, Critérios, QFD e FMEA

ABSTRACT

Puglieri, F.N. **Environmental and operational review and analysis of ecodesign methods based on QFD and FMEA.** 2010. Texto de dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

During 1990s decade began a scattering of methods and tools aimed at the environmental suitability of products whose application is performed at certain stages of development. However, many of these published methods do not incorporate important environmental issues, the prospect of life cycle, often resulting in inefficient product development from the standpoint of ecodesign. This study aims to examine some of these methods to ensure the development of more environmentally suitable products. So it was carried out a systematic review of ecodesign requirements for methods, which allowed us to identify characteristics that these methods must meet from the environmental point of view and application. Through these requirements have been proposed criteria used in the analysis of 19 ecodesign methods based on FMEA and QFD. As a result of this analysis, it was identified that most part of the methods reviewed are not in agreement with literature suggestions.

Keywords: Ecodesign, Criteria, QFD e FMEA

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo de vida do produto e suas alternativas de fim-de-vida. Fonte: PIGOSSO, 2008 16
Figura 2. Etapas relacionadas ao desenvolvimento da dissertação 21
Figura 3. Modelo da matriz de análise dos métodos QFD e FMEA de ecodesign..... 26
Figura 4: Representação de uma matriz da qualidade. Adaptado de Akao (1996) 34
Figura 5. Passos para o estabelecimento da qualidade planejada..... 36
Figura 6. Definição para as correlações da matriz do QFD. Adaptado de Cheng e Melo Filho, 2007..... 38
Figura 7: Exemplo de matriz do QFD para o desenvolvimento de um frasco. Adaptado de Miguel (2008)..... 39
Figura 8: Exemplo da matriz CQ x CQ. Adaptado de Cheng e Melo Filho (2007)..... 40
Figura 9. Modelo conceitual do QFD. Adaptado de Cheng e Melo Filho, 2007 41
Figura 10. Representação do QFD de 4 fases. Adaptado de Miguel (2008)..... 43
Figura 11: Duas primeiras fases do QFDE de Masui et al. (2001)..... 48
Figura 12: Fase 1 do QFDE..... 49
Figura 13: Fase 2 do QFDE..... 50
Figura 14: Environmental QFD..... 53
Figura 15. Quantificação dos requisitos do Environmental QFD. Fonte: Kato e Kimura (2003) 54
Figura 16: Exemplo da matriz do QFD ambiental de Hochman e O'Connell aplicada ao projeto de um telefone móvel 56
Figura 17: Exemplo da matriz do Ecological Quality Function Deployment (Eco-QFD) para um aspirador de pó..... 58
Figura 18: Framework do método GQFD 60
Figura 19. Estrutura de aplicação do 3D-QFDE..... 62
Figura 20. Triângulo de 3D-QFDE que permite a comparação de requisitos de qualidade, ambientais e custo..... 63
Figura 21. Processo de extração da Eco-VOC 64
Figura 22. Matriz de relação entre as VOCs convencionais e ambientais como exemplo para um secador de cabelos 65
Figura 23. QFDE simplificado como exemplo para um secador de cabelos..... 65
Figura 24. Procedimento da Casa Ambiental 67
Figura 25: Exemplo da primeira casa ambiental relacionando requisitos ambientais da fase de uso com características do produto para um espremedor de laranja..... 67
Figura 26. Segunda casa ambiental relacionando requisitos ambientais com componentes dos produtos..... 68
Figura 27. Casa Verde (Ambiental)..... 71
Figura 28: Casa comparativa de conceitos 72
Figura 29: Estrutura da casa da qualidade e ambiental 74
Figura 30. Procedimento de aplicação do uso combinado do QFDE, LCA e TRIZ 76
Figura 31. Aplicação combinada do QFDE e do LCA no processo de projeto..... 77
Figura 32. Exemplo da Casa da Qualidade para componentes do QFD-DfE..... 78
Figura 33. Legenda do QFD-DfE..... 78
Figura 34. Estrutura do QFD de Wolniak e Sędek. Adaptado de Wolniak e Sędek, 2008 . 80
Figura 35. Avaliação das opções de serviço..... 82
Figura 36. Matriz de correlação do QFD para o escopo entre o mercado e o usuário final 83
Figura 37. Eco-QFD de Kuo et al. (2009) 85

Figura 38. Casa da Qualidade para respostas técnicas 88
Figura 39: Relações da matriz do Eco-QFD de Utne 89
Figura 40. Matriz comparativa entre QFDs ambientais e características do QFD tradicional 91
Figura 41. Formulário do FMEA: adaptado de Palady (1997)..... 94
Figura 42. Gráfico de áreas do FMEA 96
Figura 43. Exemplo de aplicação do FMEA de produto 97
Figura 44. Exemplo de E-FMEA..... 98
Figura 45. Diagrama de relação..... 101
Figura 46. Exemplo de aplicação da integração FMEA e Matriz 101
Figura 47. Critérios ambientais mais importantes segundo os especialistas entrevistados125
Figura 48. Critérios operacionais mais importantes segundo os especialistas entrevistados 125
Figura 49. Modelo de correlação entre os critérios ambientais e operacionais com os métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA..... 128
Figura 50. Análise dos métodos QFD e FMEA de ecodesign segundo critérios ambientais e operacionais 140
Figura 51. Gráfico comparativo entre *score* dos critérios ambientais e operacionais para os 19 métodos analisados 142
Figura 52. Relação entre métodos atendidos para conformidade e regulamentação..... 143
Figura 53. Relação entre métodos atendidos para impactos ambientais 144
Figura 54. Relação dos métodos atendidos para fases do ciclo de vida 144
Figura 55. Relação dos métodos que atenderam o requisito facilidade de uso 145
Figura 56. Relação dos métodos que atenderam o requisito operacional de custo 145
Figura 57. Relação dos métodos que atenderam o requisito operacional tempo..... 146
Figura 58. Relação dos métodos que atenderam o requisito operacional de validação..... 147
Figura 59. Relação dos métodos que atenderam o requisito sobre visualização de benefícios..... 147
Figura 60. Relação dos métodos que atenderam o requisito sobre análise de *trade-offs* .. 148

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Métodos e atividades relacionadas ao desenvolvimento da dissertação..... 22
Tabela 2. Strings de pesquisa para métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA..... 23
Tabela 3. Strings de pesquisa para critérios e requisitos de métodos de ecodesign..... 23
Tabela 4. Bases de dados pesquisadas na revisão sistemática..... 24
Tabela 5. Pesos atribuídos aos critérios ambientais seguindo ordem de importância..... 26
Tabela 6. Pesos atribuídos aos requisitos operacionais seguindo ordem de importância.... 26
Tabela 7. Escala de Likert adotada para definir as correlações entre os métodos e os critérios 27
Tabela 8. Conversão da VOC em Qualidade Exigida para um projetor de imagens. Adaptado de Cheng e Melo Filho (2007) 35
Tabela 9. Voz do consumidor (VOC) ambiental do QFDE 46
Tabela 10. Métricas de engenharia (ME) do QFDE..... 47
Tabela 11. Cálculo das melhorias de qualidade (QI), ambientais (EI) e custo (CI)..... 62
Tabela 12. Relação entre percentual de impacto do Eco-indicator com o QFD 68
Tabela 13. Critérios e requisitos ambientais e operacionais para métodos de ecodesign . 111
Tabela 14. Agrupamento de palavras-chave para critérios e requisitos ambientais..... 114
Tabela 15. Agrupamento das palavras-chave para definição dos requisitos operacionais 115
Tabela 16. Requisitos/critérios ambientais..... 117
Tabela 17. Requisitos/critérios operacionais..... 118

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV/LCA – Avaliação do Ciclo de Vida/Life Cycle Analysis

CIRP - *College International pour la Recherche en Productique*

DfE – Design for Environment

ECV – Engenharia do Ciclo de Vida

E-FMEA – Environmental Failure Mode and Effect Analysis

EI99 – Eco-indicator 99

EPN - Environmental Priority Number

FMEA – Failure Mode and Effect Analysis

GQFD – Green Quality Function Deployment

HoE – Casa ambiental

HoQ – Casa da qualidade

IGQFD – Integrated Green Quality Function Deployment

LCC – Life Cycle Costing

P+L – Produção mais Limpa

PDP – Processo de Desenvolvimento de Produtos

QFD – Quality Function Deployment

QFDE – Quality Function Deployment for Environment

RoHS – Restriction of Certain Hazardous Substances

RSP – Receive State Parameter

SDP – Sistema de Desenvolvimento de Produtos

TRIZ – Teoria das soluções inventivas

VoC – Voz do consumidor

VoE – Voz do meio ambiente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS 15
2 MATERIAIS E MÉTODOS 21
3 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS E ECODESIGN 28
3.1 QFD tradicional e QFDs ambientais 32
3.1.1 Quality Function Deployment (QFD) 32
3.1.2 QFDE (Quality Function Deployment for Environment) 45
3.1.3 Environmental QFD 51
3.1.4 QFD de Hochman e O'Connell 55
3.1.5 Ecological Quality Function Deployment de Ernzer e Birkhofer 57
3.1.6 GQFD 60
3.1.7 3D-QFDE 61
3.1.8 Eco-VOC 64
3.1.9 EI2QFD 66
3.1.10 GreenQFD - II 70
3.1.11 IGQFD (Integrated Green and Quality Function Deployment) 73
3.1.12 Uso combinado do QFDE, LCA e TRIZ 75
3.1.13 Uso combinado do QFDE e LCA 76
3.1.14 QFD-DfE 77
3.1.15 QFD de Wolniak e Sędek 79
3.1.16 QFD based on RSP 81
3.1.17 Eco-QFD de Kuo et al. 84
3.1.18 Eco-QFD de Utne 87
3.2 FMEA tradicional e FMEAs ambientais 92
3.2.1 *Failure Mode and Effect Analysis* 92
3.2.2 E-FMEA ou EEA (Environmental Effect Analysis) 98
3.2.3 Integração FMEA-TRIZ 100
4 ANÁLISE DOS MÉTODOS QFD E FMEA DE ECODESIGN 103
4.1 Critérios e requisitos ambientais e operacionais para métodos de ecodesign ... 103
4.2 Resultados da análise ambiental e operacional dos métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA 126
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 149
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 157

APÊNDICES

Apêndice A – Classificação dos artigos da Revisão sistemática 170
Apêndice B – Questionário 173
Apêndice C - Matriz comparativa entre os métodos de QFD ambientais 175
Apêndice D - Matriz comparativa entre métodos de FMEA ambientais 179

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Desde o início da produção industrial até as décadas de 1950 e 1960, as empresas não adotavam quaisquer práticas de controle de emissões que visassem à minimização dos impactos ambientais de suas atividades. Foi somente nas duas décadas seguintes, de 1970 e 1980, que se iniciou a preocupação com os resíduos e emissões que eram lançadas no ambiente, cuja primeira atitude ficou conhecida como reativa ou "soluções de fim-de-tubo" (JOHANSSON, 2002). O objetivo deste tipo de prática era tratar os resíduos, fossem eles sólidos, líquidos ou gasosos antes de descartá-los ao meio ambiente, conforme obrigava as primeiras leis ambientais.

Nos anos seguintes, adotando uma postura preventiva, surgiu o conceito de Produção mais Limpa (P+L) (UNEP, 1996) com o objetivo de reduzir custos com tratamento e minimizar os impactos ambientais causados nas atividades de processo de produção nas empresas. Ao final dos anos 90, esta visão se expandiu para o ciclo de vida, cuja principal técnica, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode ser aplicada no desenvolvimento de produtos. Este novo estágio da gestão ambiental nas empresas ficou conhecido como abordagem pró-ativa voltada ao produto, não somente ao processo (ABNT, 2004).

Este conjunto de práticas ambientais no escopo da Engenharia do Produto passou a ser chamado pela Academia Internacional de Engenharia de Produção (CIRP – *College International pour la Recherche en Productique*) de Engenharia do Ciclo de Vida (ECV), "rótulo que descreve as áreas onde conceitos ambientais coincidem com a Engenharia de Projeto e a Engenharia de Produção" (JESWIET et al., 2005). Hauschild et al. (2005) definem a Engenharia do Ciclo de Vida como sendo um conjunto de atividades de

engenharia para o projeto e a manufatura de produtos pensando na proteção do meio ambiente e na conservação de recursos, considerando ainda o progresso econômico, a necessidade pela sustentabilidade e a otimização do ciclo de vida do produto, reduzindo a poluição e o desperdício. Por esta definição, a Engenharia do Ciclo de Vida abrange uma série de conceitos, como sustentabilidade, economia, ciclo de vida de produto e o ecodesign, tema desta dissertação.

O ecodesign tem sua aplicação através do uso de métodos e ferramentas, definidos por Baumann, Boons e Bragd (2002) como qualquer meio sistemático que considere as questões ambientais no ciclo de vida do produto durante o Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP). O Ciclo de vida do produto pode ser entendido como todas as etapas da vida do produto, ou seja, desde a extração da matéria-prima, passando pelas fases de produção, uso até sua disposição final (ABNT, 2001) envolvendo também todas as atividades de transporte e de fim-de-vida, como o reuso, reciclagem e a remanufatura conforme ilustra a figura 1.

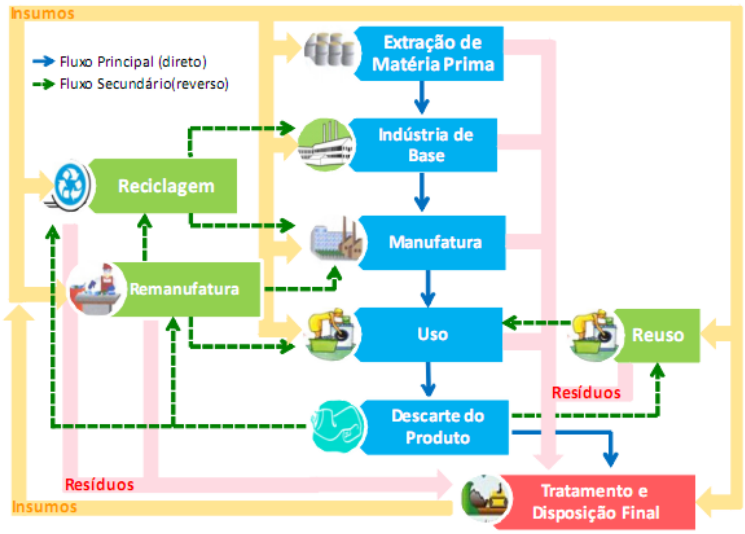

Figura 1. Ciclo de vida do produto e suas alternativas de fim-de-vida. Fonte: PIGOSSO, 2008

Para auxiliar na melhoria ambiental dos produtos em todas as fases do seu ciclo de vida, passou a serem desenvolvidas, principalmente na última década, ferramentas, *guidelines*, matrizes e até mesmo métodos mais complexos como a ACV (BOVEA; WANG, 2007). Os métodos de ecodesign compreendem, atualmente, uma quantidade superior a uma centena (PIGOSSO, 2008).

Porém, para Ritzén e Lindahl (2001), embora os métodos de ecodesign sejam utilizados com a intenção de se reduzir os impactos ambientais gerados por produtos, muitas vezes os resultados não são produtos ambientalmente melhores. Knight e Jenkins (2009) lembram que apesar dos aparentes benefícios trazidos pelos métodos de ecodesign, não pode-se garantir que eles serão aplicados e nem se terão algum efeito no desenvolvimento de produtos. Lofthouse (2006) afirma que muitos métodos de ecodesign falham por não estar focados no projeto do produto. Hauschild et al. (2005) complementam que estes métodos "algumas vezes melhoram o desempenho ambiental dos produtos, outras não".

De acordo com Karlsson e Luttropp (2005), os métodos de ecodesign devem ser feitos para situações de uso no PDP e devem considerar e esclarecer as relações ambientais dos produtos. Entende-se então que os métodos de ecodesign devem considerar questões ambientais e, além disto, necessitam serem inseridos nas atividades do desenvolvimento de produtos, o que torna questões como complexidade e custo barreiras à adoção (KNIGHT; JENKINS, 2009).

Para Pigosso (2008), os métodos/ferramentas de ecodesign cuja origem provém do PDP são na maioria das vezes adaptações daqueles já consagrados nesta área. Segundo Masui et al. (2001) e Lindahl (2002), os grandes benefícios para se trabalhar com o *Quality Function Deployment* (QFD) e o *Failure Mode and Effect Analysis* estão em permitir

agregar diversas vertentes ambientais ao desenvolvimento de produtos, sendo que o primeiro auxilia na identificação e tradução de requisitos ambientais em informações técnicas para o projeto do produto, enquanto que o FMEA contribui na identificação e análise de falhas ambientais potenciais no produto. O fato destes métodos serem provenientes do PDP podem apresentar uma maior facilidade de adoção/aplicação, por suas versões originais serem de conhecimento por parte das empresas (TINGSTRÖM, 2007).

Cheng e Melo Filho (2007) apontam várias razões que levam as empresas a adotarem o QFD, entre elas o "forte potencial inerente ao método que é de ouvir, traduzir e transmitir, de forma priorizada, a voz do cliente para dentro da empresa", além de ser um "indutor da busca e da integração de conhecimentos das áreas funcionais da empresa, como também de métodos e técnicas de alta relevância para o processo de robustecimento do Sistema de Desenvolvimento de Produtos (SDP) da empresa". O FMEA, por sua vez permite "evitar, por meio da análise de falhas potenciais e propostas de ações de melhoria, que ocorram falhas no projeto do produto ou do processo" (TOLEDO; AMARAL, sem data).

Assim, visto algumas características relacionadas aos métodos de ecodesign, tanto no que se refere às possibilidades de melhoria ambiental dos produtos, quanto a aplicabilidade pelas equipes de PDP, além da importância do QFD e do FMEA dentro da Engenharia de Produção, permitiu-se chegar à seguinte questão de pesquisa: quais critérios e requisitos ambientais[1] e operacionais[2] são contemplados pelos atuais métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA?

---

[1] Definidos como atributos ou características importantes para que os métodos de ecodesign considerem de modo a melhorar o desempenho ambiental dos produtos comparados aos tradicionais, tal como minimizar os impactos ambientais no ciclo de vida (RIVERA-BECERA; LIN, 1999).

[2] De forma similar aos critérios e requisitos ambientais, considera-se então como critérios e requisitos operacionais aqueles atributos relacionados à aplicação, ou seja, características identificadas como

A partir desta questão de pesquisa, optou-se, então, por se identificar critérios e requisitos ambientais que métodos de ecodesign devam considerar, de modo a trazerem benefícios ambientais para os produtos comparados aos tradicionais. Além disto, a outra razão foi buscar entender quais as dificuldades que muitas vezes impedem que estes métodos ambientais sejam aplicados por empresas em larga escala (PIGOSSO; GUELERE FILHO, 2007) chamados de critérios e requisitos operacionais.

O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar métodos QFD e FMEA de ecodesign sob a perspectiva ambiental e operacional.

Os objetivos específicos são:

- Identificar e apresentar os principais métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA, a partir de suas características e formas de aplicação com base nas suas versões tradicionais.
- Identificar os critérios e requisitos ambientais e operacionais para métodos de ecodesign e traduzí-los em critérios para os métodos QFD e FMEA de ecodesign;
- Realizar a análise ambiental e operacional dos métodos de FMEA e QFD de ecodesign, identificando quais os critérios ambientais e operacionais que são contemplados pelos métodos.

A estrutura deste trabalho está dividida em capítulos da seguinte forma:

- Capítulo 1: É apresentada uma breve contextualização sobre a evolução das práticas ambientais adotadas pelas empresas até o que hoje conhecemos por ecodesign e justificativa/relevância da importância do trabalho. Também

---

importantes que promovam a aplicação dos métodos de ecodesign nas etapas do desenvolvimento de produtos (HAUSCHILD et al., 2005).

são apresentados os objetivos (geral e específicos) e esta estrutura do trabalho;

- Capítulo 2: Trata da apresentação da metodologia empregada no desenvolvimento da pesquisa, ou seja, o tipo de pesquisa e método, a forma que foi conduzida a revisão bibliográfica sistemática, a definição dos critérios ambientais e operacionais e como foi realizada a análise dos métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA;
- Capítulo 3: Introdução ao PDP e conceitualização de ecodesign. Neste capítulo são apresentadas as descrições dos métodos tradicionais de QFD e FMEA e de suas versões de ecodesign;
- Capítulo 4: São identificados os requisitos e critérios ambientais e operacionais para os métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA. Também é realizada uma análise destes métodos frente aos critérios propostos;
- Capítulo 5: Apresenta a conclusão do trabalho como um todo, com base na teoria apresentada e resultados alcançados e indica sugestões para trabalhos futuros.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Do ponto de vista da pesquisa, este trabalho se enquadra como de natureza teórica e objetivo descritivo.

Quanto à forma de abordagem do problema, a pesquisa é qualitativa, pois embora seja utilizada a aplicação de questionários a especialistas como instrumento de coleta de dados, e as opiniões traduzidas em números, não serão utilizados métodos e ferramentas estatísticas tais como média, mediana, desvio padrão e coeficiente de correlação (SILVA; MENEZES, 2001).

Quanto aos procedimentos técnicos, será utilizada pesquisa bibliográfica, revisão sistemática e aplicação de questionário com especialistas de forma presencial e por meio eletrônico (e-mail).

As atividades gerais relacionadas ao desenvolvimento da dissertação e suas descrições são apresentadas de forma sequêncial na figura 2.

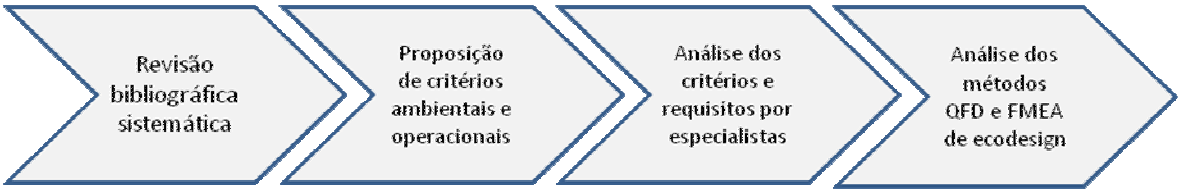

Figura 2. Etapas relacionadas ao desenvolvimento da dissertação

Na tabela 1 são apresentados os métodos e atividades para o desenvolvimento da dissertação, conforme os objetivos específicos definidos.

Tabela 1. Métodos e atividades relacionadas ao desenvolvimento da dissertação

Objetivo específico	Método	Atividades
Objetivo específico 1	Revisão bibliográfica sistemática dos métodos QFD e FMEA	Definir questão de pesquisa
		Definir *strings* de pesquisa
		Realizar pesquisa em bases de dados
		Selecionar artigos e teses
Objetivo específico 2	Revisão bibliográfica sistemática dos requisitos de ecodesign	Definir questão de pesquisa
		Definir *strings* de pesquisa
		Realizar pesquisa em bases de dados
		Selecionar artigos e teses
		Agrupamento de termos
	Revisão bibliográfica de QFD e FMEA tradicionais voltada para definição dos critérios	Proposta dos critérios ambientais e operacionais para métodos QFD e FMEA de ecodesign
	Enquete com especialistas	Definição dos critérios ambientais e operacionais
Objetivo específico 3	Matriz de correlação	Atribuição de pesos para critérios ambientais e operacionais
		Definição de uma escala Likert
		Correlação dos métodos x critérios
		Análise dos métodos

A primeira etapa, definida como "Revisão bibliográfica sistemática", iniciou com a definição das questões de pesquisa e *strings*[3] e teve por objetivo determinar quais os critérios e requisitos que autores de ecodesign e desenvolvimento de produtos sugerem para métodos ambientais. Além da determinação dos critérios e requisitos já citados, conforme foi considerada a importância dos métodos de QFD e FMEA no desenvolvimento de produtos e para o ecodesign, buscou-se também determinar quais são estes métodos. Deste modo definiu-se duas questões de pesquisa: Quais são os principais critérios e requisitos que os métodos de ecodesign devem atender do ponto de vista ambiental e operacional? Quais são os métodos de QFD e FMEA de ecodesign apresentados na literatura?

[3] Palavras-chave e seus sinônimos

Para isso, foram pesquisados artigos/teses em bases de dados nacionais e internacionais utilizando-se de *strings* de pesquisa, tanto para identificar os métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA (tabela 2), quanto para os critérios e requisitos para métodos de ecodesign (tabela 3).

Tabela 2. Strings de pesquisa para métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA

FMEA Ecodesign	Failure Mode and Effect Analysis Ecodesign
FMEA Eco-Design	Failure Mode and Effect Analysis Eco-Design
QFD Ecodesign	Failure Mode and Effect Analysis Design for Environment
QFD Eco-Design	Failure Mode and Effect Analysis DfE
FMEA DfE	Quality Function Deployment Ecodesign
FMEA Design for Environment	FMEA Ambiental
QFD DfE	Failure Mode and Effect Analysis Ambiental
QFD Design for Environment	Quality Function Deployment Eco-Design
Quality Function Deployment DfE	Quality Function Deployment Design for Environment
Environmental FMEA	Environmental QFD
Environmental Failure Mode and Effect Analysis	Environmental Quality Function Deployment
QFD Ambiental	Quality Function Deployment Ambiental

Tabela 3. Strings de pesquisa para critérios e requisitos de métodos de ecodesign

Eco-Design Criteria	Eco-Design Requirements
DfE Criteria	DfE Requirements
Design for Environment Criteria	Design for Environment Requirements
Ecodesign Requirements	

A segunda etapa consistiu em buscar por artigos e teses em bases de dados utilizando-se das *strings* já apresentadas, realizando-se assim a revisão sistemática.

Segundo Biolchini et al. (2005), a revisão sistemática pode ser definida como uma metodologia que “envolve objetivos específicos, que permitem o pesquisador analisar

criticamente os dados coletados, a resolver conflitos encontrados na literatura e identificar questões para investigações futuras".

Estas *strings* foram pesquisadas em uma base de dados nacional e seis internacionais entre os meses de junho a setembro de 2009. As bases de dados pesquisadas foram:

Tabela 4. Bases de dados pesquisadas na revisão sistemática

Base de dados	Endereço eletrônico
Compendex	http://www.engineeringvillage2.org
IEEE	http://ieeexplore.ieee.org
Science Direct	http://www.sciencedirect.com
Emerald	http://www.emeraldinsight.com
Web of Science	http://isiknowledge.com
Google Scholar	http://scholar.google.com.br
Scielo (nacional)	http://www.scielo.org

O critério adotado para inclusão/exclusão de artigos sobre QFD e FMEA na revisão sistemática se baseou em considerar apenas métodos relacionados ao desenvolvimento de produtos/serviços ambientais. Já para a inclusão/exclusão de artigos relacionados aos requisitos ambientais e operacionais, considerou-se artigos onde os autores apresentavam sugestões para que os métodos de ecodesign atendessem a questões ambientais e de aplicação.

A classificação dos artigos foi feita utilizando-se uma planilha de Excel, onde constou o nome do artigo, autores, ano de publicação e periódico onde foi publicado, conforme consta no Apêndice A.

A definição dos requisitos/critérios ambientais e operacionais de ecodesign foi realizada pela identificação das propostas definidas pelos autores encontrados na revisão sistemática e pelo agrupamento destas, dentro da mesma lógica e significado, em alguns critérios/requisitos que as representassem de forma mais geral. Este processo de agrupamento de palavras foi baseado na construção de um tesauro. Segundo De Jesus

(2002), o tesauro trata de uma forma de linguagem documentária com termos relacionados semanticamente e logicamente, cobrindo de modo compreensivo um domínio do conhecimento. Cervantes (2009) afirma que no tesauro as palavras são agrupadas pelas idéias que elas exprimem, que possam ser expressas e de acordo com seu significado.

Definidos os principais requisitos/critérios para os métodos de ecodesign, foram então propostos critérios ambientais e operacionais específicos para os métodos de QFD e FMEA que permitissem analisar suas versões ambientais. Para isto foi realizada uma revisão bibliográfica sobre as versões tradicionais destes métodos (QFD e FMEA), identificando-se suas principais características, tais como: finalidade, estrutura e formas e etapas de aplicação.

Propostos os critérios ambientais e operacionais para os métodos QFD e FMEA, a fim de verificar a pertinência dos critérios sugeridos, a etapa seguinte consistiu em realizar a aplicação de um questionário com especialistas, conforme é apresentado no apêndice B. Os especialistas foram escolhidos a partir de publicações científicas na área de ecodesign, desenvolvimento de produtos ou métodos QFD e FMEA, incluindo os próprios autores dos artigos utilizados na revisão bibliográfica sistemática.

A aplicação do questionário teve por objetivo avaliar o grau de importância dos critérios ambientais e operacionais propostos para os métodos QFD e FMEA de ecodesign além de possibilitar a identificação de outros critérios não encontrados na literatura. Para isto, após o especialista identificar ou não a necessidade de acrescentar outro critério aos já propostos, realizou-se uma classificação para se estabelecer a ordem de importãncia do critério/requisito.

A priorização dos critérios pelos especialistas permitiu atribuir pesos a cada critério, que auxiliou dos métodos ambientais de QFD e FMEA por uma matriz de

correlação baseada na matriz da qualidade do QFD tradicional, como se observa na figura 3. Esta matriz de correlação será utilizada pelo pesquisador no capítulo 4 desta dissertação.

			Métodos baseados em QFD										Métodos baseados em FMEA								
	Critérios	Peso																			
Ambientais																					
Operacionais																					
	Score dos critérios ambientais																				
	Score dos critérios operacionais																				

Figura 3. Modelo da matriz de análise dos métodos QFD e FMEA de ecodesign

A coluna "Peso" identifica o nível de importância dado aos critérios ambientais e operacionais pelos especialistas. Os pesos foram definidos através da ordem de importância atribuída pelos especialistas da forma apresentada nas tabelas 5 e 6:

Tabela 5. Pesos atribuídos aos critérios ambientais seguindo ordem de importância

Critério ambiental	**Peso**
Mais importante	3
Segundo mais importante	2
Menos importante	1

Tabela 6. Pesos atribuídos aos requisitos operacionais seguindo ordem de importância

Requisito operacional	**Peso**
Mais importante	6
Segundo mais importante	5
Terceiro mais importante	4
Quarto mais importante	3
Quinto mais importante	2
Menos importante	1

A correlação entre os métodos e os critérios foi realizada utilizando uma escala de Likert. Segundo Gil (1999), a escala de Likert permite avaliar o nível de concordância para uma determinada questão, variando de uma resposta mais negativa para uma mais positiva. Devido as características dos métodos, ou seja, considerando-se que podem não atender um critério, atender parcialmente ou atender completamente, foi adotada a seguinte escala representada pela tabela 7 com seus respectivos pesos.

Tabela 7. Escala de Likert adotada para definir as correlações entre os métodos e os critérios

Escala Likert	
Atende o critério totalmente	3
Atende o critério parcialmente	2
Não atende o critério	1

Será utilizado o peso 1 quando o método não atender o critério apresentado, o peso 3 se o método atender completamente o critério e o peso 2 se atender parte do critério quando este se basear em duas ou mais exigências ou mesmo se considerar o critério, mas não na forma sugerida.

O peso dos critérios ambientais é calculado de forma semelhante à matriz da qualidade, ou seja, é realizada a somatória da multiplicação de cada correlação por seu respectivo peso dos critérios ambientais. De forma semelhante é realizada a somatória para os critérios operacionais.

3 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS E ECODESIGN

Produtos, em todas as fases do seu ciclo de vida, ou seja, desde os processos de extração de matéria-prima, passando pela manufatura, uso, distribuição e descarte são fontes potenciais de impactos ambientais, pois em cada fase pode haver consumo de recursos, emissão atmosféricas, geração de resíduo sólido, etc (ABNT ISO 14062, 2004; HAUSCHILD et al., 2005). Assim tem-se no desenvolvimento de produtos a oportunidade de não somente se projetar um produto pensando em questões como qualidade, custo, segurança, mas também de considerar seu desempenho ambiental (HAUSCHILD et al., 2005).

De acordo com Rozenfeld et al. (2006), desenvolver produtos significa chegar em especificações de um projeto de produto e seus processos capaz de ser produzido, dada as restrições tecnológicas, necessidades de mercado e estratégia da empresa. Este processo de negócio tem se tornado um fator determinante para o sucesso das empresas, principalmente devido a renovação das linhas de produtos, necessidade de redução de custos e prazos, internacionalização dos mercados, aumento da diversidade e variedade dos produtos e redução do ciclo de vida[4] dos produtos no mercado (ROZENFELD et al., 2006; TOLEDO et al., 2008). Outro motivo são os clientes, "que estão cada vez mais exigentes, informados e com maior capacidade de escolha", levando as empresas a buscar "atender continuadamente às mudanças nas necessidades dos clientes" (ROZENFELD et al., 2006).

O ecodesign pode ser interpretado como um conceito que considera aspectos ambientais no projeto de produto (KARLSSON; LUTTROPP, 2005). Segundo Manzini e Vezzoli (2002), diferentemente do que pode às vezes ser entendido como forma e estética, a palavra *design* diz respeito ao conjunto de atividades projetuais visando a produção de

[4] Entendido como todas as fases da vida do produto, passando do nascimento da idéia do produto, desenvolvimento, produção, vendas até o descarte (ROZENFELD et al., 2006)

bens de consumo. Ou seja, pode-se resumir a palavra *design*, conforme será usada aqui, como um conjunto de atividades de projeto. Já Karlsson e Luttropp (2005) definiram a palavra "Eco" como algo relacionado à natureza ou ao meio ambiente, além da similaridade com as palavras economia e ecologia.

Somente estas definições não tornam o termo suficientemente claro, o que torna necessário conceitualizar o que é o ecodesign, a fim de se entender quais são seus princípios e objetivos.

Ecodesign ou DfE (*Design for Environment*) são termos sinônimos utilizados no desenvolvimento de produtos quando as variáveis ambientais são consideradas, ou seja, quando o projeto do produto leva em consideração aspectos que possam causar impactos no meio ambiente (MANZINI; VEZZOLI, 2002). Outros termos utilizados para o ecodesign, embora menos comuns são: *ecological design*, *environmental design*, *sustainable product design*, *green design*, *life-cycle design* e até mesmo *biodesign* (LEWIS; GERTSAKIS, 2001).

Segundo Bakker (1995), o ecodesign pode ser definido como "o desenvolvimento de produtos através da aplicação de requisitos ambientais dirigidos à redução de impactos ambientais por todos os estágios do ciclo de vida do produto". Já Lewis et al. (2001) definem ecodesign como "projetar produtos pensando nas questões ambientais, minimizando seus impactos ambientais diretos e indiretos em toda oportunidade possível". Johansson (2002) estabelece que o ecodesign se refere a "ações tomadas no desenvolvimento de produtos dirigidas à minimização dos impactos ambientais dos produtos durante todo o ciclo de vida, sem comprometer outras características essenciais, como desempenho e custo". O ecodesign também pode ser definido como "incorporar questões ambientais no desenvolvimento de produtos, como aquecimento global, consumo

de recursos e uso de substâncias perigosas (...) com o pensamento de ciclo de vida, que é uma idéia de ver o produto sob o ponto de vista de toda sua vida, desde a aquisição de material até a disposição final do produto" (SAKAO et al., 2005). Ernzer e Birkhofer (sem data) consideram que o DfE tem por objetivo "minimizar os impactos de produtos no meio ambiente durante todo seu ciclo de vida, maximizando seus benefícios". Outra definição para o ecodesign é "a preocupação com o projeto de produtos, através da aplicação de requisitos ambientais dirigidos a prevenção de perdas e emissões, e a minimização dos seus impactos ambientais durante todo ciclo de vida material do produto" (VAN WEENEN, 1995). Para a ABNT (2004), a integração das questões ambientais no desenvolvimento de produtos permite considerar todos os estágios do ciclo de vida do produto de modo a garantir que os impactos ambientais mais significativos sejam identificados, que o sistema na qual o produto está inserido também seja focado e que materiais não sejam arbitrariamente desconsiderados.

Embora pouco comum, existem ainda definições que tratam o ecodesign sob uma abordagem sustentável, que inclui além da questão ambiental questões relativas à economia, ao social e à ética. (KARLSSON; LUTTROPP, 2006).

Com base nas afirmações anteriores, pode-se concluir de forma sucinta que o ecodesign é uma abordagem do desenvolvimento de produtos que visa redução dos impactos ambientais do ciclo de vida do produto.

Conforme a ABNT (2004), dentre os benefícios obtidos pela integração dos aspectos ambientais no desenvolvimento de produtos, pode-se citar:

- Redução de custos através da otimização do uso de materiais e energia, processos mais eficientes e redução de resíduos;

- Estímulo à inovação e criatividade;
- Identificação de novos produtos, por exemplo, à partir de materiais descartados e/ou reciclados;
- Atingir ou superar as expectativas dos clientes;
- Melhoria da imagem da organização ou da marca;
- Incremento da fidelidade do cliente;
- Atração de financiamento e investimento, particularmente de investidores ambientais conscientes;
- Aumento da motivação dos empregados;
- Incremento do conhecimento sobre o produto;
- Redução de infrações legais por meio da redução de impactos ambientais;
- Redução dos riscos;
- Melhoria das relações com as agências reguladoras;
- Melhoria das comunicações internas e externas.

A aplicação do ecodesign é permitida através de um conjunto de práticas (métodos e ferramentas) que estão disponíveis para tornar o trabalho do *designer*[5] mais confiável e agilizar tarefas no desenvolvimento de produtos ambientais (LEWIS et al., 2001). De acordo com Vezzoli e Sciama (2006), na última década foi desenvolvida uma série de métodos e ferramentas de suporte para o ecodesign, sendo estas metodologias baseadas em *softwares*, *checklists*, *guidelines*, matrizes.

O interesse dos clientes e usuários também está aumentando em relação aos aspectos e impactos ambientais dos produtos (ABNT, 2004). A integração dos aspectos ambientais no desenvolvimento de produtos permite, além de ganhos ambientais, também

[5] Membro da equipe de desenvolvimento de produto

a melhoria da imagem da empresa, novas oportunidades de mercado e redução de custo (BYGGETH; HOCHSCHORNER, 2004). Desta maneira, na última década foram publicados em torno de 105 métodos para adequação ambiental de produtos (PIGOSSO, 2008).

Porém, conforme Guelere Filho e Pigosso (2007) salientam, os métodos de ecodesign normalmente não são aplicados no desenvolvimento de produtos. Para Neal e Heintz (2001), um dos grandes desafios para a maior utilização dos métodos de ecodesign está em definir um conjunto de passos e atividades que cumpram todos os conceitos do ecodesign. Outros fatores de sucesso também estão associados à inserção do ecodesign no PDP, que incluem o comprometimento da alta administração e fornecedores, motivação, consideração das questões ambientais no início do desenvolvimento, composição do time de desenvolvimento, comunicação interna e mercado (BOKS, 2005; JOHANSSON, 2002).

De acordo com a ABNT (2004), práticas de ecodesign podem "ajudar no desenvolvimento de sistemas de medida, análise do desempenho ambiental, tomada de decisão, promoção de criatividade e na integração com negócios e fatores econômicos". Entre estas práticas pode-se encontrar o QFD e o FMEA voltados ao ecodesign.

3.1 QFD tradicional e QFDs ambientais

Esta parte do trabalho tem por objetivo apresentar conceitos básicos sobre o método QFD em sua versão tradicional e apresentar suas dezessete versões de ecodesign identificadas por meio da revisão sistemática.

3.1.1 Quality Function Deployment (QFD)

Com o objetivo de traduzir as necessidades dos consumidores em requisitos de produto e de processos, os pesquisadores japoneses Shigeru Mizuno e Yoji Akao desenvolveram, no final da década de 70, o método chamado de QFD ou em português,

Desdobramento da Função Qualidade. O desdobramento parte da voz do consumidor final ou do cliente intermediário, passando por características de qualidade do produto final, subsistemas, componentes até se chegar no processo de fabricação. O procedimento para aplicação do QFD consiste em primeiramente determinar o que os clientes desejam (voz do consumidor - VoC) e por meio de desdobramentos sistemáticos, chegar em características de qualidade do produto, funções, parâmetros de controle, componentes, entre outros. De maneira geral, pode-se dizer que o objetivo do desdobramento é tornar o implícito em explícito e o informal em formal (CHENG; MELO FILHO, 2007).

Através do desdobramento da qualidade, o QFD permite então "garantir a qualidade em cada fase do desenvolvimento do produto, começando pelo projeto, e objetivando a satisfação dos clientes, traduzindo as suas demandas em metas de projeto" (AKAO, 1990)

Segundo Miguel (2008), a literatura apresenta 4 definições principais para o QFD: Matriz da Qualidade (Casa da Qualidade), desdobramento da qualidade, além do QFD no sentido restrito e do QFD como método de gestão.

O desdobramento da qualidade (*quality deployment*), segundo Akao (1996), pode ser definido pela conversão das exigências dos usuários em características substitutivas (características de qualidade) por um conjunto de matrizes.

O QFD no sentido restrito trata do desdobramento de funções, como planejamento, projeto, produção, serviços e operações que contribuam para a qualidade nas etapas sucessivas para a obtenção do produto (MIGUEL, 2008). Conforme Akao (1996) apresenta, o QFD (sentido amplo) pode ser visto como a soma entre o QFD (sentido restrito) e o desdobramento da qualidade, embora segundo o próprio autor ambos sejam tratados atualmente como sinônimos.

Por outro lado, o QFD como modo de gestão é apresentado por Miguel (2008) como uma aplicação do QFD para o suporte à diversas atividades de gestão e não para o desenvolvimento de produtos.

Já a matriz da qualidade pode ser definida da seguinte forma:

> "A matriz da qualidade é uma matriz bi-dimensional que consiste em uma tabela de qualidade exigida e uma tabela de características de qualidade desdobradas. Seu objetivo fundamental é converter cada qualidade exigida pelos clientes em características de qualidade expressas em linguagem de engenharia. Isto se deve ao fato das demandas dos clientes serem expressas em termos abstratos, não específicos o suficiente para a manufatura" (AKAO, 1990).

Conforme definida por Akao (1990), a matriz da qualidade pode ser representada basicamente por dois triângulos, a Qualidade Exigida e a Características da Qualidade, e um quadrado com as abas de Qualidade Planejada e de Qualidade Projetada, como pode ser visualizado na figura 4.

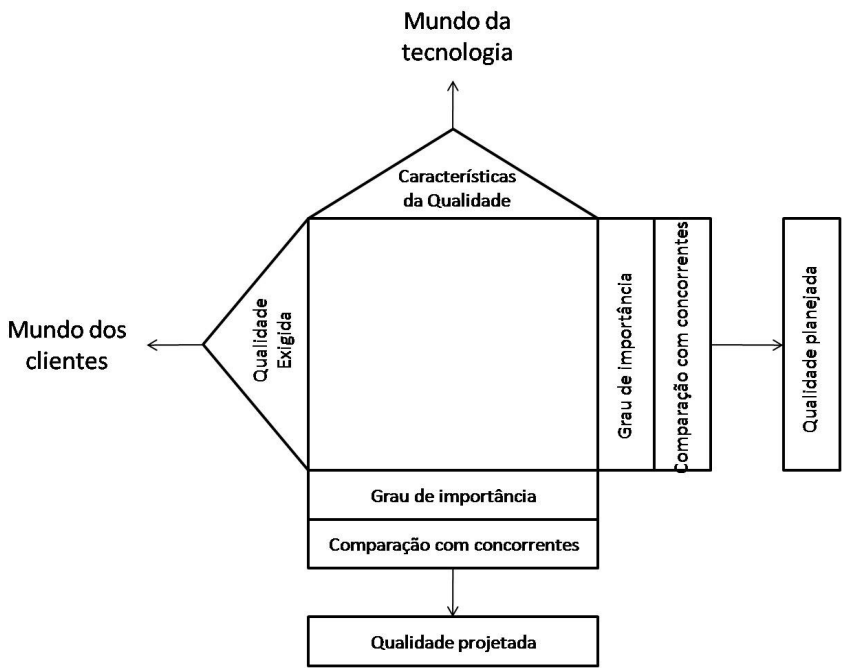

Figura 4: Representação de uma matriz da qualidade. Adaptado de Akao (1996)

De acordo com Miguel (2008), a qualidade exigida expressa os requisitos dos clientes, traduzidas pelo que é denominado de VoC (Voz do Cliente). Já as características de qualidade são atributos do produto que tem por objetivo atender as qualidades exigidas, ou seja, são as especificações do produto.

Porém, como salienta Cheng e Melo Filho (2007), a ênfase do QFD está no procedimento e não somente no uso da matriz, que é apenas uma ferramenta para processar as informações. Deste modo, como afirma Akao (1996), a casa da qualidade não é o QFD, fazendo então necessário explicar suas outras atividades.

A primeira atividade relacionada ao uso do QFD consiste em identificar a VoC. As fontes de dados para a coleta da VoC podem ser de vários tipos: entrevistas, informações de SACs (serviço de atendimento ao consumidor), documentos internos e conhecimento e experiências de pessoas. Segundo Akao (1996), estas informações são denominadas de dados originais ou primitivos e são desdobradas em "necessidades". Um método utilizado para isto é o "desdobramento de cenas", onde questões como "quando", "quem", "onde", "como", "por quê" e "e se" devem ser feitas para os dados originais, auxiliando no desdobramento para a qualidade exigida, conforme a tabela 8:

Tabela 8. Conversão da VOC em Qualidade Exigida para um projetor de imagens. Adaptado de Cheng e Melo Filho (2007)

Dados originais	Desdobramento de cenas	Item exigido	Qualidade exigida
Fácil de transportar	Carregar junto com outros materiais	Prático ao transportar	Transportável com uma mão só
			Rápido preparo para o transporte
		Transporte agradável	Boa aderência às mãos
			Necessita de pouco esforço
			Não machuca
		Resistente ao transporte	Resistente a impactos
			Mantém integridade durante o transporte

Todos os itens desdobrados em Qualidade exigida devem ser agrupados por similaridade e em níveis de maior abstração para menor abstração (nível primário, nível

secundário, nível terciário etc.). Esta tabela, contendo o desdobramento da qualidade exigida, é a representação da lista completa das necessidades dos clientes. Estas necessidades dos clientes devem ser priorizadas, pois o atendimento a todas elas podem incorrer em altos custos e dificuldades operacionais. A definição das exigências mais importantes podem ser verificadas comparando com o produto concorrente, identificando quais características se encontram inferiores, ou mesmo consultando o cliente sobre o que ele acha mais importante, normalmente através de questionários. O resultado destes questionários podem ser expressos em forma de gráficos, auxiliando na interpretação gerencial. Nesta fase é calculado o peso absoluto e relativo da qualidade planejada, onde os requisitos da tabela de qualidade exigida são cruzados com os de qualidade planejada (CHENG; MELO FILHO, 2007), como na figura 5:

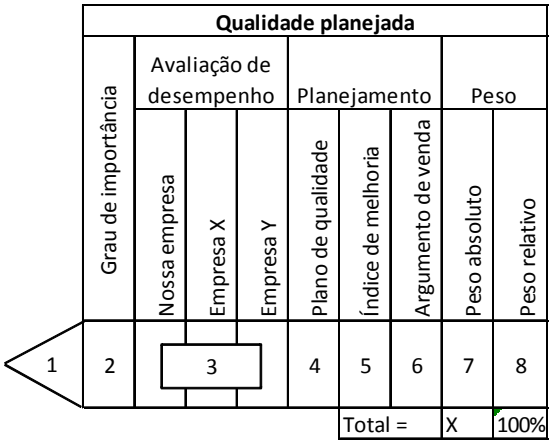

Figura 5. Passos para o estabelecimento da qualidade planejada. Adaptado de Cheng e Melo Filho (2007)

Na figura 5 está listada uma sequência de 8 passos para estabelecer a qualidade planejada. O passo 1 consiste em construir e desdobrar em níveis a qualidade exigida, e no passo 2 apresentar o grau de importância para cada qualidade exigida. O passo 3 permite o público avaliar o desempenho do produto da empresa (representado pela coluna “Nossa empresa” e de seus concorrentes (colunas “Empresa X” e “Empresa Y”).

Para estabelecer o Plano da qualidade (passo 4), a empresa deve definir um nível de desempenho esperado para cada item da qualidade exigida utilizando a mesma escala numérica adotada para o grau de importância e para a avaliação de desempenho. Já o índice de melhoria (5) é a razão entre o Plano de qualidade pelo índice atribuído ao produto da "Nossa empresa" no passo 3.

O argumento de venda (passo 6) é um número que representa o quanto aquela qualidade exigida pode contribuir para o aumento nas vendas do produto. Cheng e Melo Filho (2007) definem que deve ser atribuído um valor igual a 1,5 quando a característica da qualidade exigida for estratégica para o sucesso da empresa, 1,2 quando for "comum" e apenas 1 quando for "indiferente".

De posse dos índices atribuídos até o passo 6, é possível calcular o peso absoluto e relativo da qualidade planejada. O peso absoluto é obtido através da multiplicação entre os passos 2, 5 e 6, ou seja, entre o grau de importância, o índice de melhoria e o argumento de venda.

Finalmente, a matriz da qualidade tem por objetivo transformar informações dos clientes em informações tecnológicas. O primeiro tipo de informações é formado pelos itens da qualidade exigida e da qualidade planejada que já foi comentado anteriormente, e o segundo, que está em função do primeiro, é formado pela tabela de desdobramento das características de qualidade e da qualidade projetada. Assim, a matriz da qualidade ajuda a organizar e dar maior visibilidade às informações e sua utilização permite que o projeto básico do produto seja estabelecido com foco nas necessidades dos clientes.

Os itens que compõem as características da qualidade são requisitos que devem ser medidos no produto para verificar se a qualidade exigida está sendo cumprida. Cheng e

Melo Filho (2007) apresentam um procedimento proposto de 4 etapas que auxilia o *designer* no desdobramento da qualidade exigida em elementos de qualidade. Obtidas as características de qualidade, sugere-se que estas sejam agrupadas em elementos de qualidade, como por exemplo, peso, largura e espessura em "propriedades físicas". Uma tabela de desdobramento das características de qualidade em níveis pode ser feita, a exemplo de como foi sugerido para qualidade exigida.

Após isto, consiste-se em realizar o processo de correlação da matriz do QFD que tem por objetivo identificar relações entre os elementos das duas diferentes tabelas da matriz e priorizar itens em função de pesos. As correlações são identificadas através de cores, símbolos ou pesos, como é apresentado na figura 6.

Correlação	Representação sugerida				
	Cor	Símbolo	Valores sugeridos		
Forte	Vermelho	⊙	9	5	4
Média	Verde	△	3	3	2
Fraca	Azul	○	1	1	1
Inexistente		Vazio	-	-	-

Figura 6. Definição para as correlações da matriz do QFD. Adaptado de Cheng e Melo Filho, 2007

A etapa de preenchimento da matriz pode ser realizada individualmente ou em grupo. No último caso, quando se há divergências entre as correlações, deve ser argumentada a escolha, permitindo a discussão e acúmulo de conhecimento pela equipe de aplicação.

A matriz do QFD permite comparar cada característica de qualidade com os concorrentes e traçar metas, principalmente para aquelas que apresentaram relações mais fortes com qualidade exigida. Estas metas devem ser verificadas junto à área de manufatura/processo a fim de verificar sua possibilidade/viabilidade (CHENG; MELO

FILHO, 2007). Deste modo, tem-se, por completo, o preenchimento da casa da qualidade, como pode-se visualizar na figura 7.

			Características de Qualidade							Qualidade Planejada							
	Nível 1	Nível 2	Resistência a queda	Escoamento	Estabilidade do corante	Encaixe tampa x frasco	Encaixe tampa x *flip top*	Contaminação (embalagem)	Força de adesão (rótulo)	Grau de importância	Produto da empresa	Produto concorrente X	Plano da qualidade	Índice de melhoria	Argumento de vendas	Peso Absoluto QE	Peso relativo QE
Qualidade Exigida	Mantém o produto	Mantém o odor				1		1		4	5	4	5	1	1	4	6,5
		Mantém a cor			9					3	4	4	4	1	1	3	4,9
		Compatível com a embalagem						9		5	5	5	5	1	1	5	8,1
		Mantém-se acondicionado	1	9						5	3	4	5	2	1	8,3	13,6
	Fácil de usar	Fácil de abrir		1		3	9			5	2	5	5	3	1,5	18,8	30,5
		Fácil de fechar		1		3	9			5	3	4	5	1,67	1,5	12,5	20,4
	Resistente	Resistente a qedas	9					3		4	3	3	4	1,33	1,2	6,4	10,4
		Resistente para tampar		3		1	3	3		2	4	5	4	1	1,2	2,4	3,9
		Resistente no rótulo	3						9	1	3	4	3	1	1	1	1,6
Qualidade Projetada		Peso absoluto CQ	136,2	452,5	44	82,2	469,8	107,2	14,7								
		Peso Relativo CQ	10,4	34,6	3,4	6,3	36	8,2	1,1								
		Produto da empresa	120	5	5	0,5	0,08	70	0,3								
		Produto concorrente X	150	7	3	0,4	0,06	50	0,8								
		Qualidade projetada	150	10	5	0,5	0,05	50	0,5								
		Unidades	N	N/m²	pH	mm	mm	ppm	N								

Figura 7: Exemplo de matriz do QFD para o desenvolvimento de um frasco. Adaptado de Miguel (2008)

Uma matriz auxiliar entre características de qualidade *versus* características de qualidade (figura 8) pode ser feita com o objetivo de apresentar como uma característica modifica a outra. Convém-se falar que as correlações (critérios de proporcionalidade) possuem um sentido (diretamente/inversamente proporcional) e um grau (forte/normal).

CQ \ CQ	Peso	Altura	Largura	Comprimento	Volume	Razão altura/largura	Grau de reflexão	Grau de refração	Área de projeção máx	Amplitude da distância focal	Taxa de lux
Peso		9	9	9	9						
Altura					3	3					
Largura					3	9					
Comprimento					3						
Volume						9					
Razão altura/largura											
Grau de reflexão								3	9	9	9
Grau de refração									3	3	9
Área de projeção máx										3	3
focal											3
Taxa de lux											

Figura 8: Exemplo da matriz CQ x CQ. Adaptado de Cheng e Melo Filho (2007)

Por exemplo, na figura 8 pode-se observar que a característica da qualidade “Peso” está fortemente e diretamente relacionada à característica “Altura”, pois quando se aumenta a altura, aumenta-se o peso também. Já a “Largura” é fortemente e inversamente relacionada à “Razão altura/largura”, pois quanto maior for a largura, menor será a razão.

Conforme lembra Cheng e Melo Filho (2007), observa-se que o QFD, quando aplicado ao desenvolvimento de produtos por diversos autores como Clark e Wheelwright (1993), Pugh (1991) e Don Clausing (1994), tratavam-se apenas da utilização da Casa da Qualidade (matriz da qualidade). Porém, de acordo com Akao (1996), a Casa da Qualidade não pode ser entendida como o QFD, mas apenas como uma ferramenta no desenvolvimento de produtos.

De acordo com Cheng e Melo Filho (2007), o QFD auxilia no desenvolvimento de dois grupos de fatores: o primeiro está relacionado ao produto, como componentes, matéria-prima e insumos. O segundo tem relação com o projeto do processo de fabricação,

como processos, operações de montagem e equipamentos. Neste caso, utiliza-se representações gráficas de modelos conceituais, como pode ser observado na figura 9:

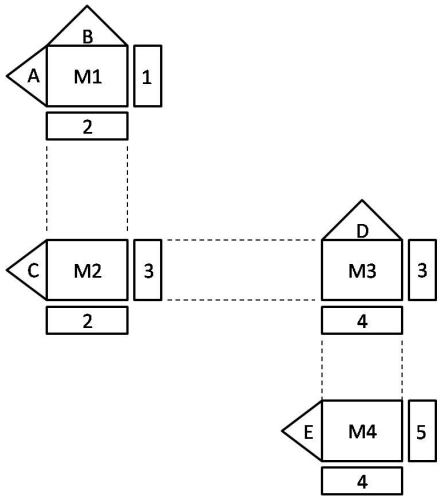

Figura 9. Modelo conceitual do QFD. Adaptado de Cheng e Melo Filho, 2007

O modelo conceitual como é apresentado por Cheng e Melo Filho (2007), é formado pelas tabelas e matrizes de um determinado projeto de desenvolvimento. O modelo conceitual é dependente do tipo de projeto, produto ou empresa, pois há casos que necessitam de mais tabelas e matrizes que outros. Por exemplo, há projetos onde se faz necessário o desdobramento de características tecnológicas, de custo, e em outros casos isto pode não ser fundamental.

Considere um exemplo para o desdobramento vertical de um produto em seus mecanismos, componentes e matérias-primas. Na figura 9, a matriz da qualidade M1 apresenta A como sendo a tabela de qualidade exigida e B a tabela de características da qualidade, e 1 e 2 as abas de qualidade planejada e projetada respectivamente. A matriz M2 é formada pelas tabelas de característica da qualidade, porém substitui-se a tabela A pela tabela C (esta para o desdobramento de mecanismos) e a aba 1 pela aba 3, que contém os pesos, especificações e metas para estes mecanismos.

Tem-se de forma similar nas matrizes M3 e M4 as tabelas D para o desdobramento de componentes e E para matéria-prima, e as abas 4 e 5 com os pesos, especificações e metas para os componentes e matéria-prima respectivamente.

O modelo conceitual contempla 4 dimensões horizontais possíveis: qualidade, tecnologia, custo e confiabilidade. A análise tecnológica se faz necessária para verificar se a empresa possui tecnologia própria para produzir o produto segundo as especificações geradas e em volume desejado. O objetivo deste desdobramento é a remoção de gargalos de engenharia através da solução antecipada de problemas (CHENG; MELO FILHO, 2007).

Porém, desenvolver o produto pensando somente em questões de qualidade e tecnológicas pode-se incorrer em custos elevados. Assim, o desdobramento do custo auxilia no desenvolvimento do produto atendendo às metas de custo que a empresa definiu.

Por fim, o desdobramento da confiabilidade tem por objetivo antecipar possíveis falhas no produto, utilizando técnicas auxiliares como o FMEA.

Além do modelo de desdobramento em 4 dimensões (qualidade, tecnologia, custos e confiabilidade), que é o modelo mais completo do QFD, sugerido por Akao (1996), outros autores propuseram variações deste QFD, como é o caso do QFD de 4 fases e o QFD estendido.

Conforme apresenta Miguel (2008), o QFD de 4 fases foi proposto por Sullivan em 1986 e Hauser e Clausing (1988) e consiste em desdobramentos sucessivos, onde o *output* de uma matriz é o *input* da matriz seguinte, como segue na figura 10.

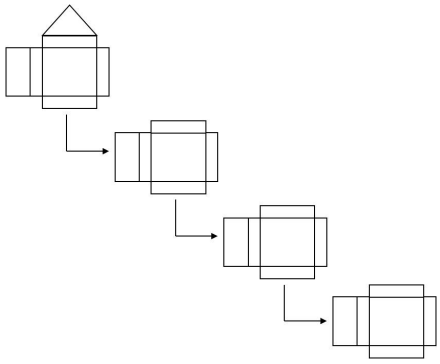

Figura 10. Representação do QFD de 4 fases. Adaptado de Miguel (2008)

Já o QFD estendido de Clausing (1994) tem por base o QFD de 4 fases e é chamado de estendido, pois inclui o processo de tomada de decisão durante o desenvolvimento do produto e inclui o desdobramento do produto em três níveis de agregação (sistema total, sistema, subsistema e componentes).

Diversos autores apresentam vantagens ao se trabalhar com o QFD. De acordo com Carnevalli, Miguel e Calarge (2008), entre os principais benefícios do uso do QFD está em ajudar no trabalho de equipe, melhoria da comunicação entre departamentos, redução do número de falhas de projeto e redução de custos de projeto.

Miguel (2008) apresenta outras vantagens em se trabalhar com o QFD, como a redução do número de reclamações de clientes, maior participação no mercado, redução no tempo de desenvolvimento, construção de uma base de conhecimento devido ao processo de registro e documentação e maior satisfação dos clientes.

Para Akao (1990), os principais benefícios ao se introduzir o conceito de QFD no desenvolvimento de novos produtos são:

- Desenvolver produtos que atendam às necessidades dos clientes;

- Melhorar a cooperação interdepartamental e a comunicação, além de auxiliar na identificação de problemas no início do desenvolvimento.

Apesar dos benefícios, Cheng e Melo Filho (2007) afirmam que o QFD é relativamente pouco utilizado no Brasil. De acordo com os mesmos autores, alguns fatores foram identificados como desmotivadores ao uso do QFD por algumas empresas. Entre estes fatores foram identificadas expectativas não alcançadas, problemas durante a implantação e decisão gerencial. Entre as dificuldades destacadas foram a falta de experiência no uso do método, falta de comprometimento entre os membros da equipe e a dificuldade em se trabalhar com matrizes grandes. Já para Carnevalli, Miguel e Calarge (2008), outras dificuldades enfrentadas por empresas na implantação e uso do QFD são os problemas em interpretar a voz do cliente, a priorizar características de qualidade, definir a qualidade projetada e dificuldades geradas pelo trabalho em equipes.

Entre as dificuldades metodológicas para o uso do QFD, de acordo com Carnevalli, Miguel e Calarge (2008), em 78% dos casos as dificuldades estão relacionadas à aplicação da matriz da qualidade. Segundo os autores, após a aplicação de um questionário em sete empresas nacionais que utilizam o QFD, identificou-se que há uma resistência quanto a aplicação do QFD, desmotivando seu uso.

Nos itens a seguir serão apresentados dezessete métodos de QFDs ambientais de produto encontrados na revisão sistemática.

3.1.2 QFDE (Quality Function Deployment for Environment)

O método mais encontrado na literatura quando se trata de QFD para o ecodesign é o QFDE. Publicado em 2001 pelos pesquisadores Masui, Sakao e Inaba, do Instituto Nacional de Ciência Industrial Avançada e de Tecnologia, da Mitsubishi, do Japão, o QFDE pode ser entendido como uma "metodologia para dar suporte ao DfE (*Design for Environment*) através da incorporação dos aspectos ambientais[6] no QFD". Já para Yim e Herrmann (2003), o QFDE pode ser considerado como "um manual de DfE com aplicação do QFD em aspectos ambientais".

Em outras palavras, pode-se definir o QFDE como sendo um método de QFD aplicado nas primeiras fases do desenvolvimento de produtos que integra os fatores ambientais como requisitos de projeto e requisitos de clientes. Assim, o QFDE traduz as necessidades e desejos dos clientes (VoC) e as necessidades de qualidade ambiental em requisitos de projeto.

O QFDE apresenta um conjunto de 15 VoCs e 15 Métricas de Engenharia (ME) como forma de abranger a maioria dos problemas ambientais do produto, de modo que os *designers* os considerem para incorporar as questões ambientais ao projeto e melhorar o desempenho ambiental do produto que está sendo desenvolvido, como é mostrado nas tabelas 9 e 10:

---

[6] Elemento de atividades, produtos ou serviços de uma organização que pode interagir com o meio ambiente (ABNT, 2004)

Tabela 9. Voz do consumidor (VOC) ambiental do QFDE

1	Uso de menos material através da diminuição da quantidade de materiais incorporados ao produto.
2	Facilidade de transporte e manuseio durante a logística até os distribuidores e durante a logística reversa.
3	Facilidade de processo e montagem durante a fabricação.
4	Redução do consumo de energia durante todas as fases do ciclo de vida do produto.
5	Alta durabilidade, com baixa deteriorização e alta confiabilidade durante o uso.
6	Facilidade de reusar o produto ou suas partes.
7	Facilidade em realizar a desmontagem do produto ou fazer manutenção na fase de uso e no seu fim-de-vida.
8	Facilidade em limpar o exterior do produto.
9	Facilidade de esmagar ou triturar o produto durante o fim-de-vida.
10	Facilidade em separar os diferentes tipos de materiais presentes durante seu fim-de-vida.
11	Seguro para incineração, sem a emissão de substâncias tóxicas no estágio de fim-de-vida.
12	Seguro para disposição em aterros sanitários, sem liberar substâncias tóxicas que possam ultrapassar os limites do aterro.
13	Não oferece perigo para o ambiente e sua vizinhança durante o processo de manufatura e uso, como substâncias tóxicas, barulho e vibração.
14	Emissão segura pelas fábricas.
15	Possível de realizar a disposição facilmente.

Tabela 10. Métricas de engenharia (ME) do QFDE

1	Peso do produto.
2	Volume do produto.
3	Número de partes do produto.
4	Número de tipos de materiais que compõem o produto.
5	Facilidade de alterar a cor externa por efeito de sujeira.
6	Resistência das partes do produto.
7	Tempo de vida útil do produto.
8	Consumo total de energia ao longo de todas as fases do ciclo de vida do produto.
9	Percentual de uso de materiais recicláveis no produto.
10	Volume de emissão de barulho, vibração e ondas eletromagnéticas durante o uso do produto.
11	Massa de poluentes atmosféricos gerada ao longo do ciclo de vida do produto.
12	Massa de poluentes aquáticos gerados ao longo do ciclo de vida do produto.
13	Massa de poluentes ao solo gerada ao longo do ciclo de vida do produto.
14	Biodegradabilidade dos materiais e partes a serem dispostos em aterro sanitário.
15	Toxicidade dos materiais do produto.

As duas primeiras fases do QFDE consistem em desdobrar os requisitos do consumidor em características de engenharia, e na sequência, desdobrar as características de engenharia em componentes do produto, como é mostrado na figura 11:

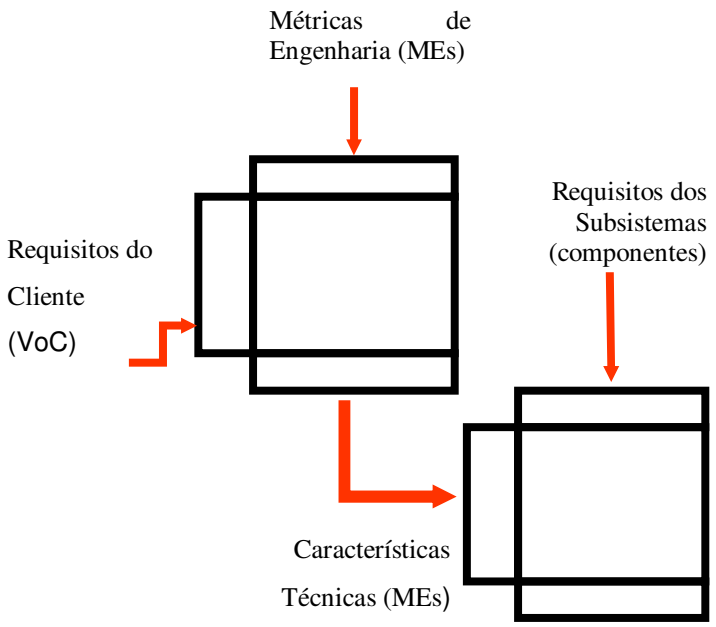

Figura 11: Duas primeiras fases do QFDE de Masui et al. (2001)

Conforme apresentado na figura acima, a fase 1 da matriz de relação do QFDE consiste em relacionar os requisitos do consumidor com as métricas de engenharia, tanto aquelas tradicionais de produto como as ambientais, estas apresentadas nas figuras 14 e 15. Para cada relação são atribuídos pesos: 9 – a relação é muito importante; 3 – a relação é importante e 1 – quando a relação é relativamente importante quando comparada as demais. Quando relações não existem, não são atribuídos quaisquer valores. Na figura 12, a coluna "Peso do Consumidor" se refere ao grau de importância dado pelos consumidores a cada um dos "Requisitos do consumidor", cujos valores também devem ser 9, 3 ou 1.

A "Pontuação total" é dada pela soma da multiplicação de cada coluna das "Métricas de Engenharia" por seus respectivos "Pesos do Consumidor". Aquelas métricas que apresentarem maior pontuação total e, consequentemente maior peso relativo, serão identificados como os requisitos mais importantes.

Fase 1 do QFDE		Métricas de Engenharia																			
Requisitos do consumidor	Peso do Consumidor	Do produto					Peso	Volume	Número de partes	Número de tipos de materiais	Facilidade em ficar sujo	Durabilidade	Tempo de vida físico	Quantidade de energia consumida	Taxa de materiais reciclados	Barulho, vibração, eletromagnetismo	Poluição do ar	Poluição água	Poluição solo	Biodegrabilidade	Toxidade dos materiais
Do produto																					
Uso de menos material																					
Fácil de transportar																					
Fácil de processar e montar																					
Baixo consumo de energia																					
Alta durabilidade																					
Fácil de reusar																					
Fácil de desmontar																					
Fácil de limpar																					
Fácil de amassar																					
Fácil de separar																					
Seguro ao incinerar																					
Seguro para o aterro																					
Sem risco para o ambiente vizinho																					
Livre de emissões																					
Possível de dispor facilmente																					
	Pontuação total																				
	Peso relativo																				

Figura 12: Fase 1 do QFDE

Na fase 2 do QFDE (figura 13) há o desdobramento das métricas de engenharia em componentes do produto que está sendo considerado. Os pesos relativos da fase anterior são transpostos para a coluna identificada nesta fase 2. A distribuição dos pesos na matriz de relação é realizada da mesma forma que na fase anterior, ou seja, cada componente do produto recebe um valor variando entre 9, 3 e 1 quando existir relação entre as métricas de engenharia. Ao final é realizada a soma da pontuação total e a relativa, de modo semelhante como foi feito na fase 1.

		Componentes do produto					
Fase 2 do QFDE Métricas de engenharia	Pesos relativos da Fase 1						
Do Produto							
Peso							
Volume							
Número de partes							
Número de tipos de materiais							
Facilidade em ficar sujo							
Durabilidade							
Tempo de vida físico							
Quantidade de energia consumida							
Taxa de materiais reciclados							
Barulho, vibração, eletromagnetismo							
Poluição do ar							
Poluição água							
Poluição solo							
Biodegrabilidade							
Toxidade dos materiais							
	Pontuação total						
	Peso relativo						

Figura 13: Fase 2 do QFDE

O método QFDE apresentado por Masui, Sakao e Inaba (2001) tem por objetivo identificar quais funções e componentes devem ser priorizados de modo a satisfazer o desejo dos consumidores preocupados com as questões ambientais. Como método, ele apresenta duas tabelas pré-definidas para a qualidade exigida e para as características de qualidade (respectivamente chamadas de VoC e Métricas de Engenharia). Uma questão a ser levantada sobre estas tabelas é que 15 VoCs ambientais e 15 MEs podem implicar em uma maior demanda de tempo para o preenchimento das matrizes da qualidade, incorrendo assim em maiores custos também. Em outras palavras, o método apresenta muitos requisitos ambientais, e considerando ainda os requisitos tradicionais de qualidade, a matriz tende a se tornar demasiadamente longa.

Ainda relacionado às duas tabelas propostas pelos autores, é importante salientar que cada produto exige requisitos diferentes, sejam eles ambientais ou de qualidade. Ou seja, como Cheng e Melo Filho (2007) apresentam, o ponto de partida do QFD é a identificação da VoC, que se atendida satisfatoriamente poderá resultar no desenvolvimento de um novo produto que tenha sucesso. Deste modo, o ideal é que para cada projeto existisse um levantamento das qualidades exigidas e das características da qualidade ambientais, além daquelas de qualidade.

Um ponto importante da matriz da qualidade está no planejamento e no projeto da qualidade, que permitem comparar o produto da empresa com os principais concorrentes e se projetar novos parâmetros para os itens da característica da qualidade. Estas etapas não são consideradas pelo QFDE, incorrendo no risco de não desenvolver um produto que apresente vantagens aos concorrentes no mercado.

3.1.3 Environmental QFD

Kato e Kimura (2003) apresentaram uma metodologia baseada numa matriz de QFD e na técnica *Quantification Theory type IV*, chamada de *Environmental* QFD. De acordo com os autores, esta técnica tem por objetivo correlacionar e analisar afinidades entre dois objetos que podem ser plotados em um gráfico, facilitando a visualização.

A matriz do *Environmental* QFD é composta por grupos de requisitos, como sociais (que englobam questões ambientais), do usuário e da empresa. Cada grupo de requisitos pode ser detalhado, por exemplo: o requisito do usuário pode conter outro requisito "segurança e confiança para o usuário" e dentro deste requisito pode-se ter "não causa incêndio" como se verifica na figura 14.

Os requisitos técnicos são identificados por material, projeto, manufatura, vendas, uso, reciclagem/recuperação, logística reversa, educação e outros requisitos. A relação entre os requisitos sociais, do usuário e da empresa com os requisitos técnicos são identificadas por índices numéricos que variam de 1 a 5 (da relação mais fraca a mais forte, respectivamente).

Environmental QFD

			Material				Projeto							Manufatura				Vendas			Uso				Coleta		Recuperação/Reciclagem										Logística reversa			Educação		Outros			5 anos depois			10 anos depois		
			Economia de material	Material reciclado	Materiais não tóxicos	Materiais de alta funcionalidade	Projeto para o ciclo de vida	Padronização das partes	Padronização de material	Seleção de material	Projeto para montagem/desmontagem	Projeto modular	Métodos de LCA	Baixa emissão no Processo	Economia de energia no Processo	Melhoria na produção	Redução de embalagens	Embalagem reciclável	Estimação da demanda	Otilização da logística	Economia de energia no uso	Economia de energia em modo de espera	Tecnologia de diagnóstico anormal	Uso de gestão histórica	Estimativa de perda	Logística reversa ótima	Tecnologia de rastreamento de produto	Estimativa de tempo de vida extra	Material desentoxicável	Tecnologia de desmontagem	Tecnologia de lavagem	Tecnologia de separação	Informação do produto	Recuperação de material	Alta taxa de recuperação de material	Recuperação na economia de energia	Desenvolvimento do mercado	Encontrar demanda/fornecedores	Possibilidade de reuso	Educação do consumidor	Educação dos funcionários	Leis/Regulamentação	Importância	Nível de status	Nível da meta	Valor do crescimento	Peso	Nível da meta	Valor do crescimento	Peso
Requisitos sociais	Baixa emissão no ambiente global	Longo período de uso de recursos energéticos																																																	
		Longo período de uso de recursos minerais																																																	
		Prolongamento da área de disposição final																																																	
		Estabilização da temperatura do ar																																																	
		Não difusão de substâncias perigosas																																																	
Requisitos do usuário	Confiança e segurança para o usuário	Seguro																																																	
		Não causa incêndio																																																	
		Manutenção do valor do produto																																																	
		Uso é prolongado																																																	
		Produtos usados são recolhidos																																																	
		Baixa taxa de falha																																																	
		Fácil de consertar																																																	
		Fácil manutenção																																																	
	Serviço de alta qualidade	Serviço atraente																																																	
		Alta qualidade																																																	
		Bom preço																																																	
		Baixo consumo de energia																																																	
		Atualização por troca de partes																																																	
		Fácil de instalar																																																	
		Serviço por demanda																																																	
		Serviço no local																																																	
Requisitos da empresa	Viabilidade do negócio	Mercado para reusados																																																	
		Alto ganho de valor																																																	
		Acesso a materiais																																																	
		Não há leis restritivas																																																	
	Reconhecimento do negócio	Avaliar atitude da empresa																																																	
		Alto valor para produtos usados																																																	
		Importância 5 anos depois																																																	
		Importância 10 anos depois																																																	

Figura 14: Environmental QFD

A matriz do *Environmental* QFD é analisada e seus resultados são plotados em um gráfico por meio da *Quantification Theory type IV*, como é mostrado na figura 15.

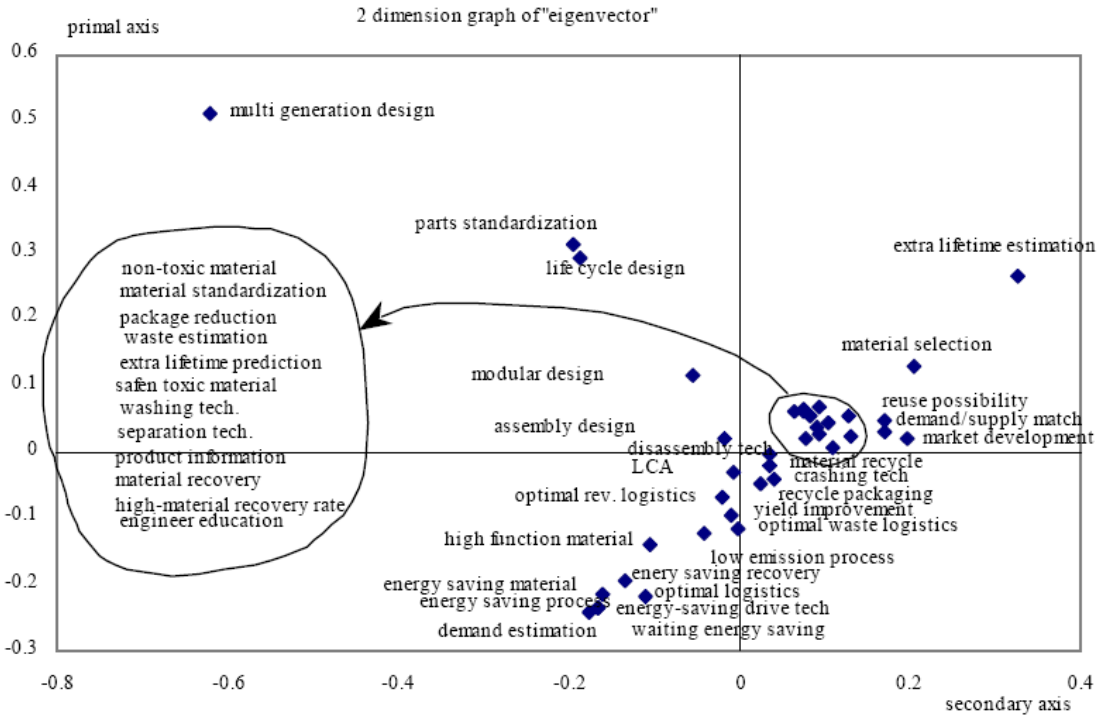

Figura 15. Quantificação dos requisitos do Environmental QFD. Fonte: Kato e Kimura (2003)

Pode-se observar na figura 15 que as tecnologias mais importantes, pela ponderação da matriz da figura 14, são identificadas no primeiro quadrante (superior, à direita), como uso de materiais não-tóxicos, padronização de material e possibilidade de reuso. Por outro lado, economia de energia e estimativa de demanda é apontada como menos importantes.

No exemplo apresentado pela figura 14, foram identificados 27 requisitos de qualidade exigida e 40 de características da qualidade, somente envolvendo características ambientais (nenhuma característica relacionada a qualidade). Neste caso fica possível estabelecer 1.080 correlações, que é um número bastante grande, podendo tornar sua aplicação demorada e custosa.

Outra característica do método que deve ser considerada é sobre o uso da *Quantification Theory type IV*. A sua utilização pode despender recursos financeiros com aquisição de softwares/treinamento e até mesmo desestimular a utilização de um QFD ambiental.

A definição de níveis de meta (qualidade planejada) para o horizonte de 5 e 10 anos talvez não seja apropriada devido às dificuldades de previsão de comportamento das exigências dos clientes em um prazo de tempo relativamente grande.

O Environmental QFD foca somente na matriz da qualidade, e não em desdobramentos sucessivos (QFD de 4 fases) ou no QFD amplo de Akao (1996).

3.1.4 QFD de Hochman e O'Connell

Este método de QFD foi desenvolvido com o objetivo de melhorar a qualidade, velocidade e a eficácia-custo das iniciativas de *Design for Environment* (HOCHMAN; O'CONNELL, 1993).

A aplicação do método consiste na equipe de projeto identificar requisitos primários de projeto (coluna "primário"), cujos detalhes sobre o que os consumidores desejam são atualizados na coluna "secundário" (figura 16). Os requisitos ambientais dos clientes são também identificados pela "Voz ambiental", apresentados na matriz como "Pode ser atualizado", "Conserva energia" e "Reciclado". Todos os requisitos dos consumidores recebem pontuações numa escala entre 1 a 5, preenchidos na coluna "Nível de importância do consumidor" em escala crescente de importância.

QFD de Hochman e O'Connell

Relação		Nível de importância do consumidor	Sensitividade do receptor	Ganho da antena	Peso do telefone	Aspecto	Cor	Fácil de desmontar	% Plástico reciclável	% Plástico reciclado	Consumo de energia	Avaliação competitiva	Taxa de melhoria	Peso absoluto
Primário	Secundário													
Fácil de ouvir a voz	Sem distorção													
	Sem ruído													
Fácil de segurar	Peso confortável													
	Ajusta ao rosto													
Boa aparência	Bom acabamento													
	Bonito													
Ambiental	Reciclável													
	Usa pouca energia													
	Pode ser atualizado													
	Medida de importância técnica													
Desempenho da empresa														
Desempenho do concorrente														
Especificações meta														

Forte
Média
Fraca

Figura 16: Exemplo da matriz do QFD ambiental de Hochman e O'Connell aplicada ao projeto de um telefone móvel

Cada requisito do consumidor é relacionado a pelo menos uma característica técnica do produto, além das características ambientais, identificadas na matriz como "facilidade de desmontar", "% de plástico reciclável", "% plástico reciclado" e "consumo de energia", por meio de uma relação forte, média ou fraca. Relações também podem ser identificadas entre as características técnicas (do produto e as ambientais)

Este método permite avaliar também o desempenho do produto em desenvolvimento em relação ao da empresa concorrente, além da evolução competitiva do produto.

O QFD de Hochman e O'Connell é o que apresenta maior similaridade com o QFD tradicional, apresentando o desdobramento da qualidade exigida até o segundo nível, os principais itens de qualidade planejada e projetada e até mesmo uma matriz de correlação entre as características de qualidade.

Uma crítica possível para este método é que os requisitos ambientais, a princípio, já seriam identificados pela voz do consumidor, eliminando assim a necessidade da utilização de um QFD ambiental, como este de Hochman e O'Connell.

3.1.5 Ecological Quality Function Deployment de Ernzer e Birkhofer

O Eco-QFD tem por objetivo desdobrar as necessidades do mercado (voz do consumidor) em uma lista de requisitos de projeto considerando as questões ambientais (ERNZER; BIRKHOFER)

O método proposto pelos pesquisadores alemães consiste em relacionar na matriz do Eco-QFD os requisitos de produto e ambientais (coluna definida como "Primário" da figura 17) com as características técnicas, visuais e de uso.

Eco-QFD de Ernzer e Birkhofer

			Características técnicas							Características visuais	Controle/Utilização					
			Motor			Saco de pó			Materiais	Carcaça	Manuseio		Sucção		Manutenção	
Primário	Secundário	Terciário	Poder	Eficiência	Tempo de vida	Capacidade	Eficiência do filtro	Tempo de vida			Acesso à escova	Acesso ao filtro	Poder de sucção	Energia dissipada		Soma dos pesos
Manuseio	no transporte															
	na aspiração															
Força de sucção	remove bem a sujeira	remove muita sujeira														
		alto poder														
		indicador de mudança no saco de pó														
		sinais visíveis de limpeza														
		sem cheiro														
Ambiental	no uso	filtro de ar														
		pouco barulho														
		baixa corrente														

Figura 17: Exemplo da matriz do Ecological Quality Function Deployment (Eco-QFD) para um aspirador de pó

Identificada cada relação entre os requisitos e as características dos produtos, estas relações recebem valores 9 quando for forte, 3 quando for moderada e 1 quando for fraca. O valor total da soma de cada linha e coluna permite identificar quais requisitos e características devem ser prioritárias no desenvolvimento do produto.

Embora o Eco-QFD esteja inserido dentro de uma sequência de atividades (que incluem outros métodos e técnicas) propostas pelos autores com o objetivo de reduzir os impactos ambientais de produtos, torna-se importante observar algumas características quando comparadas ao QFD tradicional.

O primeiro ponto a se destacar é que não são consideradas no Eco-QFD a qualidade planejada e a qualidade projetada para o produto, assim como também não é apresentada a coluna de grau de importância, que reflete o valor para o consumidor de cada item da qualidade exigida.

Outra questão a ser abordada é sobre a utilização do Eco-QFD. Os autores não apresentam uma descrição das atividades necessárias para aplicação do método, tornando difícil inclusive a compreensão da soma dos pesos da matriz de relação.

O método pode ser visto apenas como uma tabela de correlação entre requisitos funcionais, ambientais e de uso com características técnicas, visuais e de utilização. Não são apresentados outros desdobramentos da matriz para processos, componentes e tecnologia, por exemplo.

3.1.6 GQFD

Proposto pelos autores australianos Wong e Juniper (ca. 2000), o GQFD consiste em relacionar os “O que”, que são os atributos ambientais e do consumidor com os “Como”, atributos de engenharia do produto.

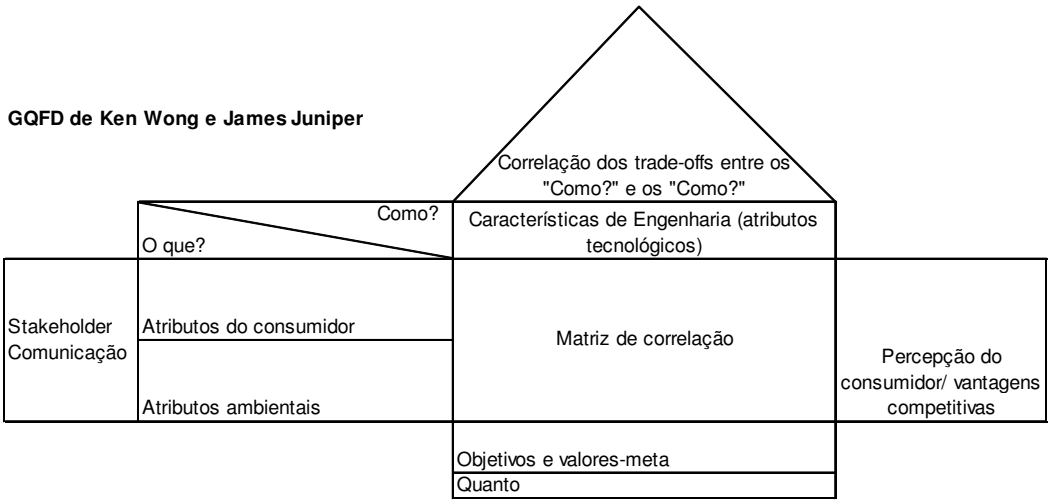

Figura 18: Framework do método GQFD

O teto da casa da qualidade na figura 18 permite identificar *trade-offs* entre os atributos de engenharia, os “Como”. Assim como no QFD tradicional, através de pesos são identificadas relações entre os requisitos ambientais e do consumidor com os requisitos técnicos do produto.

A estrutura do GQFD não difere muito da casa da qualidade do QFD tradicional. Basicamente o método traz como diferença que os requisitos ambientais da voz do consumidor devam ser obtidos de todas as partes interessadas, como investidores, governos e Organizações não Governamentais (*Stakeholders*).

Uma crítica a ser feita ao GQFD, que pode causar dificuldades quanto a sua aplicação, reside no fato de que é apresentado somente um framework do método. Os autores não apresentam um exemplo, nem mesmo como os cálculos devem ser realizados.

Outro ponto importante a ser observado, a exemplo do QFD de Hochman e O'Connell, no QFD tradicional poderia-se incluir a voz do consumidor ambiental, sendo talvez desnecessário haver mais um método de ecodesign baseado no QFD como o GQFD.

3.1.7 3D-QFDE

Também baseado no QFDE de Masui et al. (2001), o 3D-QFDE foi desenvolvido para avaliar diferentes produtos não somente do ponto de vista da qualidade e do meio ambiente, mas também sob o custo do projeto. Esta análise conjunta de alternativas de produtos permite aos designers decidirem qual produto é o ideal para seguir para as demais etapas de desenvolvimento entre aqueles que fazem parte do portfólio da empresa.

No exemplo apresentado pelos autores Shih e Liu (2005), foram avaliados 3 projetos para tornar notebooks e computadores pessoais (PCs) em produtos ambientalmente melhores. A alternativa I consistia em introduzir soldas sem chumbo nos componentes dos computadores, a alternativa II se referia a substituir a base de plástico por liga de metal nos gabinetes, enquanto a terceira alternativa assumia a produção mais limpa na manufatura de telas de LCD.

A estrutura de aplicação do 3D-QFDE se baseia primeiramente na elaboração de uma matriz de QFDE para cada alternativa de projeto, conforme a figura 19.

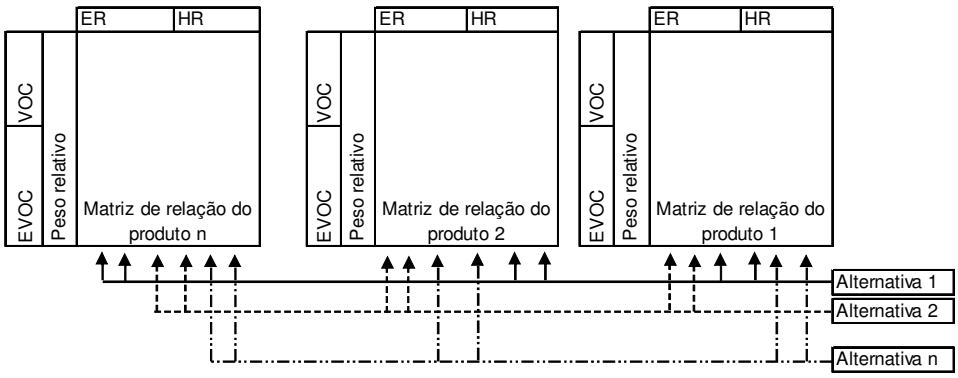

Figura 19. Estrutura de aplicação do 3D-QFDE

O processo de aplicação do 3D-QFDE tem início com a inclusão de um especialista dos produtos em questão no grupo de aplicação do método, seguindo para o cálculo das melhorias ambientais (EI) e melhorias de qualidade (QI) e estimativas de custo (CI) (tabela 11). As equações para cálculo destes parâmetros não foram apresentados pelos autores.

Tabela 11. Cálculo das melhorias de qualidade (QI), ambientais (EI) e custo (CI)

		QI	EI
Alternativa I	Produto 1		
	Produto 2		
	Produto 3		
Alternativa II	Produto 1		
	Produto 2		
	Produto 3		
Alternativa III	Produto 1		
	Produto 2		
	Produto 3		

	QI total	EI total	CI
Alternativa I			
Alternativa II			
Alternativa III			

Os valores obtidos de QI total, EI total e CI são transpostos para uma figura triangular, onde cada um dos três vértices do triângulo corresponde aos requisitos de qualidade, ambientais e de custo. A estrutura piramidal (figura 20) permite os designers visualizarem quais as melhores alternativas de produto.

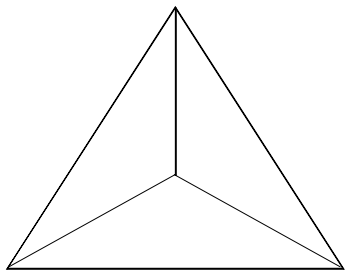

Figura 20. Triângulo de 3D-QFDE que permite a comparação de requisitos de qualidade, ambientais e custo

Por usar a matriz da qualidade do QFDE, as mesmas críticas relacionadas para o método de Masui et al. (2001) continuam sendo válidas para o 3D-QFDE, ou seja, há muitos itens de qualidade exigida e características de qualidade e não há qualidade planejada e projetada. O QFDE apresenta desdobramentos seguindo a estrutura do QFD de 4 fases, isto é, desdobra os requisitos do consumidor em características de projeto, depois em componentes e em processo. Por outro lado, o 3D-QFDE apresenta somente a casa da qualidade, relacionando os itens ambientais e exigidos pelos clientes com as características de projeto.

O artigo que apresenta o método peca em não apresentar de forma clara como o resultado da correlação dos QFDEs é transmitido para a tabela de cálculo da qualidade, do meio ambiente e do custo, desestimulando os *designers* que queiram adotar o 3D-QFDE.

Em resumo, o método proposto por Shih e Liu (2005) apresenta uma grande contribuição com a possibilidade de se comparar diversas alternativas e produtos sob o ponto de vista da qualidade, ambiental e de custo, porém apresenta as mesmas deficiências já observadas no QFDE, método utilizado como referência pelos autores.

3.1.8 Eco-VOC

Com o objetivo de extrair dos consumidores os requisitos ambientais que desejam para os produtos, Yim e Herrmann (2003) propuseram uma metodologia chamada de *Eco-Voice* (Eco-VOC) aplicada a uma versão simplificada do QFDE.

O processo de extração da Eco-VOC consiste basicamente em 3 etapas: 1) Desdobrar a VOC convencional do produto em termos de projeto; 2) Interpretar a VOC convencional em parâmetros de engenharia relacionados ao meio ambiente; e 3) Gerar a eco-VOC baseada na lista de VOCs ambientais de Masui et al. (2001) (YIM; HERRMANN, 2003).

	Etapa 1	**Etapa 2**	
VOC	Termos de Projeto (propriedades físicas)	Parâmetros de Engenharia (atributos do produto relacionados ao meio ambiente)	Eco-VOC
Leve	Peso	Material	Consumo de menos material
Silencioso	Menos barulho	Energia	Consumo de menos energia
Fácil de segurar	Ergonômico	Material	Uso de materiais renováveis
...	...	...	...

Etapa 3
Checklist da Eco-VOC
Menor consumo de material
Menor consumo de energia
Uso de materiais renováveis
...

Figura 21. Processo de extração da Eco-VOC

Obtida a Eco-VOC, é realizada uma matriz de relação com o objetivo de se identificar o nível de importância das Eco-VOCs e também o nível de importância das Eco-VOCs comparadas às VOCs convencionais. Os pesos atribuídos à matriz de relação devem ser 9 quando a relação for forte, 6 quando a relação for moderada e 3 quando for fraca, conforme a figura 22.

Matriz de relação entre VOC convencional e ambiental

VOC convencional / VOC ambiental	Secagem rápida	Fácil de segurar	Seguro de operar	Baixo ruído	Nível de importância das VOCs ambientais		Nível de importância das VOCs ambientais de acordo com as VOCs	
	9	6	6	3	Importância	%	Importância	%
Menor consumo de material	3	9	6	9	27	31	144	28
Menor consumo de energia	9	0	3	9	21	24	126	25
Redução substâncias perigosas	3	3	9	0	15	17	99	19
Facilidade de desmontagem	0	3	6	0	9	10	54	10
Facilidade de transporte e estocagem	0	6	6	3	15	17	81	16

Figura 22. Matriz de relação entre as VOCs convencionais e ambientais como exemplo para um secador de cabelos

As VOCs convencionais e as VOCs ambientais mais favoráveis servirão de *input* para o QFDE simplificado, que permitirão os designers identificarem quais VOCs estão associadas a cada componente do produto, auxiliando no desenvolvimento de soluções para atender os requisitos técnicos e ambientais do produto.

QFDE simplificado		Partes do Produto						
		Importância	Motor	Ventoinha	Aquecedor	Carcaça	Filtro	Componentes
VOC Convencional	Fácil de segurar							
	Leve							
	Consome menos energia							
	Seca mais rápido							
	Seguro ao usar							
	Silencioso							
	Fácil de operar							
VOC ambiental	Menos material							
	Usa materiais reciclados							
	Alta durabilidade							
	Usa energia limpa							
	Usa materiais renováveis							
		Média geral						
		Importância Relativa						

Figura 23. QFDE simplificado como exemplo para um secador de cabelos

O processo de extração da VOC em Eco-VOC é uma alternativa para situações onde o consumidor não tenha qualquer tipo de exigência ambiental para seus produtos e mesmo assim a empresa queira desenvolver um produto com características ecológicas. Porém, como Cheng e Melo Filho (2007) afirmam, as empresas não devem ficar restritas somente aos dados primários (pesquisas de mercado junto aos clientes), como também devem consultar dados secundários para incrementar a voz do consumidor, como

“estatísticas governamentais, publicações técnicas, dados comercializados por empresas de pesquisa de mercado e informações internas da empresa” ou os stakeholders, como sugere o GQFD. A partir destas outras fontes é possível identificar os requisitos ambientais para os produtos.

Com relação ao QFDE simplificado, trata-se de uma matriz de relação que identifica a importância relativa de cada VOC e Eco-VOC com os componentes do produto. As demais características do QFD não são identificadas, tais como qualidade planejada e projetada e demais desdobramentos.

3.1.9 EI2QFD

O EI2QFD propõe o uso do QFD suportado pelo método Eco-Indicator 99 (EI99), utilizado na Avaliação do Ciclo de Vida de produtos.

O Eco-Indicator 99 neste caso é sugerido pelos autores para auxiliar na extração da voz do meio ambiente (VoE), pois “o meio ambiente não pode ser facilmente consultado (como os consumidores) sobre seus requisitos no produto” (ERNZER et al., 2003), auxiliando na avaliação dos impactos ambientais.

O módulo da casa da qualidade (HoQ) é realizado em duas partes e é baseado no QFD convencional: Primeiro são relacionados requisitos dos consumidores com características dos produtos. No segundo momento se relaciona características do produto com componentes do produto.

O módulo da casa ambiental (HoE) tem por objetivo transferir os requisitos derivados dos resultados do Eco-indicator para os componentes dos produtos (ERNZER et al., 2003). A estrutura da sua aplicação é descrita na figura 24:

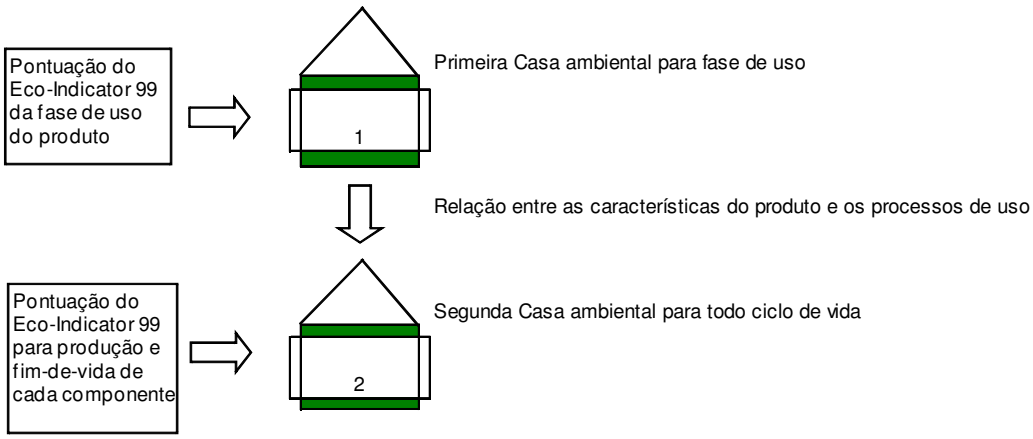

Figura 24. Procedimento da Casa Ambiental

Na primeira casa ambiental, os requisitos ambientais (VoE) e dos consumidores (VoC) estão relacionados às mesmas características técnicas dos produtos, devendo a equipe de QFD preencher a primeira casa ambiental como na figura 25:

	Características do produto							
Primário	Características técnicas				ticas visuais		Uso	
Secundário	Motor		Produção de suco		Carcaça e junções		Manuseio	
Terciário 9 - Correlação forte 3 - Correlação média 1 - Correlação fraca	Desempenho do motor	Consumo de energia	Ponto de pressão	Pote de suco	Rugosidade	*Design*	Fácil de desmontar	Soma ponderada
Consumo de energia								
Fácil de limpar								
Transporte								
Soma das demandas ambientais								

Figura 25: Exemplo da primeira casa ambiental relacionando requisitos ambientais da fase de uso com características do produto para um espremedor de laranja

Para se estabelecer uma relação entre os resultados dos impactos ambientais obtidos através do Eco-indicator 99 com o QFD, os autores propuseram uma tabela de conversão (tabela 12), onde:

Tabela 12. Relação entre percentual de impacto do Eco-indicator com o QFD

Porcentagem de impacto total	Escala no QFD
Menos de 5%	Nada
Menos que 15%	1
Menos que 35%	3
Mais que 35%	9

A combinação da primeira casa ambiental com a casa da qualidade que contém características dos produtos e seus componentes permite gerar a segunda casa ambiental, onde os requisitos ambientais das fases de produção e do fim-de-vida proveninetes do Eco-Indicator 99 também são considerados (figura 26).

			Componentes do produto							
9 - Correlação forte 3 - Correlação média 1 - Correlação fraca			Carcaça	Fonte de energia	Motor	Ponto de pressão	Peso absoluto do EI	Multiplicador	Soma ponderada	Rank
Produção de matéria-prima	Natural	Borracha								
	Plásticos	ABS								
		PP								
	Metais	Aço								
		Cobre								
		Outros metais não-ferrosos								
Reciclagem	Metal	Aço e ferro								
Perdas	Plástico	Plástico (excluindo PVC)								
	...									
Uso		Processo de pressão								
		Fácil de limpar								
		Transporte								
		Soma dos pesos								
		Rank dos pesos								

Figura 26. Segunda casa ambiental relacionando requisitos ambientais com componentes dos produtos

Os resultados da HoQ e da HoE permitirá o *designer* identificar quais componentes do produto apresentam maior importância tanto para o consumidor quanto para o meio ambiente, visualizados pela soma total dos pesos ou pela posição na coluna "rank" da segunda casa ambiental.

Um ponto importante a ser observado no EI2QFD é que embora Ernzer et al. (2003) afirmem que a utilização do Eco-indicator 99 não requeira "grande perícia, tempo e dinheiro para identificar materiais e processos com relevância ambiental", para a equipe de desenvolvimento de produtos de uma empresa, isso pode não representar uma verdade. A utilização de um método como o Eco-indicator 99 pode demandar treinamento, incorrendo em custos para a empresa. Além disto, deve-se considerar que o Eco-indicator 99, a exemplo do método EDIP[7], foi desenvolvido baseando-se em informações européias, podendo apresentar diferenças quando utilizado em outras regiões do globo.

Diferente dos demais métodos, o EI2QFD apresenta as casas da qualidade e ambiental separadas, ou seja, é criada uma matriz que relaciona somente os requisitos de qualidade (do consumidor) com as características de qualidade e outra relacionando os requisitos ambientais (através do Eco-indicator 99) com as características da qualidade. Deste modo há a necessidade de se criar o dobro de matrizes, ainda mais quando se faz o desdobramento das características de qualidade em componentes, e estes em processos, como apresenta o método.

A etapa anterior a composição da segunda HoE consiste em combinar a primeira HoE com a segunda HoQ. Esta etapa pode trazer confusão uma vez que novos valores de correlação são indicados pelos autores.

---

[7] Método desenvolvido por entidades dinamarquesas para o tratamento de categorias de impactos ambientais na ACV (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

Quando comparado com o QFD tradicional, observa-se que a qualidade planejada, a qualidade projetada, o desdobramento do QFD em fases e mesmo a correlação entre os itens das características da qualidade não estão presentes no EI2QFD.

Embora os autores Ernzer et al. (2003) afirmam que o EI2QFD reduz os esforços de aplicação quando comparado a outras alternativas de QFDs ambientais, observa-se que a utilização de diversas matrizes, e principalmente do Eco-indicator 99, podem representar dificuldades para a equipe de desenvolvimento de produtos não familiarizada a este método utilizado na ACV.

3.1.10 GreenQFD - II

Este método é definido por seus autores como a "melhoria do GQFD pela integração da LCA e do LCC nas matrizes de QFD, desdobrando requisitos ambientais, de custo e dos consumidores durante todo processo do desenvolvimento do produto" (ZHANG et al., 1999).

A metodologia de aplicação do GQFD-II consiste em 3 fases fundamentais:

Fase 1: Identificação dos requisitos técnicos, sendo os de qualidade obtidos através da VOC, os ambientais do LCA e os de custo do LCC.

Fase 2: Geração de alternativas de conceito de produto por meio da análise comparativa entre os requisitos de qualidade, ambientais e de custo para satisfazer os requisitos da fase 1.

Fase 3: Projeto do produto e do processo, que ocorre de forma semelhante ao QFD tradicional, exceto pelos *inputs* das matrizes que incluem requisitos ambientais e de custo.

Na figura 27 pode-se observar a estrutura da casa ambiental da fase 1. As entradas e saídas como energia, materiais e emissões são documentadas no “Inventário das fases do ciclo de vida”. O campo “Soma” identifica cada entrada e saída do inventário, assim como sua unidade (kg, kJ). Em “classificação dos impactos” tem-se uma lista de todos os impactos ambientais que são relacionados com as entradas/saídas do inventário na “Matriz de relação” por fatores de equivalência. Em “Caracterização do impacto”, os valores dos impactos ambientais podem ser calculados, e na sequência, em “Prioridades do impacto”, especialistas ambientais, como os autores propõem, podem sugerir uma lista de prioridades para cada impacto ambiental. Na “Matriz de cálculo dos pesos” são calculados os pesos médios dos impactos ambientais incorporando fatores como opinião pública, a situação local do meio ambiente e a estratégia de marketing da empresa. A Casa Verde do GreenQFD – II também apresenta uma “Matriz de correlação” entre as cargas do inventário e “Valores meta” como o objetivo a se atingir para a redução dos impactos ambientais, conforme a figura 27.

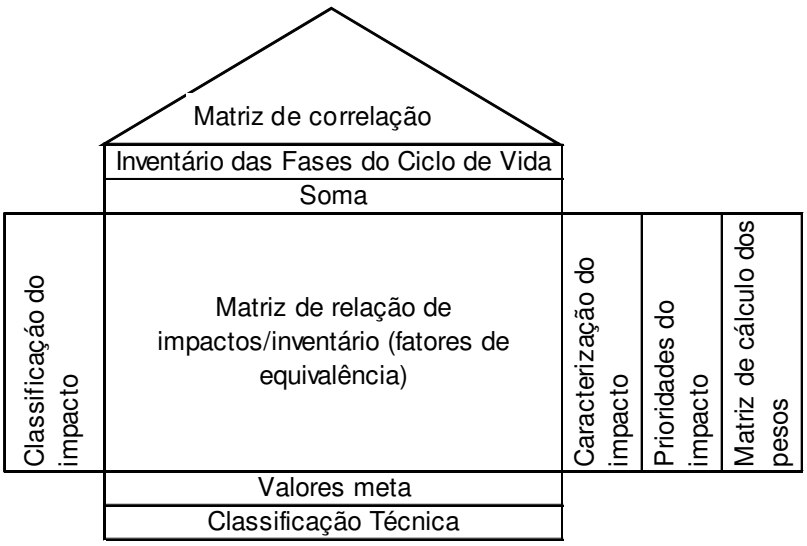

Figura 27. Casa Verde (Ambiental)

A casa comparativa de conceitos da figura 28 busca relacionar conceitos de produtos com requisitos das casas da qualidade, ambiental e de custo. Como resultado, o GreenQFD – II permite identificar o melhor conceito de produto com base no grau de satisfação, nos índices gerais de impactos ambientais e no custo total do ciclo de vida.

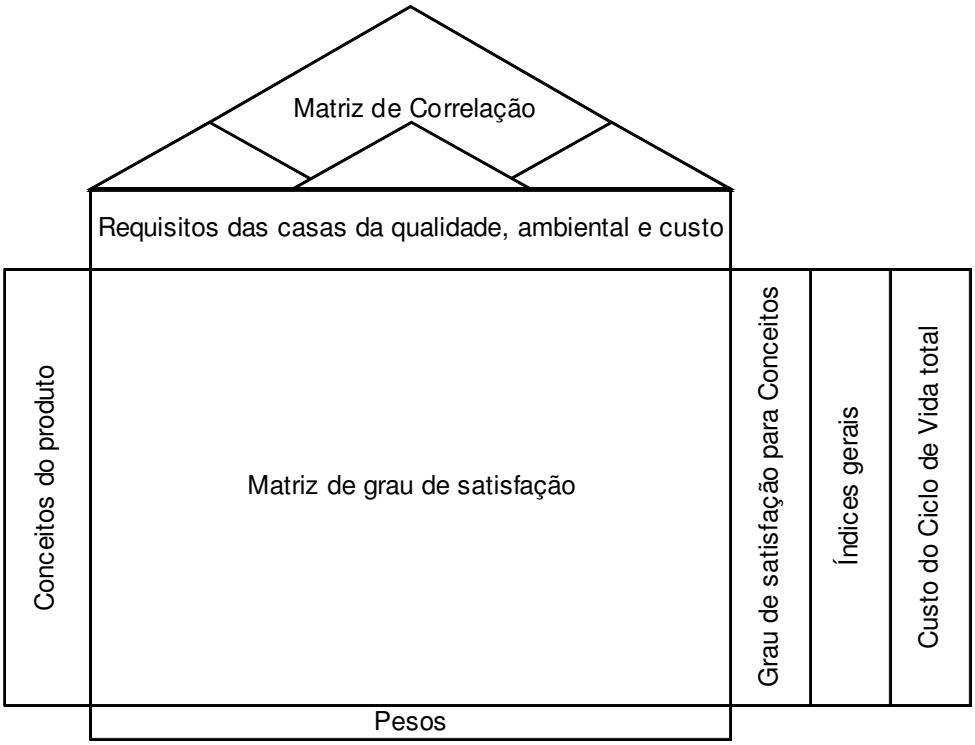

Figura 28: Casa comparativa de conceitos

Conforme apresentado por Zhang et al. (1999), o GQFD-II apresenta uma versão de QFD voltado para a melhoria da qualidade e ambiental dos produtos, além da redução de custos por meio da integração com a ACV e com o LCC (*Life Cycle Costing*). O método pressupõe a elaboração de três matrizes (qualidade, ambiental e custo) e uma quarta matriz relacionando os requisitos das anteriores com os conceitos (alternativas) de produto.

A casa da qualidade é apresentada como sendo uma matriz de relação entre os requisitos dos clientes e os requisitos de projeto (características da qualidade), atribuindo-se pesos às correlações existentes e identificando seus valores absolutos e relativos. Não há

qualidade planejada e projetada como sugere a versão tradicional do QFD, apesar de permitir a comparação de conceitos de produtos diferentes.

Ainda a respeito da matriz do QFD, o teto da casa comparativa de conceitos da figura 30 não necessitaria estar segmentado em três tetos menores para a qualidade, meio ambiente e custo, uma vez que o teto mais abrangente já permite a correlação entre estas características.

A introdução das análises ambientais a partir da inclusão da Avaliação do Ciclo de Vida e do Custo do Ciclo de Vida, embora permitam avaliar todos os impactos ambientais e custos respectivamente no ciclo de vida do produto, por outro lado podem apresentar dificuldades para as equipes de projeto não familiarizadas com estas técnicas.

De acordo com Lindahl (2000), técnicas como a ACV requerem um alto nível de conhecimento e especialistas, algo que não está ao alcance de muitas empresas, principalmente aquelas de pequeno e médio porte.

3.1.11 IGQFD (Integrated Green and Quality Function Deployment)

Definida pelos autores italianos Cagno e Trucco (2007) como uma metodologia focada em qualidade e eco-eficiência, o IGQFD busca reduzir as limitações encontradas no Green QFD-II.

O método é aplicado em 6 fases fundamentais: 1. Análise de configuração; 2. Identificação das necessidades de qualidade do consumidor; 3. Estruturação do projeto e especificações do produto; 4. *Green and Quality House* (GQH); 5. Escolha do conceito; 6. Desenvolvimento das características do produto e matriz de projeto.

A GQH consiste no desenvolvimento sequencial de várias atividades, como é possível observar pela figura 29.

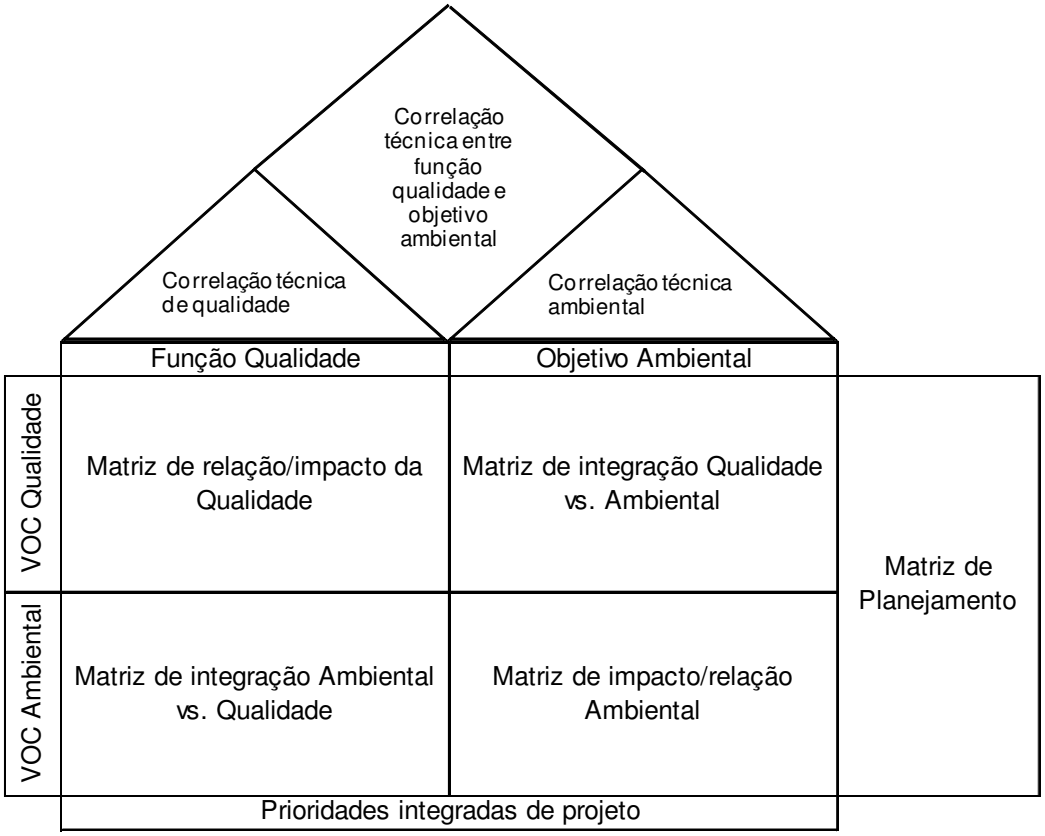

Figura 29: Estrutura da casa da qualidade e ambiental

As VoCs de qualidade e ambientais se referem a identificação das necessidades dos consumidores. A matriz de relação do IGQFD pode ser visualizada por quatro blocos: um que relaciona requisitos de qualidade (VoC da Qualidade) com funções de qualidade, outro que relaciona requisitos de qualidade com objetivos ambientais, o terceiro relacionando requisitos ambientais (VoC Ambiental) com funções de qualidade e por fim, a relação entre requisitos ambientais com objetivos ambientais.

A matriz de planejamento deve não somente considerar os julgamentos dos consumidores na normalização dos pesos da VoC ambiental e da VoC da qualidade, mas

também levar em conta as opiniões de especialistas ambientais e a própria estratégia de eco-eficiência da empresa.

O IGQFD apresenta uma série de mudanças quando comparado ao GQFD-II, como a exclusão do *Life Cycle Costing* e a simplificação na utilização da ACV. Estas mudanças tornam a aplicação do método mais simples e menos custosa para a empresa, porém algumas características devem ser observadas.

Segundo Cagno e Trucco, as características ambientais, chamada de "Objetivo Ambiental" da GQH, devem estar relacionadas a cada fase do ciclo de vida do produto, com excessão da fase de uso, considerada pelos autores pouco significante em relação aos impactos ambientais. Tendo em mente que é justamente nesta fase que os clientes podem mais contribuir com a atribuição de níveis de importância, já que eles são os usuários do produto, o IGQFD pode deixar de realizar o projeto ambiental de forma satisfatória. Outro detalhe importante é que em determinados produtos é na fase de uso que pode apresentar os maiores impactos ambientais.

Na macro-coluna "Matriz de Planejamento" da figura 29, embora apresente uma coluna para argumento de venda, presente no QFD tradicional, não são comparadas as características do produto em desenvolvimento com os concorrentes. Por consequência não há qualidade projetada. Também não há desdobramentos do QFD.

3.1.12 Uso combinado do QFDE, LCA e TRIZ

Este método apresentado por Sakao (2007) busca empregar de forma conjunta o QFDE, a Avaliação do Ciclo de Vida e a TRIZ. Ou seja, o método não propõe uma nova estrutura de QFD, apenas sugere sua aplicação combinada à ACV e à TRIZ, como segue na figura a seguir:

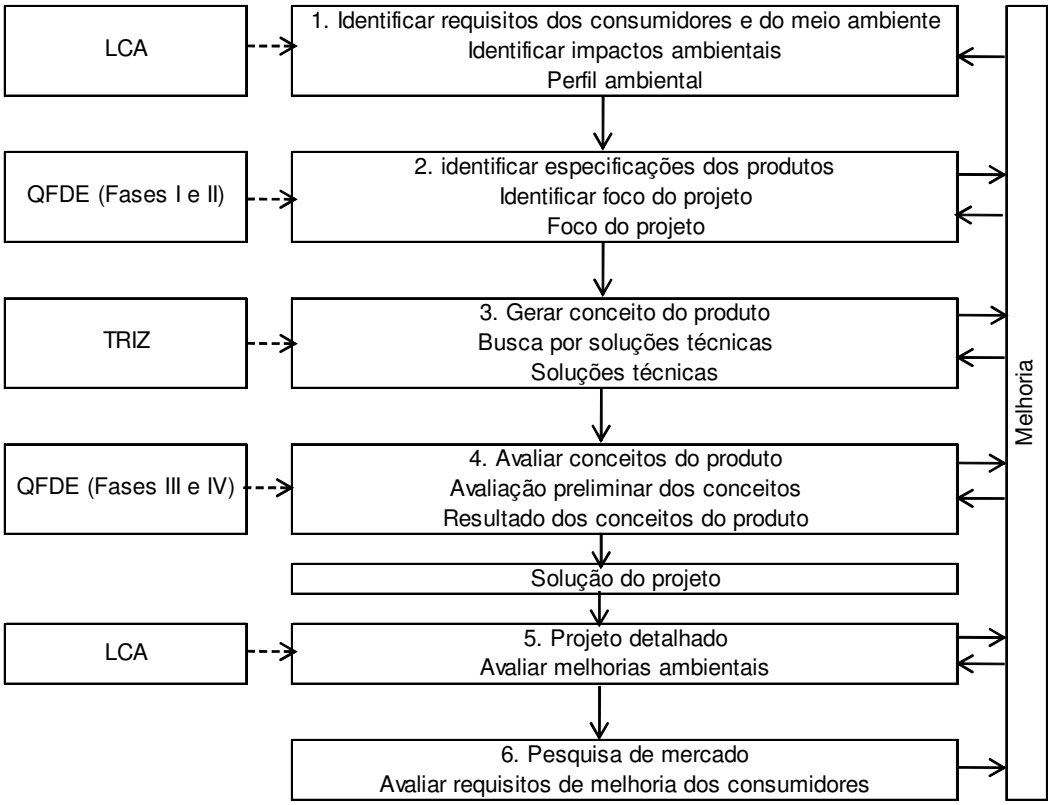

Figura 30. Procedimento de aplicação do uso combinado do QFDE, LCA e TRIZ

3.1.13 Uso combinado do QFDE e LCA

O uso deste método consiste na aplicação do QFDE nas etapas iniciais do desenvolvimento do produto, e posteriormente, no momento que houver mais informações a respeito do produto em desenvolvimento, é utilizada a ACV (SAKAO; MASUI; KOBAYASHI; INABA, 2005), conforme apresentado na figura 31.

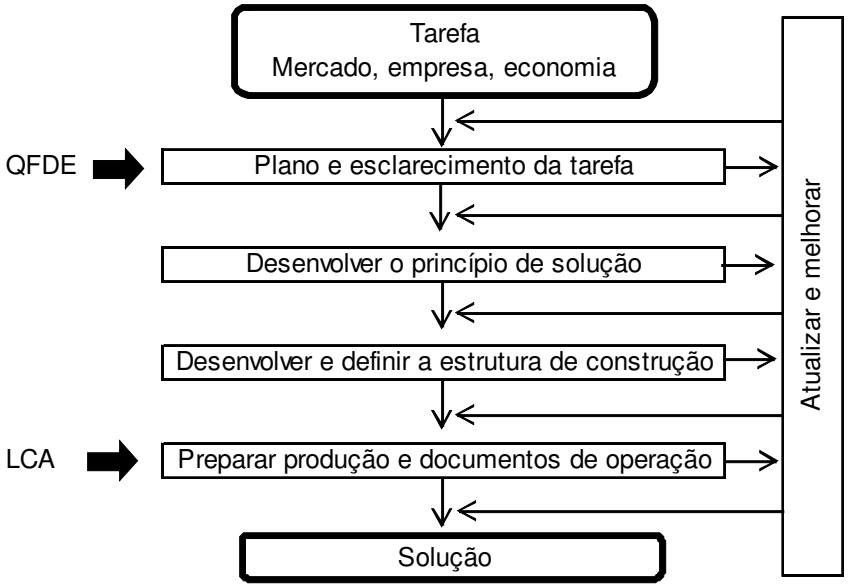

Figura 31. Aplicação combinada do QFDE e do LCA no processo de projeto

Este método e o anterior (Integração entre ACV, o QFDE e TRIZ) tratam apenas da utilização conjunta do QFDE com outras técnicas. Por não se tratar de uma nova versão do QFDE, as mesmas críticas feitas ao método de Sakao et al. (2001) com relação ao QFD são mantidas. Ou seja, o método QFDE apresenta um grande número de VoCs e de MEs, além de não realizar o planejamento e o projeto da qualidade.

3.1.14 QFD-DfE

O QFD-DfE foi desenvolvido pelos pesquisadores Rahimi e Weidner (2002). Segundo os autores, esta matriz de avaliação confronta todos os estágios do ciclo de vida do produto com conceitos ambientais de produto (escolha de material, uso de energia, resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas). Os objetivos do método são de maximizar a satisfação do consumidor, minimizar o custo do uso e minimizar os impactos ambientais.

Este método de QFD sugere a aplicação em 3 momentos do projeto de desenvolvimento do produto: fase produto, onde requisitos de qualidade, ambientais e de custo são relacionados com requisitos de produto; a fase componente, que relaciona os requisitos de qualidade, ambientais e custo com os componentes do produto; e por fim a fase fins/alternativas/atributos.

A fase de produto, conforme descrito pelos autores, segue a metodologia tradicional de QFD, incluindo além de requisitos de qualidade, também requisitos de custo e ambientais, como podem ser visualizados na figura 32.

	QFD-DfE	Peso	Intervalo de mudança	Vida do filtro	Complexidade da manufatura	Óleo derramado durante o serviço	Reciclável	Óleo removido por drenagem	Custo de manufatura
Qualidade	Proteção do motor								
	Vida longa								
	Confiabilidade								
Ambiental	Impactos na estração da MP								
	Impactos na remanufatura								
	Impactos no transporte								
	Uso de energia no uso								
	Disposição de resíduos sólidos								
Custo	Custo do filtro								
	Custo de disposição								
Importância ou dificuldade									

Figura 32. Exemplo da Casa da Qualidade para componentes do QFD-DfE

As relações são atribuídas pela seguinte legenda:

Legenda:

Correlação positiva forte	●
Correlação negativa fraca	▲

Figura 33. Legenda do QFD-DfE

O QFD-DfE apresenta na sua casa da qualidade requisitos ambientais e de custo, além dos tradicionais identificados pela VoC. Entretanto, estes requisitos ambientais e de custo não são originários da ACV e do LCC respectivamente como foi no caso do Green QFD-II de Zhang et a. (1999).

Como se pode observar na figura 32, tantos os requisitos ambientais quanto os de qualidade e custo, apresentam-se de forma bastante genérica. Por exemplo, o primeiro item de qualidade para o produto em questão (filtro de óleo), "Proteger o motor", poderia ser desdobrado em mais níveis com o objetivo de explicitar o que o cliente deseja, como "filtrar partículas contaminantes", "manter características essenciais do óleo", etc.

De modo semelhante ao que foi observado nos demais métodos de QFD ambiental, a matriz da qualidade não apresenta os items de qualidade planejada e de qualidade projetada.

Embora o QFD-DfE apresente o desdobramento do produto em componentes, as demais fases como de processo e produção são negligenciadas pelos autores.

3.1.15 QFD de Wolniak e Sędek

Esta versão do QFD para o projeto de produtos ambientais busca "juntar informações ecológicas e técnicas e selecionar os parâmetros técnicos mais cruciais sob o ponto de vista ambiental" (WOLNIAK; SĘDEK, 2008). Diferente de outros métodos, este QFD foi desenvolvido para o projeto de produtos e serviços ecológicos.

	Peso dos requisitos ecológicos	Leis e normas	Ciclovias	Áreas sem tráfego	Subsidiar transporte público	Subsidiar mudança de fontes de aquecimento não-ecológicas	Subsidiar implementação de melhores tecnologias por empresas	Construir piscinas, parques e áreas de recreação	Cinemas, clubes e museus	Redução de taxas pró-ambientais	Coleta seletiva
Poluição do ar	10	9	3	9	9	9	9			9	1
Contaminação da água	10	9	3	3	3	3	9			9	3
Contaminação do solo	10	9	3	3	3	3	9			9	3
Quantidade de resíduo produzido	8	3	3				9			9	9
Consumo de papel	3										3
Intensidade de trânsito	9	3	9	9	9					3	
Promoção de educação ambiental	4	1	1	3	3	1	1	1	1	1	9
Centros de cultura	3							3	9		
Centros de recreação	3		9	1				9	3		
Peso dos parâmetros técnicos		325	226	270	267	154	346	40	40	373	187
Parâmetros críticos		III					II			I	

Figura 34. Estrutura do QFD de Wolniak e Sędek. Adaptado de Wolniak e Sędek, 2008

Como mostra a figura 34, a forma de aplicação deste método não difere muito da forma tradicional de uso do QFD. Primeiramente são definidos requisitos ecológicos, como poluição do ar, contaminação da água e do solo, consumo de recursos e promoção da educação. Definidos os requisitos ecológicos, passa-se para a fase de atribuição de pesos dos requisitos ecológicos, que podem variar entre 1-5 a 1-10 (do peso mais fraco para o mais forte). Requisitos técnicos do produto ou serviço são colocados nas colunas correspondentes, permitindo criar relações com os requisitos ecológicos. Estas relações recebem o valor 0 (zero) quando não há relação, 1 quando a relação é fraca, 3 quando a relação é moderada e 9 quando a relação for forte.

Realizado os cálculos entre os pesos, aqueles parâmetros técnicos que obtiveram os maiores valores são classificados como parâmetros críticos de projeto, que deverão ter

maior atenção dos designers de modo a se desenvolver um produto/serviço ambientalmente adequado.

O QFD de Wolniak e Sędek pode ser definido mais como uma matriz de relacionamento do que o desdobramento da qualidade focada no meio ambiente, pois as características encontradas no QFD tradicional como o planejamento dos componentes, processos e produção, além dos desdobramentos nas dimensões tecnológicas, de custo e confiabilidade, não são abordados.

Com relação a casa da qualidade, apenas requisitos ambientais são analisados, restringindo a uma abordagem do produto/serviço somente a partir do ponto de vista ambiental. Também não há comparação dos requisitos ambientais com os produtos concorrentes, definição de planos da qualidade e índices de melhoria (qualidade planejada), nem mesmo os itens da qualidade projetada.

O exemplo apresentado na figura 34 pelos autores se refere à melhoria ambiental de uma cidade polonesa. Alguns requisitos são apresentados de forma genérica, como por exemplo, "poluição do ar", que pode ocorrer sob diversas formas, como através da queima de combustíveis fósseis (automóveis), atividades industriais (que lançam gases contendo dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, monóxido de carbono, ozônio e material particulado), processos de incineração, pinturas em geral, equipamentos de ar condicionado, estações de tratamento de esgoto (ETE), etc (ASSUNÇÃO, 2004), cada uma permitindo diferentes correlações e propostas de melhoria.

3.1.16 QFD based on RSP

O método proposto por Sakao, Watanabe e Shimomura (2003) é definido pelos autores como uma metodologia de projeto ambientalmente consciente de serviços aplicado

ao QFD e ao modelo de serviço RSP (*Receive State Parameter*), que trata de um conjunto de parâmetros que representam um serviço sob a perspectiva do consumidor.

A aplicação deste método consiste em etapas que envolvem a atribuição de valores para cada parâmetro do RSP relacionado a cada tipo de serviço (identificado na figura 35 como uso de lavagem de roupa por uma máquina particular, por uma máquina compartilhada com mais pessoas, utilização de lavanderias e de serviços de lavanderia realizados por terceiros).

RSP do usuário final \ Opções			Peso	Máquina de lavar particular	Máquina de lavar compartilhada	Lavanderia	Serviço de lavagem
Valor		Sujeira removida					
		Tipos de roupas laváveis					
		Dano às roupas					
Custo	Econômico	Custo de instalação					
		Valor pago					
	Temporal	Duração da lavagem					
		Tempo de trabalho					
		Instância					
	Ambiental	Uso de material					
		Efeitos de emissões					
		Uso de energia					
	Outros	Pureza					
Pontuação total		Incluindo fatores ambientais					
Rank							
Pontuação total		Excluindo fatores ambientais					
Rank							

Figura 35. Avaliação das opções de serviço

Os pesos são obtidos através do RSP e cada relação entre as opções de serviço de lavagem e o RSP do usuário final recebe um valor que varia entre 1, 3 e 5 (do menor para o maior). Uma matriz de relação de QFD também é aplicada de forma semelhante, porém

correlacionando o RSP com escopo no mercado e usuário final com um conjunto de parâmetros de função que afetam o RSP (figura 36).

RSP em um escopo entre o mercado e o usuário final		Parâmetros de função que afetam o RSP	Peso	Preço da máquina	Custo do transporte	Espaço para a máquina	Peso da máquina	Variedade de funções	Facilidade de entender as operações	Número de procedimentos	Uso de energia	Tempo de vida mecânico	Quantidade de substâncias tóxicas	Número de partes	Taxa de partes recicladas
Valor		Sujeira removida													
		Tipos de roupas laváveis													
		Dano às roupas													
Custo	Econômico	Custo inicial													
		Custo de utilização													
	Temporal	Duração da lavagem													
		Tempo de trabalho													
		Instância													
	Ambiental	Uso de material													
		Efeitos de emissões													
		Uso de energia													
		Uso por muito tempo													
	Outros	Pureza													
Pontuação total															

Figura 36. Matriz de correlação do QFD para o escopo entre o mercado e o usuário final

Os resultados desta matriz de correlação permitem identificar quais parâmetros de função tem maior importância para o desenvolvimento do produto.

De modo semelhante observada com o método anterior (QFD de Wolniak e Sędek), o QFD baseado em RSP tem por objetivo o projeto ambiental de serviços.

O método basicamente apresenta duas matrizes. A primeira relaciona os requisitos do cliente (final), obtidos através do *Receive State Parameter*, com as alternativas de serviço para um determinado produto. A segunda matriz por sua vez busca relacionar os mesmos requisitos do cliente com os requisitos do projeto.

O RSP se apresenta dividido em requisitos que agregam valor ao produto (qualidade) e que causam custo, seja ele econômico, temporal ou ambiental.

Embora o método de Sakao, Watanabe e Shimomura (2003) seja definido como QFD, observa-se que sua estrutura se baseia apenas em relacionar a qualidade exigida (requisitos do RSP) com as características da qualidade. Não são realizados desdobramentos para os componentes, processos e produção, além de não existir a qualidade planejada e projetada.

O usuário final do serviço não tem participação na distribuição dos pesos para os itens da qualidade exigida. Uma vez que eles são os consumidores do serviço, talvez fosse preferível consultá-lo ao invés de utilizar o RSP, que a princípio poderia trazer alguma dificuldade para os *designers*. Além disso, o RSP pode não representar de forma objetiva uma vez que o comportamento do consumidor não pode ser facilmente medido.

3.1.17 Eco-QFD de Kuo et al.

O Eco-QFD foi desenvolvido pelos pesquisadores Kuo, Wu e Shieh (2009) com o objetivo de que a equipe de projeto de produtos possa considerar conceitos ambientais no QFD utilizando como método de suporte a lógica *fuzzy,* de modo a identificar com maior exatidão, o nível de importância dado pelo consumidor para cada requisito (KUO, 2003).

A diferença principal deste método é que cada requisito do consumidor é avaliado e transformado em uma saída *fuzzy*, sendo um grupo de especialistas indicado para esta tarefa. Cada requisito (ambiental ou não) é então relacionado com os atributos técnicos do produto em diferentes fases do ciclo de vida, como mostra a figura 37.

			Fornecimento de material				Projeto e Manufatura			Distribuição		Uso	Reciclagem		
		Peso	Requisitos técnicos do produto para cada fase do ciclo de vida												
Preço															
Função	Requisitos dos consumidores														
Aparência															
Meio Ambiente	Uso de material reciclado														
	Redução de material tóxico														
	Redução de perdas														
	Fácil manutenção														
	Extensão do ciclo de vida														
Outros															
Sumarização															
Importância relativa															
Rank															
% Ciclo de Vida															

Figura 37. Eco-QFD de Kuo et al. (2009)

As relações de cada requisito técnico são somadas e indicadas no campo "sumarização". De posse destes valores, calculam-se as importâncias relativas de cada requisito técnico e então, com base nestes valores percentuais, se indica a ordem de prioridade no campo "rank". A última linha, "% ciclo de vida", permite ao designer identificar quais fases do ciclo de vida são as mais importantes através da soma das importâncias relativas de cada requisito técnico.

A principal diferença deste método de QFD ambiental para os demais está na utilização da lógica *fuzzy* na atribuição de valores para os pesos e para as correlações da matriz. A grande contribuição deste método está, segundo Kuo et al. (2009), em determinar, de forma precisa, as relações entre os requisitos dos clientes com os atributos técnicos do produto, uma vez que uma técnica matemática trabalha com uma série de variáveis e equações. Por outro lado, conforme Lofthouse (2006) observou em sua pesquisa, uma das características que mais dificultam a aplicação de métodos de ecodesign pelas empresas está no uso de linguagem científica de não conhecimento pelos *designers*. Deste modo, a utilização da técnica *fuzzy* com o QFD pode se tornar um empecilho ao ser aplicado no desenvolvimento de produtos.

Ainda sobre a utilização da lógica *fuzzy,* os pesos da VoC poderiam ser melhor atribuídos aumentando o número de consulta aos clientes.

Com relação à casa da qualidade, observa-se mais uma vez que a intenção do método é permitir a correlação entre os requisitos ambientais e dos clientes com os requisitos técnicos do produto. A matriz da qualidade não apresenta as abas de qualidade planejada e projetada, assim como não existem desdobramentos do produto em seus componentes e processos.

Os autores apontam a integração do Eco-QFD com a ACV, porém verifica-se no exemplo apresentado na figura 37 que a única relação entre eles está na identificação das fases do ciclo de vida do produto, não sendo avaliados os impactos ambientais.

3.1.18 Eco-QFD de Utne

Apresentado por Utne (2009), este método de QFD foi aplicado para a seleção da melhor alternativa de frota pesqueira considerando questões de sustentabilidade. Os requisitos adotados para o propósito do método foram identificados pelo autor como: risco de acidentes, emprego, rentabilidade, qualidade, capacidade de captura, emissões causadoras de efeito estuda e acidificação.

Assim, o objetivo do Eco-QFD de Utne (2009) é combinar questões ambientais, de custos e requisitos de *stakeholders* em um método de QFD destinado ao projeto de navios de pesca.

De acordo com o autor, o QFD permite focar nas necessidades dos *stakeholders* e pontuá-las, identificando seu nível de importância.

O método consiste primeiramente em relacionar requisitos de sustentabilidade (sociais, econômicos e ambientais) com vários tipos de embarcação utilizadas (por tamanho e espécie de traineira), pontuando cada relação com valores que variam de 1 a 5 (do pior ao melhor), auxiliando na identificação de quais embarcações são melhores do ponto de vista sustentável.

Os mesmos requisitos sustentáveis são relacionados a respostas técnicas (figura 38).

Requisitos dos *stakeholders* \ Resposta técnica			Importância do requisito	Sistema de propulsão	Dimensões principais	Seleção de material	Engrenagens	Matriz de planejamento							
								Navio, L<15 m	Navio, L=15 - 27,9 m	Navio, L>28 m	Traineira de fábrica	Traineira de peixe fresco	Meta	Fator de melhoria	Pesos
Sustentabilidade na frota pesqueira	Sociais	Baixo risco de acidente													
		Mantém empregados													
	Econômicos	Alta rentabilidade													
		Boa qualidade da carne do peixe													
		Reduzir capacidade de captura													
	Ambientais	Redução da emissão de gás de efeito estufa													
		Redução da acidificação													
		PONTUAÇÃO TOTAL													

Figura 38. Casa da Qualidade para respostas técnicas

As relações entre os requisitos sustentáveis e as respostas gerenciais, e entre os requisitos sustentáveis e as respostas técnicas são identificadas conforme a figura abaixo:

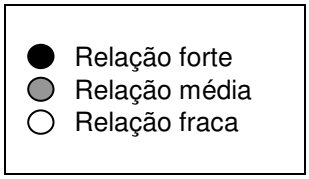

Figura 39: Relações da matriz do Eco-QFD de Utne

Alguns pontos do Eco-QFD de Utne devem ser observados. O primeiro ponto a se discutir é a real necessidade de desenvolvimento de um "novo" método de QFD, já que os requisitos de sustentabilidade podem ser obtidos diretamente da VoC, servindo de input no QFD tradicional.

Com relação à primeira casa da qualidade, observa-se que o Eco-QFD de Utne apenas relaciona os requisitos sociais, econômicos e ambientais com as alternativas de embarcações (por tamanho) e de traineiras, auxiliando na identificação da melhor opção sustentável. Como o autor sugere, a etapa de atribuição de pesos e correlações deve ter a participação fundamental dos *stakeholders* já que a importância dada a um requisito, como acidificação, pode ter diferentes resultados entre um dono de embarcações e uma organização não governamental (ONG).

A casa da qualidade que relaciona requisitos de eficiência energética com requisitos técnicos, apesar de apresentar a qualidade planejada (embora incompleta) para o projeto de novas embarcações, não proporciona o projeto da qualidade, nem como seus desdobramentos em componentes e processos de fabricação.

Finalizada a revisão dos métodos de QFD de ecodesign, a figura 40 apresenta uma matriz entre os dezessete métodos apresentados e cinco características encontradas no QFD, evidenciando a omissão de etapas importantes nas versões ambientais deste método.

Observa-se que o QFD de Hochman e O'Connell e o GQFD são os métodos que mais apresentam características relacionadas ao QFD tradicional. Dentre estas características, a mais identificada entre os 17 métodos de QFD de ecodesign foi a correlação das características da qualidade (sete vezes), e a menos considerada foi a qualidade projetada (apenas duas vezes).

Características do QFD tradicional

	Métodos de Ecodesign	Qualidade planejada	Qualidade projetada	Desdobramento do QFD em fases	Correlação das características da qualidade	Desdobramento da VoC em níveis	Pontuação dos métodos ambientais de QFD
1	QFDE	X	X	√	X	X	1
2	Environmental QFD	√	X	X	X	X	1
3	QFD de Hochman e O'Connell	√	√	X	√	√	4
4	Eco-QFD de Ernzer e Birkhofer	X	X	X	X	√	1
5	GQFD	√	√	X	√	X	3
6	3D-QFDE	X	X	X	X	X	0
7	Eco-VOC	X	X	X	X	√	1
8	EI2QFD	X	X	X	X	√	1
9	Green QFD-II	X	X	X	√	X	1
10	IGQFD	√	X	X	√	X	2
11	QFDE/LCA/TRIZ	X	X	√	X	X	1
12	QFDE/LCA	X	X	√	X	X	1
13	QFD-DfE	X	X	X	√	X	1
14	QFD de Wolniak e Sędek	X	X	X	√	X	1
15	QFD based on RSP	X	X	X	X	X	0
16	Eco QFD de Kuo et al.	X	X	X	X	X	0
17	Eco QFD de Utne	√	X	X	√	X	2
	Soma das características atendidas pelos métodos	5	2	3	7	4	

Legenda:
√ - apresenta (ao menos em parte)
X - não apresenta nada

Figura 40. Matriz comparativa entre QFDs ambientais e características do QFD tradicional

3.2 FMEA tradicional e FMEAs ambientais

São apresentados a seguir conceitos básicos relacionados à aplicação do FMEA tradicional, além dos dois métodos de FMEA de ecodesign e suas análises críticas.

3.2.1 *Failure Mode and Effect Analysis*

Utilizado com maior intensidade na indústria automobilística a partir da década de 70, o FMEA pode ser definido como uma ferramenta que busca, em princípio, evitar, por meio da análise de falhas potenciais e propostas de ações de melhoria, que ocorram falhas no projeto do produto ou do processo (TOLEDO; AMARAL, sem data). Ou seja, em outras palavras, pode-se dizer que o FMEA busca aumentar a confiabilidade, reduzindo a probabilidade de que falhas ocorram, podendo resultar na insatisfação do consumidor e em casos mais graves, até na sua morte. Pode-se dizer que o FMEA é um método pró-ativo, implicando na eliminação do problema potencial antes mesmo que ele ocorra (PALADY, 1997).

O FMEA pode ser aplicado tanto ao desenvolvimento de produtos quanto no processo, sendo as etapas de aplicação exatamente iguais, alterando-se apenas os objetivos (PALADY, 1997). Deste modo, é possível se classificar o FMEA de produto como uma ferramenta que evita que falhas ocorram no produto decorrente da fase de projeto, enquanto que o FMEA de processo busca evitar que falhas ocorram na fase de processo de produção com base nas especificações de projeto.

De acordo com Palady (1997), todas as variações do FMEA devem incluir cinco elementos básicos para garantir sua eficiência e eficácia, sob pena da contribuição final em termos de qualidade e confiabilidade ser muito pequena ou até mesmo nula. Estes cinco elementos são:

1. Planejar o FMEA através da seleção de projetos com maior potencial de retorno de qualidade e confiabilidade para a organização e seus clientes;
2. Identificar os modos de falha (como pode falhar?), a causa da falha (por que falha?) e seus efeitos (o que ocorre quando falha?);
3. Quantificar e avaliar os níveis de ocorrência, de severidade e de detecção para cada função identificada no produto;
4. Priorizar os modos de falha potenciais que serão tratados em primeiro lugar;
5. Acompanhamento com auxílio de outras ferramentas de suporte à qualidade e à confiabilidade.

Para Palady (1997), a utilização adequada do FMEA pode trazer uma série de benefícios, entre eles:

- Economia de recursos e tempo de desenvolvimento;
- Fornece uma referência rápida para a solução de problemas;
- Reduz mudanças no projeto;
- Aumenta a satisfação dos clientes, prevenindo que falhas ocorram;
- Captura e mantém o conhecimento do produto e do processo na organização.

Porém, embora o método apresente uma série de benefícios através da sua utilização e seja uma exigência em normas de qualidade como a ISO 9000 e a *Total Quality Management* (TQM), são conhecidos obstáculos à utilização do FMEA em muitas organizações, entre eles a formação de equipes de aplicação e dificuldades na atribuição de pesos (PALADY, 1997).

Antes de aplicar o FMEA, deve-se realizar primeiramente uma etapa de planejamento, objetivando selecionar o grupo de aplicação e o responsável pelo FMEA, quais produtos/processos trabalhar e a forma de abordagem (*top-down*, caso seja feita a

análise na ordem sistema, subsistema e componentes, ou *bottom-up*, ou seja, na ordem componentes, subsistema e sistema).

Uma regra sugerida por Palady (1997) é para desenvolver cada coluna separadamente para evitar a síndrome do “e se” e avançar para outras prematuramente para as outras colunas do FMEA.

Os membros da equipe de aplicação do FMEA devem somar entre 5 a 7 pessoas e devem ter uma compreensão sólida sobre as exigências e especificações do projeto. O FMEA apresentado por Palady (1997) apresenta a seguinte figura:

FMEA										
Cabeçalho										
Nome da peça	Função	Modo de Falha	Efeito	Causa	S	O	D	RPN	Ações recomendadas	Status

Figura 41. Formulário do FMEA: adaptado de Palady (1997)

O cabeçalho deve conter informações, como a descrição do produto/processo/serviço, sobre a equipe de FMEA, documentos que podem ser alterados, além de informações sobre as datas das revisões já realizadas e responsáveis.

No campo “Função” deve-se identificar todas as funções do produto/sistema/componente, incluindo as formas incorretas de utilização.

Em “Modo de Falha” deve-se descrever como a função deixa de desempenhar seu papel. O modo de falha pode ser visto como uma expressão negativa da função.

O Efeito deve apresentar as consequências do modo de falha sob a perspectiva do cliente. Estas informações podem ser obtidas através de pesquisas de marketing, relatórios de garantia da empresa e até mesmo do SAC.

Na coluna “Causa” deve constar as causas ou razões que levam ao acontecimento do modo de falha. Sugere-se que apenas as causas mais básicas, ou seja, as mais representativas sejam identificadas.

O campo “S”, de severidade, mede o índice de risco para a segurança do cliente e consequências para o bem estar financeiro da organização. Os valores atribuídos à severidade variam de 1 a 10, sendo do menor ao maior risco. Por exemplo, atribui-se 1 quando a falha não é percebida pelo cliente e 10 quando oferece risco de morte para o cliente ou coloca em risco a continuidade operacional da organização.

A ocorrência (índice “O” da tabela do FMEA) busca identificar a frequência que o modo de falha ou causa ocorre. Neste caso, atribui-se o valor 1 quando a frequência é extremamente remota e o valor 10 quando a ocorrência é certa. Palady (1997) sugere neste caso que as empresas adotem índices de falhas percentuais dos registros de qualidade de fabricação. Um exemplo seria atribuir o valor 1 para ocorrência de falhas entre 0 e 0,01% e 10 para ocorrência de falhas superior a 25%. Outras organizações utilizam outros índices, como chamadas para assistência técnica/1.000 ou defeitos/milhão.

O campo “D” busca medir a chance de se detectar o modo de falha ou suas causas antes de chegar ao cliente, sendo este não necessariamente o cliente final. Neste caso, quanto menor o valor atribuído, maior será a chance de detecção, por exemplo, se detecção quase certa se atribui o valor 1 e se a detecção quase impossível, se usa o valor igual a 10.

O índice *Risk Priority Number* (RPN) mede o grau de risco do modo de falha é calculado através da multiplicação dos itens severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D).

Segundo Palady (1997), o índice RPN pode ter duas formas diferentes de interpretação: a tradicional e a pró-ativa.

A primeira sugere que os índices com maior valor RPN tenham prioridade no processo de tomada de decisão pela empresa. Já a interpretação pró-ativa consiste em dar prioridade àqueles modos de falha de maior grau de severidade e de ocorrência com o auxílio do gráfico de áreas como é apresentado na figura 42:

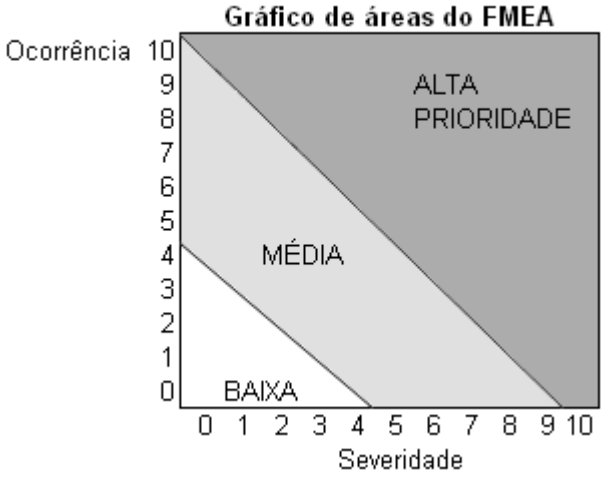

Figura 42. Gráfico de áreas do FMEA

Na figura 43 é mostrado um exemplo de como é aplicado o FMEA de produto. Sua aplicação se inicia, primeiramente, com o planejamento das atividades, que consiste em identificar quais produtos ou processos que serão analisados; formação de equipes pequenas e multidisciplinares; planejamento de reuniões e a preparação da documentação necessária, tais como desenhos, listas de peças, FMEAs anteriores e estatísticas de falhas (TOLEDO; AMARAL, ca. 2000[8]).

[8] Apostila disponível no endereço eletrônico: http://www.gepeq.dep.ufscar.br/publicacoes_det.php?idp=99

FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)																
Código Peça: ABX4508 Nome da Peça: Pastilha de freio Data: 12/05/2008 Folha: 1/1										■ FMEA de Produto □ FMEA de Processo						
Descrição	Função	Tipo de	Efeito da	Causa da	Controles	Indices				Ações de Melhoria						
										Ações	Responsável/	Medidas	Índices Atuais			
Produto/Processo	produto	Falha	Falha	Falha	Atuais	S	O	D	R	Recomendadas	Prazo	Implantadas	S	O	D	R
Pastilha de freio do VW GOL 1.0	Permitir a frenagem do veículo	Desgaste acelerado	Acidente/ Colisão do veículo	MP de qualidade inferior	Controle de qualidade realizado pelo fornecedor	10	2	9	180	Busca por novos fornecedores de MP	A. Silva 01/06/2008					

Figura 43. Exemplo de aplicação do FMEA de produto

Realizado o planejamento das atividades, a tabela do FMEA deve ser preenchida com as informações a respeito do produto/ processo, como código e nome, assim como a data em que foi feita a aplicação.

As primeiras seis colunas da tabela correspondem, sequencialmente, a descrição do produto ou processo, a função do produto, ao tipo de falha que está sujeito, ao efeito que a falha pode resultar, a causa da falha, e aos controles atualmente adotados pela empresa.

Os critérios S, O e D são simplificações dos nomes “severidade”, “ocorrência” e “detecção”, isto é, respectivamente se trata do grau de perigo da falha, a freqüência que ocorre e a dificuldade de se observar que a falha está presente em um determinado produto ou processo. Cada critério recebe um índice numérico que varia entre 1 e 10, que variam de menor para maior grau respectivamente. A multiplicação de cada um destes índices determina o valor de R “risco”, que permite priorizar 3 ações de melhoria do maior valor para o menor. Estas ações devem ser descritas, assim como o responsável e o prazo para a implementação. Implantadas as medidas, o FMEA poderá ser aplicado novamente com o objetivo de acompanhar se o risco realmente foi reduzido.

3.2.2 E-FMEA ou EEA (Environmental Effect Analysis)

O E-FMEA, conhecido como *Environmental Failure Mode and Effect Analysis*, e mais tarde denominado de *EEA (Environmental Effect Analysis)* pelo nome FMEA ser uma marca registrada, foi desenvolvido por uma agência de consultoria da Suécia (HRM/Ritline) e é apresentado como uma metodologia de DfE para o processo de desenvolvimento de produtos (LINDAHL, 1999).

Este método é uma modificação do FMEA tradicional, mas que ao invés de enfatizar nos riscos de falhas potenciais, sua ênfase está nos aspectos ambientais. O objetivo do E-FMEA é permitir que melhorias ambientais possam ser realizadas nos produtos logo nas suas primeiras etapas de projeto, identificando e avaliando impactos ambientais potenciais em todas as fases do ciclo de vida do produto (LINDAHL, 2000).

E-FMEA (Environmental FMEA Design)																
Produto				Data	Responsável					Projeto						
Máquina Lava-Roupas				9/8/1999	C.Jonson					XYZ-001						
Características Ambientais					**Índices**				**Ações de Melhoria**							
Nº	Fase do CV	Atividade	Aspecto Ambiental	Impacto Ambiental	S	I	A	EPN/F	Recomendações	Decisões Tomadas	S	I	A	EPN/F	Dept./Ass.	
	Produção	Limpar e pintar o gabinete	Emissões na atmosfera	Redução da camada de ozônio	2	1	2	5/3	Verificar a possibilidade de gabinete pré-pintado							
	Uso	Uso de detergentes	Lançamento no meio aquático	Eutrofização	1	2	1	4/3								
	Descarte	Desmontagem de componentes eletrônicos	Contaminação do solo com materiais tóxicos	Toxidade	3	2	2	7/8	Os componentes plásticos contém materiais tóxicos?							

Figura 44. Exemplo de E-FMEA

De acordo com o autor, o E-FMEA pode utilizar os resultados da aplicação de uma ACV inicial, bem como as saídas do E-FMEA podem ser utilizadas para a ACV em áreas específicas.

Como pode ser observado no formulário do E-FMEA na figura 44, o primeiro passo da aplicação deste método consiste em identificar as fases do ciclo de vida e todas as atividades conectadas a esta fase, como produção e transporte.

O passo seguinte é a identificação dos aspectos ambientais envolvidos, tais como emissões atmosféricas ou contaminação do solo, e logo em seguida os impactos ambientais (efeito estufa, redução da camada de ozônio etc).

Diferentemente do FMEA tradicional, os critérios onde são atribuídos os pesos são diferentes neste método. Os três critérios apresentados são: S = controle de documentos, I = imagem pública e A = conseqüências ambientais. Cada um deles recebe um índice numérico variando de 1 a 3, cuja soma resulta no EPN, isto é, o EPN = S+I+A. O critério F que é mostrado ao lado do EPN significa a possibilidade de melhoria ambiental. Para ele é designado um valor entre 1 a 9, sendo o número menor (1) quando não há nenhuma possibilidade de melhoria e o maior (9) quando as possibilidades de melhoria são muito boas. Na atribuição de índice para o critério F, devem-se considerar esforços em tempo, custo e necessidades técnicas.

O último passo do E-FMEA é a recomendação de ações, que servirão de base para que decisões sejam tomadas. Implantadas estas decisões, o E-FMEA poderá ser aplicado sucessivas vezes a fim de diminuir o índice EPN.

Segundo Palady (1997), entre os elementos que compõem o FMEA estão a identificação da função do produto/sistemas/sub-sistemas/componentes, seus modos de falhas, suas causas e efeitos para cada componente do produto. Quando se busca identificar estes elementos citados por Palady no E-FMEA, pode-se associar a coluna “Atividade” do método de Lindahl a função, o “Aspecto ambiental” a causa e o “Impacto ambiental” aos efeitos. Observa-se, porém, que as atividades causadoras de problemas ambientais do E-FMEA não são associadas a nenhum sistema, sub-sistema ou componente do produto, dificultando o processo de tomada de decisão para a melhoria do produto.

Quanto aos índices do E-FMEA, um determinado problema de ordem ambiental pode estar associado a um grau de ocorrência e de detecção, índices presentes no FMEA

tradicional. Por exemplo, uma bomba de injeção de um veículo pode apresentar uma frequência de falha (Ocorrência) que leva ao maior consumo de combustível, podendo se caracterizar como um impacto ambiental devido a utilização de um recurso não-renovável (derivado de petróleo). Os índices de ocorrência e detecção não são previstos no método de Lindahl.

A atribuição de pesos para impactos ambientais no E-FMEA pode ser considerada subjetiva o bastante para não trazer grandes benefícios para o meio ambiente, uma vez que somente uma técnica como a ACV consegue medir de forma precisa cada impacto ambiental do ciclo de vida do produto. O mesmo pensamento se aplica ao critério F, que representa a possibilidade de melhoria ambiental, já que o peso é atribuído subjetivamente pela equipe de FMEA.

Os modos de falha ambientais poderiam também ser integrados ao FMEA tradicional, onde o índice de severidade responderia pela gravidade ambiental da falha, evitando-se assim a utilização de um novo método pelos designers.

3.2.3 Integração FMEA-TRIZ

O FMEA elaborado por Yen e Chen (2005) considerou a integração de uma matriz de relação ao método a fim de auxiliar no processo de recomendações e tomada de decisão. Esta matriz relaciona as causas ambientais com 7 elementos propostos pela WBCSD (World Business Council for Sustainable Development) para o desenvolvimento de produtos/processos ambientalmente melhores.

As intensidades destas relações são definidas através de símbolos, conforme a figura 45:

●	Relação forte
▲	Relação média
■	Relação fraca

Figura 45. Diagrama de relação

Da mesma forma observada nos métodos anteriores, a aplicação neste caso também é apresentada como uma seqüência de passos para auxiliar no processo de aplicação. A figura 46 apresenta um exemplo de aplicação do método a um aspirador a vácuo.

Fase do ciclo de vida	Elementos de eficiência ambiental / Falha ambiental: Efeito	Causa	Reduzir a intensidade de material em produtos e serviços	Reduzir a intensidade de energia em produtos e serviços	Reduzir a dispersão de tóxicos	Aumentar a reciclagem de materiais	Maximizar o uso sustentável de recursos renováveis	Estender a durabilidade dos produtos	Aumentar a intensidade de serviços dos produtos	Índices: E	C	R	Eco-RPN
Uso	Não otimização da funcionalidade dos produtos	Execução difícil	■				■	▲	●	2	3	1	6
	Manutenção incômoda	Limpeza difícil	■					▲	●	2	4	1	8
	Consumo de energia	Baixa eficiência		●						4	3	1	12
	Saúde	Barulho			▲				●	3	4	1	12
		Emissões			●				■	3	3	1	9

Figura 46. Exemplo de aplicação da integração FMEA e Matriz

O passo inicial consiste em identificar as falhas ambientais potenciais (causas e efeitos) para todas as fases do ciclo de vida do produto, que pode ser possível através de sessões de *brainstorming*[9] com os membros da equipe de aplicação do FMEA-TRIZ.

No momento seguinte deve ser feito a avaliação do índice Eco-RPN, ou número de prioridade de risco ambiental. Este número consiste em multiplicar os índices de três

[9] Técnica que consiste em gerar idéias para a solução de problemas através de sessões em grupo de três a dez pessoas (ROZENFELD et al., 2006)

critérios propostos: Impacto ambiental (E), perspectiva do consumidor (C) e cumprimento com as normas (R). Estes índices variam entre “1” e “5”, onde “1” significa baixo impacto ambiental, baixa importância para o consumidor e total conformidade com as normas ambientais; por outro lado, o índice “5” expressa alto impacto ambiental, alta importância para o consumidor e nenhuma conformidade com as normas ambientais. Deste modo, os índices com maior Eco-RPN têm prioridade na tomada de decisão.

Apesar da vantagem de integrar o método TRIZ para auxiliar a equipe de desenvolvimento no processo de tomada de decisão, alguns problemas podem ser identificados. De modo semelhante ao E-FMEA, a integração entre FMEA-TRIZ não associa os efeitos e causas ambientais a um modo de falha e a um componente de um produto como ocorre no método tradicional.

Os índices propostos pelos autores são semelhantes ao E-FMEA, com excessão do índice C que neste caso se refere a perspectiva do consumidor para cada falha ambiental, sendo que o método de Lindahl possui o índice I relacionado a imagem pública da empresa. Com relação a este índice C, observou-se que o método não apresenta como o nível de importância do consumidor deve ser verificado/analisado.

A exemplo do E-FMEA, nota-se a necessidade de identificar outros índices, como ocorrência e detecção de cada falha.na integração FMEA-TRIZ.

Apresentados os métodos de QFD e FMEA de ecodesign, inicia-se no capítulo seguinte a identificação e a proposição de critérios ambientais e operacionais que permitirão a análise destes dezenove métodos. Uma matriz comparativa contendo objetivos, principais diferenças, críticas e aplicação para os métodos de QFD e FMEA de ecodesign podem ser visualizadas nos apêndices C e D desta dissertação.

4 ANÁLISE DOS MÉTODOS QFD E FMEA DE ECODESIGN

Este capítulo inicia com uma apresentação dos critérios e requisitos sugeridos para métodos de ecodesign conforme encontrado na literatura obtida através da revisão bibliográfica sistemática. Este conjunto de critérios e requisitos permitiu-se então propor três critérios ambientais e seis critérios operacionais para métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA, que depois de validados com especialistas, tornou possível analisar os dezenove métodos apresentados no capítulo 3 desta dissertação.

4.1 Critérios e requisitos ambientais e operacionais para métodos de ecodesign

Como resultado da revisão bibliográfica sistemática, foi possível encontrar uma série de sugestões sobre critérios, requisitos e características que os métodos de ecodesign devem considerar, tanto de modo a garantir o desenvolvimento de produtos ambientalmente melhores que aqueles tradicionais, quanto para promover maior utilização no PDP.

O trabalho mais antigo encontrado sobre critérios ambientais foi proposto por Rivera-Becera e Lin (1999). Segundo estes autores, critérios e métricas ambientais devem considerar todo produto e suas fases do ciclo de vida, incluindo outras questões de projeto, como desmontagem, reparo, reciclagem, conformidade e regulamentação, disposição, impacto sobre a saúde e a segurança e minimização de materiais perigosos.

Griese et al. (2005) listam três princípios básicos que um projeto orientado para o meio ambiente deve considerar. Estes princípios são listados a seguir:

- As questões ambientais devem ser consideradas logo nas primeiras fases do projeto do produto;

- Deve-se considerar todas as fases do ciclo de vida, incluindo o fechamento do ciclo de vida do produto;
- Deve-se promover a conservação de recursos, redução do aquecimento global, conservação da camada de ozônio e reduzir/eliminar a toxicidade de materiais/substâncias.

Já Hauschild et al. (2005) apontam alguns requisitos operacionais a serem considerados por métodos de ecodesign, definidos por:

- O método deve ser simples, de fácil entendimento e uso;
- O método deve ser de fácil aquisição, ou seja, o método não deve ser de alto custo para a empresa;
- Deve ser objetivo, significando que duas ou mais pessoas qualificadas devem atingir os mesmos resultados quando aplicado o método;
- Deve ser válido, isto é, o método deve medir, indicar ou predizer exatamente o que pretendem;
- O método deve ser robusto, relativamente insensível a mudanças no ambiente de aplicação;
- Deve promover melhoria do entendimento e predição, onde boas métricas, modelos e ferramentas de suporte à decisão devem ajudar na predição de processos e parâmetros de produtos.

Knight e Jenkins (2009) estabeleceram 8 questões com o objetivo de se levantar critérios de avaliação para métodos de ecodesign:

- O método suporta os requisitos dos produtos?

- O método considera normas e legislação ambiental de produtos?
- O método pode ser utilizado pela empresa ou requer profissionais experientes para isso?
- Reduz o risco de se esquecer de elementos importantes?
- Pode ser utilizado na medida em que novos produtos são lançados pela empresa?
- O método é fácil de usar, fácil de adaptar e implementar?
- Ele reduz o tempo do processo de desenvolvimento?
- É de baixo custo para a empresa?

Ritzén e Lindahl (2001) ressaltam ainda outras características ambientais e de aplicação importantes para os métodos de ecodesign. A primeira destas características é se o método promove a integração entre pessoas de diferentes áreas. Segundo os autores, equipes multi-funcionais são um dos fatores de sucesso na integração dos aspectos ambientais no desenvolvimento de produtos. Os outras características envolvem os tipos de dados (qualitativos ou quantitativos), facilidade de entendimento, aprendizado, perspectiva de ciclo de vida e considerações econômicas, como custos, e marketing.

Byggeth e Hoschschorner (2006) sugerem que métodos de ecodesign permitam realizar análise de *trade-offs*. Segundo os autores a análise de *trade-offs* permite auxiliar na escolha de alternativas de projeto, analisar a ocorrência de impactos ambientais ou mesmo comparar alternativas de melhoria ambiental. Os resultados da pesquisa dos autores apontaram que dentre quinze métodos inicialmente selecionados, apenas quatro consideraram situações de *trade-offs*.

Bocs e Pascual (2004) apresentam que os métodos de ecodesign devem ser fáceis de aplicar. De acordo com os autores, entre diversas barreiras à disseminação dos conceitos

de ecodesign dentro das empresas está a complexidade dos métodos disponíveis, o que limita sua aplicação no PDP.

Também relacionado a aplicação, Ramírez (2009) apresentou critérios para seleção de métodos de alocação em Avaliação do Ciclo de Vida. Os critérios apresentados buscaram identificar se os métodos exigem outros dados, se são muito demorados de aplicar e se suas aplicações exigem muito conhecimento matemático.

Para Waage (2007), as características e critérios para o desenvolvimento de produtos sustentáveis devem considerar:

- a diminuição do fluxo e volume de materiais e produtos;
- utilizar materiais não tóxicos e não poluentes;
- garantir condições de trabalho seguras, sem práticas discriminatórias e sem trabalho forçado e infantil, tanto para a empresa, quanto para seus fornecedores.

Lindahl (2005) levantou, após entrevistas com *designers*, requisitos relacionados a aplicação que os métodos de ecodesign devem atender. Estes requisitos são:

- Facilidade de entender. O método deve ser intuitivo, lógico e fácil de entender. Deve passar uma sensação para o *designer* de facilitação e simplificação do trabalho.
- Fácil de aplicar no trabalho. Ser capaz de entender como o método se encaixa no trabalho do designer, não haver necessidade de entendê-lo por completo, não ser necessário longos manuais e descrições de como utilizá-lo. Os *designers* entrevistados responderam dar preferência por métodos que requeiram o mínimo de treinamento e que possam ser utilizados imediatamente.

- Outras características importantes citadas por Lindahl para métodos de ecodesign incluem: rápida aplicação, ser de preferência baseado em sistemas computacionais e facilidade em observar seus benefícios.

Segundo Vezzoli e Sciama (2006) para o projeto de produtos para o meio ambiente, métodos de ecodesign devem permitir: a redução do consumo de material e energia, redução do risco de toxicidade, conservação de recursos e bio-compatibilidade, otimização da vida de produtos e componentes, extensão da vida dos materiais e questões envolvendo o projeto para a desmontagem (*design for disassembly*), pensando nas alternativas de fim-de-vida do produto.

Fargnoli (2005) sugere que os métodos de ecodesign utilizados nas fases iniciais do desenvolvimento de produtos satisfaçam requisitos operacionais, como: sejam fáceis de usar, não requeiram grande quantidade de informações e que sejam mais rápidos de aplicar comparados a métodos quantitativos, como os baseados na ACV.

Maxwell e van der Vorst (2003) definiram uma série de requisitos para métodos que objetivam o desenvolvimento de produtos e serviços sustentáveis, chamada de SPSD (*Sustainable Product and Service Development*). Os requisitos ambientais que compõem o SPDS consistem em:

- Para a fase de extração de matéria-prima:
    - Reduzir ou eliminar uso de fontes não-renováveis;
    - Reduzir o volume de materiais usados;
    - Substituir matérias-primas perigosas;
    - Facilitar a recuperação, reuso e reciclagem.

- Para a fase de produção:
    - Otimizar uso de tecnologias de produção;
    - Eliminar ou reduzir emissões no ar, efluentes, perdas e uso de energia.
- Para a fase de distribuição:
    - Verificar a necessidade de transporte;
    - Eliminar ou reduzir emissões no ar e perdas.
- Fase de consumo:
    - Eliminar ou reduzir perdas do produto, da embalagem e no consumo.
- Para a fase de fim de vida:
    - Estender o tempo de vida do produto através do projeto para reparo (*Design for repair*) e projeto modular;
    - Facilitar a recuperação de componentes para o reuso, reciclagem e disposição final.

Para Talbot (2005), a aplicação do ecodesign deve obedecer uma sequência de atividades, definida por: reduzir o número de material utilizado no produto, reduzir o consumo de energia durante a manufatura e uso do produto, aumentar a vida útil do produto, e considerar questões de fim-de-vida, como facilidade de desmontar, reparar e reciclar.

Lofthouse (2006) conduziu uma pesquisa com *designers*, permitindo identificar requisitos de aplicação para práticas de Ecodesign para a proposição de um framework chamado de “Informação/Inspiração”. Os requisitos identificados por Lofthouse baseavam em: utilizar guias simplificados para a aplicação da ferramenta de Ecodesign, haver

disponibilidade de informações, foco no aprendizado, não utilização de linguagem científica, uso de figuras e imagens que facilitem a visualização e facilidade de acesso através de websites.

Pigosso (2008) sugeriu a classificação de métodos de ecodesign de acordo com suas características como segue abaixo:

- Quanto à natureza do objetivo principal do método, ou seja, se é prescritiva, comparativa ou analítica;
- Pelo tipo de ferramenta. Os métodos foram classificados se eram *checklists, guidelines, matrizes* ou *softwares*;
- Natureza dos dados de entrada e saída, isto é, se os dados de entrada e saída eram qualitativos ou quantitativos;
- Área de pesquisa que originou o método, ou seja, se o método tem origem no Desenvolvimento de Produtos ou se é originário do ecodesign ou mesmo da Gestão Ambiental;
- Tempo demandado para aplicação: se o consumo de tempo é alto ou baixo;
- Custo de aplicação alto ou baixo;
- Grau de especialização do usuário alto ou baixo;
- Fases do ciclo de vida são considerados, tais como: extração de matéria-prima, manufatura, uso e descarte;
- Se aspectos ambientais são considerados pelo método;
- O nível de maturidade do método, ou seja, se é apenas teórico, se já teve aplicação em caráter experimental ou se já tem uso consolidado;

- Se o método avalia impactos ambientais;
- Se o detalhamento dos métodos são superficiais, sucintos ou completos;
- Se existe indicação de utilização conjunta com outros métodos e ferramentas;
- Se o setor para qual o método foi desenvolvido é identificado.

Por esta dissertação ter como objetivo identificar apenas requisitos/critérios ambientais e operacionais para métodos de ecodesign, aqueles que estão relacionados às outras questões sustentáveis, como as sociais e econômicas, não serão consideradas.

A tabela 13 apresenta uma síntese dos critérios e requisitos sugeridos pelos autores para os métodos de ecodesign, divididos em ambientais e operacionais.

Tabela 13. Critérios e requisitos ambientais e operacionais para métodos de ecodesign

		Critérios e requisitos	
Autores	**Ano**	**Ambientais**	**Operacionais**
Rivera-Becera, Lin	1999	Considerar fases do ciclo de vida do produto	
		Atividades relacionadas ao fim-de-vida do produto	
		Conformidade e regulamentações	
		Reduzir impactos sobre a saúde/segurança	
		Reduzir a utilização de materiais perigosos	
Griese et al.	2005	Considerar fases do ciclo de vida do produto	
		Atividades relacionadas ao fim-de-vida do produto	
		Conservação de recursos	
		Reduzir impactos ambientais	
Hauschild et al.	2005		Fácil de usar
			Demanda pouco recurso financeiro
			Objetivo
			Robusto (insensível a mudanças)
			Válido
Knight, Jenkins	2009	Suporte a legislação ambiental de produtos	Suporte a requisitos dos produtos
			Não requer uso de especialistas
			Reduz risco de se esquecer de elementos importantes
			Fácil de usar
			Demanda pouco recurso financeiro
			Reduz tempo de desenvolvimento
Ritzén, Lindhal	2001	Considera fases do ciclo de vida do produto	Permite integração com pessoas de diferentes áreas
			Preferências por uso de dados qualitativos
			Fácil de usar
			Considera questões econômicas/marketing

Byggeth, Hoschschorner	2006	Perspectiva de sustentabilidade	Permite análise nálise de *trade-offs*
		Avalia impactos ambientais	
Bocs, Pascual	2004		Baixa complexidade dos métodos
Ramírez	2009		Necessário muito conhecimento matemático
			Baixo tempo de aplicação
			Necessidade de muitos dados
Waage	2007	Redução do volume	
		Reduzir o consumo de recursos	
		Utilização de materiais perigosos	
		Considera questões sociais de trabalho	
Lindahl	2005		Fácil de entender
			Fácil de aplicar
			Ajustável a diferentes contextos
			Não necessita de colaboração excessiva
			Rápido
			Intuitivo e lógico
			Facilidade no entendimento dos benefícios
			Baseado em sistemas computacionais
Lindahl et al.	2003		Fácil de usar
			Fácil de entender
			Gera resultados que podem ser comparáveis
			Estruturado para o desenvolvimento de produtos
			Integrado a outros métodos e ferramentas existentes
			Baseado em checklists
			Baseado em Internet
Vezzoli e Sciama	2006	Redução do consumo de materiais e energia	
		Redução da toxicidade	
		Conservação de recursos e bio-compatibilidade	

		Questões relacionadas ao fim-de-vida do produto	
Fargnoli	2005		Fácil de usar
			Não requer um alto nível de informação (input)
			Não demanda muito tempo
Maxwell e van der Vorst	2003	Reduzir uso de material	
		Considerar estratégias de fim-de-vida do produto	
		Eliminar/reduzir perdas/emissões/efluentes	
		Considerar todas as fases do ciclo de vida do produto	
		Otimizar questões sociais e econômicas	
Talbot	2005	Matéria-prima reciclável e sem risco ao meio ambiente	
		Reduzir uso de material	
		Reduzir consumo de energia na manufatura/uso	
		Questões relacionadas ao fim-de-vida do produto	
Pigosso	2008	Considera fases do ciclo de vida	Tempo de aplicação
		Considera aspectos ambientais	Custo de aplicação
		Avalia impactos ambientais	Grau de especialização do usuário
			Nível de maturidade do método
			Nível de detalhamento do método
			Identificação do setor específico de utilização
Lofthouse	2006		Guia simples de aplicação
			Disponibilidade de informação
			Foco no aprendizado
			Não faz uso de linguagem científica
			Utilização de figuras/imagens
			Facilidade de acesso (Internet)

Encontrados os critérios e requisitos para os métodos de ecodesign na literatura, buscou-se agrupar termos relacionados a um mesmo contexto ou significado. Para isto foram selecionadas palavras-chave entre os requisitos e critérios identificados na literatura que fossem similares e que pudessem ser agrupadas a um mesmo critério ambiental ou operacional, reduzindo-se assim a necessidade de haver muitos critérios, utilizando-se da idéia de um dicionário tesauro como apresentado na metodologia deste trabalho. Ao mesmo tempo, foi considerado o sentido do requisito/critério apresentado pelos autores da revisão bibliográfica sistemática. Por exemplo, na tabela 14 observa-se que aspectos ambientais, conservação de energia, redução de emissões/efluentes/perdas/toxicidade, etc são termos relacionados a uma mesma categoria, a de Impactos Ambientais. Deste modo foi possível estabelecer três critérios relacionados ao meio ambiente e outros seis critérios operacionais. As tabelas seguintes, 14 e 15, apresentam todos os critérios apresentados na tabela 13, mas agrupados.

Tabela 14. Agrupamento de palavras-chave para critérios e requisitos ambientais

Critérios e requisitos ambientais	**Palavras-chave**
Fases do Ciclo de Vida	Considerar as fases do ciclo de vida do produto
	Considerar estratégias de fim-de-vida do produto
Conformidade e regulamentação	Conformidade e regulamentação
	Suporte a legislação ambiental
Impactos ambientais	Impactos ambientais
	Aspectos ambientais
	Conservação de energia
	Reduzir uso de material
	Reduzir emissões/efluentes/perdas
	Reduzir toxicidade
	Conservação de recursos
	Materiais perigosos
	Impactos sobre saúde/segurança

De acordo com a tabela 14, várias palavras-chave foram agrupadas de modo a se reduzir o número de critérios ambientais. O primeiro grupo de palavras-chave, relacionadas ao Ciclo de Vida do produto apresenta termos envolvendo as estratégias de fim-de-vida do produto. Termos relacionados à conformidade, regulamentação e leis ambientais foram agrupadas no critério/requisito Conformidade e regulamentação. Já para o grupo de palavras-chave relacionado ao critério/requisito impacto ambiental, como foi considerado que emissões, efluentes, toxicidade, periculosidade de materiais e conservação de recursos são termos associados à ocorrência de impactos ambientais.

Já a tabela 15 apresenta a definição dos requisitos operacionais de forma similar ao que foi realizado para os requisitos ambientais. Ou seja, buscou-se organizar termos similares que identificassem um mesmo requisito operacional.

Tabela 15. Agrupamento das palavras-chave para definição dos requisitos operacionais

Critério/requisito operacional	**Palavras-chave**
Facilidade de uso	Fácil de usar
	Complexidade dos métodos
	Necessário muito conhecimento matemático
	Fácil de entender
	Fácil de aplicar
	Intuitivo e lógico
	Sistemas computacionais
	Checklists
	Internet
	Nível de detalhamento
	Uso de linguagem científica
	Simples aplicação
	Uso de dados qualitativos
	Uso de figuras/ imagens
Custo	Nível de especialização do usuário
	Sistemas computacionais
	Especialistas
	Colaboração excessiva
	Demanda pouco recurso financeiro

Tempo	Objetivo
	Intuitivo e lógico
	Reduz tempo de desenvolvimento
	Rápido
	Necessita de muitos dados
	Baixo tempo de aplicação
	Não requer grande quantidade de informação
	Resultados que podem ser comparáveis
	Integrado a outros métodos/PDP
Validado	Robusto
	Válido
	Reduz risco de esquecer de elementos importantes
Visualização de benefícios	Fácil de entender os benefícios
	Objetivo
	Foco no aprendizado
Análise de *trade-offs*	Análise de *trade-offs*

Deste modo, agrupados os critérios e requisitos das tabelas 14 e 15, foi possível definir três critérios ambientais e seis requisitos operacionais como consta nas tabelas 16 e 17. Cada critério apresenta uma breve descrição dos requisitos que devem ser obedecidos, baseando-se no que os autores sugerem na literatura.

Tabela 16. Requisitos/critérios ambientais

Requisito/critério	**Descrição**	**Referências**
Fases do Ciclo de Vida do Produto	O método deve considerar em seu modelo todas as fases do ciclo de vida do produto para atender este critério, ou seja, da extração de matéria-prima, indústria de base, manufatura do produto, uso e disposição final, além de todas as atividades de transporte existentes entre as fases. Também deve incluir as estratégias de fim-de-vida do produto, como reciclagem, remanufatura e reuso, e seus requisitos.	(RIVERA-BECERA; LIN, 1999; GRIESE et al., 2005; RITZÉN; LINDAHL, 2001; MAXWELL; VAN DER VORST, 2003; VEZZOLI; SCIAMA, 2006; TALBOT, 2005; WAGE, 2007; PIGOSSO, 2008).
Conformidade e Regulamentação	O método deve considerar a legislação ambiental de produto para os países/regiões onde serão produzidos, utilizados e dispostos.	(KNIGHT; JENKINS, 2009; RIVERA-BECERA; LIN, 1999)
Impactos Ambientais	O método deve identificar e avaliar todos os impactos ambientais potenciais do ciclo de vida do produto, como conservação de recursos naturais e energia, toxidade humana, e efeitos sobre emissões no ar, na água e no solo.	(RIVERA-BECERA; LIN, 1999; GRIESE et al., 2005; BYGGETH; HOSCHSCHORNER, 2006; WAGE, 2007; VEZZOLI; SCIAMA, 2006; MAXWELL; VAN DER VORST, 2003; PIGOSSO, 2008)

Tabela 17. Requisitos/critérios operacionais

Requisito/critério	**Descrição**	**Referências**
Facilidade de uso	O método será considerado de fácil utilização quando os procedimentos de aplicação se apresentam bem detalhados, utilizar figuras/imagens, descrever cada atividade e não apresentar modelos matemáticos e cálculos complexos que envolvam o uso de linguagem científica.	HAUSCHILD et al., 2005; KNIGHT; JENKINS, 2009; RITZÉN; LINDAHL, 2001; BOCS; PASCUAL, 2004; RAMÍREZ, 2009; LINDAHL, 2003; FARGNOLI, 2005; LOFTHOUSE, 2006)
Custo	Um método será considerado custoso quando houver necessidade de treinamento e/ou especialistas, consultoria ou aquisição de softwares .	(HAUSCHILD et al., 2005; KNIGHT; JENKINS, 2009; PIGOSSO, 2008)
Válido	A validade do método será comprovada quando houver estudos de caso na literatura sobre sua aplicação em empresas.	(HAUSCHILD et al., 2005; PIGOSSO, 2008)
Tempo	O método poderá ser considerado rápido quando seu tempo de aplicação for menor quando comparado a métodos quantitativos, como aqueles baseados na ACV e se não demandar uma grande quantidade de dados.	(LINDAHL, 2005; FARGNOLI, 2005; PIGOSSO, 2008; RAMÍREZ, 2009)
Visualização dos benefícios	Quando o método apresentar quais são os benefícios e principais resultados da sua aplicação.	(LINDAHL, 2005)
Análise de *trade-offs*	Quando houver análise de *trade-offs* entre requisitos somente ambientais, entre requisitos somente de produto e entre requisitos ambientais e de produto.	(BYGGETH; HOSCHSCHORNER, 2006)

Os critérios ambientais e operacionais identificados na literatura são pouco específicos quando se observa a grande variedade de métodos de ecodesign publicados nos últimos dez anos. Em outras palavras, os critérios ambientais e operacionais apresentados na tabela 13 e agrupados nas tabelas 16 e 17 tratam apenas de recomendações genéricas e não apontam como devem ser considerados de forma mais objetiva aos métodos de ecodesign.

Assim, foram apresentadas propostas de como os critérios e requisitos já identificados podem ser considerados nos métodos de ecodesign baseados no QFD e no

FMEA, considerando as particularidades de cada método, como sua estrutura, características e aplicação, apresentadas nos subcapítulos para os métodos tradicionais.

Deste modo, para a análise ambiental dos métodos QFD e FMEA de ecodesign, foram propostos os seguintes critérios ambientais, divididos entre Fases do Ciclo de Vida, Conformidade e Regulamentação, e Impactos Ambientais:

- Fases do Ciclo de Vida

Considerando-se que normalmente os requisitos dos clientes estão relacionados à fase de uso do produto, este critério busca identificar se os itens da qualidade exigida contemplam todas as fases do ciclo de vida do produto, ou seja, se são considerados requisitos relacionados à fase de extração de matéria-prima, manufatura, uso, fim-de-vida e transporte entre as fases. Deste modo se propôs o seguinte critério para métodos QFD:

  - QFD: são considerados requisitos ambientais relacionados ao ciclo de vida do produto (não somente a fase de uso)?

Com relação ao FMEA, o critério tem por objetivo avaliar se o método identifica quais fases do ciclo de vida que cada modo de falha pode ocorrer no produto, estabelecido pela seguinte questão:

  - FMEA: são identificadas em quais fases do ciclo de vida que o modo de falha pode ocorrer?

- Conformidade e Regulamentação

Tendo a legislação ambiental um importante requisito a ser cumprido pelos produtos em suas diferentes fases do ciclo de vida, o critério a seguir busca identificar se o

método de QFD considera as leis ambientais, além de normas ambientais de produto, como um item da qualidade exigida.

- QFD: a legislação ambiental e normas ambientais são consideradas como um requisito de produto?

Considerando-se que a legislação ambiental é um item a ser cumprido pelos produtos, no caso do FMEA, o critério a seguir busca identificar se o descumprimento destas leis é tratado como um modo de falha.

- FMEA: o método considera o descumprimento da legislação ambiental como um modo de falha?

- Impactos Ambientais

Este critério busca identificar no QFD se os impactos ambientais que podem ser causados pelos produtos são considerados como itens das características da qualidade e se podem ser avaliados de forma objetiva e quantitativa, ou seja, se os impactos ambientais relacionados à qualidade exigida podem ser medidos de forma a determinar de forma precisa o peso da correlação.

- QFD: os impactos ambientais são considerados como requisitos técnicos (característica da qualidade) que permitem ser correlacionados com a qualidade exigida pelo cliente e avaliados de forma objetiva e quantitativa?

De acordo com Wenzel, Hauschild e Alting (2001), as formas de impactos ambientais podem ser de abrangência global, regional ou local. No primeiro caso se

enquadram o aquecimento global, redução da camada de ozônio, toxicidade[10] e consumo de recursos não-renováveis. De abrangência regional tem-se danos a florestas/ vegetação e a lagos/águas costeiras e, em nível local, impactos físicos[11], toxicidade local e consumo de recursos renováveis.

Com relação à avaliação objetiva e quantitativa de impactos ambientais, ainda segundo Wenzel, Hauschild e Alting (2001), o princípio de avaliação de um impacto ambiental potencial é dado pela multiplicação da quantidade de substância emitida pelo potencial de impacto da substância. Assim, o método só avaliará os impactos ambientais se obedecer o princípio apresentado acima.

No caso do FMEA, o critério tem por objetivo identificar se para cada modo de falha ambiental é associado um impacto ambiental. O critério também busca identificar se estes impactos ambientais potenciais são avaliados objetivamente e quantitativamente, isto é, se o peso atribuído à severidade de cada modo de falha é medido baseando-se no impacto ambiental. O critério é apresentado a seguir:

- FMEA: os impactos ambientais estão associados aos modos de falha potenciais e são avaliados de forma objetiva e quantitativa?

Já os critérios operacionais Facilidade de Uso, Custo, Tempo, Validado, Visualização de benefícios e Análise de *trade-offs* para os casos de QFD e FMEA são apresentados a seguir:

---

[10] Decorrente do uso de substâncias como ftalatos e pesticidas que trazem efeitos tóxicos em diferentes organismos (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 2001)

[11] Como por exemplo: erosão, perda da qualidade visual, inundações decorrentes da má absorção do solo (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 2001)

- Facilidade de Uso

Este critério busca avaliar se os métodos baseados em QFD e FMEA apresentam os passos e etapas relacionadas a aplicação detalhados, além de não fazer uso de modelos matemáticos que não fazem parte do conhecimento da equipe de desenvolvimento de produto, de modo que possam ser facilmente compreendidos e aplicados. O critério é definido pela seguinte questão:

  - QFD e FMEA: o método tem suas etapas de aplicação detalhadas e não faz uso de linguagem matemática complexa (de não conhecimento pelos *designers*)?

Para Rozenfeld et al. (2006), a equipe de desenvolvimento de um produto normalmente envolve membros de diferentes áreas, sendo mais comum pessoas de marketing, engenharia e de produção. Portanto, de modo a atender este requisito operacional, a linguagem matemática ou técnica empregada nos métodos de QFD e FMEA ambientais devem ser familiares às áreas citadas.

- Custo

O critério Custo tem por objetivo identificar se os métodos baseados em QFD e FMEA requerem o uso de softwares específicos, treinamento de funcionários, consultoria ou contratação de especialistas, isto é, qualquer necessidade que gere custo para a empresa para a aplicação do método, definido pela questão:

  - QFD e FMEA: o método requer a aquisição de softwares, contratação de especialistas e/ou treinamento?

- Tempo

O critério “tempo” busca avaliar se o método de ecodesign baseado em QFD e FMEA é aplicado de forma mais rápida ou demorada com base no número de etapas de suas versões tradicionais conforme apresentadas nos subcapítulos 3.2.1 para o QFD e 3.3.1 para o FMEA. Ou seja, se um determinado método apresentar maior número de etapas que sua versão tradicional, ele será considerado demorado. A situação oposta, ou seja, o método será rápido quando tiver menos etapas que sua versão tradicional. Uma situação intermediária, isto é, nem demorado, nem rápido (atendimento parcial do critério), será identificada se o método apresentar o mesmo número de etapas que a versão tradicional. Assim, este critério ficou definido pela questão:

- QFD e FMEA: o método apresenta maior número de passos que sua versão tradicional?

- Validado

O método será considerado validado quando for encontrada na literatura exemplos relacionados a sua aplicação em empresas, no desenvolvimento de produtos, apresentando inclusive resultados de sua utilização. Assim, o critério estabelecido consiste na seguinte pergunta:

- QFD e FMEA: o método foi aplicado em empresas?

- Visualização dos benefícios

Este critério tem por finalidade identificar se o método apresenta claramente quais seus objetivos, benefícios e principais resultados que podem ser obtidos através de sua aplicação.

- QFD e FMEA: o método apresenta quais os principais benefícios e resultados de sua aplicação?

- Análise de *Trade-Offs*

Este critério permite identificar se o método baseado em QFD considera conflitos e relações entre os os requisitos ambientais e de produto, tanto para a qualidade exigida quanto para as características da qualidade.

- QFD: o método permite identificar relações/conflitos entre os requisitos ambientais e de produto da qualidade exigida e das características da qualidade?

No caso do FMEA, o critério permite analisar se o método ambiental identifica possíveis relações e conflitos entre as recomendações propostas pela equipe de desenvolvimento para os modos de falha.

- FMEA: o método permite identificar relações/conflitos entre as recomendações propostas?

Definidos os três critérios ambientais e os seis critérios operacionais específicos para os métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA, a etapa seguinte consistiu em validá-los junto a especialistas através de um questionário cujo exemplo se encontra no apêndice B. Como resultado da aplicação, foram respondidos oito questionários, sendo dois de especialistas da área ambiental de produtos, três de autores sobre requisitos ambientais para métodos de ecodesign e três de especialistas em desenvolvimento de produtos, obtendo-se as seguintes proporções apresentadas nas figuras 47 e 48 para os critérios ambientais e operacionais respectivamente:

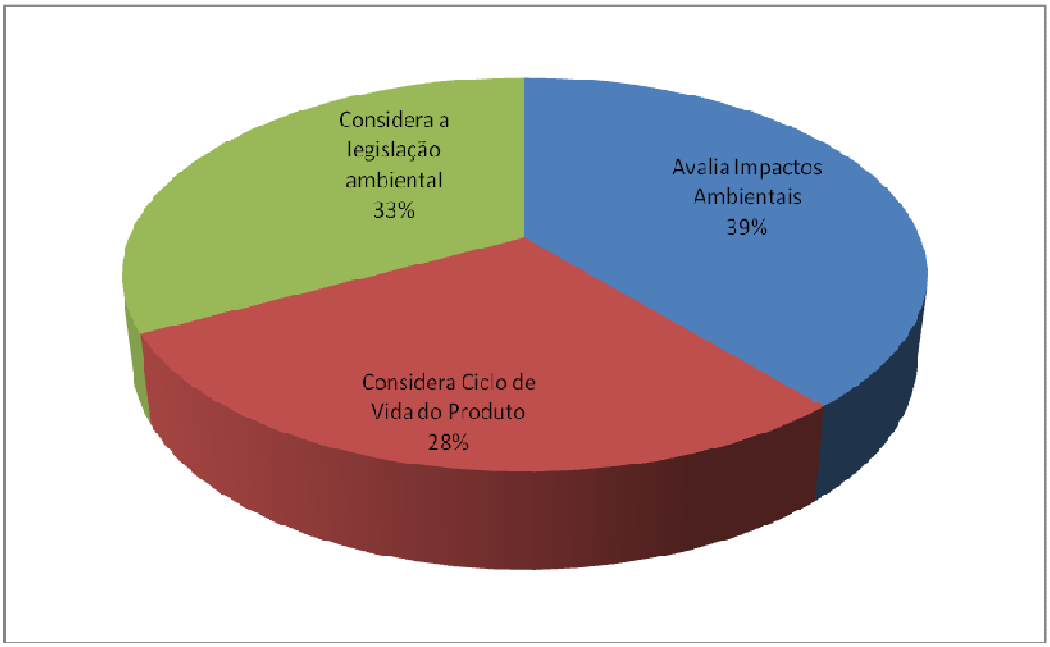

Figura 47. Critérios ambientais mais importantes segundo os especialistas entrevistados

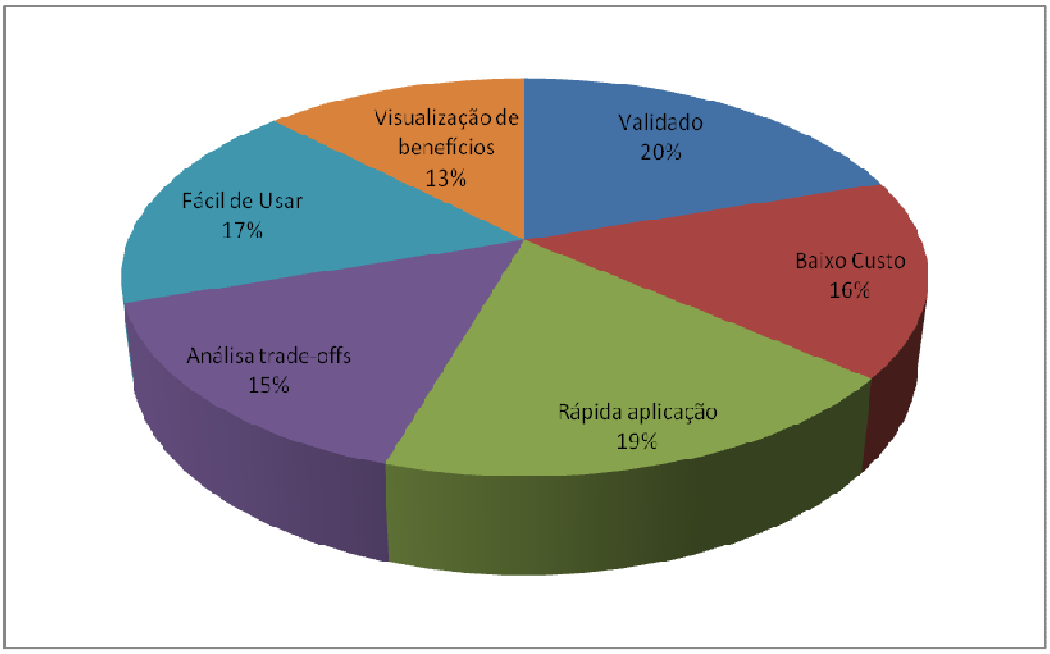

Figura 48. Critérios operacionais mais importantes segundo os especialistas entrevistados

Observa-se que, de acordo com os especialistas, quando consideradas todas as respostas dos questionários, a diferença de importância entre os critérios foi pouco significativa, mostrando que todos os critérios são importantes para a análise dos métodos de ecodesign. Outra constatação se refere a que nenhum especialista sugeriu a inclusão de

um novo critério, seja ambiental ou operacional. Assim, se obteve a seguinte ordem de importância para os critérios ambientais e operacionais:

- Critérios ambientais:
    - Avalia impactos ambientais;
    - Considera a legislação ambiental;
    - Considera o ciclo de vida do produto.
- Critérios operacionais:
    - Validado;
    - Rápida aplicação;
    - Fácil de usar;
    - Baixo custo;
    - Analisa *trade-offs;*
    - Visualização dos benefícios.

4.2 Resultados da análise ambiental e operacional dos métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA

Definidos os critérios ambientais e operacionais através das entrevistas com os especialistas**,** tornou-se possível então analisar quais dos 19 métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA contemplam mais critérios sob o ponto de vista ambiental e da aplicação (operacional). Para isso foi utilizada uma matriz baseada na casa da qualidade que permitiu correlacionar os 19 métodos de QFD e FMEA com os três critérios ambientais e os seis critérios operacionais. Conforme apresentado na metodologia deste trabalho, o pesquisador utilizou-se de uma escala Likert para as correlações entre os

critérios e os métodos, além dos pesos para cada critério ter sido atribuído à ordem de importância definida pelos especialistas.

A figura 49 apresenta a matriz de correlação entre os critérios ambientais e operacionais com os métodos QFD e FMEA de ecodesign, com respectivos pesos e resultados.

			Métodos de ecodesign baseados em QFD																	Métodos de ecodesign baseados em FMEA	
	Critérios	**Peso**	QFDE	Environmental QFD	QFD de Hochman e O'Connell	Eco-QFD de Ernzer e Birkhofer	GQFD	3D-QFDE	Eco-VOC	EI2QFD	Green QFD-II	IGQFD	QFDE/LCA/TRIZ	QFDE/LCA	QFD-DfE	QFD de Wolniak e Sędek	QFD based on RSP	Eco QFD de Kuo et al.	Eco QFD de Utne	E-FMEA	FMEA TRIZ
Ambientais	Fases do Ciclo de Vida do Produto	1																			
	Conformidade e Regulamentação	2																			
	Impactos Ambientais	3																			
Operacionais	Facilidade de uso	4																			
	Custo	3																			
	Tempo	5																			
	Aplicado	6																			
	Visualização de benefícios	1																			
	Análise de *trade-offs*	2																			
	***Score* dos critérios ambientais**																				
	***Score* dos critérios operacionais**																				

Figura 49. Modelo de correlação entre os critérios ambientais e operacionais com os métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA

O método QFDE apresentou o peso 3 para a correlação “Considera Ciclo de Vida do Produto” uma vez que são considerados requisitos ambientais do produto das fases de manufatura, de uso, estratégias de fim-de-vida e disposição final, tais como: fácil de processar e montar, baixo consumo de energia, fácil de reusar/desmontar e seguro para o aterro. Porém, apesar do QFDE identificar algumas formas de impacto ambiental como requisitos técnicos, como poluição do ar/água/solo e toxidade, estes impactos não são medidos de forma objetiva e quantitativa, já que os pesos das correlações da matriz do QFDE são atribuídos de forma subjetiva pela equipe de desenvolvimento, recebendo o peso 2. Já para o critério “Conformidade e regulamentação”, o método recebeu o peso 1, pois a legislação ambiental não foi considerada como um item da qualidade exigida.

Com relação aos requisitos operacionais, o QFDE apresentou um alto resultado por apresentar detalhadamente suas etapas de aplicação e não fazer uso de modelos matemáticos, não necessitar da contratação de especialistas ou da compra de softwares, se basear na mesma estrutura do QFD tradicional, ou seja, não possuindo mais etapas que o método original, além de deixar claro quais os benefícios de sua aplicação. Por outro lado, o QFDE não atendeu ao requisito de “Analisar *trade-offs*”, ficando com o valor 1 para esta correlação.

O *Environmental* QFD recebeu peso 3 para o critério ambiental sobre fases do ciclo de vida, pois apresentou como itens da qualidade exigida, requisitos dos clientes relacionados às fases de extração de matéria-prima, manufatura, uso e disposição final. Para conformidade e regulamentação, recebeu o peso 2 em razão de não ser considerada como um requisito de produto, apenas um requisito técnico (características da qualidade).

Por não permitir avaliar impactos ambientais, o Environmental QFD recebeu peso 1 para este critério ambiental.

Apesar do *Environmental* QFD apresentar detalhadamente suas etapas de aplicação, o método apresenta a utilização de metodologia chamada de Teoria da Quantificação do Tipo IV que necessita de cálculos de autovetor e requer dispêndios financeiros por parte da empresa com treinamento e compra de software.

Esta metodologia também representa uma etapa adicional ao que se verifica no QFD tradicional, além de uma grande quantidade de correlações (1.080 correlações possíveis), prejudicando o requisito operacional "Tempo" apesar de se basear somente na casa da qualidade. Os outros pesos se devem ao fato do método ter sido validado por meio de aplicação em uma empresa do setor automobilístico (peso 3), deixar claro as principais vantagens em utilizar da Teoria da Quantificação do Tipo IV (peso 3) e não permitir a identificação de relações e conflitos para a qualidade exigida e para a qualidade planejada através da análise de trade-offs (peso 1).

O terceiro método analisado, o QFD de Hochman e O'Connell, foi um dos métodos com menor *score* ambiental entre os dezenove métodos apresentados. Para os três critérios ambientais foram atribuídos valor 1 já que o método não considera requisitos relacionados às fases do ciclo de vida do produto, não considera a legislação ambiental como um requisito, além de não avaliar os impactos ambientais potenciais do produto. Por outro lado, devido as semelhanças com o QFD tradicional, o QFD de Hochman e O'Connell foi considerado fácil de usar, de baixo custo e de relativa rápida aplicação, já que apresenta as mesmas etapas do QFD tradicional, ou seja, há desdobramento em componentes, processos e produção. Também por se assemelhar ao QFD tradicional, considerando apenas algumas questões ambientais para a qualidade exigida e as características da qualidade, foi atribuído

o peso 1 para o requisito operacional “Visualização de benefícios” e o peso 2 para “Análise de *trade-offs*” já que somente são correlacionados itens das características da qualidade.

Analisando somente o Eco-QFD do modelo metodológico de DfE de Ernzer e Birkhofer, embora os autores sugiram que os requisitos relacionados as fases do ciclo de vida sejam considerados pelo método, os demais critérios ambientais, conformidade e regulamentação e impactos ambientais, não são identificados, somando-se somente oito pontos ambientais. Com relação aos requisitos operacionais, o método não foi validado em uma empresa pelos pesquisadores, porém foi aplicado no desenvolvimento interno de um protótipo de aspirador de pó, permitindo atribuir o peso 2 para esta correlação. Por não permitir analisar *trade-offs*, o método recebeu o peso 1 para este requisito. Por não deixar claro as principais vantagens em se utilizar a versão de QFD ambiental proposta, já que se poderia utilizar o QFD tradicional, atribuiu-se o peso 1 para o requisito “Visualização de benefícios”. Os demais requisitos operacionais foram considerados como atendidos (peso 3).

Para o método GQFD foi atribuído o peso 2 para o critério sobre fases do ciclo de vida, pois apesar do método não apresentar requisitos relacionados as fases do ciclo de vida do produto, os autores sugerem que a qualidade exigida seja obtida a partir dos *stakeholders*, o que leva a crer que a voz do cliente de diversas fases do ciclo de vida sejam consideradas. A mesma correlação foi dada ao critério relacionado a legislação ambiental, que apesar de não ser citado como um requisito de produto, entende-se que ao se considerar *stakeholders* na obtenção da qualidade exigida, as leis ambientais sejam incluídas. O critério sobre impactos ambientais recebeu peso 1, pois o método não permite identificar e avaliar impactos ambientais. Com relação aos requisitos operacionais, o GQFD não apresenta um exemplo de como é aplicado, restringindo-se apenas a um *framework* do método, recebendo, deste modo, o peso 2 para facilidade de uso. Em razão

de não necessitar de especialistas, treinamento ou compra de *softwares*, além de ter menos etapas que o QFD tradicional, o GQFD foi considerado um método de baixo custo e rápido. Por não ter sido aplicado em empresas, o GQFD não foi considerado como validado (peso 1), mesmo peso atribuído para visualização de benefícios por não apresentar quais suas vantagens em relação ao QFD tradicional.

O 3D-QFDE recebeu os mesmos pesos atribuídos ao QFDE já que se baseia no mesmo método de Masui et al. (2001). Por outro lado, mesmo apresentando benefícios por permitir comparar diferentes alternativas de projeto de ecodesign, o 3D-QFDE não apresenta suas etapas de aplicação e nem tabelas necessárias para o cálculo, recebendo o peso 2 para o requisito operacional sobre facilidade de uso. O mesmo peso foi dado ao requisito "Tempo" por apresentar uma etapa adicional ao QFD para o cálculo das melhorias de qualidade, ambiental e de custo, não realizando desdobramentos em componentes e processos como no QFDE de Masui et al. (2001). O 3D-QFDE não foi aplicado em empresas, ou seja, não foi validado. Atribuiu-se o peso 1 para *trade-offs* pois o método não atendeu este requisito operacional conforme foi definido, apesar de permitir comparar alternativas de projeto.

A Eco-VOC, por utilizar da VoC ambiental do QFDE de Masui et al. (2001) para a geração da eco-VoC, permitiu-se atribuir o peso 3 para a correlação do método para fases do ciclo de vida. Porém o QFDE simplificado de Yim e Herrmann não permite correlacionar a eco-VoC com as métricas de engenharia ambientais, partindo-se diretamente para a correlação da VoC convencional e ambiental com as partes dos produtos. Por este motivo não é possível identificar e avaliar impactos ambientais através do QFDE simplificado, resultando no peso 1 para o respectivo critério ambiental. O mesmo peso foi designado para o critério sobre legislação ambiental já que este não é considerado pelo método. Com relação aos requisitos operacionais, identificou-se que o

método foi considerado fácil de usar e de baixo custo, porém o método não permite realizar análise de *trade-offs*, além de apresentar etapas adicionais ao QFD tradicional como a matriz de relação entre as VoCs ambientais e tradicionais, embora não apresente demais desdobramentos do QFD, justificando-se assim o peso 2. Pelo método não ter sido validado, foi atribuído o peso 1 para este critério.

O método EI2QFD, por se utilizar do *Eco-indicator* 99 (EI99), permite considerar as fases do ciclo de vida do produto, recebendo deste modo o peso 3. Porém os autores sugerem que os resultados do EI99 sejam transformados em uma escala semelhante ao QFD tradicional, reduzindo a possibilidade de análise objetiva dos impactos ambientais no produto (tabela 2). Deste modo, para o critério ambiental "Avaliação de impactos ambientais" foi atribuído o peso 2 ao EI2QFD. Pelo fato do método não considerar a legislação ambiental como requisito de produto, foi dado o peso 1 para este critério ambiental.

No que se refere às questões operacionais do EI2QFD, por se utilizar de bases de dados do EI99 e o IdeMat, ferramenta utilizada na escolha de materiais no projeto, os *designers* podem apresentar dificuldades ao utilizar estas referências para impactos ambientais. Assim, mesmo os autores apresentando as etapas de aplicação do EI2QFD, foi atribuído o peso 2 para o critério relacionado a facilidade de uso. Quanto à questão de custo, apesar de proposta a utilização de um programa baseado no Microsoft Excel no lugar de *softwares* como o SimaPro[12], verifica-se a necessidade de treinamento para a utilização dos resultados do EI99, resultando-se no peso 2 para o requisito operacional custo. Por haver mais etapas que o QFD tradicional, foi atribuído peso 1 para tempo, além de se ter atribuído também o peso 1 pelo método não ter sido validado e não realizar análise de *trade-offs*. Por apresentar as vantagens do EI2QFD ao permitir melhor avaliação

[12] *Software* utilizado na avaliação de impactos ambientais de produtos.

ambiental dos produtos por meio do EI99, foi atribuído o peso 3 para o requisito relacionado a visualização de benefícios.

O método GreenQFD-II, em especial a casa verde ambiental (figura 19), por considerar como fonte de dados os resultados da aplicação de uma ACV, permitiu-se atribuir o valor 3 para o critério ambiental "Fases do Ciclo de Vida" e o peso 2 para o critério ambiental "Impactos Ambientais". Embora se utilize da ACV, o que a princípio permitiria a avaliação de impactos ambientais, o peso 2 foi dado em razão do GreenQFD-II interpretar qualitativamente os resultados da ACV para uma escala variando entre 1 e 10, reduzindo a objetividade dos resultados, apesar de apresentar categorias de impactos ambientais[13], tais como esgotamento de recursos, saúde humana e impactos ecológicos. Como o método não considera questões relacionadas as leis ambientais, foi atribuido o peso 1 para este critério.

Para os requisitos operacionais, o GreenQFD-II foi considerado relativamente fácil de aplicar pelo fato de se utilizar de dados muitas vezes não conhecidos pelos *designers* (provenientes da ACV e do LCC) apesar do método ter suas etapas de aplicação detalhadas, ficando assim com o peso 2. Pelo mesmo motivo de se utilizar da ACV e do LCC, o GreenQFD-II foi considerado um método custoso e demorado devido a necessidade da compra de *softwares*, treinamento e apresentar maior quantidade de etapas comparado ao QFD tradicional. Como o método não foi aplicado, apenas apresentado um exemplo ilustrativo, recebeu peso 1 para o requisito sobre validação.

O método IGQFD, sob o critério relacionado a fases de vida do produto, recebeu o peso 2. Esta atribuição foi dada em razão do método desconsiderar a fase de uso, apesar de considerar as demais fases do ciclo de vida. Devido a importância ambiental que a fase de uso apresenta, principalmente para aqueles produtos onde a maior parte dos impactos

[13] Classe que representa as questões ambientais relevantes às quais os resultados do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) podem ser associados (ABNT, 2004).

ambientais estão relacionadas a sua utilização, optou-se por definir este critério como atendido parcialmente. Com relação ao critério ambiental sobre impactos ambientais, em razão do IGQFD se utilizar de uma versão simplificada e semi-quantitativa da ACV, chamada de *Matrix Approach*, foi atribuído o peso 2 para esta correlação já que não é possível analisar objetivamente os impactos causados pelo produto, além dos impactos serem convertidos para pesos entre 0, 1, 3 e 9 como no QFD e não considerar os impactos ambientais da fase de uso. O IGQFD não trata de questões relacionadas a legislação e normas ambientais, recebendo assim o peso 1.

Quando observado sob a perspectiva operacional, o método foi considerado relativamente fácil de aplicar pois as etapas relacionadas a utilização da *Matrix Approach* para exemplificação do IGQFD não são apresentadas. Ainda a respeito da *Matrix Approach*, devido à sua característica simplificadora e semi-quantitativa da ACV, permitiu classificar o IGQFD como sendo um método de baixo custo e de relativa aplicação rápida, já que não apresenta desdobramentos em processo e produção presentes no QFD tradicional. Por ter sido realizado um estudo de caso, o método foi avaliado com peso 3 para o requisito sobre validação. Por permitir a correlação entre as características técnicas e demonstrar seus benefícios, principalmente comparado ao GreenQFD-II, o método IGQFD recebeu os pesos 2 e 3 respectivamente.

As duas propostas de uso combinado do QFDE com a ACV e TRIZ permitiram analisar, de forma objetiva e quantitativa, os impactos ambientais associados à VoC, corrigindo esta deficiência até então identificada no método original de Masui et al. (2001). Em ambos os casos, o critério ambiental sobre conformidade e regulamentação não foi atendido. Relacionado aos requisitos operacionais, ambos os métodos foram considerados relativamente fáceis de usar devido a descrição das etapas de aplicação, porém, levando-se em consideração também a necessidade de informações detalhadas sobre ACV, podem

trazer dificuldades para *designers* não familiarizados com esta técnica. Em razão da própria ACV, os métodos foram considerados custosos (compra de *softwares* e treinamento) e demorados em virtude das etapas adicionais. Ambos deixam claro as vantagens e benefícios em sua utilização (peso 3) e não analisam *trade-offs* (peso 1). A única diferença registrada entre os métodos no *score* operacional se deve ao fato do uso combinado do QFDE/ACV ter sido realizado aplicado em um estudo de caso enquanto que o QFDE/ACV/TRIZ apenas em forma de exemplo.

O método QFD-DfE, por considerar fases do ciclo de vida entre os requisitos ambientais do produto, permitiu atender o respectivo critério ambiental proposto. Já o critério sobre impactos ambientais não foi atendido pois o método não identifica as formas ou categorias de impactos, e consequentemente, não os avalia de forma objetiva. Também não são realizadas considerações sobre a legislação ambiental. Quando observado o método sob o ponto de vista operacional, verificou-se que o QFD-DfE pôde ser considerado fácil de usar por suas etapas de aplicação serem apresentadas detalhadamente, além de não utilizar de linguagem matemática não conhecida pelos *designers*. Também foi considerado de baixo custo e rápido, até em função de se assemelhar ao QFD tradicional e desdobrar até a fase componente somente. O método não foi validado (apenas apresentado como um exemplo ilustrativo – peso 1) e permite identificar relações/conflitos entre requisitos do produto, componentes e questões de qualidade, ambientais e de custo (peso 3).

O QFD de Wolniak e Sędek recebeu peso 2 para a correlação com o critério de impactos ambientais e legislação ambiental já que o método permite identificar algumas formas de impactos ambientais (embora não os avalie) e considerar genericamente o critério de conformidade e regulamentação através de um requisito conforme exemplo apresentado na figura 26. O método também foi considerado fácil de usar por não utilizar

de linguagem matemática desconhecida por *designers*, não necessitar de *softwares* e treinamento, até em razão de se assemelhar à casa da qualidade do QFD tradicional (requisito operacional "Tempo"). Por não ter sido aplicado para produtos, apenas em um estudo para uma cidade polonesa, atribuiu-se o peso 2 para este critério operacional. O método permite identificar relações entre os requisitos técnicos, porém sem se preocupar com conflitos, atendendo parcialmente este requisito. Com relação ao requisito sobre visualização de benefícios, o método apresenta somente a vantagem de ser desenvolvido para bens e serviços, sendo que na realidade trata-se apenas de uma matriz de QFD tradicional focada somente em questões ambientais, recebendo o peso 1.

O método QFD baseado em RSP apresentou baixo *score* para os critérios ambientais propostos. Por estar dirigido a avaliação da fase de uso de um serviço, o método recebeu o peso 1 para fases do ciclo de vida. O mesmo peso foi atribuído ao método para os demais critérios ambientais por não identificar e avaliar impactos ambientais, além de não considerar questões relacionadas às leis e normas ambientais de produto. Com relação à operacionalidade do método, foi constatado que suas fases de aplicação apresentam-se bem detalhadas, não sendo necessário o uso de modelos matemáticos mais complexos, *softwares* e treinamento, além de ter sido validado e apresentar seus benefícios na seleção de serviços ambientais. Por apresentar duas etapas adicionais (RSP e a avaliação dos serviços sob a ótica ambiental e não-ambiental) ao QFD tradicional, apesar de se basear somente em uma matriz da qualidade (sem outros desdobramentos), foi considerado que o método atende parcialmente ao requisito operacional sobre tempo. Atribuiu-se o peso 1 para *trade-offs* já que este requisito, conforme definido na metodologia, não foi atendido.

O Eco-QFD, proposto por Kuo et al. (2009), atendeu parcialmente o critério ambiental sobre fases do ciclo de vida pois são considerados apenas as fases do ciclo de

vida para os requisitos técnicos (características da qualidade), e não para a VoC. O método não permite avaliar os impactos ambientais para a qualidade exigida, uma vez que a técnica *fuzzy* tem por objetivo, somente, identificar de forma mais precisa o valor dado pelos consumidores para os pesos e correlações, enquanto que questões relacionadas as leis e normas ambientais não são consideradas pelo método. Com relação aos requisitos operacionais o método não foi considerado de fácil uso devido a quantidade de cálculos e fórmulas matemáticas apresentadas para uso da técnica *fuzzy*, fator este que eleva o tempo de aplicação (embora o método foque apenas na casa da qualidade) e requer contratação de especialistas ou treinamento de *designers*, embora não haja necessidade de aquisição de *softwares*. Como o método foi aplicado, atribuiu-se o peso 3 para o requisito validação e o peso 1 para análise de *trade-offs* já que conflitos e relações não são analisados.

O último método de QFD ambiental de produto, o Eco-QFD de Utne (2009), foi avaliado com peso 1 para fases do ciclo de vida e conformidade e regulamentação por não considerar estes critérios. Foi atribuído o peso 2 para avaliação de impactos ambientais apenas por se identificar entre os requisitos das embarcações duas formas de impactos ambientais, porém sem avaliá-las. O método foi considerado de fácil uso por não utilizar de linguagem matemática complexa para *designers* e apresentar bem definidas as etapas de aplicação, além de ser de baixo custo por não demandar treinamento, contratação de especialistas ou mesmo compra de *softwares*. Entretanto, por haver uma matriz para respostas gerenciais, esta adicional ao QFD tradicional, atribuiu-se o peso 2 para o requisito operacional tempo (pois embora exista uma matriz adicional, não há os outros desdobramentos do QFD), mesmo peso dado para análise de *trade-offs*. Pelo fato do método não ter sido aplicado, foi atribuído o peso 1 para este requisito.

O método E-FMEA, por identificar as fases do ciclo de vida para cada atividade da vida do produto, recebeu o peso 3 para este critério. O peso 2 foi atribuído ao critério sobre

conformidade e regulamentação devido ao exemplo apresentado pelo método não considerar o descumprimento da legislação ambiental como um modo de falha, apesar de analisar cada atividade relacionada ao produto segundo um índice S, este relacionado a controle de documentos (normas e leis) ambientais. O critério sobre avaliação ambiental também foi considerado como parcialmente atendido por avaliar os impactos ambientais de forma subjetiva através de atribuição de pesos pela equipe de desenvolvimento de produtos. Em relação aos critérios operacionais, observou-se que o E-FMEA é um método de fácil utilização, de baixo custo, apresentando basicamente as mesmas etapas de aplicação do FMEA tradicional e tendo sido aplicado.

A integração FMEA-TRIZ apresentou o mesmo desempenho ambiental que o E-FMEA segundo os critérios propostos, entretanto, com relação aos requisitos operacionais, apresentou um *score* inferior por não ter sido validado.

A figura 50 apresenta os resultados obtidos através da análise dos métodos.

			Métodos de ecodesign baseados em QFD																	Métodos de ecodesign baseados em FMEA	
	Critérios	**Peso**	QFDE	Environmental QFD	QFD de Hochman e O'Connell	Eco-QFD de Ernzer e Birkhofer	GQFD	3D-QFDE	Eco-VOC	EI2QFD	Green QFD-II	IGQFD	QFDE/LCA/TRIZ	QFDE/LCA	QFD-DfE	QFD de Wolniak e Sędek	QFD based on RSP	Eco QFD de Kuo et al.	Eco QFD de Utne	E-FMEA	FMEA TRIZ
Ambientais	Fases do Ciclo de Vida do Produto	1	3	3	1	3	2	3	3	3	3	2	3	3	3	1	1	2	1	3	3
	Conformidade e Regulamentação	2	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	2
	Impactos Ambientais	3	2	1	1	1	1	2	1	2	2	2	3	3	1	2	1	1	2	2	2
Operacionais	Facilidade de uso	4	3	2	3	3	2	2	3	2	2	2	2	2	3	3	3	1	3	3	3
	Custo	3	3	1	3	3	3	3	3	2	1	3	1	1	3	3	3	2	3	3	3
	Tempo	5	2	2	2	3	3	2	2	1	1	2	1	1	3	3	2	2	2	2	2
	Aplicado	6	3	3	1	2	1	1	1	1	1	3	3	1	1	2	3	3	1	3	1
	Visualização de benefícios	1	3	3	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3	3	3
	Análise de *trade-offs*	2	1	1	2	1	2	1	1	1	3	2	1	1	3	2	1	1	2	1	1
	***Score* dos critérios ambientais**		11	10	6	8	9	11	8	11	11	10	14	14	8	11	6	7	9	13	13
	***Score* dos critérios operacionais**		54	44	42	51	43	38	42	30	31	52	39	27	51	53	54	43	44	54	42

Figura 50. Análise dos métodos QFD e FMEA de ecodesign segundo critérios ambientais e operacionais

Assim, conforme os pesos identificados, observa-se que entre os métodos ambientais de QFD que são utilizados em conjunto com a ACV (LCA) apresentaram os maiores pesos ambientais uma vez que esta técnica permite identificar e avaliar de forma objetiva e quantitativa todos os impactos ambientais que ocorrem em todas as fases do ciclo de vida do produto. Nesta situação, conforme se verifica através da figura 47, a utilização conjunta do método QFDE com a LCA permitem atingir bons resultados ambientais durante o desenvolvimento de produtos.

Porém, embora as integrações entre QFDE e LCA apresentem maiores vantagens ambientais, o mesmo não pode ser considerado quando se trata da aplicação. Devido a complexidade da avaliação de impactos ambientais, necessidade de treinamento, especialistas e compra de *softwares*, e tempo necessário para a técnica de LCA, estes métodos apresentaram uns dos menores pesos operacionais.

Verificou-se assim que entre os métodos de QFD, quanto maior os benefícios ambientais que eles podem trazer no desenvolvimento de produtos, mais obstáculos operacionais apresentarão, como pode ser visto na figura a seguir.

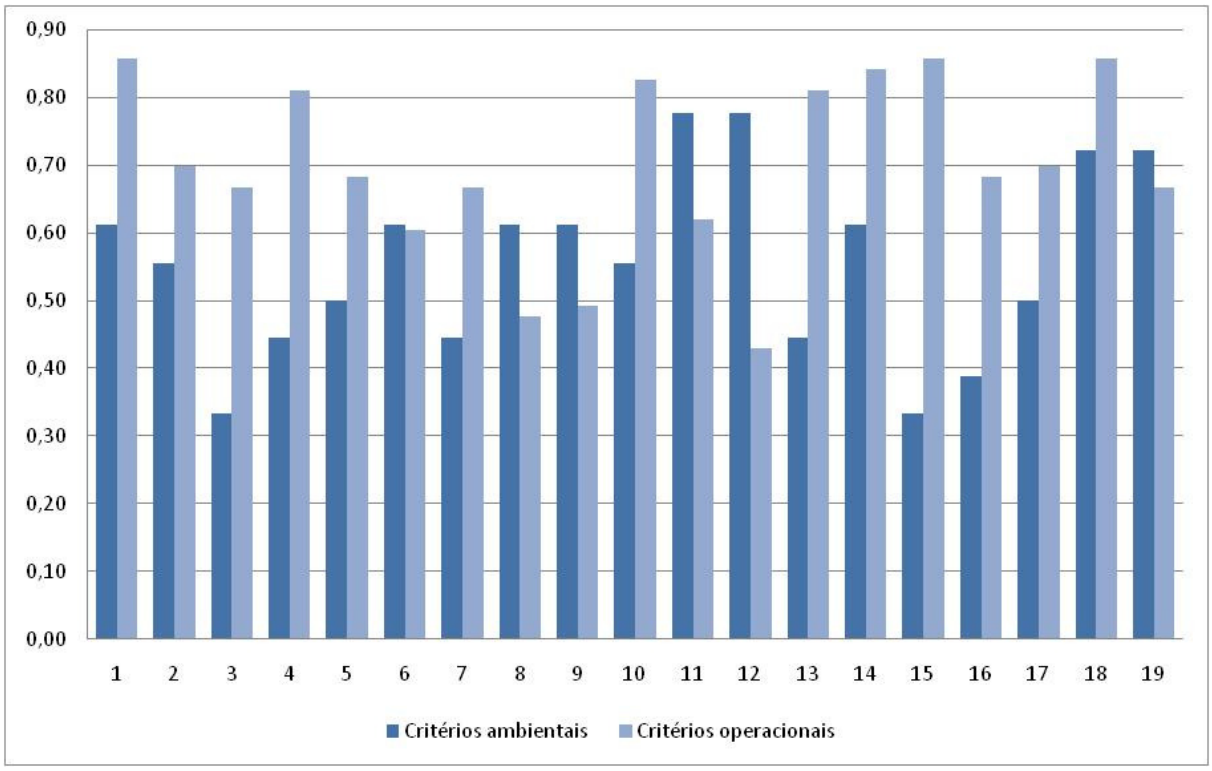

Figura 51. Gráfico percentual comparativo entre *score* dos critérios ambientais e operacionais para os 19 métodos analisados

A figura 51 mostra que os métodos 11 e 12, representados respectivamente pelas integrações QFDE/LCA e QFDE/LCA/TRIZ, embora apresentem maiores vantagens ambientais (os métodos 18 e 19 se referem respectivamente ao E-FMEA e ao FMEA-TRIZ), não são considerados adequados operacionalmente.

Por outro lado, os método QFDE, QFD de Wolniak e Sędek e o QFD baseado em RSP obtiveram a maior pontuação relacionada a questão operacional por ser considerado fácil e rápido de aplicar, não ser necessário gastos financeiros com especialistas e *softwares*, além de ter sido validado através de aplicações reais no desenvolvimento de produtos, embora nenhum deles permitissem avaliar impactos ambientais.

Entre os métodos de FMEA para ecodesign, observou-se o mesmo *score* ambiental para o FMEA TRIZ e o E-FMEA, apenas apresentando maior vantagem operacional o método de Lindahl por este ter sido validado.

Em relação aos critérios ambientais, tanto para os métodos de ecodesign baseados em QFD, quanto em FMEA, verificou-se que "Conformidade e regulamentação" foi o menos considerado pelos dezenove métodos de ecodesign analisados. Observa-se pela figura 52 que este critério não foi atendido por catorze vezes e foi atendido parcialmente por cinco vezes em razão de fazer alguma consideração às leis ambientais, embora ainda não de acordo com os critérios propostos.

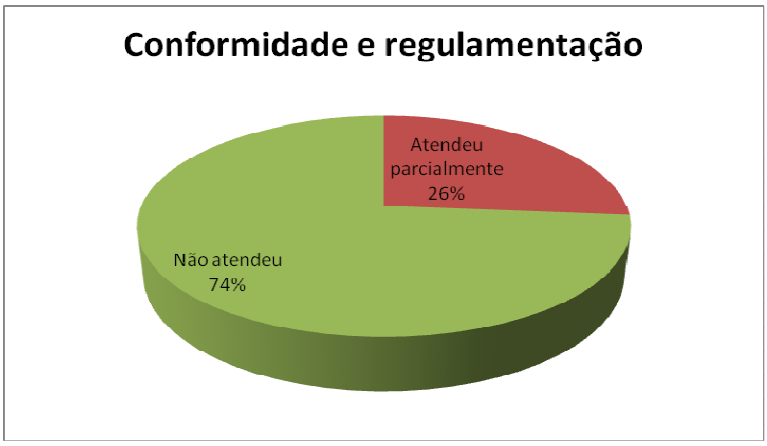

Figura 52. Relação entre métodos atendidos para conformidade e regulamentação

O segundo critério ambiental menos considerado foi "Impactos ambientais". Validado como o mais importante pelos especialistas, este critério foi atendido por duas vezes, atendido parcialmente nove vezes e não atendido oito vezes. Ou seja, somente dois métodos permitem considerar formas de impacto ambiental e também avaliá-los objetivamente, sendo estes métodos derivados da integração com a ACV, como pode ser visto na figura 53.

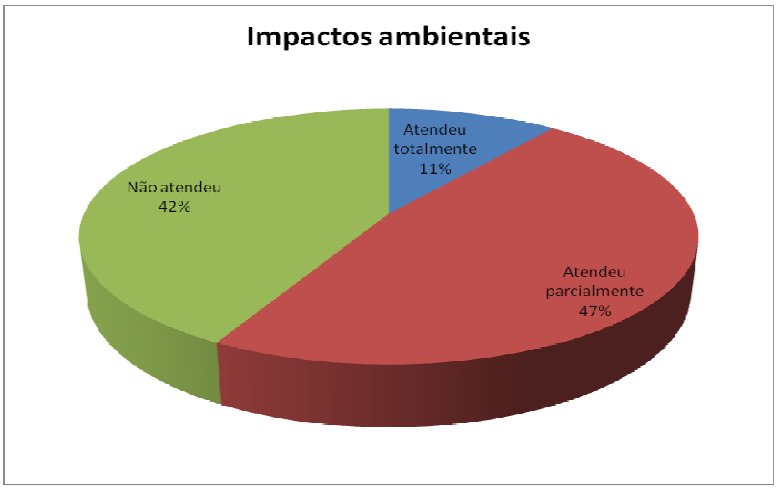

Figura 53. Relação entre métodos atendidos para impactos ambientais

Já o critério ambiental mais considerado entre os métodos QFD e FMEA de ecodesign foi sobre as fases do ciclo de vida do produto, como consta na figura 54. Neste caso, doze métodos atenderam totalmente ao critério, três atenderam parcialmente, ou seja, consideravam algumas fases do ciclo de vida e quatro métodos não atenderam por considerar requisitos de apenas uma fase do ciclo de vida.

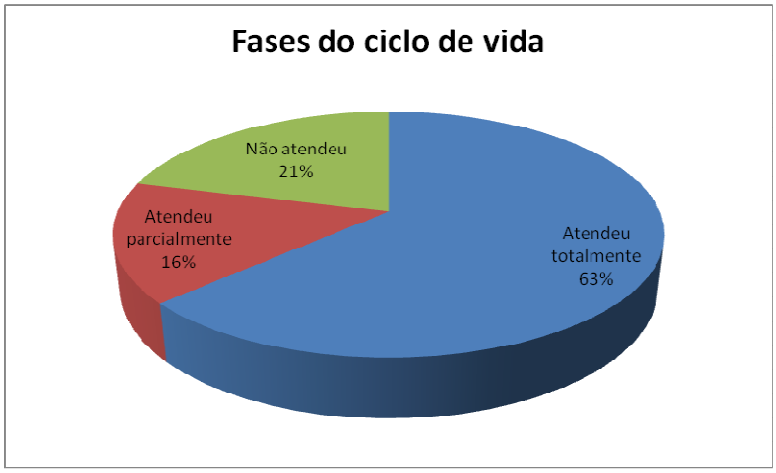

Figura 54. Relação dos métodos atendidos para fases do ciclo de vida

Com relação aos requisitos operacionais, foi possível verificar que a maioria dos métodos (10 métodos) foi considerado de fácil uso, isto é, não utilizava de linguagem matemática de não conhecimento pelos *designers* e apresentavam detalhadamente suas etapas de aplicação, como mostra a figura 55. Outros oito métodos atenderam parcialmente

este requisito, ou seja, ou não apresentavam as etapas de aplicação ou faziam uso de cálculos ou informações não familiares para a equipe de desenvolvimento, e apenas um método não atendeu o requisito operacional.

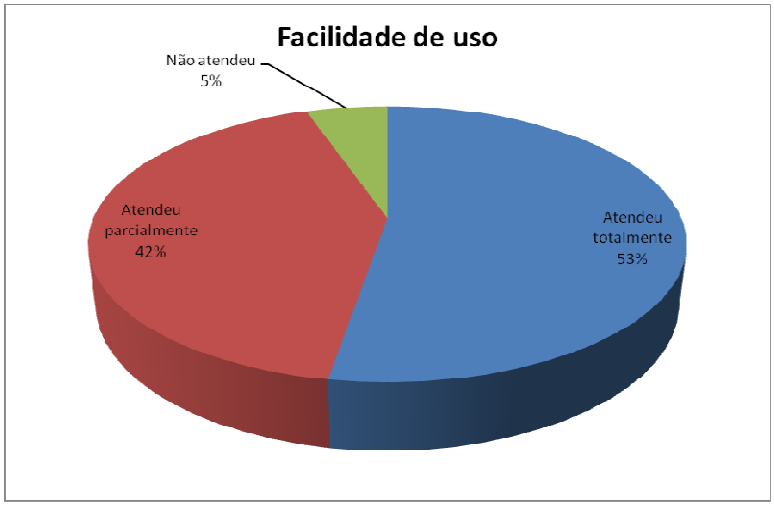

Figura 55. Relação dos métodos que atenderam o requisito facilidade de uso

Por meio do requisito operacional relacionado ao custo de aplicação, identificou-se que a maior parte dos métodos (13) não requer a compra de *softwares* nem mesmo a contratação de especialistas ou treinamento, enquanto dois métodos atendiam parcialmente as exigências deste requisito operacional e quatro métodos não atendiam, conforme apresenta a figura 56.

Figura 56. Relação dos métodos que atenderam o requisito operacional de custo

Verificou-se que a maior parte dos métodos atenderam parcialmente o requisito sobre tempo de aplicação, como se observa na figura 57. Isto se deve ao fato de que onze métodos apresentaram etapas semelhantes ao QFD tradicional ou apresentaram etapas adicionais quando a quantidade de passos eram menor que a versão original. Entre os demais oito métodos restantes, quatro atenderam o requisito tempo e os outros quatro não atenderam.

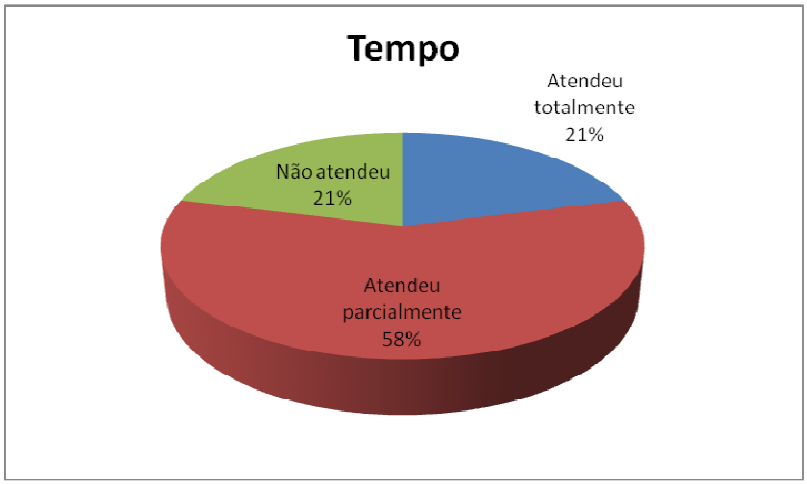

Figura 57. Relação dos métodos que atenderam o requisito operacional tempo

Com relação ao requisito sobre validação, requisito operacional identificado como o mais importante de acordo com os especialistas, observou-se que dez métodos não foram validados em empresas, restringindo-se a aplicação apenas a exemplos ilustrativos ou em alguns casos que apresentam apenas um *framework* do método (figura 58). Em dois casos, no Eco-QFD de Ernzer e Birkhofer e no QFD de Wolniak e Sędek, foi considerado parcialmente atendido já que o primeiro desenvolveu um protótipo internamente a universidade e o segundo, dirigido para produtos e serviços, teve sua aplicação somente realizada no projeto de uma cidade. Os demais sete métodos foram considerados atendidos pelo requisito operacional proposto.

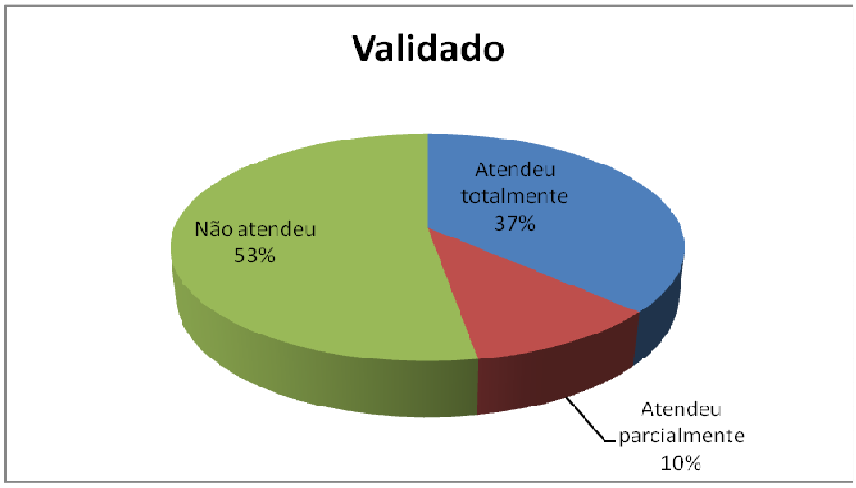

Figura 58. Relação dos métodos que atenderam o requisito operacional de validação

O requisito sobre visualização de benefícios foi atendido quinze vezes, não atendendo quatro vezes quando os autores não apresentaram os benefícios e resultados, já que os métodos tratavam apenas de versões ambientais do QFD ou da casa da qualidade.

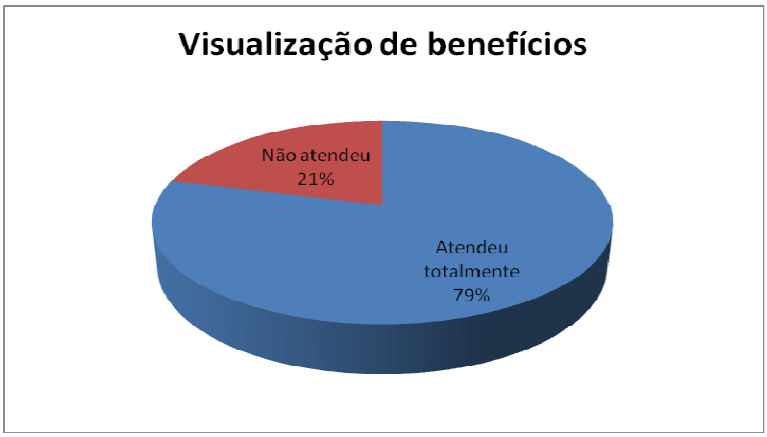

Figura 59. Relação dos métodos que atenderam o requisito sobre visualização de benefícios

Por fim, verificou-se que doze métodos não atenderam ao requisito de análise de *trade-offs*, sendo atendido parcialmente por cinco vezes e não atendido por duas vezes, conforme a figura 60.

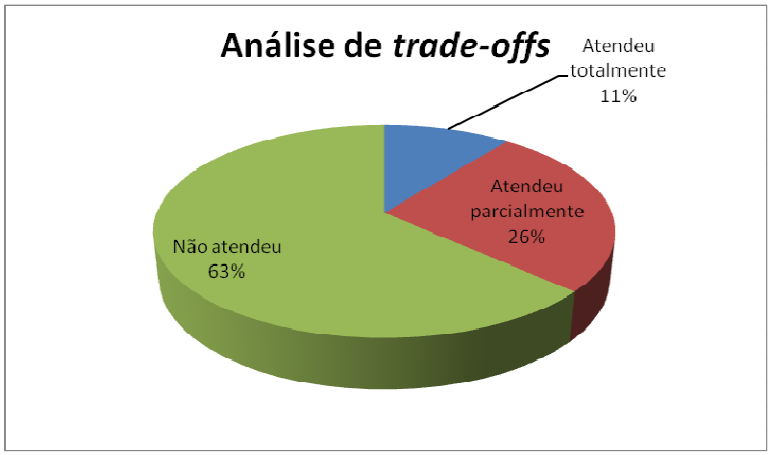

Figura 60. Relação dos métodos que atenderam o requisito sobre análise de *trade-offs*

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O Ecodesign se apresenta como uma solução pró-ativa para se reduzir problemas ambientais que os produtos geram nas fases do ciclo de vida, já na fase de desenvolvimento, através do uso de um conjunto de práticas, estas podendo ser compostas por métodos, ferramentas e *guidelines*.

Em razão disso, principalmente na última década, pôde ser observado um aumento considerável no número de publicações de métodos de ecodesign, sendo uma parte destes métodos tendo origem em outras práticas comuns na própria Engenharia de Produção, na área de desenvolvimento de produtos, caso do QFD e do FMEA.

Devido ao grande número de práticas publicadas para o desenvolvimento de produtos ambientais, observou-se que parte destas práticas não consideravam requisitos importantes, tanto para o desempenho ambiental do produto, quanto para sua aplicação durante o seu desenvolvimento. Tal observação levou pesquisadores identificar uma série de requisitos que viessem a considerar para a melhoria ambiental e operacional das práticas de ecodesign.

Este presente trabalho permitiu identificar os requisitos ambientais e operacionais de métodos de ecodesign e agrupá-los, chegando assim em três critérios ambientais, isto é, um conjunto de três considerações sob a perspectiva ambiental que as práticas de ecodesign devem atender de modo a garantir o mínimo para o desenvolvimento de produtos ambientalmente melhores, e seis requisitos operacionais para auxiliar na aplicação. Porém estes critérios ambientais e requisitos operacionais trataram apenas de recomendações genéricas para todas as práticas de ecodesign.

Com o objetivo de se analisar métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA, foram adaptados os critérios ambientais e requisitos operacionais identificados na literatura de modo que se adequassem as diferentes características destes métodos. Como resultado

do cruzamento destes critérios e requisitos específicos para os métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA através de uma matriz de relação, permitiu-se chegar às seguintes considerações:

Observou-se que normalmente os requisitos operacionais tempo e custo estão relacionados à facilidade de uso, já que um interfere no outro. Em outras palavras, quanto mais dificil for a aplicação de um método, mais demorado e mais custoso ele será. Nota-se também que com excessão de alguns métodos, como o QFDE, que um maior *score* ambiental normalmente reflete em um baixo *score* operacional. Isto evidencia que quanto maior for sua capacidade de principamente avaliar objetivamente impactos ambientais no ciclo de vida do produto, maiores serão as dificuldades em sua implementação por conta de custos com treinamento, especialistas e *softwares*, tempo de aplicação devido ao maior número de passos e atividades, além de eventualmente considerar linguagem matemática e informações não conhecidas por *designers*.

A identificação de que muitos métodos não são validados mostra que não existe a preocupação de testar os métodos em um ambiente real de desenvolvimento de produtos e com profissionais desta área. Isto leva à inviabilidade operacional dos métodos de ecodesign uma vez que ao não aplicá-los, se impossibilita os *designers* auxiliarem na melhoria destes métodos.

De modo geral, o QFDE foi o método de QFD que apresentou simultaneamente o melhor desempenho ambiental e operacional, justificando ser referência de outra série de métodos e integrações, como o eco-VoC, 3D-QFDE, e as integrações com a ACV e a TRIZ. Além disso, o QFDE apresentou alguns dos critérios ambientais mais simples de ser considerados, como os requisitos do produto estarem relacionados às fases do ciclo de vida e, ao menos, identificar e correlacionar formas de impactos ambientais com a qualidade

exigida. Entre os métodos de FMEA, apesar das semelhanças com a integração FMEA TRIZ, o E-FMEA pode ser considerado como a melhor alternativa.

Ao considerar as definições dadas sobre o que se trata o ecodesign no capítulo 2 desta dissertação, onde de forma geral os autores definem o termo como uma forma de se desenvolver produtos de modo a se reduzir impactos ambientais em todo o ciclo de vida do produto, conclui-se que ao menos 37% dos métodos de QFD e FMEA encontrados nem mesmo poderiam ser considerados de ecodesign, já que não consideram todo ciclo de vida do produto. Este percentual pode inclusive ser maior já que somente dois dos dezenove métodos permitem identificar e avaliar os impactos ambientais gerados pelos produtos, possibilitando assim reduzir impactos ambientais de modo eficaz.

Assim, conclui-se que os métodos de ecodesign precisam considerar durante a sua fase de conceitualização e desenvolvimento um conjunto de fatores para que assim possam ser mais facilmente inseridos no processo de desenvolvimento de produtos, além de permitir ganhos ambientais, contribuindo para a redução de impactos ambientais do ciclo de vida do produto.

Como alternativa para a melhoria ambiental e operacional dos métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA, se faz as seguintes propostas de recomendações para trabalhos futuros para cada critério e requisito identificado na literatura:

Nos casos dos métodos de QFD para ecodesign, observou-se que em poucos casos os requisitos de produto estavam relacionados as fases do ciclo de vida. Uma vez que a VoC é normalmente extraída a partir de consulta ao consumidor e as exigências dos clientes estão associadas a fase que eles tem contato com o produto, ou seja, a fase de uso.

A proposta para a inclusão deste critério no QFD seria, então, de se levantar junto aos *stakeholders*, isto é, acionistas, organizações governamentais, organizações não-governamentais (ONGs), especialistas ambientais, comunidade acadêmica, associações

empresariais, além dos tradicionais clientes, todos os requisitos ambientais que envolvam as fases do ciclo de vida do produto onde cada requisito identificado pelos *stakeholders* seria associado a uma determinada fase do ciclo de vida. Deste modo é possível considerar todos os requisitos ambientais de projeto ao longo do seu ciclo de vida, permitindo atender não somente às exigências dos clientes (consumidores finais), mas da sociedade.

Os requisitos para atendimento das estratégias de fim-de-vida dos produtos também passam a fazer parte da matriz do QFD a partir do momento em que a consulta a VoC dos *stakeholders* também considera a opinião de profissionais que tenham conhecimento sobre reciclagem, reuso, remanufatura, etc.

Com relação aos métodos FMEA de ecodesign, o E-FMEA é um exemplo de método de ecodesign onde pode ser verificada a existência da identificação das fases do ciclo de vida do produto. Neste caso é incorporada à tabela do FMEA uma coluna extra que identifica em qual fase do ciclo de vida que o modo de falha pode ocorrer.

Para auxiliar na identificação dos modos de falha que podem ocorrer nas fases do ciclo de vida do produto, sugere-se que a equipe de FMEA ambiental seja composta por clientes e fornecedores além de pessoas da própria empresa.

O critério ambiental relacionado à conformidade e regulamentação poderia ser tratado como requisitos da VoC para os métodos de QFD uma vez que cada país apresenta uma legislação ou norma ambiental diferente quanto a produção, importação e descarte dos produtos. Estes requisitos referentes a legislação e normas ambientais também podem ser obtidas através dos *stakeholders*, a exemplo dos demais requisitos das fases do ciclo de vida do produto.

Já para os métodos de FMEA, este critério ambiental pode ser observado pela introdução uma coluna à tabela de FMEA que indicaria quais legislações ambientais estariam sendo descumpridas e associá-las a cada modo de falha. Em outras palavras, os

modos de falha devem considerar falhas ambientais decorrentes do descumprimento de normas. Por exemplo, supondo o desenvolvimento de um equipamento eletrônico no Brasil e que seja exportado para algum país da Comunidade Européia. Um modo de falha possível para este critério seria "Contém mercúrio" cuja legislação ambiental descumprida seria a RoHS[14].

O critério que prevê a avaliação de impactos ambientais e seus aspectos nos métodos de ecodesign é um elemento importante para o QFD pois permite correlacionar estes impactos com a qualidade exigida pelos *stakeholders*. Porém, observa-se que estes métodos de ecodesign baseados no QFD tratam muitas vezes de apenas atribuir pesos, de forma subjetiva, para as relações ambientais identificadas, sem de fato avaliar os impactos ambientais.

Uma técnica precisa e utilizada na avaliação de impactos ambientais potenciais no ciclo de vida do produto é a ACV. Todas as entradas e saídas do sistema de produto (Inventário do Ciclo de Vida) são analisadas através de categorias de impactos ambientais. Um exemplo de categorias de impactos ambientais pode ser encontrado no EDIP (*Environmental Development of Industrial Products*) (THRANE; SCHMIDT, 2004), tais como "Aquecimento Global", "Destruição da Camada de Ozônio", "Formação de Ozônio Fotoquímico", "Acidificação", "Enriquecimento Nutricional", "Eco-Toxidade", "Toxidade Humana", "Resíduos Sólidos" e "Consumo de Recursos Naturais".

No caso específico do QFD, estas categorias de impacto podem ser consideradas como requisitos técnicos (característica da qualidade) que permitem ser correlacionadas com a qualidade exigida. Com relação à atribuição dos pesos, os resultados normalizados da ACV permitem identificar com maior exatidão aqueles impactos ambientais mais importantes, diferentemente do caso onde atribuição de pesos seja realizada de maneira

[14] Diretiva européia que proíbe o uso de certas substâncias perigosas nos produtos.

qualitativa. Estes resultados da ACV, depois de normalizados, poderiam ser ponderados pelas equipes de desenvolvimento das empresas.

Da mesma forma verificada no QFD, a avaliação de impactos ambientais nos métodos baseados em FMEA devem ser medidas de forma objetiva e quantitativa por uma técnica que meça estes impactos, como a ACV. A identificação dos impactos ambientais, a exemplo dos QFDs de Ecodesign, pode ser realizada através das categorias de impacto encontradas no EDIP.

Com relação aos requisitos operacionais, foram sugeridas as seguintes propostas de melhoria para futuros trabalhos:

Com relação à facilidade de uso, para que o método QFD de ecodesign seja considerado de fácil utilização, considerando as características do método tradicional, deve-se apresentar de forma detalhada os processos de elaboração da casa da qualidade, seus desdobramentos e explicação das expressões matemáticas para cálculo dos itens que compõem as matrizes.

A utilização de modelos matemáticos mais complexos, que envolvam linguagem científica e que não fazem parte do cotidiano das equipes de desenvolvimento de produto podem oferecer resistência a adoção destes métodos. No caso, deve-se evitar a utilização destes modelos matemáticos, como a lógica *fuzzy* apresentada no Eco-QFD de Kuo et al. (2009) para o cálculo do nível de importância atribuído pela VoC.

Observa-se que as dificuldades apontadas por Carnevalli, Miguel e Calarge (2008) e Cheng e Melo Filho (2007) quanto a utilização do QFD tradicional também devem compor o critério “Facilidade de uso”, como por exemplo se evitar trabalhar com matrizes grandes e com muitos itens da qualidade exigida e das características da qualidade.

No caso de uma adaptação para uso no desenvolvimento de produtos com características ambientais, as mesmas recomendações feitas para o QFD podem ser

aplicadas ao FMEA. Em outras palavras, os métodos ambientais de FMEA não devem apresentar uso de linguagem científica complexa, além de ter os procedimentos de aplicação e expressões matemáticas devidamente detalhadas e explicadas, assim como foi estabelecido para os métodos de QFD ambientais.

Para o requisito operacional custo, os métodos de ecodesign baseados em QFD que façam uso de *softwares*, como o caso do Environmental QFD de Kato e Kimura (2003) e a Teoria da Quantificação do Tipo IV para análise dos resultados podem apresentar custos para a empresa devido a necessidade de aquisição destes *softwares*, além da necessidade de se investir recursos financeiros para consultoria e treinamento de funcionários para sua utilização. Deste modo, sugere-se que métodos ambientais de QFD e FMEA evitem fazer uso de *softwares* que envolvam custos para empresa e outras metodologias científicas de não conhecimento dos *designers* que exijam gastos com treinamento ou contratação de especialistas.

Este requisito operacional, juntamente com o requisito tempo, está associado a "Facilidade de uso", pois os métodos que exigem conhecimento matemático mais complexo ou que não apresentam de forma detalhada as atividades de aplicação tendem ser mais custosos por necessitar de treinamento/especialistas, além de demandar mais tempo para aplicação. Ainda, com relação ao tempo de aplicação, recomenda-se que os métodos de QFD e FMEA para ecodesign evitem apresentar um número de etapas superior a suas versões tradicionais de modo a não tornar a aplicação mais demorada, podendo inclusive comprometer o requisito de custo em razão do número de horas trabalhadas pela equipe de desenvolvimento durante a aplicação do método.

Outra sugestão é que os métodos sejam sempre validados através de aplicações reais no desenvolvimento de produtos, aumentando as garantias de sucesso quando

aplicados pela equipe de *designers*, já que pode-se observar que em alguns casos eram apenas apresentados os métodos através de um *framework* ou exemplos ilustrativos.

Os métodos também devem apresentar quais suas vantagens e benefícios diante outros métodos, além dos principais resultados obtidos por meio de sua aplicação. Este requisito operacional facilita a seleção dos métodos pelos *designers* para diferentes situações.

Por fim, o requisito para análise de *trade-offs* deve ser considerado para os métodos de QFD e FMEA ambientais. Para o primeiro caso sugere-se que sejam identificadas relações e conflitos entre os itens da qualidade exigida além do tradicional teto da casa da qualidade do QFD a fim de identificar *trade-offs* entre os requisitos da VoC, já que uma determinada exigência pode interferir na outra, seja de forma positiva ou negativa, principalmente entre a VoC ambiental e a VoC tradicional. Para os métodos de FMEA, sugere-se que a análise de *trade-offs* seja feita entre as ações de melhoria, pois a proposta de uma pode interferir na outra.

Como contribuição, esta dissertação pode auxiliar na de outros métodos de ecodesign, além de subsidiar o desenvolvimento de um novo método de ecodesign que contemple as exigências ambientais e operacionais aqui apresentadas, podendo-se basear em algumas das sugestões apresentadas para o caso dos métodos de ecodesign baseados em QFD e FMEA.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14041**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Definição do objetivo e escopo e análise de inventário. Rio de Janeiro, 2001.

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. **Introdução ao desdobramento da qualidade**. Vol. 1. Belo Horizonte, MG: Fundação Christiano Ottoni, 1996, 187p.

AKAO, Y. **Quality function deployment: Integrating customer requirements into product design**. Cambridge: Productivity Press, 1990.

BAKKER, C. **Environmental information for industrial designers**. Delft, Holanda. Originalmente apresentada como tese de doutorado, Delft University of Technology, 1995.

BAUMANN, H., BOONS, F., BRAGD, A. Mapping the green product development field: engineering, policy and business perspectives. **Journal of Cleaner Production**, v. 10, 409 – 425, 2002.

BHANDER, G.S., HAUSCHILD, M., MCALOONE, T. Implementing Life Cycle Assessment in Product Development. **Environmental Progress**, v. 22, n. 4, dez. 2003.

BIOLCHINI, J., MIAN, P. G., NATALI, A. C. C., TRAVASSOS, G. H. Systematic Review in Software Engineering. Rio de Janeiro: COPPE / UFRJ; 2005, 30p. Technical report RT - ES 679/05.

BOKS, C. The soft side of Ecodesign. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, 1346 – 1356, 2006.

BOKS, C., PASCUAL, O. The Role of Success Factors and Obstacles in Design for Environment: A Survey among Asian Electronic Companies. **IEEE**, 2004.

BOONKANIT, P., APIKAJORNSIN, A. The Methodology for Selecting Product at Conceptual Design. **IEEE**, 2005.

BOVEA, M.D., WANG, B. Redesign Methodology for Developing Environmentally Conscious Products. **International Journal of Production Research**, v. 45, 4057 – 4072, set 2007.

BYGGETH, S., BROMAN, G., ROBÈRT, K-H. A method for sustainable product development based on a modular system of guiding questions. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, 1 – 11, 2007.

BYGGETH, S., HOCHSCHORNER, E. Handling trade-offs in Ecodesign tools for sustainable product development and procurement. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, p. 1420 – 1430, 2006

CAGNO, E., TRUCCO, P. Integrated green and quality function deployment. **International Journal of Product Lifecycle Management**, v. 2, n. 1, 2007.

CAPES. Disponível em: <http://qualis.capes.gov.br/webqualis/ConsultaPeriodicos. faces>. Acesso em: 03 set. 2009.

CARNEVALLI, J. A., MIGUEL, P. A. C., CALARGE, F. A**.** Proposta de um modelo conceitual para minimizar as dificuldades no uso do QFD. **Produção**, São Paulo, v. 18, p. 126 – 141, 2008.

CERVANTES, B. M. N. **A construção de tesauros com a integração de procedimentos terminográficos**. Marília, SP. Apresentada originalmente como tese de doutorado, UNESP, 2009.

CHENG, L.C., MELO FILHO, L.R. **QFD - Desdobramento da função qualidade na gestão de desenvolvimento de produtos**. São Paulo: Blucher, 2007. 539 p.

DE ASSUNÇÃO, J. V. **Controle Ambiental do Ar**. In: JR. PHILIPPI, A.; ROMÉRO, M. A.; BRUNA, G. C. Curso de Gestão Ambiental. São Paulo: Manole, 2004. p. 101 – 154.

DE JESUS, J. B. M. Tesauro: Um instrumento de representação do conhecimento em sistemas de recuperação da informação. Recife. In: XII Seminário Nacional de Bibliotecas Universitárias, 2002.

ERNZER, M., BIRKHOFER, H. **How to carry out lifecycle design? Methodical support for product developers.**

ERNZER, M., MATTHEI, C., BIRKHOFER, H. EI2QFD - an Integrated QFD Approach or From the Results of Eco-indicator 99 to Quality Function Deployment. Tokyo, Japão In: PROCEEDINGS OF ECODESIGN 2003: THIRD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTALLY CONSCIOUS DESIGN AND INVERSE MANUFACTURING, 2003.

ERNZER, M., OBERENDER, C., BIRKHOFER, H. **Methods to support Ecodesign in the product development process**.

FARGNOLI, M. An Integrated Approach for the Development and Management of Environmentally Conscious Products. **IEEE**, 2005.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Editora Atlas, 1999.

GRIESE, H., STOBBE, L., REICHL, H., STEVELS, A. Eco-Design and Beyond - Key Requirements for a Global Sustainable Development. **IEEE**, 2005.

HANDFIELD, R.B., MELNYK, S.A., CALANTONE, R.J., CURKOVIC, S. Integrating Environmental Concerns into the Design Process: The Gap between Theory and Practice. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 48, n. 2, maio 2001.

HAUSCHILD, M.Z., JESWIET, J., ALTING, L. Design for Environment - Do We Get the Focus Right? In: **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v.53, 1 – 4, 2004.

HAUSCHILD, M.Z., JESWIET, J., ALTING, L. From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives. In: **Annals of the CIRP 54/2**, 2005.

HOCHMAN, S., O'CONNELL, P. Quality Function Deployment: Using the Customer to Outperform the Competition on Environmental Design. **IEEE**, 1993.

JESWIET, J., DUFLOU, J., DEWULF, W., LUTTROP, C., HAUSCHILD, M. A Curriculum for Life Cycle Engineering Design for the Environment. Ontario, Canadá. In: **1st Annual CDIO Conference**, 2005.

JESWIET, J., HAUSCHILD, M. Ecodesign and future environmental impacts. **Materials & Design**, v. 26, 629 – 634, 2004.

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.

JOHANSSON, G., MAGNUSSON, T. Organising for environmental considerations in complex product development projects: implications from introducing a "Green" sub-project. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, 1368 – 1376, 2006.

KARLSSON, R., LUTTROPP, C. Ecodesign: what's happening? An overview of the subject area of Ecodesign and of the papers in this special issue**. Journal of Cleaner Production**, 1 – 8, 2006.

KATO, S., KIMURA, F. Systematization of Product Life Cycle Technology Utilizing the QFD Method. Tokyo, Japão In: PROCEEDINGS OF ECODESIGN 2003: THIRD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTALLY CONSCIOUS DESIGN AND INVERSE MANUFACTURING, 2003.

KNIGHT, P., JENKINS, J.O. Adopting and applying eco-design techniques: a practitioners perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, p. 549 – 558, 2009.

KUO, T-C. Green Product Development in Quality Function Deployment by Using Fuzzy Logic Analysis. **IEEE**, 2003.

KUO, T-C., WU, H-H. Fuzzy Eco-Design Product Development by Using Quality Function Deployment. **IEEE**, 2005.

KUO, T-C., WU, H-H., SHIEH, J-I. Integrating of environmental considerations in quality function deployment by using fuzzy logic. **Expert Systems with Applications**, v. 36, 7148 – 7156, 2009.

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

LINDAHL, M. Designers Utilization of and Requirements on Design for Environment (DfE) Methods and Tools. **IEEE**, 2005.

LINDAHL, M. E-FMEA - A new Promising Tool for Efficient Design for Environment. In: **Proceedings of the 1st International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing**, 1999.

LINDAHL, M. Engineering designers experience of design for environment methods and tools - Requirement definitions from an interview study. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, 487 -496, 2006.

LINDAHL, M. Environmental Effect Analysis - How does the method stand in relation to lessons learned from the use of other Design for Environment Methods. **IEEE**, 2001.

LINDAHL, M. **Environmental Effect Analysis (EEA) - an Approach to Design for Environment.** Originalmente apresentada como tese de doutorado. Royal Institute of Technology, Stockholm, 2000.

LOFTHOUSE, V. Designing for Designers - Ecodesign Tools to Inform and Inspire. **IEEE**, 2003.

LOFTHOUSE, V. Ecodesign tools for designers: defining the requirements. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, p. 1386 – 1395, 2006.

MANZINI, E., VEZZOLI, C. O **Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis - Os requisitos ambientais dos produtos industriais**. São Paulo: Edusp, 2002. 367 p.

MASUI, K. Environmentally Conscious Design Support Tool in Early Stage of Product Development - Quality Function Deployment (QFD) for Environment: QFDE. **JEMAI ECP Newsletter**, n. 20.

MASUI, K., SAKAO, T., INABA, A. Quality Function Deployment for Environment: QFDE (1st Report) - A Methodology in Early Stage of DfE. **IEEE**, 2001.

MASUI, K., SAKAO, T., KOBAYASHI, M., INABA, A. Applying Quality Function Deployment to environmentally conscious design. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 20, n. 1, 90 – 106, 2003.

MASUI, K., SAKAO, T., KOBAYASHI, M., INABA, A. **Quality Function Deployment for Environment (QFDE) To Spread DFE on the Whole Company**.

MAXWELL, D., VAN DER VORST, R. Developing sustainable products and services. **Journal of Cleaner Production**, v. 11, 883 – 895, 2002.

MIGUEL, P. A. C. **Implementação do QFD para o Desenvolvimento de Novos Produtos.** São Paulo. Editora Atlas, 2008. 166 p.

MULDER, K. **Sustainable Development for Engineers - A Handbook and Resource Guide**. United Kingdom: Greenleaf Publishing Ltd, 2002. 288 p.

NEAL, T.L., HEINTZ, M. A system for integrating Design for Environment (DfE) Criteria into the new product introduction process. **IEEE**, 2001.

PALADY, P. **FMEA: Análise dos Modos de Falha e Efeitos. Prevendo e Prevenindo Problemas Antes que Ocorram**. São Paulo: Instituto IMAM, 1997. 270 p.

PIGOSSO, D.C.A. **Integração de métodos e ferramentas de Ecodesign ao processo de desenvolvimento de produtos**. São Carlos, SP. Originalmente apresentada como monografia de conclusão de curso em Engenharia Ambiental, EESC, 2008.

PIGOSSO, D. C. A., GUELERE FILHO, A. Proposta de Roteiros para a Sistematização do Uso de Métodos e Ferramentas do Ecodesign. In: IX ENGEMA - Encontro Nacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, Curitiba, 2007.

RAHIMI, M., WEIDNER, M. Integrating Design for Environment (DfE) Impact Matrix into Quality Function Deployment (QFD) Process. **The Journal of Sustainable Product Design**, v. 2, 29 – 41, 2002.

RITZÉN, S., LINDAHL, M. Selection and implementation - Key activities to successful use of Ecodesign tools. **IEEE**, 2001.

RIVERA-BECERRA, A., LIN, L. Measuring Environmental Consciousness in Product Design and Manufacturing. **Concurrent Engineering: Research and Applications**, v. 7, n. 2, jun. 1999.

ROUNDS, K.S., COOPER, J.S. Development of product design requirements using taxonomies of environmental issues. **Research in Engineering Design**, v. 13, 94 – 108, 2002.

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: Editora Saraiva, 2006. 542p.

SAKAO, T. A QFD-centred design methodology for environmentally conscious product design. **International Journal of Production Research**, v. 45, n. 18 -19, 4143 – 4162, set 2007.

SAKAO, T., KANEKO, K., MASUI, K., TSUBAKI, H. Combinatorial Usage of QFDE and LCA for Environmentally Conscious Design. **The Grammar of Technology Development**, 2005.

SAKAO, T., MASUI, K., KOBAYASHI, M., AIZAWA, S., INABA, A. Quality Function Deployment for Environment: QFDE (2nd Report) - Verifying the Applicability by Two Case Studies. **IEEE**, 2001.

SAKAO, T., MASUI, K., KOBAYASHI, M., INABA, A. **QFDE (Quality Function Deployment for Environment) and LCA: An effective combination of tools for DfE**.

SAKAO, T., WATANABE, K., SHIMOMURA, Y. A Method to Support Environmentally Conscious Service Design Using QFD. Tokyo, Japão In: PROCEEDINGS OF ECODESIGN 2003: THIRD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTALLY CONSCIOUS DESIGN AND INVERSE MANUFACTURING, 2003

SÁNCHEZ, L.E. **Avaliação de Impacto Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 495 p.

SCHVANEVELDT, S. J, Environmental performance of products: Benchmarks and tools for measuring improvement. **Benchmarking: An International Journal**, v. 10, n. 2, 137-152, 2003.

SHIH, L., LIU, B. Evaluating Eco-Design Projects with 3D-QFDE Method and Life Cycle Cost Estimation. **IEEE**, 2005.

SHIMOMURA, Y., WATANABE, K., ARAI, T., SAKAO, T., TOMIYAMA, T. A Proposal for Service Modeling. Tokyo, Japão In: PROCEEDINGS OF ECODESIGN 2003: THIRD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTALLY CONSCIOUS DESIGN AND INVERSE MANUFACTURING, 2003

SHU-YANG, F., FREEDMAN, B., COTE, R. Principles and practice of ecological design. **Environment Review**, v. 12, 97 – 112, 2004.

SILVA, E. L., MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. Florianópolis: UFSC, 2001.

SOUSA, I., WALLACE, D. Product classification to support approximate life-cycle assessment of design concepts. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 73, 228 – 249, 2006.

TALBOT, S. Ecodesign Practices in Industry: An Appraisal of Product Life Cycle Design Initiatives in SMEs. **IEEE**, 2005.

TINGSTRÖM, J. **Product Development with a Focus on Integration of Environmental Aspects**. Originalmente apresentada como tese de doutorado, 2007.

TINGSTRÖM, J., KARLSSON, R. The relationship between environmental analyses and the dialogue process in product development. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, 1409 – 1419, 2006.

TOLEDO, J. C., AMARAL, D. C. **FMEA – Análise do Tipo e Efeito de Falha**. São Carlos: GEPEQ, DEP – UFSCar, ca. 2000.

TOLEDO, J. C., SILVA, S. L. da, ALLIPRANDINI, D. H., MARTINS, M. F., FERRARI, F. M. Práticas de gestão no desenvolvimento de produtos em empresas de autopeças. **Produção**, v. 18, n. 2, 2008.

UNEP. **Cleaner Production: A Training Resource Package.** United Nations Publication, 1996.

UTNE, I.B. Improving the environmental performance of the fishing fleet by use of Quality Function Deployment (QFD). **Journal of Cleaner Production**, v. 17, 724 – 731, 2009.

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

VEZZOLI, C., SCIAMA, D. Life Cycle Design: from general methods to product type specific guidelines and checklists: a method adopted to develop a set of guidelines/checklist handbook for the eco-efficient design of NECTA vending machines. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, 1319 – 1325, 2006.

WAAGE, S.A. Re-considering product design: a practical "road-map" for integration of sustainability issues. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, 638 – 649, 2007.

WATANABE, M., TAKATA, S. Module-Based Model Change Planning in Consideration of Environmental Impact and Customer Satisfaction. **IEEE**, 2005.

WENZEL, H., HAUSCHILD, M., ALTING L. **Environmental Assessment of Products**. Bonton/Dordrecht/London; Kluwer Academic Publihers. V.1, 1997.

WOLNIAK, R.; SĘDEK, A. Using QFD method for the ecological designing of products and services. **Springer Science + Business Media B.V**, 2008.

WONG, K., JUNIPER, J. **Quality Function Deployment (QFD) and the Environment**, ca. 2000.

WRIGHT, J. T. C., GIOVINAZZO, R.A. Delphi - Uma Ferramenta de Apoio ao Planejamento Prospectivo. **Caderno de Pesquisas em Administração**. São Paulo: v. 01, nº 12, 2º trim./2000

YEN, S., CHEN, J.L. An Eco-Innovative Tool by Integrating FMEA and TRIZ methods. **IEEE**, 2005.

YIM, H., HERRMANN, C. Eco-Voice of Consumer (VOC) on QFD. Tokyo, Japão In: PROCEEDINGS OF ECODESIGN 2003: THIRD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTALLY CONSCIOUS DESIGN AND INVERSE MANUFACTURING, 2003

ZAMBRANO, T.F., MARTINS, M.F. Utilização do método FMEA para avaliação do risco ambiental. **Gestão e Produção**, v. 14, n. 2, 2007.

ZHANG, Y., WANG, H., ZHANG, C. Green QFD-II: a life cycle approach for environmentally conscious manufacturing by integrating LCA and LCC into QFD matrices. **International Journal of Production Research**, v. 37, n. 5, 1075 – 1091, 1999.

ZHOU, X., SCHOENUNG, J. M. Development of a Hybrid Environmental Impact Assessment Model: A Case Study on Computer Displays. **IEEE**, 2004.

APÊNDICE A - Classificação dos artigos na Revisão Sistemática

QFD e FMEA

Nome do Artigo	Autores	Ano	Periódico
A Method to Support Environmentally Conscious Service Design Using QFD	Sakao,T., Watanabe, K., Shimomura, Y.	2003	Proceedings of EcoDesign 2003
A QFD-centred design methodology for environmentally conscious product design	Sakao, T.	2007	International Journal of Production Research
An Eco-Innovative Tool by Integrating FMEA and TRIZ methods	Yen, S., Chen, J.L.	2005	IEEE
Applying Quality Function Deployment to environmentally conscious design	Masui, K., Sakao, T., Kobayashi, M., Inaba, A.	2003	International Journal of Quality & Reliability Managem
Combinatorial Usage of QFDE and LCA for Environmentally Conscious Design	Sakao, T., Kaneko, K., Masui, K., Tsubaki, H.	2005	The Grammar of Technology Development (Book)
Development of a Hybrid Environmental Impact Assessment Model: A Case Study on Comput	Zhou, X., Schoenung, J. M.	2004	IEEE
Eco-Voice of Consumer (VOC) on QFD	Yim, H., Herrmann, C.	2003	Proceedings of EcoDesign 2003
E-FMEA - A new Promising Tool for Efficient Design for Environment	Lindahl, M.	1999	Proceedings of the 1st International Symposium on En
EI2QFD - an Integrated QFD Approach or From the Results of Eco-indicator 99 to Quality Func	Ernzer, M., Matthei, C., Birkhofer, H.	2003	Proceedings of EcoDesign 2003
Environmental Effect Analysis - How does the method stand in relation to lessons learned fro	Lindahl, M.	2001	IEEE
Environmental Effect Analysis (EEA) - an Approach to Design for Environment	Lindahl, M.	2000	Royal Institute of Technology
Environmentally Conscious Design Support Tool in Early Stage of Product Development - Qual	Masui, K.		
Evaluating Eco-Design Projects with 3D-QFDE Method and Life Cycle Cost Estimation	Shih, L., Liu, B.	2005	IEEE
Fuzzy Eco-Design Product Development by Using Quality Function Deployment	Kuo, T-C., Wu, H-H.	2005	IEEE
Green Product Development in Quality Function Deployment by Using Fuzzy Logic Analysis	Kuo, T-C.	2003	IEEE
Green QFD-II: a life cycle approach for environmentally conscious manufacturing by integratin	Zhang, Y., Wang, H., Zhang, C.	1999	International Journal of Production Research
How to carry out lifecycle design? Methodical support for product developers	Ernzer, M., Birkhofer, H.		
Improving the environmental performance of the fishing fleet by use of Quality Function Dep	Utne, I.B.	2008	Journal of Cleaner Production
Integrated green and quality function deployment	Cagno, E., Trucco, P.	2007	International Journal of Product Lifecycle Managemen
Integrating Design for Environment (DfE) Impact Matrix into Quality Function Deployment (Q	Rahimi, M., Weidner, M.	2002	The Journal of Sustainable Product Design
Integrating of environmental considerations in quality function deployment by using fuzzy log	Kuo, T-C., Wu, H-H., Shieh, J-I.	2009	Expert Systems with Applications
Methods to support ecodesign in the product development process	Ernzer, M., Oberender, C., Birkhofer, H.		
Module-Based Model Change Planning in Consideration of Environmental Impact and Custom	Watanabe, M., Takata, S.	2005	IEEE
QFDE (Quality Function Deployment for Environment) and LCA: An effective combination of t	Sakao, T., Masui, K., Kobayashi, M., Inaba, A.		
Quality Function Deployment (QFD) and the Environment	Wong, K., Juniper, J.		

Quality Function Deployment for Environment (QFDE) To Spread DFE on the Whole Company	Masui, K., Sakao, T., Kobayashi, M., Inaba, A.		
Quality Function Deployment for Environment : QFDE (2nd Report) - Verifying the Applicabilit	Sakao, T., Masui, K., Kobayashi, M., Aizawa, S., Ina	2001	IEEE
Quality Function Deployment for Environment: QFDE (1st Report) - A Methodology in Early St	Masui, K., Sakao, T., Inaba, A.	2001	IEEE
Quality Function Deployment: Using the Customer to Outperform the Competition on Enviror	Hochman, S., O'Connell, P.	1993	IEEE
Redesign Methodology for Developing Environmentally Conscious Products	Bovea, M.D., Wang, B.	2007	International Journal of Production Research
Systematization of Product Life Cycle Technology Utilizing the QFD Method	Kato, S., Kimura, F.	2003	Proceedings of EcoDesign 2003
The Methodology for Selecting Product at Conceptual Design	Boonkanit, P., Apikajornsin, A.	2005	IEEE
Using QFD method for the ecological designing of products and services	Wolniak, R., Sędek, A.	2008	Springer Science + Business
Using quality function deployment for technique selection for optimum environmental perfor	Halog, A., Schultmann, F., Rentz, O.	2000	Journal of Cleaner Production
Utilização do método FMEA para avaliação do risco ambiental	Zambrano, T.F., Martins, M.F.	2007	Gestão e Produção

Critérios

Nome do Artigo	**Autores**	**Ano**	**Periódico**
A Framework to Encourage Step-Change Reduction in Environmental Impact in the Creation o	Low, M.K., Williams, D.J.	2001	IEEE
A method for sustainable product development based on a modular system of guiding questi	Byggeth, S., Broman, G., Robèrt, K-H.	2007	Journal of Cleaner Production
A system for integrating Design for Environment (DfE) Criteria into the new product introduct	Neal, T.L., Heintz, M.	2001	IEEE
Adopting and applying eco-design techniques: a practitioners perspective	Knight, P., Jenkins, J.O.	2009	Journal of Cleaner Production
An Integrated Approach for the Development and Management of Environmentally Conscious	Fargnoli, M.	2005	IEEE
Design for Environment - Do We Get the Focus Right?	Hauschild, M.Z., Jeswiet, J., Alting, L.		
Designers Utilization of and Requirements on Design for Environment (DfE) Methods and Too	Lindahl, M.	2005	IEEE
Designing for Designers - Ecodesign Tools to Inform and Inspire	Lofthouse, V.	2003	IEEE
Developing sustainable products and services	Maxwell, D., van der Vorst, R.	2002	Journal of Cleaner Production
Development of product design requirements using taxonomies of environmental issues	Rounds, K.S., Cooper, J.S.	2002	Research in Engineering Design
Eco-Design and Beyond - Key Requirements for a Global Sustainable Development	Griese, H., Stobbe, L., Reichl, H., Stevels, A.	2005	IEEE
EcoDesign and future environmental impacts	Jeswiet, J., Hauschild, M.	2004	Materials & Design
EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into	Luttropp, C., Lagerstedt, J.	2006	Journal of Cleaner Production
Ecodesign Practices in Industry: An Appraisal of Product Life Cycle Design Initiatives in SMEs	Talbot, S.	2005	IEEE
Ecodesign tools for designers: defining the requirements	Lofthouse, V.	2006	Journal of Cleaner Production
Ecodesign: what's happening? An overview of the subject area of Ecodesign and the papers in	Karlsson, R., Luttropp, C.	2006	Journal of Cleaner Production
Eco-indicators in product development	Persson, J-G.	2001	IMechE
Engineering designers experience of design for environment methods and tools - Requiremen	Lindahl, M.	2006	Journal of Cleaner Production

Environmental information for industrial designers	Bakker, C.	1995	Doctoral Thesis
From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives	Hauschild, M.Z., Jeswiet, J., Alting, L.	2005	Annals of the CIRP 54/2
Functional and environmental factors in early phases of product development - Eco Functiona	Lagerstedt, J.	2003	Doctoral Thesis
Handling trade-offs in Ecodesign tools for sustainable product development and procurement	Byggeth, S., Hochschorner, E.	2006	Journal of Cleaner Production
Integrating Environmental Concerns into the Design Process: The Gap between Theory and Pr	Handfield, R.B., Melnyk, S.A., Calantone, R.J., Curk	2001	IEEE
Life Cycle Design: from general methods to product type specific guidelines and checklists: a r	Vezzoli, C., Sciama, D.	2006	Journal of Cleaner Production
Measuring Environmental Consciousness in Product Design and Manufacturing	Rivera-Becerra, A., Lin, L.	1999	Concurrent Engineering: Research and Applications
Organising for environmental considerations in complex product development projects: impli	Johansson, G., Magnusson, T.	2006	Journal of Cleaner Production
Principles and practice of ecological design	Shu-Yang, F., Freedman, B., Cote, R.	2004	Environment Review
Product classification to support approximate life-cycle assessment of design concepts	Sousa, I., Wallace, D.	2006	Technological Forecasting and Social Change
Product Development with a Focus on Integration of Environmental Aspects	Tingström, J.	2007	Doctoral Thesis
Re-considering product design: a practical "road-map" for integration of sustainability issues	Waage, S.A.	2007	Journal of Cleaner Production
Selecting environmental indicator for use in strategic environmental assessment	Donnelly, A., Jones, M., O'Mahony, T., Byrne, G.	2007	Environmental Impact Assessment Review
Selection and implementation - Key activities to successful use of EcoDesign tools	Ritzén, S., Lindahl, M.	2001	IEEE
Success factors for integration of ecodesign in product development: A review of state of the	Johansson, G.	2002	Environmental Management and Health
The relationship between environmental analyses and the dialogue process in product develo	Tingström, J., Karlsson, R.	2006	Journal of Cleaner Production
The Role of Success Factors and Obstacles in Design for Environment: A Survey among Asian E	Boks, C., Pascual, O.	2004	IEEE
The soft side of ecodesign	Boks, C.	2006	Journal of Cleaner Production

APÊNDICE B - Questionário

1. Classifique em ordem de prioridade (número 1 o mais importante, número *n* o menos importante) os critérios ambientais que os métodos de Ecodesign devem atender. Caso considere necessário outro(s) critério(s) ambiental(is), indique-o(s) antes de realizar a classificação.

( ) Fases do Ciclo de Vida do Produto

( ) Conformidade e Regulamentação

( ) Impactos Ambientais e Aspectos Ambientais

( ) _____

( ) _____

( ) _____

( ) _____

( ) _____

( ) _____

Comentários:

_____

_____

_____

_____

2. Classifique em ordem de prioridade os critérios operacionais que os métodos de Ecodesign devem atender. Caso considere necessário outro(s) critério(s) operacional(is), indique-o(s) antes de realizar a classificação.

( ) Facilidade de uso

( ) Custo

( ) Válido

( ) Tempo

( ) Visualização dos benefícios

( ) Análise de *trade-offs*

( ) _____

( ) _____

( ) _____

( ) _____

( ) _____

( ) _____

Comentários:

_____

_____

_____

_____

APÊNDICE C - Matriz comparativa entre os métodos de QFD ambientais

	Métodos de QFD ambientais			
	QFDE	Environmental QFD	QFD de Hochman e O'Connell	Eco-QFD de Ernzer e Birkhofer
Autor(es)	Masui, K. Sakao, T. Inaba, A.	Kato, S.; Kimura, F.	Hochman; O'Connell	Ernzer; Birkhofer
Ano	2001	2003	1993	sem data
Objetivo do método	O QFDE tem por objetivo identificar nas etapas iniciais do desenvolvimento do produto quais funções e componentes devem ser focados de modo a satisfazer o consumidor preocupado com as questões ambientais.	Apresentar um método de QFD que sistematiza requisitos ambientais com tecnológicos.	O objetivo deste método é promover a melhoria da qualidade e aumento da velocidade e eficiência-custo das iniciativas de Ecodesign.	Desdobrar as necessidades do mercado (voz do consumidor) em uma lista de requisitos de projeto que considere as questões ambientais do produto.
Diferenças fundamentais do método	Define 15 requisitos do consumidor sob o ponto de vista ambiental (VOC) e 15 métricas de engenharia ambientais (ME) que deverão ser utilizadas na matriz do QFDE.	Este método utiliza a Teoria da Quantificação do Tipo IV, técnica que permite plotar no plano e no espaço e analizar as tecnologias resultantes da matriz do Environmental QFD.	Requisitos ambientais dividem espaço na matriz do QFD com requisitos de produtos. A matriz proposta também permite a comparação do produto com o concorrente (planejamento da qualidade)	O método apresenta maior nível de detalhamento das características da qualidade.
Principais críticas para o QFD tradicional	Grande número de requisitos ambientais (15 VoCs ambientais) e de características ambientais da qualidade (15 Mês). VoCs ambientais e MEs já definidas pelo método. Não é prevista a inclusão de novos requisitos ambientais através da consulta aos clientes. Não é realizado o planejamento e projeto da qualidade.	Grande número de requisitos ambientais (27 para qualidade ambiental exigida e 40 para as características ambientais da qualidade). A Quantification Theory type IV pode levar a dificuldades de aplicação e geração de custos para a empresa. Foco somente na Casa da Qualidade. Meta para 5 e 10 anos pode não ser apropriada devido a mudanças nas exigências dos clientes.	Os requisitos ambientais poderiam ser obtidos diretamente da VoC, excluindo a necessidade de um QFD ambiental.	Qualidade Planejada e Qualidade Projetada não são consideradas. Focado apenas na matriz da qualidade. Não são descritas todas as atividades para a aplicação do método.
Validação	Aplicado em empresa (setor eletrônico)	Aplicado em empresa (setor automobilístico)	Não aplicado.	Aplicado no desenvolvimento de um protótipo.

GQFD	3D-QFDE	Eco-VOC	EI2QFD	Green QFD-II
Wong, K.; Juniper, J.	Shih, L-H.; Liu, B-S.	Yim, H.; Herrmann, C.	Ernzer, M.; Mattheiß, C.; Birkhofer, H.	Zhang, Y.; Wang, H-P.; Zhang, C.
sem data	2005	2003	2003	1999
Relacionar os "o que" dos requisitos ambientais e do consumidor com os "como", definidos pelos atributos de engenharia do produto.	Avaliar diferentes alternativas de produtos ao mesmo tempo sob 3 perspectivas: qualidade, meio ambiente e custo.	Auxiliar na identificação dos requisitos ambientais (Eco-Voice) para o QFDE proposto por Masui et al. (2001).	O objetivo do EI2QFD consiste em obter a voz do meio ambiente (VOE - *Voice of the Environment*) por meio dos resultados do *Eco-Indicator II*, método utilizado na Avaliação do Ciclo de Vida de produtos.	O objetivo deste método é integrar questões ambientais e de custo à matriz do QFD através da inclusão do *Life-Cycle Cost* (LCC) e da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).
Considera os *stakeholders* para a obtenção da VoC.	Permite o cálculo de requisitos de qualidade, ambiental e de custo para *n* alternativas de produto. Os resultados obtidos através destes cálculos são plotados em um gráfico de forma piramidal, auxiliando na visualização da melhor alternativa.	O método apresenta uma etapa de extração da voz do consumidor "ambiental" baseada em 3 passos. Além disso, os autores propõem uma versão simplificada do QFDE de Masui et al. (2001).	Procedimento de aplicação do QFD composto por duas casas ambientais. Ambas as casas apresentam como *inputs* para os requisitos do meio ambiente os resultados encontrados pelo Eco-Indicator 99.	Os requisitos técnicos de qualidade são oriundos da VOC, os ambientais da ACV e os de custo da LCC. A matriz contendo todos estes requisitos técnicos (chamada de "casa comparativa de conceitos") propõe correlacionar estes requisitos, tanto separadamente, como em conjunto.
Os autores apresentam apenas um *framework* de aplicação. Trata apenas da inclusão de requisitos ambientais ao QFD tradicional.	Muitos requisitos ambientais pois é baseado no QFDE. Foco somente na casa da qualidade, sem demais desdobramentos, diferentemente do QFDE. Não é realizado o planejamento e o projeto da qualidade. Alguns cálculos não são apresentados.	Extração da VoC focada somente nos dados primários (entrevistas com clientes). Qualidade planejada e projetada não fazem parte do QFDE simplificado. Não há demais desdobramentos do QFD.	O procedimento é composto da formação de diversas matrizes de QFD, tornando a aplicação mais demorada. O Eco-Indicator 99 também pode apresentar dificuldades de aplicação e necessidade de treinamento. Informações do Eco-Indicator 99 podem não representar a realidade de outros países por basear-se na Europa. Desdobramento somente até a fase componente, além de não apresentar qualidade planejada e projetada.	Necessita de conhecimento em ACV e LCC, requerendo treinamento e gastos financeiros. Casa da qualidade focada apenas nas relações existentes entre os requisitos dos clientes e do projeto. Não há planejamento e projeto da qualidade. Não há necessidade de segmentar o teto da casa comparativa de conceitos.
Não aplicado	Não aplicado	Não aplicado.	Não aplicado.	Não, somente exemplo.

IGQFD	QFDE/LCA/TRIZ	QFDE/LCA	QFD-DfE
Cagno, E.; Trucco, P.	Sakao, T.	Sakao, T.; Masui, K.; Kobayashi, M.; Inaba, A.	Rahimi, M.; Weidner, M.
2007	2007	2005	2002
A proposta dos autores é corrigir as limitações por eles encontradas no método Green QFD-II de Zhang et al. (1999)	Aplicar o QFDE de Masui et al. (2001) em conjunto com a ACV e a TRIZ, esta última auxiliando na identificação de melhores soluções de projeto.	O objetivo é aplicar de forma combinada o método QFDE e a ACV.	Os objetivo proposto pelos autores para este método consiste em relacionar requisitos de satisfação do consumidor e minimização do custo de uso/impactos ambientais com características de projeto em todas as fases de vida do produto.
Os autores dividem a matriz de relação do IGQFD em 4 blocos, permitindo a análise individual entre cada requisito (de qualidade e ambiental) com a função qualidade e com o objetivo ambiental. Não envolve a análise de custo, diferentemente do Green QFD-II.	Utiliza a ACV em conjunto com o QFDE. Inclui ainda a técnica TRIZ no suporte à solução de alternativas de projeto.	O método de QFDE é aplicado em associação com a técnica da ACV, permitindo o designer chegar a resultados quantitativos e objetivos sobre os impactos ambientais que podem ser gerados nas fases de vida do produto.	Apesar de considerar questões de ambientais e de custo além das tradicionais de qualidade como o Green QFD-II apresenta, o DfE-QFD não utiliza outras técnicas de suporte como a ACV e o LCC.
Exclusão dos requisitos ambientais relacionados à fase de uso. Não compara as características do produto em desenvolvimento com os concorrentes, portanto, também não há qualidade projetada. Não há desdobramentos do QFD.	Idem ao QFDE	Idem ao QFDE	VoC genérica. Qualidade planejada e projetada não são desenvolvidas no QFD-DfE. Não são realizados desdobramentos do QFD.
Aplicado no projeto de um filtro de óleo.	Não, somente um exemplo.	Aplicado na indústria eletrônica.	Não, somente exemplo.

QFD de Wolniak e Sędek	QFD based ob RSP	Eco QFD de Kuo et al.	Eco QFD de Utne
Wolniak, A.; Sędek, A.	Sakao, T.; Watanabe, K.; Shimomura, Y.	Kuo, T-C.; Wu, H-H.; Shieh, J-I.	Utne, I. B.
2008	2003	2009	2009
Segundo os próprios autores, este método de QFD busca relacionar informações ecológicas e técnicas de produtos e serviços, e identificar quais os parâmetros cruciais sob o ponto de vista ambiental	Conforme definido pelos autores, o objetivo deste método consiste em projetar serviços ambientalmente conscientes através do uso do QFD e do modelo de serviço RSP (*Receive State Parameter)*	O objetivo deste QFD é utilizar a lógica *fuzzy* como método de suporte na identificação e valoração do nível de importância dado pelo consumidor para cada requisito de projeto (ambiental ou não-ambiental)	Melhorar o desempenho ambiental de frotas pesqueiras e auxiliar as atividades de gerenciamento através de requisitos ambientais, de custo e de *stakeholders*.
O método basicamente consiste em uma versão do QFD tradicional, exceto pelos requisitos, que são exclusivamente ambientais, podendo ser aplicado a produtos e serviços.	Este método é apresentado na avaliação de alternativas de serviços.	Utilização da lógica *fuzzy* na identificação do nível de importância dado pelos consumidores para cada requisito.	Considera requisitos sociais, além dos econômicos e ambientais. Foi desenvolvido somente para análise de embarcações pesqueiras de diferentes tamanhos.
Trata-se apenas de uma matriz de correlação. A matriz analisa somente requisitos ambientais, desconsiderando-se os de qualidade. Os requisitos ambientais se apresentam de forma genérica, sem haver desdobramentos destes requisitos em mais níveis de detalhamento. Não há qualidade planejada/projetada e desdobramentos do QFD.	O cliente (usuário final) não tem participação na distribuição dos pesos. Somente relaciona os itens da qualidade exigida com as características da qualidade. Qualidade planejada e projetada não são desenvolvidas neste método. Não é realizado o desdobramento das características da qualidade.	A utilização da lógica *fuzzy* pode trazer dificuldades de aplicação pela equipe de desenvolvimento pelo uso de linguagem científica. O método apenas relaciona a qualidade exigida com as características da qualidade. Os pesos da VoC podem ser melhor definidos aumentando o número de consulta aos clientes. Não há qualidade planejada e projetada, nem demais desdobramentos do QFD.	Método focado somente na correlação entre os requisitos de sustentabilidade com os de projeto. Não há no método o projeto da qualidade e desdobramentos em componentes e processos.
Aplicado no projeto de uma cidade.	Aplicado no serviço de lavagem de roupas	Aplicado a um cartucho de impressão	Não, apenas exemplo.

APÊNDICE D – Matriz comparativa entre métodos de FMEA ambientais

	Métodos de FMEA ambientais	
	E-FMEA (EEA)	FMEA-TRIZ
Autor(es)	Lindahl, M.	Yen, S-B; Chen, J-L.
Ano	1999	2005
Objetivo do método	Permitir que melhorias ambientais possam ser realizadas nos produtos nas primeiras etapas do projeto, identificando e avaliando impactos ambientais potenciais nas fases do ciclo de vida.	Utilizar da já disseminação do FMEA nas empresas para também considerar questões ambientais, de segurança e de saúde ao projeto de desenvolvimento do produto.
Diferenças fundamentais do método	Define-se colunas para a identificação das fases do ciclo de vida do produto onde os impactos ambientais podem ocorrer. Acrescenta-se junto ao índice EPN (equivalente ao RPN do FMEA) um outro índice chamado de F, que indica a possibilidade de melhoria considerando-se esforços de tempo, custo e necessidades técnicas.	Considera a incorporação de uma TRIZ junto à tabela de FMEA para auxiliar o *designer* no processo de tomada de decisão.
Principais críticas para o FMEA tradicional	Problemas ambientais não estão associados a nenhum sistema, sub-sistema ou componente. Índices de Ocorrência e Detecção são negligenciados pelo E-FMEA. Os modos de falha ambientais poderiam ser considerados no FMEA tradicional, eliminando a necessidade de um método somente focado nas questões ambientais. Critério F atribuído subjetivamente.	Problemas ambientais não estão associados a nenhum sistema, sub-sistema ou componente. Índices de Ocorrência e Detecção são negligenciados pela integração FMEA-TRIZ.
Validação	Sim, com refrigeradores e freezers.	Não, apenas um exemplo.