

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Monique Sonogo

**MODULARIZAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE
PRODUTOS SUSTENTÁVEIS**

Porto Alegre
2018

Monique Sonogo

Modularização no Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção, na área de concentração em Sistemas da Qualidade.

Orientador: Márcia Elisa Soares Echeveste, Dr^a.
Coorientador: Cecília Gravina da Rocha, Dr^a.

Porto Alegre
2018

Monique Sonogo

Modularização no Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Márcia Elisa Soares Echeveste, Dr.

Orientador PPGEP/UFRGS

Prof. Cecília Gravina da Rocha, Dr.

Coorientador PPGEC/UFRGS

Prof. Flávio Sanson Fogliatto

Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professor Marcelo Nogueira Cortimiglia, Dr. (PPGEP/UFRGS)

Professor Diego de Castro Fettermann, Dr. (EPS/UFSC)

Professora Janaina Mascarenhas Hornos da Costa, Dr. (EESC/USP)

RESUMO

A estratégia de modularidade no desenvolvimento de produtos tem como propósito geração de variedade, economia de escala, redução do tempo de montagem e produção, flexibilidade na reutilização de componentes e facilidade de montagem e desmontagem. Recentemente, os benefícios relacionados à diminuição do impacto ambiental dos produtos tornaram a modularidade uma estratégia associada ao design sustentável, principalmente devido à capacidade para estender a vida útil do produto e facilitar a sua desmontagem para a recuperação de valor no final do ciclo de vida. Estudos realizados para demonstrar o efeito da modularidade em projetos sustentáveis são focados na arquitetura do produto, sem considerar o contexto de utilização dos produtos. Para contribuir com essa questão, o objetivo geral desta tese é analisar a realização dos benefícios da modularidade considerando sustentabilidade em todo o ciclo de vida do produto. Para atingir este objetivo, inicialmente foram identificados estudos publicados na literatura relacionando modularidade e design sustentável. Essa revisão possibilitou identificar quais os benefícios da modularidade visando sustentabilidade, e também lacunas de pesquisa, entre elas a influência dos usuários no ciclo de vida dos produtos e na realização desses benefícios. Na sequência, analisou-se o papel dos usuários e demais stakeholders na realização dos benefícios propiciados pela modularidade nas fases de uso e descarte de produtos eletrônicos, exemplificados pelo reparo e pela destinação dada aos produtos ao final do ciclo de vida. Como principal resultado, conclui-se que as mudanças projetadas na arquitetura do produto visando sustentabilidade são importantes, mas não garantem a sustentabilidade, sendo essencial planejar um sistema que possibilite e incentive a realização dos benefícios planejados no desenvolvimento do produto. Essa visão sistêmica de design sustentável contempla a adoção de modelos de negócio visando sustentabilidade em conjunto com uma arquitetura de produto modular; e a importância de conscientizar e incentivar os stakeholders críticos, principalmente os usuários, para que realizem os benefícios que a modularidade pode proporcionar ao longo do ciclo de vida dos produtos.

Palavras-chave: modularidade, design modular, design sustentável, desenvolvimento de produto

ABSTRACT

Modularity in product development can be aimed at the generation of variety, economy of scale, reduction of assembly and production times, flexibility in the reuse of components and ease of assembly and disassembly. Recently, the benefits associated with reducing the environmental impact of products have made modularity a strategy associated with sustainable design, mainly due to its ability to extend the product lifespan and facilitate disassembly for value recovery at the end of the life cycle. Studies to demonstrate the effect of modularity on sustainable projects are focused on product architecture, without considering the use context of the product. To contribute to this discussion, the general objective of this thesis is to analyze the realization of the benefits of modularity aiming for sustainability in the whole product life cycle. To reach this objective, we initially identified studies relating modularity and sustainable design in the literature. This review allowed to identify the benefits of modularity for sustainability, as well as research gaps, including the influence of users on the product life cycle and the fulfillment of these benefits. Next, we analyze the role of the users and other stakeholders in the fulfillment of the benefits offered by modularity in the phases of use and disposal of electronic products, exemplified by the repair and the destination given to products at the end of their life cycle. As a result, we conclude that changes in product architecture aiming for sustainability are important, but do not guarantee sustainability: a system that enables and encourages the realization of the benefits planned during product development needs to be designed. This systemic vision of sustainable design contemplates the adoption of business models aimed at sustainability in conjunction with a modular product architecture; and the importance of raising awareness and encouraging stakeholders, especially users, to realize the benefits that modularity can deliver throughout the product life cycle.

Keywords: modularity, modular design, sustainable design, product development

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Delineamento do estudo.....	16
Figure 2-1: Visão geral da revisão sistemática	23
Figure 2-2: Análise de referência cruzada nos estudos de modularização sustentável.....	27
Figure 2-3: Benefícios e limitações da modularidade em cada fase do ciclo de vida	32
Figure 3-1: Etapas da revisão.....	55
Figure 3-2: Barreiras e dificuldades e sua relação com o design e o modelo de negócios da empresa	62
Figure 3-3: O papel dos stakeholders na promoção do reparo.....	64
Figure 4-1: Procedimentos metodológicos	76
Figure 5-1: Diagrama de influência das ações dos stakeholders	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Categorias de temas por ano de publicação.....	25
Tabela 2-2: Benefícios da modularização para o design sustentável em cada fase do ciclo de vida.....	31
Tabela 3-1: Lista dos artigos analisado nesta revisão	56
Tabela 3-2: Motivações, barreiras e consequências do reparo na perspectiva do usuário.....	58
Tabela 3-3: Dificuldades na perspectiva dos centros de reparo.....	61
Tabela 3-4: Exemplos de iniciativas dos stakeholders para promover o reparo.....	65
Tabela 4-1: Publicações ao longo dos anos	76
Tabela 4-2: Definição das destinações dada ao produto eletrônico	77
Tabela 4-3: Destinações dadas aos produtos eletrônicos	79
Tabela 4-4: Destinações e sua relação com a recuperação de valor	84

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Tema	11
1.2 Justificativa do tema	13
1.3 Objetivos	13
1.4 Delineamento do estudo	14
1.5 Delimitações da pesquisa	16
1.6 Referências	17
2. O PAPEL DA MODULARIDADE NO DESIGN SUSTENTAVEL: UMA REVISÃO DA LITERATURA.....	20
2.1 Introdução.....	20
2.2 Método.....	22
2.3 Resultados	24
2.3.1 Categorias de temas comuns.....	24
2.3.1.1 Métodos de modularização sustentáveis.....	26
2.3.1.2 Life Cycle Assessment.....	27
2.3.1.3 Design for X - DfX.....	28
2.3.1.4 Revisões de Modularidade.....	28
2.3.1.5 Manufatura.....	29
2.3.1.6 Uso.....	29
2.3.1.7 Cadeia de suprimentos.....	30
2.3.2 Benefícios da Modularidade.....	30
2.4 Discussão	32
2.4.1 Produção.....	32
2.4.2 Uso.....	33
2.4.3 Descarte.....	35
2.4.4 Influência do usuário.....	35
2.5 Conclusões.....	37
Apêndice A: Lista dos artigos analisados nesta revisão (autores, palavras chave e contribuições).....	37
2.6 Referências.....	41
3. REPARO DE PRODUTOS ELETRÔNICOS: O PAPEL DOS STAKEHOLDERS NA REALIZAÇÃO DOS BENEFÍCIOS DA MODULARIDADE.....	50
3.1 Introdução.....	51
3.2 Referencial	52
3.3 Método.....	54
3.4 Resultados e Discussão.....	55
3.4.1 As práticas dos usuários.....	57
3.4.2 Dificuldades para os centros de reparos.....	61
3.4.3 Uma visão sistêmica para promover o reparo.....	63
3.5 Conclusões.....	67

3.6 Referências.....	67
4. MODULARIDADE E O FIM DA VIDA DE PRODUTOS ELETRONICOS: PRATICAS E INICIATIVAS PARA RECUPERAÇÃO DE VALOR.....	73
4.1 Introdução.....	73
4.2 Método.....	74
4.2.1 Revisão sistemática da literatura	75
4.2.2 Pesquisa de iniciativas na web.....	75
4.3 Resultados e Discussão.....	76
4.3.1 Destinação dada ao final da vida útil.....	77
4.3.1.1 Reuso.....	80
4.3.1.2 Armazenamento	81
4.3.1.3 Coleta formal	81
4.3.1.4 Coleta informal	82
4.3.1.5 Lixo doméstico.....	83
4.3.1.6 Destinações e a recuperação de valor	83
4.3.2 Sugestões e iniciativas.....	84
4.3.2.1 Educação	85
4.3.2.2 Incentivo à recuperação de valor	86
4.4 Conclusões.....	88
Apêndice B: Lista dos artigos analisados nesta revisão.....	89
4.5 Referências.....	90
5. CONCLUSÕES.....	96
5.1 Análise conclusiva	96
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	102
5.3 Referências.....	103

1. INTRODUÇÃO

A estratégia de modularidade, primeiramente mencionada na literatura na década de 1960 (STARR, 1965), busca desenvolver arquiteturas de produtos formadas por unidades fisicamente destacáveis que podem ser utilizadas em linhas de produtos diferentes ou em variações de um mesmo produto (NEPAL et al., 2005). Apesar da simplicidade do conceito, cuja utilização remonta mais de 5000 anos (KONG et al., 2009), não existe uma definição universalmente aceita para o conceito de módulo (Gershenson et al., 2004), fazendo com que esta estratégia não pertença a uma área específica do conhecimento (STARR, 2010).

Na área de desenvolvimento de produtos, as principais características atribuídas à modularidade são: independência estrutural, independência funcional, minimização de interfaces e interações com outros módulos ou influências externas (STEWART; YAN, 2008). As interfaces são as superfícies de contato entre os módulos e, pela sua padronização, o design modular permite a combinação de diferentes módulos para a criação de produtos e/ou famílias de produtos.

Essas características fazem da modularidade uma estratégia chave para a Customização em Massa (PINE, 1993), fazendo da capacidade de criar variedade um dos mais importantes motivos para modularizar produtos. Através da modularização de produtos é possível atingir a flexibilidade necessária para a customização (DURAY, 2002), bem como superar a complexidade que a possibilidade de variedade traz para a manufatura (KUDERER, 2006).

A modularidade também pode trazer outros benefícios para o desenvolvimento de produtos, além da geração de variedade. Através dela é possível dividir tarefas, economizando custos e tempo (PIMMLER; EPPINGER, 1994), atingir economia de escala, economia de custos com estoque e logística, flexibilidade na reutilização de componentes, redução do tempo de montagem e do tempo de produção, e fabricação de módulos em paralelo (JOSE; TOLLENAERE, 2005). Além disso, a modularização também pode facilitar reparos, manutenção e upgrades, aumentando a vida útil dos produtos (SOARES; OKIMOTO, 2009), além de atuar também no fim de vida dos produtos, facilitando processos de reuso, reciclagem e remanufatura (GU; SOSALE, 1999; JOSE; TOLLENAERE, 2005; TSENG et al., 2008).

Algumas desvantagens relacionadas ao design modular são: alto investimento inicial e o aumento da complexidade de desenvolvimento (MODULAR DESIGN PLAYBOOK, 2010). A reutilização de módulos entre famílias de produtos pode aumentar a similaridade e reduzir a flexibilidade de desenvolvimento (GERSHENSON et al., 1999), resultando em falta de foco no cliente por conta da utilização de módulos já existentes em detrimento da criação de novos (MODULAR DESIGN PLAYBOOK, 2010).

Os riscos com relação a propriedade intelectual também são relacionados a esta estratégia, pois a arquitetura modular facilita a imitação (GERSHENSON et al., 2003; MODULAR DESIGN PLAYBOOK, 2010). A falta de otimização da arquitetura modular pode prejudicar a estética do produto (PANDREMENOS et al., 2012) aumentar o número de erros de montagem (ALGEDDAWY; ELMARAGHY, 2013), e influenciar o desempenho global do produto (MEYER; LEHNERD, 1997).

Para auxiliar no desenvolvimento de produtos modulares, métodos de modularização são propostos na literatura para conduzir o processo de divisão dos módulos e seleção dos conceitos. Segundo Holmqvist e Persson (2003), a forma como a divisão em módulos é realizada afeta significativamente os benefícios que as empresas podem obter com a modularização. Estes métodos apresentam diferentes ferramentas e manipulações, assim como diferentes objetivos. Entre os mais citados na literatura encontram-se o *Design Structure Matrix* (PIMMLER; EPPINGER, 1994), *Modular Function Deployment* (ERIXON, 1998), *Axiomatic Design* (SUH, 1990), e *Heuristic Design* (STONE et al., 2000).

1.1 Tema

Recentemente, o uso da modularidade com vista a sustentabilidade tem sido explorado na literatura, como uma consequência da importância dos assuntos relacionados ao impacto ambiental dos produtos (MA; KREMER, 2016). Isso porque é na fase de concepção de um produto que são determinadas as suas características, e o impacto ambiental do produto pode ser reduzido significativamente se as decisões relacionadas aos fatores ambientais forem tomadas ainda nesta fase (QIAN; ZHANG, 2009).

Devido ao fato de que estruturas modulares podem influenciar o ciclo de vida de um produto, a estratégia de modularização de produtos é parte integrante de abordagens como o Ecodesign (NEWCOMB et al., 1998; ZETL et al., 2006; TSENG et al., 2008; UMEDA et al., 2008; SMITH; YEN, 2010). O ciclo de vida de um produto abrange uma série de questões, incluindo a concepção, fabricação, montagem, testes, transporte, distribuição, uso, serviços, reutilização (GU; SOSALE, 1999). Com a modularização é possível atrelar diferentes objetivos estratégicos para o ciclo de vida do produto a diferentes módulos (BONVOISIN et al., 2016).

Apesar do aumento das publicações realizadas nesta área, ainda existem lacunas e possibilidades para a pesquisa. A literatura de modularidade para sustentabilidade ainda apresenta um foco no fim da vida dos produtos, atrelando a estratégia de modularidade à desmontagem para reciclagem, reuso e remanufatura (LI et al., 2008). Poucas pesquisas lidam com seus aspectos positivos e negativos em todo o ciclo de vida dos produtos e, igualmente, poucas pesquisas

apresentam evidências concretas dos benefícios derivados da modularização (BONVOISIN et al., 2016; PIRAN et al., 2016). Uma visão mais abrangente, considerando todo o ciclo de vida, não somente pode indicar a melhor forma de utilizar a modularização, como também pode indicar outras peças chave envolvidas na determinação do impacto ambiental dos produtos e que precisam ser consideradas.

Uma dessas peças é o usuário, que é responsável pela concretização de muitos dos benefícios possibilitados pela modularização e, por isso, co-criador do valor sustentável dos produtos modulares. O comportamento do consumidor é crítico para determinar o impacto ambiental de um produto (OBERENDER; BIRKHOFFER, 2003; BHAMRA et al., 2008; LOCKTON et al., 2008; LILLEY, 2009), principalmente devido a sua influência sobre a fase de uso e descarte dos produtos. As decisões e hábitos dos usuários tem um efeito significativo nos recursos utilizados pelos produtos (LOCKTON et al., 2008; DOMINGO et al., 2013), e também no sucesso de estratégias que buscam por maior durabilidade dos produtos e recuperação de valor pós descarte (MAYERS, 2001). O descarte prematuro dos produtos tornou-se um hábito comum das sociedades modernas, e o comportamento de descartar os produtos antes que quebrem contribui para o esgotamento de recursos, emissão de gases e geração de resíduos (COX et al., 2013). Por isso, além das mudanças na arquitetura do produto, considerar as práticas do usuário e sua influência no ciclo de vida é importante para a diminuição do impacto ambiental gerado pelos produtos.

De acordo com Mont e Plepys (2008), usuários são importantes *stakeholders* para a sustentabilidade, mas o seu comportamento é influenciado por contextos institucionais, infraestruturas existentes e fatores sociais, bem como limitado pela tecnologia, pelo mercado e por seus próprios conhecimentos. Portanto, é preciso considerar as iniciativas dos demais stakeholders críticos ao longo do ciclo de vida do produto ou serviço que possibilitem e incentivem o usuário a tomar atitudes mais conscientes. Especificamente, envolver governos, empresas e organizações não governamentais (MONT; PLEPYS, 2008) na criação de um sistema que possibilite e promova a realização dos benefícios que estratégias como a modularidade trazem para o design do produto.

A modularidade pode trazer diferentes benefícios para o ciclo de vida do produto visando sustentabilidade. Neste processo, o entendimento das práticas dos usuários pode auxiliar as equipes de desenvolvimento a direcionar o uso da estratégia de forma mais eficaz. Adicionalmente, a análise do ciclo de vida do produto pressupõe a adoção de modelos de negócio visando sustentabilidade, e apontando iniciativas que devem ser tomadas em conjunto com as mudanças na arquitetura do produto para se atingir um desempenho mais sustentável. Essa perspectiva é condizente com as mais recentes pesquisas de inovação para a sustentabilidade (ADAMS et al.,

2016), na qual as empresas transcendem o foco na tecnologia, e passam a buscar por soluções sustentáveis de forma integrada.

1.2 Justificativa do tema

O uso de equipamentos eletrônicos tem crescido fortemente nas últimas décadas, resultando em um aumento considerável na quantidade de equipamentos descartados (WIDMER et al, 2005). Os avanços tecnológicos fazem com que os consumidores busquem por equipamentos mais modernos, diminuindo a vida útil desses equipamentos, promovendo a obsolescência e gerando toneladas de *e-waste*, o lixo eletrônico (BABBITT et al., 2009; SABBAGHI et al., 2015). O lixo eletrônico é hoje a categoria de resíduos que mais cresce em países desenvolvidos, sendo que, na realidade, é formado de produtos reutilizáveis, recicláveis e remanufaturáveis (SABBAGHI et al., 2015).

Atlason et al. (2017) defendem que, para estender a circulação de recursos promovendo sustentabilidade, é preciso a cooperação de todos os *stakeholders* envolvidos no ciclo de vida do produto. Essa cooperação complementa o uso de estratégias como a modularidade, que são essenciais, mas não garantem o comprometimento dos usuários com um final de vida com menor impacto ambiental para os produtos. Portanto, é preciso alinhar o uso de estratégias como a modularidade com esta perspectiva que considera *stakeholders* e o ciclo de vida do produto, contribuindo para uma visão mais sistêmica de sustentabilidade.

A contribuição teórica do trabalho concentra-se na discussão da modularidade de forma mais abrangente, não considerando somente a mudança na arquitetura do produto, mas também a possível realização destes benefícios de acordo com as atuais práticas dos usuários e das possibilidades ofertadas a eles pelas empresas. Como contribuição prática apresenta-se um panorama atual das práticas dos usuários com relação ao fim de vida dos produtos eletrônicos, o levantamento de problemas relacionados a esta questão, bem como exemplos de iniciativas para lidar com estes problemas.

1.3 Objetivos

O objetivo geral desta tese é analisar a realização dos benefícios da modularidade visando sustentabilidade no ciclo de vida dos produtos.

Os objetivos específicos deste trabalho serão desenvolvidos em cada um dos três capítulos que constituem o desenvolvimento desta tese:

- Identificar temas comuns e relacionar os benefícios da modularidade visando sustentabilidade em todo o ciclo de vida dos produtos

- Identificar as atuais práticas dos usuários relativas ao reparo de produtos eletrônicos, bem como identificar iniciativas dos demais stakeholders para promover ações de reparo.

- Identificar as destinações mais comuns dadas aos produtos eletrônicos ao final da vida útil e relacioná-las com a recuperação de valor propiciada pela modularidade.

1.4 Delineamento do estudo

Quanto a natureza de pesquisa, este trabalho caracteriza-se como pesquisa aplicada, pois busca gerar conhecimentos aplicados a área de desenvolvimento de produtos. Com relação à abordagem, esta pesquisa emprega abordagem qualitativa. Sobre os objetivos, a pesquisa é de caráter exploratório, proporcionando maior familiaridade com o problema e possibilitando a consideração de diferentes aspectos relativos ao estudo (GIL, 2007). Com relação aos procedimentos, utiliza-se de pesquisa bibliográfica.

Esta tese está estruturada em 3 capítulos de desenvolvimento, além de um capítulo introdutório e um capítulo de conclusões. As etapas abordadas em cada capítulo são: (i) revisão da literatura sobre modularidade no desenvolvimento de produtos sustentáveis, (ii) análise dos benefícios propiciados pela modularidade visando sustentabilidade na fase de uso, (iii) análise dos benefícios propiciados pela modularidade visando sustentabilidade na fase de descarte. Na sequência estas etapas passam a ser descritas detalhadamente.

O capítulo 1 é um capítulo introdutório que apresenta o contexto do trabalho, baseado na necessidade de um desenvolvimento mais sustentável e no redesenho das atuais práticas industriais. Apresenta também o tema e sua justificativa, objetivos, métodos e estrutura do trabalho.

O capítulo 2 apresenta o primeiro capítulo que compõe o desenvolvimento desta tese, intitulado “*O papel da modularidade no design sustentável: uma revisão da literatura*”. Este artigo consiste de uma revisão de literatura em duas etapas envolvendo os temas modularidade e design sustentável sob a perspectiva do ciclo de vida do produto. Por meio desta revisão, foi possível identificar temas comuns (apresentados no artigo como categorias de assuntos) e relacionar os benefícios da modularidade para o design sustentável em todo o ciclo de vida dos produtos. Com o panorama propiciado pela revisão de literatura, pode-se perceber algumas lacunas de pesquisa, entre elas o papel do usuário na criação do valor sustentável dos produtos modulares, e a deficiência de estudos nas fases de uso e descarte dos produtos.

A identificação das lacunas de pesquisa direcionou os capítulos seguintes do trabalho. Decidiu-se, portanto, focar no usuário e seu papel de co-criador do valor sustentável dos produtos, e no papel dos demais *stakeholders* em prover aos usuários a possibilidade de concretização dos

benefícios que são planejados no design do produto. Desta forma, foram consideradas as fases de uso e descarte, pois são as fases em que o usuário exerce a maior influência no ciclo de vida do produto.

O capítulo 3 apresenta a continuidade desta pesquisa, trabalhada no segundo capítulo, intitulado “*Reparo de produtos eletrônicos: papel dos stakeholders na realização dos benefícios da modularidade*”. Este artigo visa preencher a lacuna de conhecimento apresentada no artigo 1 com relação à concretização dos benefícios da modularidade na fase de uso dos produtos. O reparo foi escolhido para representar a fase de uso, pois entre os benefícios da modularidade nesta fase do ciclo de vida, o reparo é o benefício com que os usuários têm maior familiaridade por ser uma prática difundida. Este artigo consiste de uma revisão de surveys e iniciativas no intuito de analisar as atuais práticas com relação ao reparo de produtos eletrônicos. Como resultado, discute-se a importância da adoção de modelos de negócio visando sustentabilidade em conjunto com a arquitetura modular, de forma a possibilitar aos usuários a realização dos benefícios. O artigo também apresenta um panorama de iniciativas de outros stakeholders que podem ser adotadas em conjunto com a modularidade para incentivar os usuários a buscarem o reparo.

O capítulo 4 apresenta o capítulo de desenvolvimento final desta tese, no qual é explorada a concretização dos benefícios da modularidade na fase de descarte dos produtos, exemplificada pela destinação dada aos produtos eletrônicos que não são mais utilizados. A destinação dada aos produtos foi escolhida pois esta ação determina a realização dos benefícios que a modularidade pode trazer no final do ciclo de vida do produto. O artigo intitulado “*Modularidade e o fim da vida de produtos eletrônicos: práticas e iniciativas para recuperação de valor*” apresenta uma revisão de surveys sobre o fim da vida de produtos eletrônicos, com o objetivo de realizar um levantamento das destinações dadas pelos usuários e relacionando estas destinações com a recuperação de valor possibilitada pela modularidade. Adicionalmente, neste estudo, apresenta-se uma revisão de iniciativas para estimular o descarte correto destes produtos. Este trabalho evidencia uma situação atual onde a recuperação de valor é pouco praticada e salienta a importância de informação e incentivo para que os *stakeholders*, em especial os usuários, busquem a realização dos benefícios propiciados pela modularidade.

O capítulo 5 é composto pelas considerações finais, divididas em análise conclusiva e lacunas para futuras pesquisas. A Figura 1.1 ilustra o delineamento deste estudo. A introdução da tese apresenta o tema modularidade e design sustentável, e a importância de se considerar os *stakeholders* críticos para a sustentabilidade em todo o ciclo de vida do produto de forma a promover a realização dos benefícios que a modularidade pode trazer para a sustentabilidade. O capítulo 2 apresenta um levantamento desses benefícios durante o ciclo de vida e aponta a lacuna

de pesquisas nas fases de uso e descarte. Os capítulos 3 e 4 visam preencher esta lacuna, contemplando as fases mencionadas com ênfase no usuário e nas iniciativas dos demais *stakeholders* para incentivar e promover a realização dos benefícios.

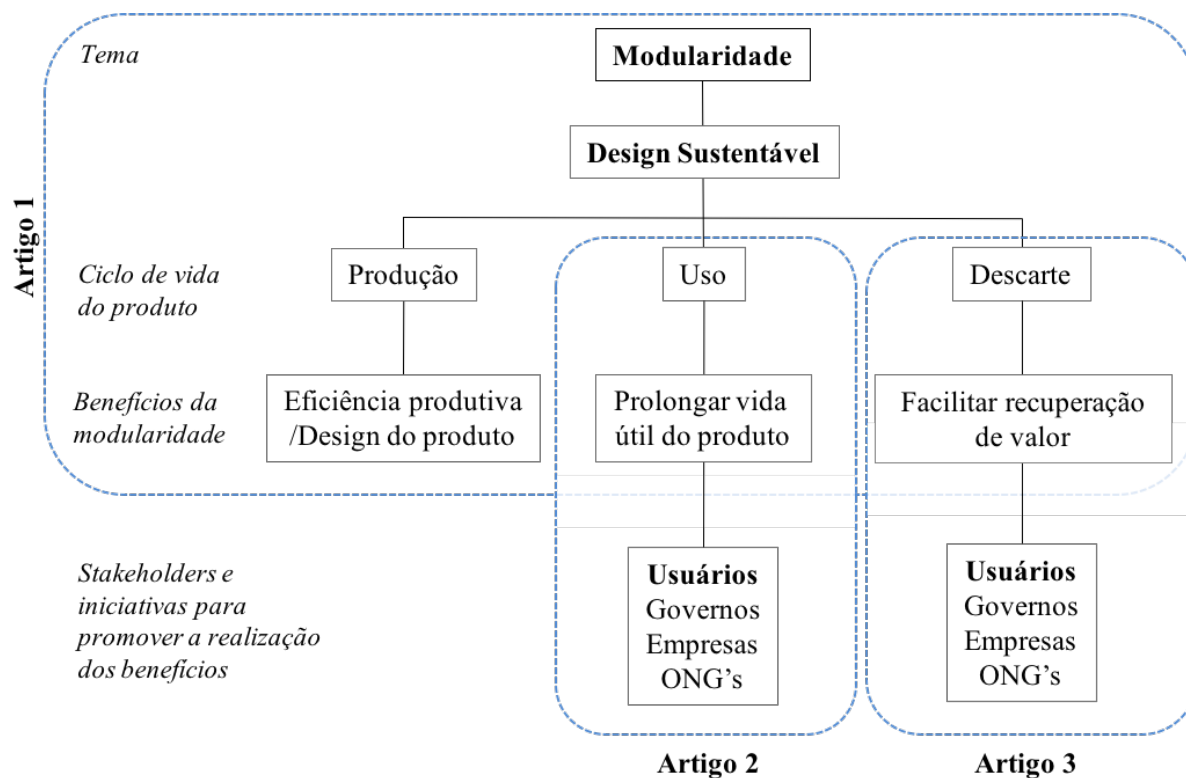


Figura 1-1: Delineamento do estudo

1.5 Delimitações da pesquisa

As delimitações deste trabalho são dependentes do escopo de estudo previamente definido. Este trabalho está concentrado na utilização da modularidade em produtos eletrônicos, que são exemplos de produtos onde o usuário tem o poder e a capacidade de tomar decisões relacionadas às possibilidades alcançadas pela modularização (reparos, manutenção, upgrades). Exemplos de modularização na construção civil ou na área de softwares foram descartados.

Este trabalho não entra na discussão de tipos ou níveis de modularidade (ULRICH, 1995; MIKKOLA, 2006), atendo-se aos benefícios atribuídos à modularidade de uma forma geral e à sua concretização no ciclo de vida dos produtos. As revisões de literatura ficam atreladas aos termos utilizados e às bases de dados escolhidas, fornecendo um panorama dos temas relacionados à pesquisa e não uma extensa e detalhada descrição de tudo o que já foi publicado. Os dados contidos nas *surveys* utilizadas não podem ser generalizados a todos contextos e populações.

1.6 Referências

- ADAMS, R.; JEANRENAUD, S.; BESSANT, J.; DENYER, D.; OVERY, P. Sustainability-oriented Innovation: a systematic review. *Int. J. Manag. Rev* 18, 180-205, 2016.
- ALGEDDAWY, T.; ELMARAGHY, H. Reactive Design Methodology for Product Family Platforms, Modularity and Parts Integration. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 6, 34–43, 2013.
- ATLASON, R.S.; GIACALONE, D.; PARAJULY, K. Product design in the circular economy; User's perception of end-of-life scenarios for electrical and electronic appliances. *Journal of Cleaner Production* 168, 1059-1069, 2017.
- BABBITT, C.W.; KAHHAT, R.; WILLIAMS, E.; BABBITT, G.A. Evolution of product lifespan and implications for environmental assessment and management: a case study of personal computers in higher education. *Environmental Science and Technology* 43, 5106–5112, 2009.
- BHAMRA, T., LILLEY, D., TANG, T. Sustainable use: changing consumer behaviour through product design. *Proceedings of the Changing the Change: Design Visions, Proposals and Tools Conference, Turin, 2008.*
- BONVOISIN, J.; HALSTENBERG, F.; BUCHERT, T.; STARK, R. A systematic literature review on modular product design. *Journal of Engineering Design* 27, 488–514, 2016.
- BOVEA, M.D.; PÉREZ-BELIS, V. A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product desing process. *Journal of Cleaner Production* 20, 61-71, 2012.
- CESCHIN, F.; GAZIULUSOY, I. Evolution of design for sustainability: from product design to design for system innovations and transitions. *Design Stud* 47, 118-163, 2016.
- COX, J.; GRIFFITH, S.; GIORGI, S.; KING, G. Consumer Understanding of Product Lifetimes. *Resource, Conservation and Recycling* 79, 21-29, 2013.
- DOMINGO, L.; BRISSAUD, D.; MATHIEUX, F., 2013. Implement scenario to better adress the use phase in product ecodesign. *Proceedings of the ICED Conference, Seoul, 2013.*
- DURAY, R. Mass customization origins: mass or custom manufacturing? *International Journal of Operations & Production Management*, v. 22, p. 314-328, 2002.
- ERIXON, G. “Modular Function Deployment – a method for product modularization”. *Doctoral Thesis, Royal Institute of Technnology, Stockholm, 1998.*
- GERSHENSON J.K.; PRASAD G.J.; ZHANG Y. Product modularity: measures and design methods. *Journal of Engineering Design* v.15, p. 33-51, 2004.
- GERSHENSON, J.K.; PRASAD, G.J.; ALLAMNENI, S. Modular Product Design: A Life-Cycle View. *Journal of Integrated Design & Process Science* 3, 13–26, 1999.
- GERSHENSON, J.K.; PRASAD, G.J.; ZHANG, Y. Product modularity: definitions and benefits. *Journal Engineering Design* v. 14, p. 295-313, 2003.
- GIL, A. C., 2007. *Como elaborar projetos de pesquisa*. ed.4. Ed. São Paulo: Atlas.
- GU, P.; SOSALE, S. Product Modularization for life cycle engineering. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* v. 15, p.387- 401, 1999.
- HOLMQVIST, T.K.P.; PERSSON, M.L. Analysis and Improvement of Product Modularization Methods: their ability to deal with complex products. *Systems Engineering* v.

6, p. 195-209, 2003.

HUME, M. Compassion without action: examining the young consumers consumption and attitude to sustainable consumption. *J World Bus* 45, 385-394, 2010.

JOSE, A.; TOLLENAERE, M. Modular and platform methods for product family design: literature analysis. *Journal of Intelligent Manufacturing* v. 16, p.371-390, 2005.

KONG, F.B.; MING, X.G.; WANG, L.; WANG, X.H.; WANG, P.P. On Modular Products Development. *Concurrent Engineering, Research and Applications* v. 17, p. 291-300, 2010.

KUDERER, K. Benefits of Modularity. *Proceedings of the 4th Student Conference on Development of Modular Products*, 74-81, 2006.

LI, J.; ZHANG, H.; GONZALEZ, M.A.; YU, S. A multi-objective fuzzy graph approach for modular formulation considering end-of-life issues. *International Journal of Production Research* v.46, p.4011-4033, 2008.

LILLEY, D. Design for sustainable behavior: strategies and perceptions. *Design Studies* 30, 714-720, 2009.

LOCKTON, D.; HARRISON, D.; STANTON, N. Making the user more efficient: Design for sustainable behaviour. *International Journal Sustainable Engineering* 1, 3-8, 2008.

MA, J.; KREMER, G.E.O. A systematic literature review of modular product design (MPD) from the perspective of sustainability. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 86, 1509-1539, 2016.

MAYERS, K. An investigation of the implications and effectiveness of producer responsibility for the disposal of WEEE. *Doctoral Thesis, Centre for Environmental Strategy, University of Surrey, Guildford, UK*, 2001.

MEYER, M. H.; LEHNERD, A. P. *The power of product platforms*. Simon and Schuster, New York, 1997.

MIKKOLA, J.H. Capturing the degree of Modularity Embedded in Product Architectures. *Journal of Product Innovation Management* v. 23, p. 128-146, 2006.

MODULAR DESIGN PLAYBOOK. Guidelines for assessing the Benefits and Risks of Modular Design. *The Corporate Executive Board Company*, 2010.

MONT, O.; PLEPYS, A. Sustainable consumption progress: should we be proud or alarmed? *J. Clean. Prod.* 16, 531-537, 2008.

NEPAL, B.; MONPLAISIR, L.; SINGH, N. Integrated fuzzy logic-based model for product modularization during concept development phase. *International Journal of Production Economics* v. 96, p.157-174, 2005.

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

OBERENDER, C.; BIRKHOFFER, H. Estimating environmental impacts: the use-phase analysis matrix – a use phase centered approach. *Proceedings of the ICED Conference, Stockholm*, 2003.

PANDREMENOS, J.; VASILIADES, E.; CHRYSOLOURIS, G. Design Architectures in Biology. *Procedia CIRP* 3, 448–452, 2012.

PIMMLER, T.U.; EPPINGER, S.D. 1994. Integration analysis of product decompositions. In *ASME Design Theory and Methodology Conference*, Minneapolis, 1994.

- PINE II, J.B. *Mass Customization: the new frontier in business competition*. Boston: Harvard Business School Press, 1993.
- PIRAN, F.A.S.; LACERDA, D.P.; CAMARGO, L.F.R.; VIERO, C.F.; DRESH, A.; CAUCHIK-MIGUEL, P.A. Product modularization and effects on efficiency: an analysis of a bus manufacturer using data envelopment analysis (DEA). *International Journal of Production Economics* 182, 1-13, 2016.
- QIAN, X.; ZHANG, H.C. Design for Environment: and Environmentally Conscious Analysis Model for modular design. *IEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, v. 32, p.164-175, 2009.
- SABBAGHI, M.; ESMAEILIAN, B.; MASHHADI, A.R.; BEHDAD, S. An investigation of used electronics return flows: a data driven approach to capture and predict consumers storage and utilization behavior. *Waste Management* 36, 305-315, 2015.
- SMITH, S.; YEN, C. Green Product Design through product modularization using atomic theory. *Robotics and computer integrated manufacturing* v.26, p.790-798, 2010.
- SOARES, M.A.T.; OKIMOTO, M.L.L.R.; 2009. Modularidade e flexibilidade de uso de mobiliário infantil. In *Anais do 5o Congresso Internacional de Pesquisa em Design, 2009*.
- STARR, M.K. Modular production – a new concept, *Harvard Business Review*, v. 3, p. 131-142, 1965.
- STARR, M.K. Modular Production: a 45-year-old concept. *International Journal of Operation and Production Management* v.30, p. 7-19, 2010.
- STEWART, B., YAN, X. Modular Product Family Development within a SME. In: *Global design to gain a competitive edge: a holistic and collaborative design approach based on computational tools*, 21-30, 2008.
- STONE, R.B.; WOOD, K. L.; CRAWFORD, R.H. A heuristic method for identifying modules for product architectures. *Design Studies* v.21, p. 5-31, 2000.
- SUH, N.P. *The principles of design*. New York: Oxford University Press, 1990.
- TSENG, H.; CHANG, C.; LI, J. Modular design to support green life-cycle engineering. *Expert systems with applications* v.34, p.2524-2537, 2008.
- ULRICH, K. The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm. *Research Policy* v.24, p. 419-449, 1995.
- UMEDA, Y.; FUKUSHIGE, S.; TONOIKE, K.; KONDOH, S. Product Modularity for life cycle design. *CIRP Annals Manufacturing Technology* v.57, p.13-16, 2008.
- WIDMER, R.; OSWALD-KRAPF, H.; SINHA-KHETRIWAL, D.; SCHNELLMANN, M.; BONI, H. Global Perspectives on E-Waste. *Environmental Impact Assessment Review* 25, 436-458, 2005.
- ZETTL, M.; SELIGER, G.; BILGEN, E. Product Life Cycle Oriented Methodology Supporting the Development of Modular Product Structures. In *Global Conference on Sustainable Development and Life Cycle Engineering 4*, São Carlos, 2006.

2. O PAPEL DA MODULARIDADE NO DESIGN SUSTENTÁVEL: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Resumo: A modularidade é uma estratégia reconhecida pela academia e pela indústria, e muitos estudos relacionam a arquitetura modular com o desenvolvimento de produtos sustentáveis. O objetivo deste artigo é identificar temas comuns e relacionar os benefícios da modularidade visando sustentabilidade em todo o ciclo de vida dos produtos. Para atingir este objetivo, foi realizada uma revisão da literatura em duas etapas. A primeira etapa consiste de uma revisão sistemática da literatura, na qual 81 artigos foram selecionados e distribuídos em sete diferentes categorias de temas: Life Cycle Assessment, Design for X, Modularização sustentável, Manufatura, Revisões de Modularidade, Cadeia de Suprimentos e Uso. Como resultado desta primeira etapa foram identificados: benefícios em todo o ciclo de vida dos produtos (produção, uso e descarte); grande número de estudos focando na fase de produção, apresentando métodos para modularizar visando sustentabilidade e projetando cenários de fim de vida útil; pouca atenção ao papel dos usuários na realização dos benefícios e cenários projetados. Portanto, a segunda etapa de revisão de literatura teve como foco o usuário e sua influência no impacto ambiental dos produtos, afim de validar a lacuna de pesquisa encontrada na primeira etapa. Como conclusão, aponta-se a necessidade de um melhor entendimento do ciclo de vida dos produtos e dos stakeholders envolvidos, para decidir quando e como usar a estratégia de modularidade de forma mais eficaz no desenvolvimento de produtos.

Palavras chave: modularidade, design modular, desenvolvimento de produtos, design sustentável

Abstract: Modularity is a strategy recognized by the academia and the industry, and many studies relate modular product architecture to the development of sustainable products. The objective of this article is to explore the intersection between modularity and sustainable design from the perspective of the product life cycle. To achieve this objective, a systematic review was conducted and a total of 81 articles were selected and distributed in seven different categories of subjects: Life Cycle Assessment, Design for X, Green Modularization, Manufacture, Modularization Reviews, Supply Chain, and Usage. We identified in the literature that: (i) benefits are claimed in every life cycle phase (production, use, and disposal); (ii) academic research is mainly focused in the production phase and in projecting product disposal scenarios, offering a wide variety of methods and methodologies to modularize products with environmental concerns; (iii) little attention is given to the role of the user in realizing the benefits anticipated during in the project. In a second stage, we focused on the user's influence on the environmental impact of products to validate the research gap in the first step. Our conclusion points that, in spite of the association of modularity with environmental benefits, a better understanding of the entire life cycle of modular products and of the stakeholders is needed to decide when and how to efficiently use modularity in the development of products.

Keywords: modularity, modular, design, product development, sustainable design

2.1 Introdução

O desenvolvimento sustentável tem sido destacado como uma ideia central para a nossa era (SACHS, 2014). Inclui, de maneira geral, desenvolvimento econômico, inclusão social e

sustentabilidade ambiental. Para tanto, o consumo e a produção sustentáveis exigem o redesenho das práticas industriais, de serviços e de infra-estruturas (SPANGERBERG et al., 2010). Como resultado, o foco na indústria e na legislação mudou de processos de produção para produtos e seus ciclos de vida. O ciclo de vida do produto engloba todas as atividades desde o projeto até o fim da vida, incluindo fabricação, montagem, testes, distribuição, operação, serviços, reutilização, remanufatura, reciclagem e descarte (GU; SOSALE, 1999). O desenvolvimento de produtos sustentáveis é impulsionado por consumidores mais exigentes e é o objetivo de políticas emergentes e integradas de produtos, particularmente na Europa (HAUSCHILD et al. 2004). Ao tornar o fabricante responsável por todo o ciclo de vida de um produto, as regulamentações pressionam as empresas a adequar seus métodos e a considerar a o fim de vida do produto (WESTKAMPER et al., 2000).

A arquitetura do produto tem efeito significativo em todo o seu ciclo de vida, afetando, portanto, as suas características sustentáveis (BONVOISIN et al, 2016; HALSTENBERG et al., 2015). A modularidade visa quebrar a arquitetura do produto em unidades fisicamente independentes (NEWCOMB et al. 1998), facilitando a associação de estratégias de ciclo de vida ao projeto de produtos (UMEDA et al. 2008). A ideia central do design modular é permitir a combinação de módulos distintos - através de interfaces definidas - para compor produtos. Há uma variedade de conceitos sobre o assunto, mas, segundo Stewart e Yan (2008), as principais características relacionadas à modularidade são a independência estrutural, independência funcional, minimização de interfaces e interações com outros módulos e influências externas. A modularidade facilita atualizações, adaptações, modificações, montagem e desmontagem do produto, aumenta a variedade de produtos, permite economias de escala e reduz o tempo de produção.

Devido à sua capacidade de influenciar o ciclo de vida do produto e suas características sustentáveis, a modularidade ganhou recentemente destaque nos estudos de design sustentável. O design sustentável visa desenvolver soluções sustentáveis, equilibrando os interesses privados das empresas com preocupações ambientais, econômicas e sociais (SKERLOS, 2015). Como o impacto ambiental de um produto é determinado na fase de projeto (HE; GU, 2016; JESWIET; HAUSCHILD, 2005), o design sustentável pode ajudar a atender às necessidades do consumidor e integrar a preocupação ambiental no desenvolvimento de produtos. Os termos *Ecodesign*, *Green Design* e *Environmental Design* também são usados para descrever a integração das preocupações ambientais no desenvolvimento do produto (JESWIET; HAUSCHILD, 2005).

De forma geral, a literatura associa o design modular a benefícios ambientais. No entanto, a modularidade tem algumas limitações e pode não ser a estratégia mais adequada para determinados segmentos de mercado. Por exemplo, produtos associados à status podem não se beneficiar das estratégias de reutilização/atualização permitidas pela modularização, pois o usuário valoriza o ato de possuir um novo produto. Nesses casos, as decisões dos usuários têm um efeito importante sobre o impacto ambiental do produto (LOCKTON et al., 2008), limitando os benefícios que podem ser obtidos por meio da modularidade. Portanto, um melhor entendimento do impacto ambiental de cada etapa do ciclo de vida de um produto, incluindo o papel do usuário, é necessário para decidir se a modularidade é uma estratégia sustentável adequada e como aproveitar melhor seus pontos fortes.

O objetivo deste estudo é identificar temas comuns e relacionar os benefícios da modularidade para o design sustentável em todo o ciclo de vida dos produtos. A contribuição deste estudo pode ser resumida em duas perspectivas. Primeiro, revisando a literatura científica, apresentamos os benefícios da modularização para o design sustentável e apresentamos categorias de temas mais recorrentes ao longo dos diferentes estágios do ciclo de vida; segundo, ao apresentar as limitações da modularidade e destacar as lacunas de pesquisa em sua relação com o design sustentável, defendemos a importância de estudar todo o ciclo de vida de um produto para entender como a modularidade pode promover o design sustentável. Essas contribuições podem ser usadas por pesquisadores e profissionais para orientar futuros desenvolvimentos de modularidade para projetos sustentáveis.

2.2 Método

Para atingir o objetivo acima citado, as seguintes atividades foram realizadas: (1) uma revisão sistemática da literatura; (2) e uma revisão da literatura sobre a fase de uso e influências do usuário para discutir a lacuna encontrada na revisão sistemática.

A revisão sistemática foi realizada para identificar publicações e assuntos relacionados à modularidade para o desenvolvimento sustentável de produtos. Incluiu duas fases principais: seleção e análise. A seleção compreende a coleta de um conjunto de publicações na área desejada, enquanto a análise compreende o exame crítico dessas publicações para identificar padrões e temas recorrentes. Como proposto por Kitchenham (2007), essas duas fases foram executadas em cinco etapas: questão de pesquisa, estratégia de busca, seleção de estudos, avaliação da qualidade dos estudos e extração de dados. De acordo com o objetivo acima, a questão de pesquisa norteadora deste trabalho é: como a modularidade está associada ao desenvolvimento de produtos sustentáveis?

O banco de dados *Web of Science*™ *Core Collection* foi escolhido por incluir artigos científicos altamente citados de periódicos que têm fatores de impacto no *Journal Citation Report* (JCR). A pesquisa foi realizada no banco de dados com a seguinte combinação de palavras-chave: “modul* product*” OR “product* modul*” OR “modular design” OR modularity OR modularization AND “sustainable design” OR “sustainable product” (and sustainable products) OR “eco-design” (and eco-design) OR “design for environment” OR “green design” OR “green product” OR “environmental design” OR “life cycle design” OR “product life cycle”.

Os termos de pesquisa associados ao design sustentável foram definidos usando os resultados do software TerMine para duas revisões (CHIU; CHU, 2012; KEOLEIAN; MENEREY, 1994). O TerMine é um programa de extração de termos que identifica os termos-chave em um texto e produz uma lista ordenada por sua frequência e relevância (FRANTZI et al., 2000). A pesquisa do *Web of Science*™ *Core Collection* foi realizada em tópico (título, resumo e palavras-chave) sem restrição de tempo, em março de 2017, e resultou em 145 artigos.

Todos os 145 trabalhos foram analisados de forma independente e apenas trabalhos referentes à modularidade e design sustentável no desenvolvimento de produtos foram selecionados. Exemplos de construção civil, artigos sobre experiências com sustentabilidade na educação formal e artigos sobre modularidade não relacionados à sustentabilidade foram descartados. Ao final dessa etapa, 81 artigos que estão efetivamente relacionados à questão de pesquisa foram submetidos a avaliações críticas. A Figura 1 ilustra o processo desta revisão sistemática.

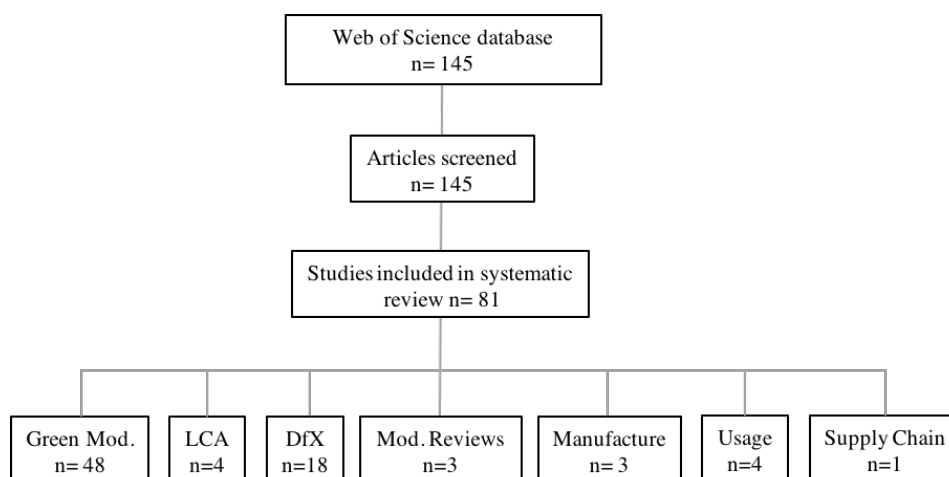


Figura 2-1: Visão geral da revisão sistemática

Uma abordagem agregativa foi empregada para extrair os dados e categorizar os achados apresentados nos estudos (DE MEDEIROS et al., 2014). A definição das categorias e a classificação dos estudos basearam-se na interpretação do autor dos principais objetivos e contribuições de cada artigo. Primeiro, os artigos foram lidos na íntegra; nesta leitura, alguns conceitos-chave foram destacados e resumidos em uma tabela; de acordo com as semelhanças, os artigos foram agrupados em categorias e foi escolhido um nome para representar cada categoria. Como defendido por De Medeiros et al. (2014), para construir um esquema útil para ilustrar os objetivos de uma revisão, as características especiais de cada estudo devem ser consideradas e comparadas quanto à sua importância. O Apêndice A apresenta uma lista dos 81 artigos usados nesta revisão.

Como demonstrado pela Figura 2.1, poucos estudos focam na questão do uso e da influência do usuário. Portanto, foi realizada uma segunda revisão de literatura buscando por estudos que relacionam as práticas dos usuários durante uso e descarte dos produtos com o impacto ambiental gerado. Essa busca teve como objetivo buscar estudos associados ao ciclo de vida dos produtos, e compreender a influência que os stakeholders exercem na concretização dos benefícios levantados pela revisão sistemática da literatura.

2.3 Resultados

Esta seção apresenta uma descrição das categorias de temas comuns e uma lista de benefícios relacionados à modularidade para o design sustentável.

2.3.1 Categorias de temas comuns

Os 81 artigos foram divididos em 7 categorias, de acordo com suas semelhanças e recorrência de tópicos: (i) métodos de modularização com objetivos sustentáveis, abrangendo a maioria dos trabalhos (48 artigos); (ii) o papel da modularidade na simplificação das abordagens de *Life Cycle Assessment*; (iii) metodologias para desenvolver produtos sustentáveis; (iv) revisões de literatura na área de modularidade; (v) metodologias com foco na manufatura; (vi) questões relacionadas ao mercado, uso e propriedade (uso); (vii) cadeia de suprimentos e sua relação com modularização e sustentabilidade. A Tabela 1 apresenta os artigos desta revisão divididos por categoria. Observa-se que as categorias na Tabela 1 são ordenadas pelo ano de publicação do primeiro artigo relacionado a ela, revelando o surgimento de novas categorias ao longo do tempo. As categorias são descritas abaixo.

Tabela 2-1: Categorias de temas por ano de publicação

	Mod. Sustent.	LCA	DfX	Revisões	Manufatura	Uso	Cadeia Sup.
2017			·Song e Sakao				
2016	·Ma e Kremer ·You e Smith ·Ma e Kremer ·Wang et al. ·Martinez e Xue ·Tseng e Chang ·Chiu et al.	·Kuo et al.	·Nielsen e Brunoe ·Huang et al. ·Bonvoisin	·Bonvoisin et al. ·Ma e Kremer	·Fang et al.		
2015			·Li et al. ·Go et al.				
2014	·Zhang et al. ·Yang et al. ·Yang ·Yan e Feng ·Cai et al. ·Ma e Kremer ·Liu e Jia ·Chung et al. ·Wang et al.		·Ostrosi et al. ·Sejayah et al.				·Chung et al.
2013	·Yang e Liu ·Tchertchian et al. ·Liu et al. ·Ji et al. ·Chiu e Teng ·Chang et al. ·Ji et al.		·Liu ·Taps et al.			·Agrawal e Ulku	
2012	·Yan et al. ·Tao and Yu ·Smith e Hung ·Philip et al.		·Chiu e Chu			·Cheng	
2011	·Yang et al. ·Yan e Feng		·Zhang et al.				
2010	·Tseng et al. ·Smith e Yen ·Luh et al. ·Yen e Smith				·Wang et al.	·Ray e Ray ·Durand et al.	
2009	·Tseng ·Qian e Zhang	·Tchertchian et al.	·Tong e Ju ·Gu et al.				
2008	·Umeda et al. ·Li et al.						
2007		·Recchioni et al	·Zhang et al.				
2006			·Dunmade e Rosentrater		·Ji et al.		
2005	·Watanabe e Takata ·Kondoh et al.			·Jose e Tollenaere			
2004			·Misceo et al. ·Dunmade				
2003	·Gu e Slevinsky ·Qian e Zhang ·Aoyama e Uno						
2002		·Otto et al.					
2001	·Kimura et al.						
2000							
1999	·Gu e Sosale						
	Mod. Sustent.	LCA	DfX	Revisões	Manufatura	Uso	Cadeia Sup

2.3.1.1 Métodos de modularização sustentáveis

O interesse no desenvolvimento de produtos modulares motiva o estudo e proposição de métodos e métricas para modularização (GERSHENSON et al., 2004). A modularização potencialmente traz grandes benefícios para as empresas, mas a divisão de produtos em módulos não é uma tarefa trivial e influencia os benefícios que as empresas podem obter (HOLMQVIST; PERSSON, 2003). O processo de modularizar produtos com preocupação ambiental, ou modularização sustentável, é uma maneira de realizar a modularização não apenas com vista a requisitos funcionais ou estruturais, mas também do ponto de vista do ciclo de vida do produto (LI et al., 2015). Em 1996, Newcomb et al. apresentou um dos primeiros métodos de modularização que considera não apenas aspectos funcionais e físicos de um produto, mas também preocupações com o ciclo de vida do produto, como intenção pós-vida, reciclagem e serviços (NEWCOMB et al., 1996).

Como a maioria dos artigos revisados faz parte da categoria de modularização sustentável, o *Histcite Software* foi usado para realizar uma análise de referência cruzada e revelar os estudos mais influentes nesta categoria. Entre os 48 estudos, 4 destacam-se como os mais citados, como mostra a Figura 2, e são apresentados a seguir. Gu e Sosale (1999) apresentam um método de modularização para abordar as preocupações do ciclo de vida - como montagem, serviços e reutilização/remanufatura/reciclagem - no estágio de projeto. Os autores argumentam que a relação entre objetivos e módulos deve ser estabelecida para que os objetivos de engenharia do ciclo de vida possam ser alcançados através da modularização. Kimura et al. (2001) propõem uma estratégia de modularização para famílias de produtos e novas gerações de produtos com base na funcionalidade e similaridade do ciclo de vida. Umeda et al (2008) propõem uma metodologia de projeto modular para integrar a viabilidade geométrica de módulos com atributos relacionados ao ciclo de vida (reciclagem, reutilização, atualização...). Smith e Yen (2010) propõem um método de modularização para o projeto sustentável usando *Atomic Theory*, onde os produtos são modularizados de acordo com restrições sustentáveis, como compatibilidade de materiais, reciclabilidade e desmontagem.

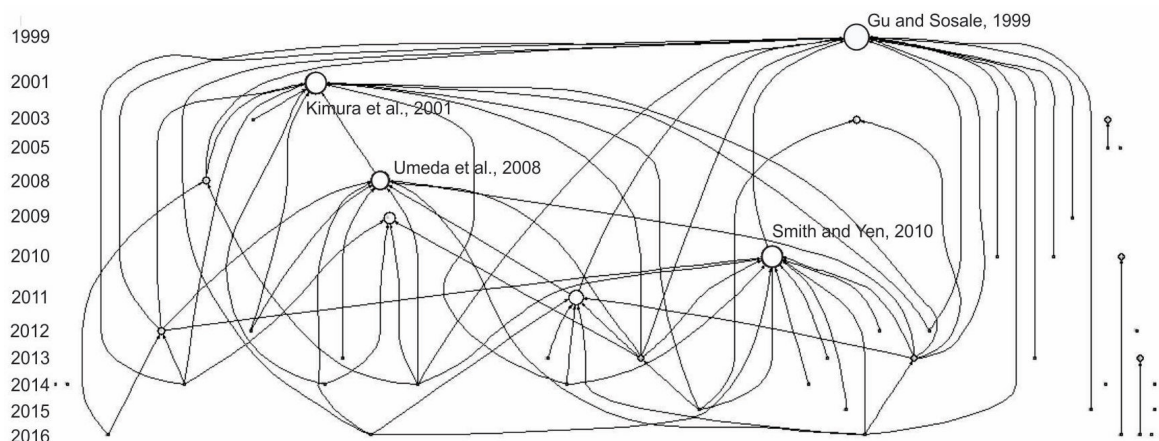


Figura 2-2: Análise de referência cruzada nos estudos de modularização sustentável

2.3.1.2 Life Cycle Assessment

O *Life Cycle Assessment* (LCA) é um método para avaliar o potencial impacto ambiental, bem como os recursos utilizados, ao longo do ciclo de vida do produto - desde a aquisição de matérias-primas até a gestão de resíduos (ISO, 2006). Como apontado por Tao et al. (2017) o LCA pode trazer grandes benefícios ao design do produto, prever impactos no ciclo de vida e ajudar a determinar se uma nova solução é melhor para o meio ambiente do que as disponíveis. As empresas podem usar o LCA para identificar os maiores contribuintes do impacto ambiental em seus produtos e processos, e então agir diretamente nesses contribuintes para reduzir o impacto negativo de seus produtos (TESTA et al., 2016). No entanto, é muito complexo, caro e demorado realizar o LCA de um produto, pois esta atividade requer a coleta de dados para todas as etapas do seu ciclo de vida (CHIU; CHU, 2012; KUO et al., 2016; OTTO et al., 2016; TAO et al., 2017).

A modularidade tem sido abordada como uma forma de simplificar o LCA, permitindo a avaliação do ciclo de vida do ponto de vista do módulo, no qual cada módulo é tratado e analisado isoladamente. Assim, modificações introduzidas em um módulo influenciam seu próprio ciclo de vida, mas não o produto como um todo (RECCHIONI et al., 2007). As equipes de desenvolvimento poderiam ter bibliotecas de módulos, e o LCA para novos produtos poderia ser mais prático, analisando apenas os novos módulos que oferecem diferenciação (OTTO et al., 2002). Esse LCA simplificado exige menos tempo, esforço e dinheiro, mas ainda fornece informações importantes (CHIU; CHU, 2012). Nessa categoria, encontramos propostas de LCA simplificado por meio de modularização (KUO et al., 2016; RECCHIONI et al., 2007), simplificação de LCA em famílias de produtos (OTTO et al., 2002) e avaliação ambiental de conceitos de módulos (TCHERTCHIAN et al., 2009).

2.3.1.3 Design for X - DfX

DfX descreve filosofias e metodologias de design que enfocam a melhoria de produtos em diferentes estágios do ciclo de vida (ZETTL et al., 2006). O "X" representa os objetivos das metodologias, ou seja, design para desmontagem, design para reciclagem, design para fim de vida (IJOMAH et al., 2007). Essas metodologias consistem em um conjunto de diretrizes de design que fornecem amplo suporte com poucos detalhes (KNIGHT; JENKINS, 2009). Uma metodologia DfX deve, por exemplo, fornecer conselhos sobre como melhorar um projeto, realizar essas melhorias, medir o desempenho e esclarecer as relações entre produtos e processos (HUANG, 2012). Assim, neste estudo foram agrupados na categoria DfX os estudos com metodologias que abrangem a preocupação ambiental durante o desenvolvimento de produtos de uma forma ampla, tais como diretrizes gerais de design. A modularidade é uma parte essencial das metodologias DfX devido à independência funcional criada pela configuração do produto (GO et al. 2015). Como Chiu e Chu (2012) observam, a arquitetura do produto é um fator decisivo que conecta o design do produto a outras atividades do ciclo de vida em relação à preocupação ambiental.

Revisões bibliográficas e análises de metodologias de design foram encontradas nesta categoria (CHIU; CHU, 2012; LI et al, 2015; OSTROSI et al., 2014); metodologias aplicadas a indústrias específicas, como automotiva e moveleira (LIU, 2013; SEJAYAH et al, 2014; TONG; JU, 2009; ZHANG et al, 2007); ferramentas baseadas na Web para apoiar design e computação em nuvem para armazenar e compartilhar conhecimentos de design (HUANG et al., 2016; MISCEO et al, 2004); frameworks para sistemas de produtos/serviços (SONG; SAKAO, 2017); conceitos como *Design for Multi-Purpose* (DUNMADE, 2004), *Design for Multi-Lifecycles* (DUNMADE; ROSENTRATER, 2006), *Design for Multiple Life Cycles* (GO et al, 2015), *Life Cycle Design* (ZHANG et al., 2011), *Adaptable design* (GU et al., 2009), *Industrial Metabolism* (TAPS et al., 2013), *Design Cradle to Cradle* (NIELSE; BRUNOE, 2016) e *Open Source Innovation* (BONVOISIN, 2016).

2.3.1.4 Revisões de Modularidade

Revisões de modularidade tentam organizar e categorizar a literatura publicada no campo da modularidade. Starr, pioneiro nos estudos de modularização, discute a dificuldade de definir modularidade, apesar de sua simplicidade (STARR, 2010). Como resultado, a modularidade não pertence a um corpo de conhecimento coerente, dificultando a organização da literatura e a compreensão de quando e como usar a modularidade para obter benefícios.

Ma e Kremer (2016) discutem que a pesquisa em modularidade aumentou em áreas como ciclos de vida de produtos, inovação e gestão ambiental. Os autores apresentam uma revisão do design modular sob a perspectiva da sustentabilidade, relacionando artigos publicados aos principais temas de sustentabilidade, ou seja, sustentabilidade econômica, sustentabilidade ambiental e sustentabilidade social. Bonvoisin et al. (2016) resumem a literatura publicada no campo da modularidade e apresentam uma compilação de diretrizes, princípios e métricas; José e Tollenaere (2005) apresentam uma revisão focada no conceito de plataformas e geração de famílias; estas revisões apresentam uma visão geral dessa área de estudo e contextualizam as muitas facetas do estudo de modularidade, incluindo a ambiental.

2.3.1.5 Manufatura

A manufatura é o pilar da sociedade industrializada. Nos anos 80, preocupações relacionadas ao desenvolvimento econômico trouxeram à tona a ideia de uma nova revolução industrial, visando minimizar os danos causados pelas indústrias e reivindicar novos processos de fabricação (JOVANE et al., 2008; PAUL et al., 2014).

As empresas têm usado a modularidade para facilitar o processo de fabricação de produtos complicados, dividindo-os em módulos ou células por mais de um século (BALDWIN; CLARK, 2003). Conforme discutido por Blackenfelt (2001), a organização da manufatura é uma das principais razões para se adotar a modularidade. A modularidade pode otimizar a utilização de equipamentos, melhorar a eficiência, a qualidade, reduzir custos e reduzir os prazos de entrega (GERSHENSON et al., 2003, GU; SOSALE, 1999). A modularidade é um conceito-chave em novos processos de manufatura sustentáveis, garantindo agilidade, reatividade e flexibilidade. Ela permite que as empresas respondam rapidamente às mudanças no mercado e aos requisitos regulamentares, permitindo assim um planejamento e controle eficientes do impacto ambiental da fase de produção. No entanto, como a organização da manufatura pode trazer benefícios econômicos para as empresas, sua adoção muitas vezes não está relacionada a metas sustentáveis. Três artigos foram encontrados nessa categoria, Wang et al. (2010) e Fang et al. (2016) apresentam estudos em desenho de ferramentas, e Ji et al. (2006) discutem a estratégia de produção inversa.

2.3.1.6 Uso

Segundo Oberender e Birkhofer (2003), a fase de uso começa com a compra e compreende a ativação, uso real, manutenção/reparo e o descarte; e desempenha um papel importante na determinação do impacto ambiental de um produto. Entender as especificidades

do mercado, o processo de decisão e os eventos que acontecem dentro das casas dos usuários é essencial para o design sustentável. A modularidade na fase de uso está relacionada à sustentabilidade devido à sua capacidade de estender a vida útil do produto por meio de atualizações, manutenção e reparos. A promoção de uma longa vida útil é parte importante das estratégias de ecodesign e é enfatizada por Luttrupp e Lagersted (2006) e Yang et al. (2011) como um pilar para o desenvolvimento de produtos mais sustentáveis.

Considerações sobre desempenho e capacidade de atualização de produtos modulares podem ser encontradas em Durand et al. (2010) e Agrawal e Ulku (2013); considerações sobre o processo de decisão em Cheng (2012); e a relação das especificidades do consumidor com a modularidade em mercados emergentes em Ray e Ray (2010).

2.3.1.7 Cadeia de suprimentos

O gerenciamento da cadeia de suprimentos procura realizar e coordenar os elos entre os processos-chave que fornecem produtos/serviços/informações, desde o usuário final até os fornecedores originais (CHRISTOPHER, 2005). Devido às interdependências entre o design do produto, o design do processo e o gerenciamento da cadeia de suprimentos, maior atenção tem sido dada à relação entre as características do produto e a gestão da cadeia de suprimentos (CHIU; OKUDAN, 2014; FIXSON, 2005;). O número e a localização dos fornecedores, o nível de serviço e as frequências de entrega são impactados pelo número e tipo de componentes que compõem um produto (FIXSON, 2005), transformando a arquitetura do produto em um aspecto crítico do gerenciamento da cadeia de suprimentos (HOWARD; SQUIRE, 2007). A modularização tem implicações consideráveis na arquitetura do produto, no design da organização e nas decisões de terceirização e entrega (HSUAN, 1999; ULRICH; EPPINGER, 1995).

Chung et al. (2014b) enfatizam que o design do produto e a cadeia de suprimentos são inseparáveis, e projetar produtos de logística amigáveis para minimizar custos e impactos ambientais no ciclo de vida do produto é um assunto importante. Os autores investigam o efeito da cadeia de suprimentos no projeto modular e avaliam o desempenho do ciclo de vida de uma estrutura modular em diferentes estados da cadeia de suprimentos. Artigos como Philip et al. (2012), Chiu e Teng (2013) e Chung et al. (2014a) apresentam métodos para modularizar os produtos que integram as preocupações da cadeia de suprimentos e são apresentados na categoria de métodos de modularização sustentável.

2.3.2 Benefícios da Modularidade

Os benefícios da modularidade têm sido extensivamente investigados nos últimos anos, e o interesse pela modularidade continua a crescer (BONVOISIN et al., 2016; MA; KREMER, 2016; ULKU; HSUAN, 2016). A Tabela 2 mostra os benefícios da modularidade para o design sustentável de acordo com as três principais fases do ciclo de vida: produção, uso e descarte. Esses benefícios foram apontados pelos estudos provenientes da revisão sistemática da literatura, e a tabela apresenta os benefícios agrupados em categorias conforme as fases do ciclo de vida.

Table 2-2: Benefícios da modularização para o design sustentável em cada fase do ciclo de vida

Produção	
Materiais	Permite otimização no uso de recursos: o reuso de módulos evita a produção de novos componentes (Chang et al., 2013; Dunmande; Rosentrater, 2006; Durand et al., 2010; Ray; Ray 2010; Tseng et al., 2008) Permite o uso de menos tipos de materiais (Qian; Zhang, 2009) Permite compatibilidade de materiais (Qian; Zhang, 2009)
Variedade	Permite oferta de variedade (Gershenson et al., 2003; Jose; Tollenaere, 2005; Philip et al., 2012; Ulrich, 1994; Zhang et al., 2011)
Cadeia de Suprimentos	Permite transporte e armazenamento mais eficiente: reduz número e tamanho de carregamentos (Chiu; Chu, 2012; Durand et al., 2010) Reduz cadeia de suprimentos (Durand et al., 2010)
Manufatura	Reduz equipamentos (Durand et al., 2010) Reduz requisitos de inventário (Durand et al., 2010) Reduz número de processos e processos repetitivos (Gershenson et al., 1999) Facilita testes (Ulrich, 1994) Aumenta a viabilidade de mudança de componente/produto (Gershenson et al., 2003) Otimiza a utilização de equipamentos (Sosale et al., 1997)
Obsolescência	Permite compatibilidade de vida útil (Qian; Zhang, 2009) Acomoda incertza futura (Ostrosi et al., 2014)
Pesquisa e Desenv.	Permite colaboração entre empresas (Recchioni et al., 2007) Permite flexibilidade (Gershenson et al., 2003; Recchioni et al., 2007) Possibilita inovação (Ma; Kremer, 2016) Simplifica LCA (Otto et al., 2002; Recchioni et al., 2007; Kuo et al., 2016)
Uso	
Manutenção	Simplifica manutenção (Go et al., 2015; Halstenberg et al., 2015; Jose; Tollenaere, 2005; Kimura et al., 2001; Newcomb et al., 1998; Sosale et al., 1997; Tseng et al., 2008; Umeda et al., 2008; Yang et al., 2011; Zhang et al., 2011) Reduz custos de manutenção (Ray; Ray, 2010; Zhang et al., 2011) Possibilita manutenção mais rápida (Yang et al., 2011; Zhang et al., 2011)
Reparos	Facilita o reparo (Cheng 2012; Gu; Sosale, 1999; Umeda et al., 2008; Yan; Feng, 2014) Otimiza o resultado do reparo (Zhang et al., 2011) Permite economia na reconfiguração (Ray; Ray, 2010)
Atualizações	Possibilita atualizações (Agrawal; Ulku, 2013; Gu; Sosale, 1999; Jose; Tollenaere, 2005; Ray; Ray, 2010; Tseng et al., 2008; Umeda et al., 2008; Watanabe; Takata, 2005) Possibilita modificações e adaptações (Halstenberg et al., 2015; Gu; Sosale, 1999) Promove continuidade (Ray; Ray, 2010)
Funcionalidade	Expande funcionalidade (Chang et al., 2013) Possibilita <i>Do It Yourself</i> (Cheng, 2012)
Serviços	Otimiza serviços pós-venda (Chiu; Chu, 2012; Gu; Sosale, 1999; Ji et al., 2013; Newcomb et al., 1998) Reduz custo dos serviços (Newcomb et al., 1998)
Descarte	
Reciclagem	Facilita desmontagem para a reciclagem (Go et al., 2015; Gu; Sosale, 1999; Ji et al., 2013; Liu et al., 2013; Newcomb et al., 1998; Tchertchian et al., 2013; Tseng et al., 2008; Umeda et al., 2008; Yang et al., 2014)
Reuso	Facilita desmontagem para o reuso (Aoyama; Uno, 2003; Go et al., 2015; Gu; Sosale, 1999; Ji et al., 2013; Jose; Tollenaere, 2005; Kimura et al., 2001; Liu et al., 2013; Newcomb et al., 1998; Tseng et al., 2008; Umeda et al., 2008; Yang et al., 2014)
Remanufatura	Facilita remanufatura devido a independência funcional (Go et al., 2015; Gu; Sosale, 1999; Tchertchian et al., 2013; Yang; Liu, 2013)

2.4 Discussão

A análise dos estudos provenientes da revisão sistemática evidenciou o foco dos estudos na fase de produção, e a a relação positiva entre modularidade e design sustentável, exemplificada pelos benefícios apresentados na tabela 2-2. No entanto, a modularidade também pode apresentar limitações e, mesmo alguns de seus benefícios podem se tornar limitações se usados de forma inadequada pelas empresas. Essa seção busca discutir essas limitações e lacunas de pesquisa, e assim enfatizar a importância de estudar todo o ciclo de vida de um produto para entender como a modularidade pode promover o design sustentável.

Permeando os benefícios e limitações ligados à arquitetura do produto, também é importante considerar o comportamento do usuário e sua influência no ciclo de vida do produto. Os artigos na categoria de uso foram os únicos a investigar minuciosamente as potenciais limitações da modularidade (AGRAWAL; ULKU, 2013; DURAND et al., 2010). A Figura 2-3 apresenta os benefícios da modularidade para o design sustentável (advindas da tabela 2-2), e resume as limitações que serão discutidas nessa seção.

	Produção	>	Uso	>	Descarte
Benefícios	Materiais Variedade Cadeia de Suprimentos Manufatura Obsolescência Pesquisa e Desenv.		Manutenção Reparos Atualizações Funcionalidade Serviços		Reciclagem Reuso Remanufatura
Limitações	Escolha de Métodos Limita a inovação Aumenta tempo e complexidade de desenvolvimento		Percepção e aceitação do usuário Problemas de performance (<i>overdesign</i> , interfaces defeituosas) Diversidade de cenários de uso e de comportamentos dos usuários Promove obsolescência		Evidências concretas Falta de suporte das empresas

Figura 2-3: Benefícios e limitações da modularidade em cada fase do ciclo de vida

2.4.1 Produção

A literatura argumenta que a modularidade é uma maneira de relacionar a arquitetura do produto com o seu desempenho ambiental e reivindica benefícios ao longo de todo o ciclo de vida. No entanto, a pesquisa acadêmica foca principalmente na fase de produção e na projeção de cenários de descarte. A indústria precisa desenvolver produtos mais sustentáveis para cumprir uma legislação mais rígida e consumidores mais exigentes, e a academia está interessada em fornecer métodos para atender a essas necessidades. Esta revisão encontrou 48 métodos de modularização sustentável (listados no Apêndice A) mostrando que o suporte

passo-a-passo para processos de modularização é o assunto mais comum na interseção dos dois assuntos. A maioria desses métodos se concentra na modularidade no fim de vida do produto, enfatizando a facilidade de desmontagem para reciclagem e reutilização.

Foram encontrados métodos de modularização com diferentes abordagens e objetivos (por exemplo, reciclagem, múltiplos ciclos de vida, etc.), tornando a escolha de um método uma tarefa complexa. Esta revisão reafirma a conclusão de Bonvoisin et al. (2016), que afirma que o apoio metodológico à modularização é extenso, mas os mecanismos de escolha do método mais adequado dentre os muitos disponíveis ainda precisam ser desenvolvidos.

Além da escolha de um método, sua utilização adequada também pode representar um obstáculo para as empresas. Lau (2011) discute que os gerentes citam a dificuldade de entender e implementar os métodos como um grande impedimento ao seu uso nas empresas. O tempo de desenvolvimento é curto e aprender a usar um método pode exigir tempo e experiência que nem sempre estão disponíveis. Além disso, o design de produtos modulares é mais caro, consome tempo e requer mais esforços do que o design de produtos integrais (JOSE; TOLLENAERE, 2005). O curto tempo de desenvolvimento também podem encorajar a adoção de módulos pré-existent de baixo custo e ampla disponibilidade, inibindo a diferenciação e a inovação do produto (ARNHEITER; HARREN, 2006; LAU, 2011; NEWCOMB et al., 1998).

2.4.2 *Uso*

Esta revisão indica que, apesar da capacidade de lidar com todo o ciclo de vida de um produto, a pesquisa em modularidade para sustentabilidade tem poucos estudos abordando a fase de uso. Para Sauer et al. (2009), isto é provavelmente devido ao controle limitado que os fabricantes têm sobre esta fase do ciclo de vida; e a diversidade dos cenários de uso, tornando dispendiosa a pesquisa sobre essa fase e prolongando o processo de desenvolvimento. A falta de estudos na fase de uso é uma observação interessante porque, para muitos produtos, é exatamente nesta fase que o maior impacto ambiental pode ser gerado (AGRAWAL; ULKU, 2013; LIDMAN; RENSTROM, 2011; LOCKTON et al., 2010; OBERENDER et al., 2001; TANG; BHAMRA, 2009). Por exemplo, os eletrodomésticos costumam ter um impacto ambiental maior na fase de uso devido ao consumo de energia e água para o seu funcionamento.

Além disso, é importante notar que a modularidade pode apresentar limitações nessa fase. Projetos modulares podem conter estruturas redundantes, influenciar o desempenho ou levar a produtos superprojetados - *overdesigned* (ERENS, 1996; DURAND et al., 2010; KRISHNAN; GUPTA, 2001; NEWCOMB et al., 1998; ULRICH, 1995). Produtos superprojetados ou com projeto defeituoso das interfaces podem aumentar o impacto ambiental

por meio do consumo excessivo de energia ou através do descarte prematuro. Em produtos como geladeiras, televisores e aspiradores de pó, 90% do impacto ambiental relacionado ao ciclo de vida ocorre durante a fase de uso (OBERENDER; BIRKHOFFER, 2003). E estes estão entre os exemplos de produtos mais usados para demonstrar a eficácia dos métodos de modularização sustentável (refrigeradores: JI et al., 2013; YANG et al., 2011; YANG et al., 2014; televisão: LUH et al., 2010; impressoras: KONDOH et al., 2005; UMEDA et al., 2008). Segundo Kim et al. (2006), os impactos ambientais da fase de descarte dos refrigeradores são pequenos quando comparados ao impacto das fases de produção e uso. Iraldo et al (2017) mostra que, para os aparelhos de refrigeração, a substituição por um novo modelo com uma pequena melhoria na eficiência energética resulta em uma redução significativa no impacto ambiental do ciclo de vida total. Essa observação enfatiza a importância da análise do ciclo de vida dos produtos para entender quais estratégias podem levar a um resultado mais sustentável. Nesse caso, a modularidade pode ser útil para promover a reciclagem e a reutilização de partes do produto, em vez de aumentar a sua vida útil.

Adicionalmente, a capacidade de atualização modular - quando o usuário pode trocar módulos para aumentar a vida útil de um produto - normalmente considerada benéfica, também pode aumentar o impacto ambiental de certos produtos devido à obsolescência gerada pela constante introdução e acelerada substituição de módulos. Tais estratégias de atualização podem ser adotadas pelas empresas para aumentar os lucros (AGRAWAL; ULKU, 2013).

Outra limitação associada à modularidade é a aceitação do usuário. Smith (2009) discute que os produtos modulares podem ser percebidos como menos duráveis, difíceis de usar e onerosos de manter. Além disso, produtos sustentáveis podem ser percebidos como menos confiáveis e seguros (SAKAO; FARGNOLI, 2010). Os clientes podem perceber que produtos com sistemas atualizados têm desempenho inferior ao de produtos inteiramente novos e podem sentir que as peças restantes serão menos confiáveis ou parecerão obsoletas (MACDONALD, 2011; ULKU et al., 2012). Isso levanta questões sobre como apresentar a modularidade aos clientes e como superar esses problemas de aceitação com um design mais inteligente. Lau et al. (2011) argumentam que é difícil para os clientes apreciarem diretamente a modularidade, mas eles podem valorizar seus benefícios, como entrega, flexibilidade, atendimento ao cliente, variedade e customização.

Para ganhar mercado e substituir produtos não sustentáveis, os produtos modulares também precisam ser competitivos. A atenção às preocupações ambientais e percepções do cliente é fundamental para produtos sustentáveis de sucesso (MACDONALD, 2015). Ao lançar produtos modulares, as empresas precisam entender como os clientes valorizam esses produtos

e integrar esse conhecimento nas decisões de design e precificação (ULKU et al., 2012). Designers podem trabalhar com a presença percebida de modularidade de forma a melhor comunicar os benefícios do produto (SMITH, 2009).

2.4.3 Descarte

Mesmo com o foco nos problemas de fim de vida, não foram encontrados estudos relatando a aplicação bem-sucedida da modularidade para reduzir o impacto ambiental na fase de descarte. Assim, é possível notar uma carência de estudos monitorando se os benefícios e metas estabelecidos pelos métodos e metodologias de modularização estão sendo atendidos após a fabricação. A maioria dos trabalhos concentra-se em fornecer suporte para a modularização sustentável e na defesa da eficiência de seus métodos em cenários hipotéticos, em vez de monitorar o impacto ambiental de produtos desenvolvidos com o apoio desses métodos. Este achado é condizente com as conclusões de Bonvoisin et al. (2016) e Piran et al. (2016). Ambos artigos argumentam que um grande número de benefícios é atribuído ao design modular de produtos, mas evidências concretas raramente são fornecidas e os benefícios são, em geral, meramente afirmados. Do ponto de vista do ecodesign, Bovea e Pérez-Belis (2012) reafirmam que a implementação de ferramentas para integrar preocupações ambientais no processo de design é escassa e, em geral, consiste em exemplos teóricos. Os autores sugerem que essa falta de apoio das empresas se deve à complexidade e ao tempo necessário para implementar um método, bem como à falta de conhecimento ambiental. Para Bonvoisin et al. (2016), é fundamental fornecer evidências mais sistemáticas e sólidas das vantagens e desvantagens da modularização.

Os relatórios de final de vida descrevendo os resultados reais podem fornecer evidências concretas para provar a eficácia de uma estratégia, inspirar outras empresas a seguir o mesmo caminho e fornecer *insights* sobre casos em que a estratégia não funcionou conforme o esperado. Por exemplo, o Relatório de 2014 da Xerox afirma que seu programa de devolução (remanufatura, reutilização e reciclagem) impediu que mais de 38.000 toneladas de resíduos entrassem nos aterros em 2013. Além disso, esse tipo de relatório de fim de vida pode fornecer *insights* sobre a fase de uso do produto, e pode indicar se algo não saiu como planejado durante o tempo que o produto esteve na posse do usuário.

2.4.4 Influência do usuário

Além de suas limitações, outro ponto que deve ser considerado no uso da modularidade para o design sustentável é o papel do usuário e sua influência na realização dos benefícios ao

longo do ciclo de vida do produto. O comportamento do usuário é fundamental para determinar o impacto ambiental de um produto e é influenciado pelo design do produto (BHAMRA et al., 2008; LILLEY, 2009; LOCKTON et al., 2008; OBERENDER; BIRKHOFFER, 2003).

Argumenta-se que o consumidor é um *stakeholder* fundamental na criação do valor sustentável do produto. A ideia de valor evoluiu de uma perspectiva econômica (dinheiro) para um conceito que também abrange aspectos ambientais e sociais (LI; FOUND, 2017). Segundo Biggemann et al. (2017), o valor não está totalmente contido no produto, em vez disso, é realizado durante o uso. Os autores complementam que desenvolvimentos recentes em sustentabilidade reconhecem a importância das necessidades e interesses de todos os *stakeholders*, e aponta o valor como uma criação das interações entre eles. Portanto, o valor sustentável dos produtos modulares é um exemplo de co-criação, onde as empresas fornecem as oportunidades e os consumidores realizam os benefícios.

Os benefícios da fase de uso estão diretamente relacionados aos comportamentos e necessidades do consumidor. As empresas podem oferecer a possibilidade de reparos e atualizações, mas são os consumidores que decidirão se essas possibilidades ocorrerão. Os benefícios da fase de descarte também dependem dos hábitos do consumidor, mas indiretamente. Para uma empresa realizar o tratamento adequado no final da vida (reutilização, remanufatura, reciclagem), o consumidor deve primeiro dar a destinação correta ao produto quando decidir descartá-lo. Neste caso, mesmo algumas estratégias utilizadas na fase de produção (ou seja, otimização do uso de recursos) não ocorrerão se o produto não retornar ao local correto para desmontagem e recuperação.

Portanto, a implementação de potenciais benefícios ambientais no design de um produto não garante que o usuário se comprometa com a sua realização. Argumentamos que, para otimizar o resultado esperado nas fases de uso e descarte de um produto, o papel do usuário deve receber atenção especial ao projetar o produto. Os *insights* sobre as expectativas e os comportamentos dos usuários podem permitir um melhor entendimento de quando e como implementar a modularidade. Como Van Nes (2010) enfatizou, cada situação tem uma estratégia mais eficaz, dependendo do tipo de produto e do tipo de usuário.

Por fim, Starr (2010) observou que a aplicação da modularidade pelos fabricantes carece de rigor acadêmico, e que não existem diretrizes que ajudem a definir quando aplicar o design modular ou qual deve ser a extensão do uso da modularidade. Como apontado em nosso estudo, os benefícios associados à modularidade são mais propagados na literatura do que suas limitações, levando a uma crença generalizada de que a modularidade é uma maneira segura de alcançar a sustentabilidade. Expandindo esta questão, Ernst (2005) discute a tendência da

pesquisa de modularidade para generalizar observações empíricas que são contexto-específicas, extrapolando essas observações para prescrições e previsões para novos casos de modularização.

2.5 Conclusões

A partir de uma revisão da literatura em duas etapas, buscou-se identificar temas comuns e relacionar os benefícios da modularidade para o design sustentável em todo o ciclo de vida. Como apresentado em nossos resultados, a modularidade está associada ao design sustentável por meio de vários benefícios. A Tabela 2-2 mostra que os benefícios da modularidade são afirmados pela literatura ao longo de todo o ciclo de vida do produto, mas a predominância de métodos mostra que a pesquisa está concentrada na fase de produção. Um esforço menos significativo foi feito para verificar se os benefícios e objetivos planejados na fase de projeto (por exemplo, atualização, reciclagem, etc.) estão sendo alcançados após a produção.

Em 2003, Gershenson et al. discutiu a falta de experimentos para provar e quantificar os benefícios reivindicados pelo design modular; apesar de todo o trabalho e pesquisa desde então, esta falta de evidência parece continuar. Em trabalhos futuros, é de suma importância que pesquisadores e projetistas desenvolvam uma melhor compreensão de todo o ciclo de vida para melhor conceber produtos modulares e para poder decidir se e quais estratégias de modularização podem ajudar a alcançar resultados sustentáveis. Nesta nova era de consumo, os consumidores estão mais conscientes das características do produto e de seus impactos negativos no meio ambiente. Sem entender os consumidores e torná-los parte do processo, os benefícios ambientais podem ser mínimos.

Apêndice A: Lista dos artigos analisados nesta revisão (autores, palavras chave e contribuições).

Modularização Sustentável		
Gu e Sosale, 1999		Apresenta um método de modularização que trata dos problemas do ciclo de vida no estágio de projeto.
Kimura et al, 2001	Product design Module structure Product life cycle	Introduz um método de modularização baseado na funcionalidade, semelhança e similaridade do ciclo de vida para famílias de produtos.
Gu e Slevinky, 2003	Design Module Mechanical bus	Propõe um método para projeto de plataforma modular para facilitar a fabricação paralela, montagem e atividades de fim de vida útil.
Qian e Zhang, 2003	Design for Environment Modular design Fuzzy Analytic Hierarch Process	Propõe um modelo quantitativo de análise ambiental para projeto modular.
Aoyama e Uno, 2003		Apresenta um método de modularização que considera vários pontos de vista, de acordo com o processo de design do produto.
Watanabe e Takata, 2005	Model change planning Modularization Life cycle design	Propõe um método para estabelecer uma relação entre a satisfação do cliente e os módulos do produto, usando a análise conjunta e o QFD.

Kondoh et al., 2005	Life cycle design Modular design Life cycle options	Introduz um método para determinar a estrutura modular do produto usando <i>Self Organizing Maps</i> .
Umeda et al., 2008	Life cycle Geometric modeling Modular design	Apresenta um método para determinar a estrutura modular de um produto combinando atributos relacionados ao ciclo de vida e a viabilidade geométrica.
Li et al., 2008	Modular design Design for the Environment Fuzzy graph theory	Propõe um método de modularização para implementar o " <i>Design for End of Life</i> " no design do produto.
Tseng, 2009	Grouping genetic algorithms Liaison graph Modularity	Propõe um método modular orientado para a reciclagem.
Qian e Zhang, 2009	Design for the environment Fuzzy analytic hierarch process Modular design	Apresenta um modelo de análise para incluir as considerações ambientais no design de produtos modulares.
Tseng et al., 2010	Grouping genetic algorithms Liaison intensity Modularity	Propõe um método orientado à modularização para desmontagem.
Smith e Yen, 2010	Green product design Atomic theory Modular design	Introduz um método de modularização usando conceitos de <i>Atomic Theory</i> para o design do produto sustentável.
Luh et al., 2010	Green product design Product modularization Product data management	Propõe um método de arquitetura de produto modularizado genérico para permitir o desenvolvimento de produtos sustentáveis e não sustentáveis ao mesmo tempo.
Yen e Smith, 2010	Atomic theory Modular design Product life-cycle	Apresenta um método que usa propriedades da <i>Atomic Theory</i> para resolver problemas de modularização no design de produto.
Yang et al., 2011	Modular design Eco-design Redesign risk control	Propõe um método modular para melhorar a capacidade de manutenção, reutilização e reciclagem em equipamentos eletrônicos (EEE).
Yan e Feng, 2012	Sustainability Modular design Modular drivers	Apresenta um método modular para alcançar design sustentável e requisitos funcionais.
Yan et al., 2012	Sustainability Modular design Modular drivers	Apresenta um método modular para alcançar design sustentável e requisitos funcionais.
Tao e Yu, 2012		Propõe um método para o planejamento familiar de produtos sustentáveis, com foco na função, estrutura e opções de ciclo de vida do produto.
Smith e Hung, 2012		Propõe um método para planejar a desmontagem paralela de produtos para remanufatura e reciclagem. Usa design modular para agrupar partes em módulos e regras recursivas para extrair peças de produtos.
Philip et al., 2012		Apresenta uma estrutura para gerar projetos modulares considerando questões sobre o fim da vida útil e da cadeia de suprimentos (para minimizar os custos e a emissão de carbono).
Yang e Liu, 2013	Remanufacturing engineering Green modular Design method	Apresenta um método de modularização para orientar a remanufatura, atendendo aos atributos ambientais e aos requisitos de remanufatura.
Tchertchian et al., 2013	Lifecycle design Modular Design Remanufacturing	Propõe um método de modularização para a identificação de módulos remanufaturados e recicláveis de acordo com o custo e o impacto ambiental.
Liu et al., 2013	Joint Optimization Green Design Modularity	Utiliza a solução Stackelberg para combinar a otimização da modularidade com objetivos conflitantes.
Ji et al., 2013	Green design Modularity Joint optimization	Propõe um modelo de otimização líder-seguidor para apoiar o design sustentável através da reutilização de materiais.
Chiu e Teng, 2013	Design for sustainability Sustainable product design Design for supply chain	Propõe um método para apoiar as decisões do fabricante no design do produto e na cadeia de suprimentos.
Chang et al., 2013	Green design Quality function deployment Modularity	Introduz um método de modularização de projeto sustentável usando a implantação de função de qualidade e a matriz de estrutura de design.
Ji et al., 2013	Modular design Product life cycle Module partition method	Propõe um método de modularização para maximizar a eficácia dos módulos ao longo do ciclo de vida do produto.

Zhang et al., 2014	Refrigerator model Modular concept Sustainable design	Discute um método para design modular no desenvolvimento de refrigeradores.
Yang et al., 2014	Reusability Eco-product family Modularity	Propõe um método para desenvolver famílias de produtos ecológicos, melhorando a capacidade de reutilização e reciclagem de resíduos.
Yang, 2014	Construction machinery Green design Modular design	Propõe um método para design modular sustentável orientado para produtos de máquinas de construção.
Yan e Feng, 2014	Sustainable design Modularity 6R concept	Propõe um método para incluir fatores sustentáveis (meio ambiente, economia e sociedade) no desenvolvimento de produtos modulares.
Cai et al., 2014	Heavy duty machine tool Green design Modular design	Propõe um método de design adaptável para a remanufatura sustentável de ferramentas pesadas.
Ma e Kremer, 2014	Modular product design Sustainable product design Key components	Fornecer uma abordagem de design modular sustentável com foco em componentes-chave.
Liu e Jia, 2014	Green design Product configuration Genetic Algorithm	Apresenta um método de modularização para projeto sustentável baseado em operadores multicamadas e algoritmos genéticos.
Chung et al., 2014	Design for life cycle Modular design Reverse logistics	Propõe um método para definir uma arquitetura modular para o produto, considerando os baixos custos do ciclo de vida e o baixo consumo de energia das fases iniciais do projeto.
Wang et al., 2014	Modular Design Machine Tools Disassembly	Introduz um método de modularização para ferramentas, focado na remanufatura.
Zhao et al., 2015	Machine design Open-architecture product Modular design	Propõe um método para integrar o <i>Quality Function Deployment</i> com o <i>Axiomatic Design</i> para o planejamento de módulos de arquitetura aberta.
Yu et al., 2015	End-of-life Product family Modularity	Propõe um método de design para problemas ecológicos e problemas de famílias de produtos.
Smith e Hung, 2015	Green design Modular design theory Parallel disassembly	Propõe um método de design sustentável para o planejamento de desmontagem paralela.
Halstenberg et al., 2015	Product modularity Modular product design Sustainable design	Introduz um método de modularização para definir a estrutura de produtos de acordo com as metas definidas pelo usuário.
You e Smith, 2016	Multi-objective modular design Green design Atomic theory	Propõe um método de modularidade sustentável usando <i>Atomic Theory</i> e o <i>fuzzy clustering</i> para criar configurações de módulo, permitindo que cada módulo atenda a um objetivo de design distinto.
Ma e Kremer, 2016	Modular product design Sustainability Key components	Apresenta um método de design modular para melhorar o ciclo de vida do produto em relação à sustentabilidade, considerando os principais componentes e incertezas no final da fase de vida.
Ma e Kremer, 2016	Modular product design Sustainable product design Social sustainability	Apresenta um método de design modular que considera as principais especificações dos componentes e o impacto do produto na sustentabilidade social.
Wang et al., 2016	Green design Modularity Product platform planning strategy	Propõe um método de design modular para estratégias de planejamento de plataforma de produtos, abordando também o impacto ambiental do produto.
Martinez e Xue., 2016	Adaptable product Product life-cycle Modular design	Introduz uma abordagem de design modular para design adaptável que considera toda a vida útil do produto.
Tseng e Chang, 2016	Design for green life cycle Modularity Disassembly planning	Apresenta um método para integrar o design modular com o planejamento de desmontagem.
Chiu et al., 2016	Design for sustainability Assemblability Greenhouse gas	Propõe um método de reformulação modular para apoiar produtos sustentáveis, considerando os materiais, a montagem e o equilíbrio de linhas na fase inicial do projeto.
LCA		
Otto et al., 2002	Product family design Eco design Life cycle assessment	Apresenta uma abordagem para integrar a avaliação do ciclo de vida de famílias de produtos em pequenas e médias empresas.

Recchioni et al., 2007	EcoDesign LCA Modularity	Estuda o papel da modularidade na redução do impacto ambiental de um produto e no aumento da interação entre o LCA e os estágios iniciais do processo de design.
Tchertchian, Liang e Millet, 2009	LCA Modularization Multiples Life Cycles	Propõe uma metodologia para avaliar os conceitos do produto do ponto de vista dos Múltiplos Ciclos de Vida.
Kuo et al, 2016	Eco-design process Depth-first search Product attributes	Propõe um método de LCA para prever o impacto ambiental dos produtos no início do processo de projeto e para reduzir o número de avaliações do ciclo de vida no desenvolvimento de novos produtos.
DfX		
Misceo et al., 2004	Eco-design Life Cycle Quality Function deployment	Propõe uma ferramenta baseada na web de fácil utilização para apoiar os estágios iniciais de design de produtos modulares, considerando simultaneamente a qualidade e o ambiente.
Dunmade, 2004	Design for environment Demufacturing Remanufacturing	Apresenta o conceito de Design for Multi Purpose Use, que inclui a capacidade de projetar produtos multifuncionais de baixo custo de ciclo de vida e baixos requisitos de know-how técnico para operar e manter.
Dunmande e Rosentrater, 2006	Design for environment Sustainable Design for Multi-lifecycle	Apresenta o conceito de Design para Multi-Lifecycles, um conceito que inclui metodologias DfX para ecologia industrial.
Zhang et al., 2007	Vehicle Design SET theory	Apresenta o uso de diferentes metodologias no desenvolvimento de um automóvel.
Tong e Ju, 2009	Green Design Disassembly Design Automotive welding assembly line	Discute os conceitos de design modular e design reciclável em montagem de soldagem automotiva.
Gu et al., 2009	Adaptable design Modular design Product life cycle	Apresenta o conceito de Design Adaptável, bem como um método de design para criar facilmente produtos adaptáveis com base em diferentes requisitos.
Zhang et al., 2011	Modular Design Life Cycle Design Range Hood	Discute a importância do design modular em todos os estágios do ciclo de vida de um produto; apresenta uma metodologia para projeto modular baseada no ciclo de vida.
Chiu e Chu, 2012	Sustainable design Sustainable product development Life cycle assessment	Apresenta uma revisão sistemática sobre design de produto sustentável.
Liu, 2013	Green Design Green Production Furniture Products	Discute a importância de adotar o design sustentável na indústria de móveis em todas as etapas do desenvolvimento do produto.
Taps et al., 2013	EcoDesign Industrial metabolism Modularity	Propõe a redefinição do conceito de Ecodesign, introduzindo a ideia de atividades do Fim da Vida para obter o metabolismo industrial.
Ostrosi et al., 2014	Modularity Product Variety Mass Customisation	Discute modularidade na intersecção de aspectos técnicos e aspectos de negócios, e analisa metodologias de modularização.
Sejayah et al., 2014	Product modularity	Apresenta ferramentas de design e estratégias para desenvolver um Índice de Design Sustentável para a indústria moveleira.
Li et al., 2015	Product eco-design Design for sustainability Eco-design software tools	Apresenta o estado-da-arte em pesquisa de design de produto ambientalmente consciente.
Go et al., 2015	Sustainable development Design for X Multiple life-cycles	Apresenta o conceito de Design para Múltiplos Ciclos de Vida como uma combinação de diferentes abordagens de Design para X.
Nielsen e Brunoe, 2016	Eco-design Cradle to cradle Modular architecture	Apresentar diretrizes para a arquitetura do produto em um contexto <i>Cradle to Cradle</i> .
Huang et al., 2016	Corporate Memory Modularization Product design knowledge	Propõe uma plataforma para usar o conhecimento da Memória Corporativa para reutilização, reutilização e reciclagem.
Bonvoisin, 2016	Open source innovation Sustainable product design Eco-design	Apresenta o conceito de <i>Open Source Design</i> , uma abordagem para o desenvolvimento de produtos que leva a padrões de produção e consumo mais eficientes.

Song e Sakao, 2017	Comprehensive design framework Design conflict resolving Modularization	Propõe uma estrutura sistemática com um processo de design para personalização do Sistema de Serviços do Produto usando métodos diferentes e incluindo requisitos ambientais.
Revisões de Modularidade		
Jose e Tollenare, 2005	Design optimization Modular design Product family design	Apresenta uma revisão de literatura sobre design modular, explorando o uso de modularidade para criar variedade.
Bonvoisin et al., 2016	Modularity Design structure matrix Product architecture	Revisão de literatura de design modular, apresentando métricas, drivers e princípios de design para modularização.
Ma e Kremer, 2016	Modular product design Sustainability Sustainable product	Apresenta uma revisão de literatura associando o design modular à sustentabilidade e categoriza os artigos de acordo com os principais temas de sustentabilidade.
Manufatura		
Ji et al., 2006	Inverse manufacturing Reuse Lifecycle	Apresenta um modelo de danos para discutir falhas em produtos montados com módulos reutilizados em uma estratégia de fabricação inversa.
Wang et al., 2010	Green Design Module Design NC machine Tool	Estuda a relação entre o design sustentáveis e ferramentas reconfiguráveis.
Fang et al, 2016	Sustainable machine design Sustainable design index Machine tools design	Apresenta uma abordagem para a análise de ferramentas CNC cobrindo aspectos ambientais, econômicos, sociais e tecnológicos.
Uso		
Ray e Ray, 2010	Emerging markets Modular design Architectural innovation	Discute o tipo de inovação que efetivamente atende às necessidades dos mercados emergentes e apresenta três fatores críticos para a inovação.
Durand et al., 2010		Explora potenciais efeitos colaterais da arquitetura modular do produto para o ambiente durante a fase de uso; organiza esses resultados em diretrizes para o design sustentável.
Cheng, 2012	Sustainable concept Product design Modular design	Discute a pesquisa em design sustentável através de uma visão humana, considerando a proteção de recursos.
Agrawal e Ulku, 2013	Modularity Green product design Sustainability	Analisa o conceito de atualização modular e sua capacidade de reduzir o impacto ambiental e gerar maior lucro.
Cadeia de Suprimentos		
Chung et al., 2014	Design for life cycle Design for logistics Modular design	Investiga os efeitos da cadeia de suprimentos no projeto modular e avalia o custo e o impacto ambiental em diferentes estados da cadeia de fornecimento.

2.6 Referências

- AGRAWAL, V.V.; ULKU, S. The Role of Modular Upgradability as a Green Design Strategy. *Manuf. Serv. Oper. Manag.* 15, 640-648, 2013.
- AOYAMA, K.; UNO, Y. Modular Design Supporting System with a step-by-step design approach - 2nd report: Management of the priority information between interfaces. In *EcoDesign Conference*, Tokyo, 2003.
- ARNHEITER, E.; HARREN, H. Quality Management in a Modular World. *The Tqm Magazine* 18, 87-96, 2006.
- BALDWIN C.Y.; CLARK, K.B. Managing in an age of modularity, in: Garud, R., Kimaraswamy, A., Langlois, R.N. (Eds), *Managing in the modular age: Architectures, networks, and organizations*, Blackwell Publishers, 149, 84-93, 2003.

- BHAMRA, T.; LILLEY, D.; TANG, T. Sustainable use: changing consumer behaviour through product design. In *Changing the Change: Design Visions, Proposals and Tools Conference*, Turin, 2008.
- BIGGEMANN, S.; WILLIAMS, M.; KRO, G. Building in sustainability, social responsibility and value co-creation. *JBIM* 29, 304-312, 2014
- BLACKENFELT, M. Managing complexity by product modularization: balancing the aspects of technology and business during the design process. Doctoral Dissertation, The Royal Institute of Technology, Stockholm, 2001.
- BONVOISIN J. Implications of Open Source Design for Sustainability, in: Setchi R., Howlett R., Liu Y., Theobald P. (eds), *Sustainable Design and Manufacturing 2016. Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol 52. Springer, 2016.
- BONVOISIN, J.; HALSTENBERG, F.; BUCHERT, T.; STARK, R. A systematic literature review on modular product design. *J Eng Design* 27, 488–514, 2016.
- BOVEA, M.D.; PÉREZ-BELIS, V. A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product desing process. *J Clean Prod.* 20, 61-71, 2012
- CAI, L.; LI, K.; CHENG, Q.; QI, Z.; GU, P. Adaptable Design Methodology of Heavy Duty Machine Tool for Green Remanufacturing. *AMM* 496-500, 2672-2678, 2014.
- CHANG, T.; WANG, C.; WANG, C. A systematic approach for green design in modular product development. *Int J Adv Manuf Technol* 68, 2729–2741, 2013.
- CHENG, J. Product Design Research based on Sustainable Concept. *Adv Mat Res* 479-481, 1070-1073, 2012.
- CHIU, M.; CHU, C. Review of Sustainable Product Design from Life Cycle Perspectives. *Int J Precis Eng Manuf.* 13, 1259-1272, 2012.
- CHIU, M.; TENG, L. Sustainable Product and Supply Chain Design Decisions under Uncertainties. *Int J Precis Eng Manuf* 14, 1953-1960, 2013.
- CHIU, M.C.; CHANG, C.H.; CHEN, Y.T.; CHIOU, J.Y.; CHANG, Y.J. Redesign for sustainability and assemblability using particle swarm optimization method. *Journal of Industrial and Production Engineering* 33, 103-113, 2016.
- CHIU, M.C.; OKUDAN, G. An investigation on the impact of product modularity level on supply chain performance metrics: an industrial case study. *J Intell Manuf* 25, 129-145, 2014.
- CHUNG, W.H.; KREMER, G.E.O.; WYSK, R.A. A Modular Design approach to improve product life cycle performance based on the optimization of a closed-loop supply chain. *J Mech Design* 136, 2014a.
- CHUNG, W.H.; KREMER, G.E.O.; WYSK, R.A. Life cycle implications of product modular architectures in closed-loop supply chains. *Int J Adv Manuf Tech* 70, 2013-2028, 2014b.
- CHRISTOPHER, M. *Logistics & Supply Chain Management*, Pearson, UK, 2011.
- DE MEDEIROS, J.; RIBEIRO, J.L.D.; CORTIMIGLIA, M.N. Success factors for environmentally sustainable product innovation: a systematic literature review. *J Clean Prod.* 65, 76-86, 2014.
- DUNMADE, I. Design for Multipurpose Use: an Application of DfE Concept in a Developing Economy. In *Environmentally Conscious Manufacturing IV Conference*, Philadelphia, 2004.
- DUNMANDE, I.; ROSENTRATER, K. Designing for multi-lifecycle to promote industrial

- ecology philosophy. In Environmentally Conscious Manufacturing VI Conference, Boston, 2006.
- DURAND, J.; TELENKO, C.; SEEPERSAD, C. How Does Modularity Affect Green Design? In ASME IDETC/CIE Conference, Quebec, 2010.
- ERENS, F.J. The Synthesis of Variety: developing Product Families. Doctoral Dissertation, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 1996.
- ERNST, D. Limits to Modularity: Reflections on Recent Developments on Chip Design. *Ind Innov* 12, 303-335, 2005.
- FANG, F.; CHENG, K.; DING, H.; CHEN, S.J.; ZHAO, L. Sustainable design and analysis of CNC machine tools: sustainable design index based approach and its application perspectives. In ASME MSEC Conference, Virginia, 2016.
- FIXSON, S.K. Product architecture assessment: a tool to link product, process and supply chain decisions. *J Oper Manag* 23, 345 – 369, 2005.
- FRANTZI, K.; ANANIADOU, S.; MIMA, H. Automatic recognition of multi-word terms. *International Journal of Digital Libraries* 3,117-132, 2000.
- GERSHENSON J.K.; PRASAD G.J.; ZHANG Y. Product Modularity: definitions and benefits. *J. Eng. Design* 14, 295-313, 2003.
- GERSHENSON J.K.; PRASAD G.J.; ZHANG Y. Product Modularity: measures and design methods. *J. Eng. Design* 15, 33-51, 2004.
- GERSHENSON, J.K.; PRASAD, G.J.; ALLAMNENI, S. Modular product design: a life cycle view. *J. Integr. Des. Process Sci* 3, 3-26, 1999.
- GO, T.F.; WAHAB, D.A.; HISHAMUDDIN, H. Multiple generation life-cycles for product sustainability: the way forward. *J Clean Prod.* 95, 16-29, 2015.
- GU, P.; SLEVINSKY, M. Mechanical bus for modular product design. *CIRP Ann-Manuf Tech* 52, 113-116, 2003.
- GU, P.; SOSALE, S. Product Modularization for life cycle engineering. *Robot Comput Integr Manuf* 15, 387- 401, 1999.
- GU, P., XUE, D., NEE, A.Y.C. Adaptable Design: concepts, methods and applications. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf* 223, 1367-1387, 2009.
- HALSTENBERG, F. A.; BUCHERT, T.; BONVOISIN, J.; LINDOW, K.; STARK, R. Target-oriented Modularization—Addressing Sustainability Design Goals in Product Modularization. *Proc CIRP* 29, 603 – 608, 2015.
- HAUSCHILD, M.; JESWIET, J.; ALTING, L. Design for Environment - Do We Get the Focus Right? *CIRP Ann- Manuf Tech* 53, 1-4, 2004.
- HE, B., GU, Z. Sustainable design synthesis for product environmental footprints. *Design Stud* 45, 159-186, 2016.
- HOLMQVIST, T.K.P.; PERSSON, M.L. Analysis and improvement of product modularization methods: their ability to deal with complex products. *Systems Engineering* 6, 195-209, 2003.
- HOWARD, M.; SQUIRE, B. Modularization and the impact on supply relationships. *Int J Oper Prod Man* 27, 1192-1212, 2007.
- HSUAN, J. Impacts of supplier-buyer relationships on modularization in new product development. *European Journal of Purchasing & Supply Management* 5, 197-209, 1999.

- HUANG G. Q. *Design for X: concurrent engineering imperatives*, Chapman & Hall, London, 2012.
- HUANG, C.; CHUANG, H.; CHEN, S. Corporate Memory: Design to better reduce, reuse and recycle. *Comput Ind Eng* 91, 48–65, 2016.
- IJOMAH, W.L.; MCMAHON, C.A.; HAMMOND, G.P.; NEUMAN, S.T. Development of design for remanufacturing guidelines to support sustainable manufacturing. *Robot Cim-Int Manuf* 23, 712-719, 2007.
- IRALDO, F.; FACHERIS, C.; NUCCI, B. Is product durability better for environment and for economic efficiency? A comparative assessment applying LCA and LCC to two energy-intensive products. *J Clean Prod.* 140, 1353-1364, 2017.
- ISO 14044, 2006. *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines*.
- JESWIET, J.; HAUSCHILD, M. EcoDesign and future environmental impacts. *Mater. Des.* 26, 629-634, 2005.
- JI, Y.; CHEN L.Y.; NARITA, H.; FUJIMOTO, H. Analysis of module reuse in inverse manufacturing. *Int J Innov Comput I* 2, 1381-1390, 2006.
- JI, Y.; JIAO, R.J.; CHEN, L.; WU, C. Green modular design for material efficiency: a leader-follower joint optimization model. *J Clean Prod.* 41, 187-201, 2013.
- JI, Y.J.; CHENG, X.B.; QI, G.N.; SONG, L.W. Modular design involving effectiveness of multiple phases for product life cycle. *Int J Adv Manuf Tech* 66, 1475-1488, 2013.
- JOSE, A.; TOLLENAERE, M. Modular and platform methods for product family design: literature analysis. *J Intell Manuf* 16, 371-390, 2005.
- JOVANE, F.; YOSHIKAWA, H.; ALTING, L.; BOER, C.R.; WESTKAMPER, E.; WILLIAMS, D.; TSENG, M.; SELIGER, G.; PACI, A.M. The incoming global technological and industrial revolution towards competitive sustainable manufacturing. *CIRP Ann-Manuf Tech* 57, 641-659, 2008.
- KEOLEIAN, G.A.; MENEREY, D. Sustainable Development by Design: Review of Life Cycle Design and Related Approaches. *Air Waste* 44, 645-668, 1994.
- KIM, H.C.; KEOLEIAN, G.A.; HORIE, Y.A. Optimal household refrigerator replacement policy for life cycle energy, greenhouse gas emissions, and cost. *Energ Policy* 34, 2310-2323, 2006.
- KIMURA, F.; KATO, S.; HATA, T.; MASUDA, T. Product modularization for parts reuse in inverse manufacturing. *CIRP Ann-Manuf Tech* 50, 89-92, 2001.
- KITCHENHAM, B. *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*. EBSE Technical Report, UK, 2007.
- KNIGHT, P.; JENKINS, J.O. Adopting and applying eco-design techniques: a practitioner's perspective. *J Clean Prod.* 17, 549–558, 2009.
- KONDOH, S.; SHIMABUKURO, A.; UMEDA, Y. Development of modular design method for inverse manufacturing. In *EcoDesign Conference*, Tokyo, 2005.
- KRISHNAN, V.; GUPTA, S. Appropriateness and Impact of Platform-Based Product Development. *Manag. Sci.* 47, 52-68, 2001.
- KUO, T.; SMITH, S.; SMITH, G.; GUANG, S.H. A predictive product attribute driven eco-

- design process using depth-first search. *J Clean Prod.* 112, 3201-3210, 2016.
- LAU, A.K. Critical success factors in managing modular production design: six company case studies in Hong Kong, China and Singapore. *J. Eng. Technol. Manage.* 28, 168-183, 2011.
- LAU, A.K., YAM, R.C.M., TANG, E. The Impact of Product Modularity on New Product Performance: Mediation by Product Innovativeness. *J. Prod. Innovat. Manag.* 28, 270–284, 2011.
- LI, A.Q.; FOUND, P. Towards Sustainability: PSS, digital technology and value co-creation. *Proc CIRP* 64, 79-84, 2017.
- LI, J.Z.; ZHANG, H.C.; GONZALEZ, M.A.; YU, S. A multi-objective fuzzy graph approach for modular formulation considering end-of-life issues. *Int J Prod Res* 46, 4011-4033, 2008.
- LI, Z.K.; GÓMEZ, J.M.; PEHLKEN, A. A systematic review of environmentally conscious product design. In *Enviroinfo and ICT for Sustainability* 22, 197-206, 2015.
- LIDMAN, K.; RENSTROM, S. How to Design for Sustainable Behavior. Master Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, 2011.
- LILLEY, D. Design for sustainable behavior: strategies and perceptions. *Design Stud* 30, 714.720, 2009.
- LIU, D.; JIA, F. A Method of the Green Product Configuration Design based on Multi-Layer Generalized Operator and Genetic Algorithm. *AMM* 483, 542-549, 2014.
- LIU, F. Brief Analysis on Green Design and Manufacture of Furniture Products. *Adv Mat Res* 694-697, 3269-3272, 2013.
- LIU, Y.; JI, Y.; JIAO, R.J. A Stackelberg Solution to Joint Optimization Problems: A Case Study of Green Design. *Procedia Comput Sci* 16, 333-342, 2013.
- LOCKTON, D.; HARRISON, D.; STANTON, N. Making the user more efficient: Design for sustainable behaviour. *Int. J. Sustainable Eng* 1, 3-8, 2008.
- LOCKTON, D., HARRISON, D., STANTON, N.A. The Design with Intent Method: a design tool for influencing user behaviour. *Appl Ergon* 41, 382-392, 2010.
- LUH, Y.; CHU, C.; PAN, C. Data management of green product development with generic modularized product architecture. *Comput Ind* 61, 223–234, 2010.
- LUTTROP, C., LAGERSTEDT, J. EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. *J Clean Prod.* 14, 1396-1408, 2006.
- MA, J.; KREMER, G.E.O. A Modular Product design method to improve product social sustainability performance. In *ASME IDETC/CIE Conference*, Boston, 2016.
- MA, J., KREMER, G.E.O. A sustainable modular product design approach with key components and uncertain end-of-life strategy consideration. *Int J Adv Manuf Tech* 85, 741-763, 2016.
- MA, J., KREMER, G.E.O. A systematic literature review of modular product design (MPD) from the perspective of sustainability. *Int. J Adv Manuf Technol* 86, 1509-1539, 2016.
- MA, J.F.; KREMER, G.E.O. A modular product design approach with key components consideration to improve sustainability. In *ASME IDETC/CIE Conference*, Buffalo, NY, 2014.
- MACDONALD, E.F.; SHE, J. Seven cognitive concepts for successful eco-design. *J Clean Prod.* 92, 23-36, 2015.

- MARTINEZ, M.; XUE, D. Development of adaptable product based on modular design and optimization methods. *Proc CIRP* 50, 70-75, 2016.
- MISCEO, M.; BUONAMICI, R.; BUTTOL, P.; NALDESI, L.; GRIMALDI, F.; RINALDI, C. TESPI (Tool for Environmental Sound Product Innovation): a simplified software tool to support environmentally conscious design in SMEs. In *Environmentally Conscious Manufacturing IV Conference*, Philadelphia, 2004.
- NEWCOMB, P.J.; BRAS, B.; ROSEN, D.W. Implications of modularity on product design for the life cycle. In *ASME DETC96/DTM-1516 California*, 1996.
- NEWCOMB, P.J.; BRAS, B.; ROSEN, D.W. Implications of modularity on product design for the life cycle. *J Mech Design* 120, 483-490, 1998.
- NIELSEN K.; BRUNOE T.D. Cradle to Cradle Products, Modularity and Closed Loop Supply Chains. In: Umeda S., Nakano M., Mizuyama H., Hibino N., Kiritsis D., von Cieminski G. (eds) *Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth. APMS 2015. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol 459. Springer, Cham, 2015.
- OBERENDER, C.; BIRKHOFFER, H. Estimating environmental impacts: the use-phase analysis matrix – a use phase centered approach. In *ICED Conference*, Stockholm, 2003.
- OBERENDER, C.; WEGER, O.; BIRKHOFFER, H.; SAUER, J. Ecological design for the usage phase: an interdisciplinary approach to design for environment. In *EcoDesign Conference*, Tokyo, 2001.
- OSTROSI, E.; STJEPANDIC, J.; FUKUDA, S.; KURTH, M. Modularity: new trends for product platform strategy support in concurrent engineering. In *ISPE CEconf*, 414-423, 2014.
- OTTO, H.E.; MUELLER, K.G.; KIMURA, F.; GERMANI, M.; MANDORLI, F. Integrating Life Cycle Aspects Within Product Family Design: An Example for SMEs, in: Kovács G.L., Bertók P., Haidegger G. (eds) *Digital Enterprise Challenges. IFIP — The International Federation for Information Processing*, vol 77. Springer, Boston, 2002.
- PAUL, I.D.; BHOLE, G.P.; CHAUDHARI, J.R. A review on green manufacturing: It's important, methodology and its application. *Proc Mat Sci* 6, 1644 – 1649, 2014.
- PHILIP, N.; OKUDAN, G.E.O.; HAAPALA, K.R.; KIM, K.Y. Computer-aided generation of modular designs considering component end-of-life options: implications for the supply chain. In *ASME IDETC/CIE Conference*, Chicago, 2012.
- PIRAN, F.A.S.; LACERDA, D.P.; CAMARGO, L.F.R.; VIERO, C.F.; DRESH, A.; CAUCHIK-MIGUEL, P.A. Product modularization and effects on efficiency: an analysis of a bus manufacturer using data envelopment analysis (DEA). *Int. J Production Economics* 182, 1-13, 2016.
- QIAN, X.; ZHANG, H.C. Design for Environment: An Environmentally Conscious Analysis Model for Modular Design. In *IEEE T Electron Pa M* 32, 164-175, 2009.
- QIAN, X.Q.; ZHANG, H.C. Design for environment: An environmental analysis model for the modular design of products. In *IEEE Int Symp Electr*, 114-119, 2003.
- RAY, P.K.; RAY, S. Resource-Constrained Innovation for Emerging Economies: the case of the Indian Telecommunications Industry. In *IEEE T Eng Manage*, 57, 144-156, 2010.
- RECCHIONI, M.; MANDORLI, F.; GERMANI, M.; FARALDI, P.; POLVERINI, D. Life-Cycle assessment simplification for modular products. In *Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses* 53-58, 2007.

- SACHS, J.D. *The Age of Sustainable Development*. Columbia University Press, New York, 2014.
- SAKAO, T.; FARGNOLI, M. Customization in Ecodesign. *J. Ind. Ecol.* 14, 529-532, 2010.
- SAUER, J.; WIESE, B.S.; RÜTTINGER, B. The utilisation phase as a critical element in ecological design, in: Hundal, M.S. (Ed), *Mechanical life cycle handbook: good environmental design and manufacturing*, Marcel Dekker, New York, 2009.
- SEJAYAH, N.; CHENG, K.; BATEMAN, R. Development of sustainable design index for office furniture design and its CAD-based implementation. In *ASME IDETC/CIE Conference*, Buffalo, NY, 2014.
- SKERLOS, S.J. Promoting effectiveness in Sustainable Design. *Proc Cirp* 29, 13-18, 2015.
- SMITH, R.J. *The Impact of Modular Design on Product Use and Maintenance*. Master Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2009.
- SMITH, S.; HUNG, P. A novel selective parallel disassembly planning method for green design. *J Eng Design* 26, 283–301, 2015.
- SMITH, S.; HUNG, P.Y. A Parallel Disassembly Method for Green Product Design. In *Electronics Goes Green 2012+ (EGG)*, 1-6, 2012.
- SMITH, S.; YEN, C. Green product design through product modularization using atomic theory. *Robot Comput Integr Manuf* 26, 790–798, 2010.
- SONG, W.; SAKAO, T. A customization-oriented framework for design of sustainable product/service system. *J Clean Prod.* 140, 1672-1685, 2017.
- SOSALE, S., HASHEMIAN, M., GU, P. Product modularization for reuse and recycling. *Concurrent Product Design and Environmentally Conscious Manufacturing*. ASME, DE-94/MED 5, 195–206, 1997.
- SPANGERBERG, J.; FUAD-LUKE, A.; BLINCOE, K. Design for Sustainability (DfS): the interface of sustainable production and consumption. *J Clean Prod.* 18, 1485-1493, 2010.
- STARR, M.K. Modular production – a 45-year-old concept. *Int J Oper Prod Man* 30, 7-19, 2010.
- STEWART, B.; YAN, X. Modular Product Family Development within a SME, in: Yan, X., Ion, W.J., Eynard, B. (Eds), *Global design to gain a competitive edge: a holistic and collaborative design approach based on computational tools*, Springer, 2008.
- TANG, T., BHAMRA, T.A. Understanding consumer behavior to reduce environmental impacts through sustainable product design. In *DRS Conference*, Sheffield, UK, 2009.
- TAO, J.; CHEN, Z.; YU, S.; LIU, Z. Integration of Life Cycle Assessment with computer-aided product development by a feature-based approach. *J Clean Prod.* 143, 1144-1164, 2017.
- TAO, J.; YU, S.R. Sustainable Product Family Planning based on Product Life Cycle Simulation. In *ASME IDETC/CIE*, Chicago, 2012.
- TAPS, S.B.; BRUNO, T.D.; NIELSEN, K. From EcoDesign to Industrial Metabolism: Redefinition of Sustainable Innovation and Competitive Sustainability. In *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*, Springer, Berlin, 2013.
- TESTA, F.; NUCCI, B.; TESSITORE, S.; IRALDO, F.; DADDI, T. Perception on LCA implementation: evidence from a survey on adopters and nonadopters in Italy. *Int J Life Cycle Assess* 21, 1501-1513, 2016.

- TCHERTCHIAN, N.; LIANG, H.N.; MILLET, D. The Influence of Multiple Life Cycles on the Environmental Impact of a Product. In ICED Conference, California, 2009.
- TCHERTCHIAN, N.; MILLET, D.; PIALOT, O. Modifying module boundaries to design remanufacturable products: the modular grouping explorer tool. *J Eng Design* 24, 546–574, 2013.
- TONG, G.Y.; JU, L. Design of Automotive Body Welding Assembly Line Based on Green Design. In ICMIE 1-2, 1400-1405, 2009.
- TSENG, H.; CHANG, C.; CHENG, C. Disassembly-oriented assessment methodology for product modularity. *Int J Prod Res* 48, 4297–4320, 2010.
- TSENG, H.; CHANG, C.; LI, J. Modular design to support green life-cycle engineering. *Expert Syst Appl* 34, 2524-2537, 2008.
- TSENG, H.E. A Systematic Assessment for Modular Product Design: A Design for End-of-life Perspective. In OSCM 3, 98-105, 2009.
- TSENG, H.E.; CHANG, S.H. Life cycle Design through modularity and disassembly. In IS3C Conference, Xi'an, 2016
- ÜLKÜ M.A.; HSUAN J. Towards sustainable consumption and production: Competitive pricing of modular products for green consumers. *J Clean Prod.* 142, 4230-4242, 2016.
- ÜLKÜ, S.; DIMOFTE, C.V.; SCHMIDT, G.M. Consumer Valuation of Modularly Upgradeable Products. *Manage Sci* 58, 1761-76, 2012.
- ULRICH, K.T.; EPPINGER, S. *Product Design and Development*, McGraw-Hill, New York, 1995.
- ULRICH, K. Fundamentals of Product Modularity, in: Dasu S., Eastman C. (eds) *Management of Design*. Springer, Dordrecht, 1994.
- ULRICH, K. The role of product architecture in the manufacturing firm. *Res Policy* 24, 419-441, 1995.
- UMEDA, Y.; FUKUSHIGE, S.; TONOIKE, K.; KONDOH, S. Product modularity for life cycle design. *CIRP Ann- Manuf Tech* 57, 13–16, 2008.
- VAN NES, N. Understanding replacement behaviour and exploring design solutions, in: Cooper, T., *Longer lasting products: alternatives to the throwaway society*. Routledge, New York, 2010.
- WANG, P.; LIU, Y.X.; ONG, S.K.; NEE, A.Y.C. Modular design of machine tools to facilitate design for disassembly and remanufacturing. *Proc CIRP* 15, 443-448, 2014.
- WANG, Q.; TANG, D.B.; YIN, L.L.; YANG, J. A Method for green modular design considering product platform strategy. In DET Conference, Nanjing, 2016.
- WANG, Y.J.; WU, F.J.; XIE, F.; YAO, K.; HOU, Z.M. Research and Design on Green Reconfigurable NC Machine Tool. *Adv Mat Res* 102, 866-869, 2010.
- WATANABE, M.; TAKATA, S. Module-based model change planning in consideration of environmental impact and customer satisfaction. In EcoDesign Conference, Tokyo, 2005.
- WESTKAMPER, E.; ALTING, L.; ARNDT, G. Life Cycle Management and Assessment: Approaches and Visions Towards Sustainable Manufacturing. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* 215, 599-626, 2000.

- XEROX REPORT ON GLOBAL CITIZENSHIP. Sustainable Services and Products. Disponível em: <https://www.xerox.com/corporate-citizenship/2014/sustainability/sustainable-products/enus.html>. Acesso em 26 out 2016.
- YAN, J.; FENG, C. Sustainability-oriented Product Modular Design Using Design Structure Matrix (DSM) Method. *AMM* 128-129, 1468-1471, 2011.
- YAN, J.; FENG, C. Sustainable design-oriented product modularity combined with 6R concept: a case study of rotor laboratory bench. *Clean Techn Environ Policy* 16, 95–109, 2014.
- YAN, J.H.; FENG, C.H.; CHENG, K. Sustainability-oriented product modular design using kernel-based fuzzy c-means clustering and genetic algorithm. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* 226, 1635-1647, 2012.
- YANG, J.R. The research of design method on green modular that oriented Construction Machinery. *Adv Mat Res* 1049-1050, 828-832, 2014.
- YANG, J.R.; LIU, Q.Y. Design Method Research on Green Modular that Oriented Remanufacturing Engineering. *AMM* 365, 545-548, 2013.
- YANG, Q.; YU, S.; JIANG, D. A modular method of developing an eco-product family considering the reusability and recyclability of customer products. *J Clean Prod.* 64, 254-265, 2014.
- YANG, Q.; YU, S.; SEKHARI, A. A modular eco-design method for life cycle engineering based on redesign risk control. *Int J Adv Manuf Technol* 56, 1215–1233, 2011.
- YEN, C.C.; SMITH, S. Product modular design using atomic theory. In *ASME IDETC/CIE Conference*, Montreal, 2010.
- YOU, Z.; SMITH, S. A multi-objective modular design method for creating highly distinct independent modules. *Res. Eng. Des.* 27, 179-191, 2016.
- YU, S.; YANG, Q.; TAO, J.; XU, X. Incorporating Quality Function Deployment with modularity for the end-of-life of a product family. *J Clean Prod.* 87, 423-430, 2015.
- ZETTL, M.; SELIGER, G.; BILGEN, E. Product Life Cycle Oriented Methodology Supporting the Development of Modular Product Structures. In *Global Conference on Sustainable Development and Life Cycle Engineering 4*, São Carlos, 2006.
- ZHANG, J.; WANG, W.; CAO, S. Module Design Based on Life Cycle Design. *Adv Mat Res* 228-229, 150-161, 2011.
- ZHANG, J.M.; XU, J.; TANG, B. Introduction of Modular Design in the Conceptual Design of Refrigerators. *AMM* 456, 96-99, 2014.
- ZHANG, Z.R.; DUAN, Q.J.; LI, Y.; LI, Y.U. Creation process of modular electronic retail vehicle. In *ICMIE* 2122-2126, 2007.
- ZHAO, C.; PENG, Q.J., GU, P.H. Development of a paper-bag-folding machine using open architecture for adaptability. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* 229, 155-169, 2015.

3. REPARO DE PRODUTOS ELETRÔNICOS: O PAPEL DOS STAKEHOLDERS NA REALIZAÇÃO DOS BENEFÍCIOS DA MODULARIDADE

Resumo: A modularidade desempenha um papel importante na extensão da vida útil dos produtos, facilitando a manutenção, o reparo e as atualizações. Essas atividades apresentam grande potencial para reduzir o impacto ambiental do produto, pois atrasam os impactos de seu descarte e substituição. No entanto, as decisões do usuário também afetam o impacto ambiental e a vida útil do produto. Este artigo tem como objetivo identificar as atuais práticas dos usuários relativas ao reparo de produtos eletrônicos, bem como identificar iniciativas dos demais stakeholders para promover o reparo. Esse conhecimento pode afetar a decisão de quando e como usar a modularidade no projeto de produtos eletroeletrônicos. Para atingir este objetivo, foi combinada uma revisão sistemática da literatura e uma uma revisão de iniciativas dos stakeholders para promover o reparo. Na revisão sistemática da literatura foram selecionados e analisados 10 artigos, e foram identificados os seguintes tópicos; motivações para o reparo, tipologia do produto, tipos de reparo, barreiras para o reparo e conseqüências do reparo. Esta pesquisa aponta que a modularidade é uma estratégia muito importante para preparar a arquitetura de produtos para facilitar o reparo. No entanto, para ser eficaz, deve estar alinhada com modelos de negócios que promovam a sustentabilidade, permitindo que os usuários realizem o reparo. A pesquisa de iniciativas de stakeholders enfatiza a importância dos modelos de negócio apontada pela literatura, e também aponta os papéis de governos e ONG's na promoção do reparo de produtos. Essa compilação de resultados contribui para uma visão mais sistêmica do design sustentável, que contempla as iniciativas das partes interessadas que podem ser adotadas em conjunto com o projeto modular para garantir uma maior realização de reparos.

Palavras chave: modularidade, reparo, lixo eletrônico, design modular, design sustentável

Abstract: Modularity plays an important role in the extension of the lifespan of products through the facilitation of maintenance, repair, and upgrades. These activities present great potential to reduce the environmental impact of the product since the impact of its' disposal and replacement are delayed. However, user's decisions also affect the environmental impact and lifespan of the product. This article aims to identify the current practices of users regarding the repair of electronic products, as well as identify initiatives of other stakeholders to promote the repair. This knowledge can affect the decision of when and how to use modularity in the design of electrical and electronic products. To achieve this goal, we conducted a systematic review and a review of stakeholders' initiatives in place to promote product repair. Ten articles were selected and analyzed in the systematic literature review, the following topics were identified; motivations for repair, product typology, types of repair, barriers to repair and consequences of repair. Our research point out that modularity is a very important strategy that can prepare the architecture of products to facilitate repair. However, to be effective it must be aligned with business models that promote sustainability, allowing users to perform the repair. Moreover, the review of stakeholder initiatives emphasizes the importance of the business models described in the literature and emphasizes the role of governments and NGOs in the promotion of product repair. Our results contribute to a more systemic view of sustainable design, which includes stakeholder initiatives that can be adopted in conjunction with modular design to ensure more repairs.

Keywords: Modularity, repair, e-waste, modular design, sustainable design

3.1 Introdução

Avanços tecnológicos têm levado os consumidores a buscar equipamentos mais modernos, encurtando a vida útil dos produtos, promovendo a obsolescência e gerando toneladas de lixo eletrônico (BABBITT et al., 2009; SABBAGHI et al., 2015). Consequentemente, o lixo eletrônico, ou *e-waste*, tornou-se a categoria de resíduos que mais cresce nos países desenvolvidos (BALDE et al., 2015) e motivo de preocupação nos países em desenvolvimento. O lixo eletrônico é composto por equipamentos eletroeletrônicos (EEE) descartados como computadores, televisores e telefones celulares (ROBINSON, 2009). Para mitigar esse problema, agências governamentais e organizações de proteção ambiental enfatizam a necessidade de reduzir o impacto ambiental de produtos eletrônicos ao longo de seu ciclo de vida, e de processamento especial do lixo eletrônico (NNORON; OSIBANJO, 2008; SABBAGHI et al., 2016). A indústria tem um papel importante nessa mudança mudando o foco dos processos de produção para os produtos e seus ciclos de vida.

O ciclo de vida engloba todas as atividades na vida de um produto, desde o projeto até o descarte, incluindo fabricação, montagem, testes, distribuição, operação, serviços, reutilização, remanufatura e reciclagem (GU; SOSALE, 1999). Segundo Umeda et al. (2008) a modularidade é um método chave para vincular estratégias de ciclo de vida ao design de produto apropriado. Devido à sua capacidade de influenciar o ciclo de vida do produto, a modularidade é vista como um facilitador para o design sustentável (NEWCOMB et al., 1998; ZETTL et al., 2006; TSENG et al., 2008; UMEDA et al., 2008; SMITH; YEN, 2010).

A modularidade não é novidade na indústria eletrônica. Desde a década de 1980, empresas como IBM, Compaq e Gateway usam essa estratégia para simplificar o design e a montagem de seus produtos (KUMAR; CRAIG, 2007; RO et al., 2007). Além dos benefícios relacionados à produção, o design modular pode facilitar as operações de recuperação de valor no final do ciclo de vida e prolongar a vida útil de um produto através de esforços de manutenção, reparos e atualizações (BONVOISIN et al., 2016; SONEGO et al., 2018). A extensão da vida útil é importante porque os ciclos de vida mais curtos estão entre os fatores que mais contribuem para o aumento do lixo eletrônico (BALDE et al., 2015). Segundo Cooper (2010), o aumento da vida útil pode reduzir o uso de recursos finitos, diminuir a emissão de poluentes e a quantidade de resíduos descartados nos aterros sanitários.

Em geral, extensão da vida útil e durabilidade estão ligados à qualidade, materiais e robustez do produto (FLETCHER, 2012). A vida útil do produto não é apenas determinada pelo projeto e fabricação, mas também pelo comportamento do consumidor, e que esforços deliberados são necessários para prolongar o ciclo de vida e explorar completamente a potencial

vida útil do produto (COOPER, 2010; GURAUSKIENE, 2008; SAUER et al., 2009; PÉREZ-BELIS et al., 2017). Ou seja, se o usuário não reparar ou descartar o produto conforme planejado pelo fabricante, seu potencial sustentável presumido não será alcançado.

O objetivo deste estudo é identificar as atuais práticas dos usuários relativas ao reparo de produtos eletrônicos, bem como identificar iniciativas dos demais stakeholders para promover ações de reparo. A ideia é contribuir para uma visão mais sistêmica do design sustentável que contemple iniciativas que possam ser adotadas em conjunto com o design modular para promover o reparo de produtos.

Para obter uma melhor perspectiva do assunto, este estudo combina uma revisão sistemática da literatura e uma revisão de iniciativas práticas dos demais stakeholders para promover o reparo.

3.2 Referencial

O processo de modularização consiste em agrupar os componentes do produto em módulos e definir as interfaces entre esses módulos (HOLMQVIST; PERSSON, 2003). No desenvolvimento de produtos, as principais características atribuídas à modularidade são independência estrutural, independência funcional, minimização de interfaces e interações com outros módulos ou influências externas (STEWART; YAN, 2008). As interfaces são as superfícies de contato entre os módulos e sua padronização permite a combinação de diferentes módulos para a criação de produtos e/ou famílias de produtos.

A modularidade permite a customização em massa, reduz os custos e o tempo de desenvolvimento, reduz a complexidade interna, permite alterações mais rápidas no design, permite a extensão do tempo de vida útil e estratégias mais sustentáveis no final da vida do produto (BONVOISIN et al., 2016). Recentemente, o papel da modularidade no desenvolvimento de produtos sustentáveis tem ganho atenção tanto na academia quanto na indústria, principalmente devido à importância que as questões ambientais ganharam (MA; KREMER, 2016). Os benefícios ambientais da modularidade são encontrados em todo o ciclo de vida do produto e vão desde a otimização no uso de recursos (CHANG et al., 2013), até a desmontagem simplificada para reutilização e reciclagem (GO et al., 2015).

Esforços de manutenção, reparos e atualizações para aumentar a vida útil do produto são citados entre os maiores benefícios para a adoção da modularidade para o design sustentável (BAKKER et al., 2014). Uma das razões é que as falhas estão contidas nos módulos e não afetam o produto como um todo. Uma longa vida útil é um dos princípios da Economia Circular, garantindo que os produtos permaneçam em circulação pelo maior tempo possível (THE

ELLEN MCARTHUR FOUNDATION, 2013); e uma das “*Ten Golden Rules*” do Ecodesign, que enfatiza a necessidade de uma vida útil longa, em particular para produtos com impacto ambiental significativo nas fases de produção e/ou descarte (LUTTROPP; LAGERSTEDT, 2006). Cooper (2010) enfatiza o potencial para gerar ganhos econômicos e sociais com a vida útil estendida, considerando a criação de empregos nas áreas de reparo e manutenção. Goffin (2000) discute que a atenção adequada ao suporte ao produto - incluindo manutenção e reparo - é essencial para alcançar a satisfação do cliente. Além disso, o prolongamento da vida útil dos produtos não apenas atrasa os impactos do descarte, mas também atrasa os impactos relacionados à substituição do produto (MANZINI; VEZZOLI, 2008; SABBAGHI et al., 2016).

O reparo procura corrigir problemas e falhas para devolver o produto ao seu funcionamento normal (WATSON, 2008). King et al. (2006) enfatizam que o preço dos serviços de reparo tem crescido muito mais do que o preço de novos produtos ao longo do tempo. Sabbaghi et al. (2016) discutem que a atitude do consumidor em relação ao reparo pode ser influenciada pelos procedimentos de reparo, pelas características e exigências do consumidor e pelo mercado.

No entanto, estender a vida útil do produto por meio de manutenção, atualizações e reparos pode não ser uma estratégia sustentável em todos os casos. O impacto ambiental dos produtos de alto consumo de energia pode ser reduzido substituindo-os por uma alternativa mais eficiente em termos energéticos (VAN NES, 2010; BAKKER et al., 2014). O Paradoxo de Jevons propõe que o progresso tecnológico poderia levar a um consumo de recursos mais eficiente, mitigando o impacto ambiental da substituição (FRYE-LEVINE, 2012; SABBAGHI et al., 2016). Kiatikittipong et al. (2008) apresentam estudos de caso com quatro diferentes produtos (monitores de computador, refrigeradores, lâmpadas e motores de indução) para entender os ganhos ambientais associados à substituição por novos modelos e aqueles relacionados ao reparo. Pérez-Belis et al. (2017) também apresentam um estudo de caso considerando o impacto ambiental do reparo ou substituição de um aspirador de pó.

Para alguns produtos, como por exemplo laptops, estratégias como reciclagem e remanufatura podem ser mais sustentáveis do que uma longa vida útil (BAKKER et al., 2014). Segundo o autor, entender quando e qual estratégia aplicar é o principal desafio da pesquisa em design. Nesse contexto, é importante considerar as características do produto e do mercado, para entender quando estratégias de vida útil mais longas permitidas pela modularização - como atualização e reparo - são benéficas ao meio ambiente.

Biggemann et al. (2014) enfatizam que pesquisas recentes em sustentabilidade estão

reconhecendo a importância e a necessidade de considerar todas as partes envolvidas e definir o valor como produto de suas interações. Apesar da associação positiva entre modularidade e design sustentável (MA; KREMER, 2016), poucas pesquisas trataram da modularidade considerando todo o ciclo de vida do produto e considerando todos os envolvidos (SONEGO et al., 2018). Muitos benefícios associados à modularidade para a sustentabilidade concentram-se nas fases de uso e descarte, nas quais o consumidor exerce grande influência (WILLIAMS; TAYLOR, 2004; COX et al., 2013, SONEGO et al., 2018). Portanto, para otimizar o resultado esperado nas fases de uso e descarte de um produto, é importante prestar atenção ao papel do usuário ao projetar o produto.

3.3 Método

Este estudo combina uma revisão sistemática da literatura e uma revisão de iniciativas práticas dos *stakeholders* para promover o reparo. Uma revisão sistemática foi conduzida visando identificar *surveys* e estudos de caso realizados para entender as atuais práticas dos consumidores com relação ao reparo de produtos eletroeletrônicos. A busca foi realizada no banco de dados *Web of Science Core Collection* em junho de 2018, buscando artigos e revisões publicados nos últimos 10 anos (2008 - presente). O banco de dados da *Web of Science* foi escolhido porque inclui artigos científicos altamente citados de periódicos que têm fatores de impacto no *Journal Citation Report* (JCR). O intervalo de tempo foi delimitado para reunir práticas atualizadas dos consumidores. A seguinte combinação de palavras foi usada: (*repair**) AND (“*electr* product **” OR “*consumer electronic **” OR WEEE OR “*e-waste*” OR “*electronic waste*”) AND (*survey** OR *questionnaire** OR “*case stud**”). As palavras foram escolhidas após uma rodada de testes com termos relacionados.

A busca resultou em 18 artigos, dos quais 7 foram vinculados aos objetivos desta pesquisa. Uma triagem das referências desses 7 trabalhos revelou 3 artigos adicionais relacionados ao assunto, que também foram incluídos na análise. Como antes, a triagem considerou apenas trabalhos publicados nos últimos 10 anos e em periódicos com fator de impacto JCR.

Esses artigos não consideram os mesmos produtos e contexto. Alguns deles têm um escopo amplo e discutem outros aspectos além do reparo do produto. Portanto, esta revisão exigiu um certo grau de ajustabilidade. Mais especificamente, foram analisados os artigos sobre questões relevantes para o processo de reparo de uma maneira geral, e não com a intenção de fazer comparações diretas. Foram considerados somente os resultados relacionados ao reparo do produto de produtos eletroeletrônicos nesta revisão.

A busca por iniciativas dos demais stakeholders foi utilizada para ajudar a elaborar uma visão mais sistêmica da questão do reparo de produtos eletroeletrônicos. Assim como no uso da literatura cinzenta, a busca por iniciativas em outras fontes ajuda a resolver o problema do atraso no tempo e fornecem conhecimento que não está presente na literatura científica (BENZIES et al., 2006). Como os governos e as ONGs são *stakeholders* importantes no consumo sustentável (MONT; PLEPYS, 2008), foi utilizada uma estratégia multicamadas, incluindo *snowballing* e referência cruzada, para reunir iniciativas que já existem para lidar com a reparabilidade dos produtos. Essa pesquisa foi feita em jornais (*The Guardian*), relatórios de ONGs (*Rreuse*, *Greenpeace*) e instituições governamentais (Comissão Européia, União Européia). Essas iniciativas e práticas são apresentadas no final da sessão de discussão (Tabela 4). A Figura 3-1 apresenta as duas etapas de busca das fontes, sendo a etapa 1 relativa à literatura científica, e a etapa 2 às iniciativas de stakeholders. Na primeira etapa foram buscadas as atuais práticas (motivações, barreiras, consequências...) e na segunda etapa foram buscadas iniciativas dos demais stakeholders para superar os problemas identificados pelos estudos com usuários e transformar o reparo em uma opção mais comum.

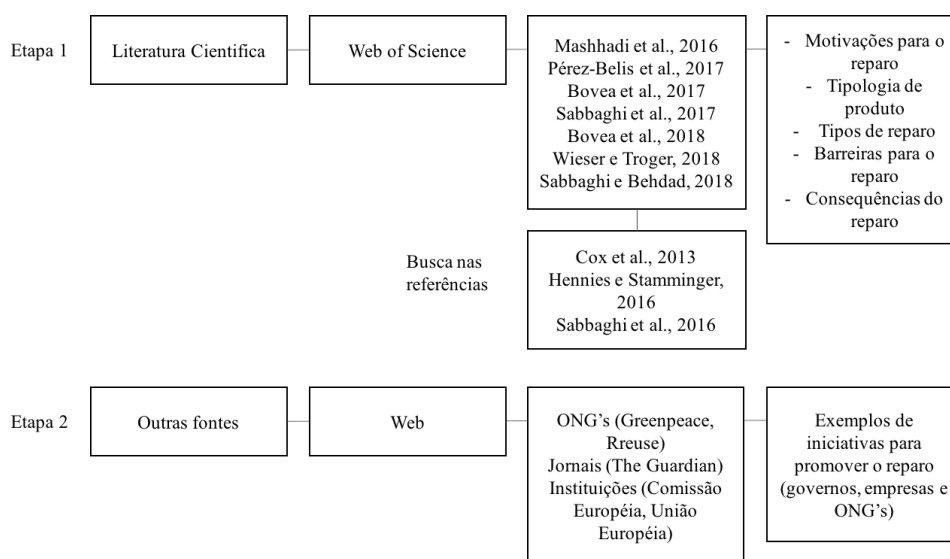


Figura 3-1: Etapas da revisão

3.4 Resultados e Discussão

A Tabela 3-1 apresenta os dez artigos analisados por este estudo, bem como os periódicos em que foram publicados, os métodos utilizados, os países nos quais as pesquisas foram realizadas e os produtos analisados por cada estudo. Os dez artigos foram analisados e seus achados foram tabulados em planilha eletrônica. Depois dessa tarefa, foram agrupadas as

descobertas por tópicos, como motivações para reparos, tipologia de produtos, tipos de reparos, barreiras para reparos e consequências de reparos, muitos dos quais são relevantes para consumidores e centros de reparo. Também é discutida a importância de uma visão sistêmica para promover resultados mais sustentáveis. Essas questões são apresentadas e discutidas a seguir.

Tabela 3-1: Lista dos artigos analisado nesta revisão

Autores	Periódico	Método, País	Produtos analisados
Cox et al., 2013	Resources, Conservation and Recycling	Discussão qualitativa com usuários Reino Unido	Eletrrodomésticos, eletrônicos, vestuário e móveis.
Hennies; Stamminger, 2016	Resources, Conservation and Recycling	Survey com usuários Alemanha	Máquinas de lavar, computadores, chaleiras elétricas, TVs, mixers.
Mashhadi et al., 2016	Journal of Cleaner Production	Survey com usuários do iFixit Estados Unidos	Computadores, tablets, smartphones, cameras, videogames, eletrodomésticos.
Sabbaghi et al., 2016	Resources, Conservation and Recycling	Survey com usuários do iFixit Estados Unidos	Eletrônicos, pequenos eletrodomésticos, grandes eletrodomésticos, veículos, roupas e móveis.
Pérez-Belis et al., 2017	Journal of Cleaner Production	Survey com usuários Espanha	Aspiradores de pó, mixers, máquinas de café, espremedores (<i>juicers</i>), chaleiras elétricas, ferros de passar, sanduicheiras, secadores de cabelo, torradeiras, aquecedores.
Bovea et al., 2017	Journal of Environmental Management	Survey com stakeholders Espanha	Aspiradores de pó, mixers, máquinas de café, espremedores (<i>juicers</i>), chaleiras elétricas, ferros de passar, sanduicheiras, secadores de cabelo, torradeiras, aquecedores.
Sabbaghi et al., 2017	Resources, Conservation and Recycling	Survey com técnicos de reparo iFixit Estados Unidos	Computadores, tablets, smartphones, cameras, videogames, eletrodomésticos.
Bovea et al., 2018	Waste Management	Survey com usuários Espanha	MP3/MP4, cameras, máquinas fotográficas, smartphones, tablet, leitores de livros eletrônicos, computadores portáteis, disco rígido, navegadores GPS, rádios e rádio relógio
Wieser; Tröger, 2018	Journal of Cleaner Production	Pesquisa quali/quantitativa com usuários Áustria	Smartphones
Sabbaghi; Behdad, 2018	Resources, Conservation and Recycling	Survey com usuários Estados Unidos	Smartphones

Sabbaghi et al. (2016) e Wieser e Tröger (2018) ressaltam a escassez de pesquisas com foco no comportamento do consumidor em relação ao reparo. Além disso, Mashhadi et al. (2016) observam que existem poucas referências que exploram o reparo do produto como um

comportamento sustentável. Isso reforça a necessidade de estudos de sustentabilidade que considerem todas as partes interessadas e, em particular, o papel dos consumidores e as consequências de seu comportamento.

Pérez-Belis et al. (2017) e Bovea et al. (2017) encontraram, em pesquisa realizada na Espanha, que quase 90% dos pesquisados não consertam seus eletrodomésticos; e Bovea et al. (2018) e Wieser e Tröger (2018), em uma pesquisa realizada na Espanha e na Áustria, constataram que quase 66% dos usuários não reparam seus celulares. Conclui-se que o reparo de produtos eletrônicos não é uma prática usual atualmente, e que os usuários têm por hábito substituir o bem por um novo produto.

Uma das possíveis explicações para a diminuição ao longo do tempo das ações de reparo na América é o aumento no preço do reparo em relação ao preço de um novo produto (MCCOLLOUGH, 2009). Cooper (2010) observou que atividades de manufatura foram realocadas para países recém-industrializados, enquanto o reparo continua a ser executado em países onde os custos de mão-de-obra são mais altos.

Além disso, os contextos econômico e social influenciam a busca por reparos. Por exemplo, a mídia brasileira reportou um aumento significativo no reparo de produtos eletrônicos durante a recente crise econômica enfrentada pelo país (JORNAL GLOBO, 2016). Essa constatação enfatiza a questão econômica relacionada às decisões de reparo, na qual os consumidores buscam por ele nos casos em que não é possível a compra de um novo produto, sem relacionar essa ação a questões de hábito ou de sustentabilidade.

A diminuição na busca por serviços de reparo também pode ser uma consequência da obsolescência planejada. Wieser e Tröger (2018) discutem que, com base em suposições sobre o estado do setor de reparo, os consumidores têm uma visão cética em relação ao reparo de telefones celulares, levando à impressão de que o telefone não pode ser consertado. King et al. (2006) observaram que o comportamento do consumidor e a falta de responsabilidade do fabricante são um grande impedimento para transformar o reparo em uma opção mais comum.

3.4.1 As práticas dos usuários

O usuário desempenha um papel crítico na determinação do impacto ambiental de um produto, uma vez que suas decisões afetam o fim da vida útil do mesmo. Portanto, para promover uma maior longevidade do produto, é importante considerar o que motiva e o que desencoraja o reparo do produto na perspectiva do usuário. Na Tabela 3-2, são apresentadas as motivações, barreiras e consequências da prática de reparo encontradas nos artigos revisados.

Tabela 3-2: Motivações, barreiras e consequências do reparo na perspectiva do usuário

Motivação	Descrição	Autores
Apego emocional	Usuários podem se sentir apegados aos seus produtos devido a boas memórias	Sabbaghi et al., 2017; Wieser; Tröger, 2018
Percepção de alta performance	Percepção de alta performance quando comparados com os novos produtos disponíveis	Sabbaghi et al., 2017; Wieser; Tröger, 2018
Dados pessoais	Produto como <i>smartphones</i> , computadores e câmeras contem armazenamento de dados pessoais importantes para os usuários	Sabbaghi et al., 2017
Experiências anteriores	Experiências anteriores positivas influenciam as decisões futuras do usuário	Sabbaghi et al., 2016
Tempo adicional	Crença no ganho de anos adicionais de uso através do reparo	Wieser; Tröger, 2018
Barreiras	Descrição	Autores
Custo	Reparos podem ser caros, tendo um preço próximo ao da compra de um produto novo	Cox et al., 2013; Pérez-Belis et al., 2017; Sabbaghi et al., 2017; Bovea et al., 2018; Wieser; Tröger, 2018; Sabbaghi e Behdad, 2018
Tempo	O reparo pode requerer um longo tempo de espera	Pérez-Belis et al., 2017; Sabbaghi et al., 2017; Wieser; Tröger, 2018
Falta de informação	Falta de manuais de reparo e falta de informação a respeito das causas de falha, de como reparar e de onde levar o produto para ser reparado	Sabbaghi et al., 2016; Pérez-Belis et al., 2017; Bovea et al., 2017; Wieser; Tröger, 2018
Qualidade do reparo	Qualidade do serviço e imprevisibilidade dos resultados	Sabbaghi et al., 2017; Bovea et al., 2017; Bovea et al., 2018
Experiências anteriores	Experiências anteriores negativas influenciam as decisões futuras do usuário	Sabbaghi et al., 2016
Conveniência	Processos de reparo complexos, acessibilidade e preço das peças e ferramentas necessárias	Sabbaghi et al., 2016; Mashadi et al., 2016; Sabbaghi et al., 2016
Obsolescência	Percepção de obsolescência, crença de que o reparo pode não trazer anos adicionais de uso	Wieser; Tröger, 2018
Consequências	Descrição	Autores
Extensão da vida útil	Reparos bem-sucedidos podem levar a uma extensão da vida útil dos produtos	Hennies; Stamminger, 2016; Pérez-Belis, 2017
Estímulo	Serviços de reparo de alta qualidade podem influenciar futuras decisões de reparo	Sabbaghi et al., 2017; Wieser; Tröger, 2018
Imagem de marca	Reparos bem-sucedidos podem melhorar a percepção de qualidade e confiabilidade do produto	Mashadi et al., 2016
Marketing boca a boca	Reparos bem-sucedidos podem levar a recomendação para outros e a recompra da mesma marca	Mashadi et al., 2016

Entre as motivações para reparar produtos destacam-se o apego emocional desenvolvido, e a crença de que o produto atual é de maior qualidade que os disponíveis no mercado (SABBAGHI et al., 2017; WIESER; TRÖGER, 2018). A perda ou uso indevido de dados pessoais contidos em determinados aparelhos também influencia a decisão pelo reparo (SABBAGHI et al., 2017), bem como o julgamento de anos adicionais que um reparo pode trazer para o produto (WIESER; TRÖGER, 2018).

Sabbaghi e Behdad (2018) apontam que a idade do produto pode desempenhar um papel na decisão de reparar: por exemplo, os consumidores são menos propensos a reparar telefones antigos. Nesse contexto, o produto pode ser percebido como obsoleto, independentemente de seu estado tecnológico, e a compra de um novo se sente justificada. Além disso, as empresas se concentram em oferecer serviços para seus modelos mais novos, descontinuando as ofertas de serviços para modelos mais antigos (SABBAGHI; BEHDAD, 2018).

O custo é a principal barreira para reparar um produto. Pérez-Belis et al. (2017) e Bovea et al. (2017) constataram que o alto custo é a razão por trás de quase 80% dos reparos não realizados. A questão do custo considera não apenas o preço do serviço, mas também o preço de um novo produto e o tempo extra que o reparo pode garantir.

Além disso, esta análise mostra que o preço pago pelo produto desempenha um papel importante na decisão de repará-lo. Em geral, os produtos mais baratos são mais facilmente substituídos porque o custo do reparo é similar ao custo do produto e, às vezes, superior. Portanto, produtos mais caros têm maior probabilidade de serem reparados (HENNIES; STAMMINGER, 2016). Essa ideia converge para a tipologia de produtos apresentada por Cox et al. (2013). Os autores argumentam que existem três tipos diferentes de produtos: *workhorse*, *investment* e *up-to-date*, e que essa tipologia influencia a busca por reparos.

Os produtos *workhorses* estão ligados à utilidade, confiabilidade, maior tempo de vida e seu reparo considera a vida adicional adquirida, o custo e o inconveniente; os produtos *investment* estão ligados a compras mais caras, dimensão emocional e são mais propensos a serem reparados; os produtos *up-to-date* estão ligados à identidade pessoal e social e têm maior probabilidade de serem descartados diretamente por motivos de moda (COX et al., 2013). Esta tipologia pode auxiliar a escolha de como usar a modularidade no desenvolvimento de produtos: produtos mais baratos e produtos *up-to-date* podem ser modularizados visando a fácil desmontagem para atividades de reciclagem, e não priorizando o reparo. Enquanto produtos *workhorse* e *investment* podem ser modularizados visando extensão de vida útil, caso o impacto ambiental nas fases de produção e descarte desses produtos seja alto, justificando a busca pela longevidade do produto.

É importante notar que o reparo não aumenta necessariamente a vida útil de todas as categorias de produtos. Por exemplo, Hennies e Stamminger (2016) descobriram que o reparo não prolongou a vida útil de alguns dos produtos analisados (laptops e chaleiras elétricas). Em contraste, Pérez-Belis et al. (2017) e Bovea et al. (2018) constataram que o reparo prolongou a vida útil dos produtos analisados, em alguns casos, em mais de quatro anos. Nota-se, no entanto, que suas descobertas se aplicam aos produtos e ao contexto em que suas pesquisas foram realizadas, e não podem ser generalizados para outros produtos ou contextos. De fato, este é um assunto interessante que deve ser mais investigado e que pode ajudar a consolidar o conhecimento sobre o potencial de prolongar a vida útil dos produtos através de reparos.

Observa-se o importante papel que a informação desempenha no problema de reparo. Muitos consumidores não sabem sobre as possibilidades de reparo ou onde levar seus produtos com defeito para serem consertados. Como os consumidores estão “no escuro”, considerando a arquitetura do produto, eles podem deixar de fazer reparos simples e rápidos por falta de informação. Pérez-Belis et al. (2017) observaram que quase 22% dos consumidores pesquisados não tinham ideia sobre as causas de falha de seus eletrodomésticos. A falta de informação está frequentemente relacionada à falta de incentivos e regulamentações, ou à falta de familiaridade com os existentes, para aumentar a conscientização sobre o problema da geração de lixo eletrônico e apresentar reparos e atualizações como opções atraentes para os consumidores.

Muitos consumidores não vinculam seus hábitos de consumo a problemas ambientais (MONT; PLEPYS, 2008; TANG; BHAMRA, 2009). Além disso, Cox et al. (2013) observam que, tipicamente, a preocupação ambiental não está entre os fatores que motivam ações para aumentar a vida útil de um produto. De fato, na literatura consultada nesta revisão, a preocupação ambiental não foi percebida como uma motivação para o reparo pelos consumidores. Sanye et al. (2006) enfatizam que a comunicação adequada é um fator importante para situar o consumidor como um agente responsável pelo impacto ambiental de um produto. Publicidade e rotulagem podem ser um curso de ação viável para informar as pessoas sobre as consequências ambientais do descarte prematuro. Como enfatizado por Bovea et al. (2018), é imperativo aumentar a conscientização e informar os consumidores sobre as diferentes alternativas de fim de vida e orientá-los para comportamentos mais conscientes.

De acordo com os artigos revisados, reparos simples e rápidos, como substituição de peças (cabos, baterias), são os reparos mais comumente praticados (MASSHADI et al., 2016; BOVEA et al., 2018; WIESER; TRÖGER, 2018). Isso porque, conforme apresentado na Tabela 3-2, a conveniência do reparo é uma das barreiras para sua realização, uma vez que o tempo

requerido pode impactar o preço e resultar em longo tempo de inatividade do equipamento.

3.4.2 Dificuldades para os centros de reparos

Outra questão analisada nesta revisão foi a dificuldade enfrentada pelos centros de reparo, que são repassados para os consumidores. Um resumo das dificuldades encontradas pelos centros de reparo pesquisados é apresentado na Tabela 3-3.

Tabela 3-3: Dificuldades na perspectiva dos centros de reparo

Dificuldades	Descrição	Autores
Peças de reposição	Dificuldade e custo para a obtenção de peças de reposição	Mashadi et al., 2016; Bovea et al., 2017; Sabbaghi et al., 2017
Ferramentas e equipamentos	Problemas relacionados ao equipamento necessário para a desmontagem do produto	Bovea et al., 2017; Sabbaghi et al., 2017
Oferta e procura	Imprevisibilidade de oferta e procura	Bovea et al., 2017
Incentivos	Falta de incentivos legais	Bovea et al., 2017
Arquitetura do produto	Estruturas de produto densas, de difícil desmontagem, partes fortemente ligadas a outras	Mashadi et al., 2016; Bovea et al., 2017; Sabbaghi et al., 2017
Falta de informação	Política dos fabricantes de não compartilhar instruções de reparo e manuais de reparo	Sabbaghi et al., 2017
Alto custo do trabalho	O custo de mão-de-obra está vinculado ao tempo necessário para o reparo	Sabbaghi et al., 2017

Em muitos casos, as empresas não estão divulgando informações sobre o reparo de seus próprios produtos (SABBAGHI et al., 2017). Essa falta de transparência afeta não apenas o consumidor, mas também os centros de reparo, impossibilitando a realização do mesmo. Esse problema pode não apenas atrapalhar o serviço, mas também comprometer sua qualidade, já que os funcionários são obrigados a realizar ações com base em conjecturas. Sabbaghi et al. (2017) argumentam que consumidores e empresas independentes de reparos devem estar cientes da reparabilidade do produto. O que ficou aparente nesta revisão foi a necessidade de legislação e/ou iniciativas para incitar os fabricantes a compartilhar informações de reparo.

Como apontado por Sabbaghi et al. (2017), os fabricantes preferem realizar cursos formais de treinamento para centros de reparo, em vez de tornar públicas as informações de reparo. Esse tipo de prática pode dificultar o acesso a serviços de reparo e aumentar seu preço. Para aumentar a procura e a realização de reparos, é importante capacitar os consumidores e empresas de reparo independentes para realizá-las, compartilhando informações e garantindo o acesso às peças e ferramentas necessárias. De acordo com Van Nes (2010), para melhorar a reparabilidade, os reparos devem ser tão simples que os consumidores possam realizá-los

sozinhos, ou poderiam ser feitos por mão-de-obra relativamente barata e pouco qualificada.

Altos preços e o acesso limitado a peças de reposição estão entre os principais fatores que inibem o processo de reparo. Peças sobressalentes devem estar disponíveis durante todo o ciclo de vida dos produtos e, para permitir o reparo, também devem estar disponíveis após o final da produção (SABBAGHI et al., 2017). Como enfatizado por Kim et al. (2017), as empresas devem decidir quantas peças sobressalentes serão produzidas na produção final para atender a demanda futura. Essa decisão pode ser difícil, pois é influenciada pelas decisões do consumidor e é, por natureza, intermitente. Boylan e Syntetos (2009) apresentam uma visão geral dos métodos para prever a demanda de peças de reposição. A indisponibilidade de peças de reposição pode levar ao uso de peças não originais ou peças recuperadas de modelos antigos, influenciando a qualidade do serviço e a percepção do consumidor quanto ao reparo.

Essas dificuldades estão estritamente ligadas às barreiras enfrentadas pelos consumidores. Por exemplo, peças sobressalentes difíceis e caras e a necessidade de equipamentos específicos para realizar reparos levam a altos custos e maior tempo de espera, o que, por sua vez, desestimula o consumidor a procurar o reparo. A Figura 3-2 associa as barreiras enfrentadas pelos consumidores (provenientes da Tabela 3-2), com as dificuldades enfrentadas pelos centros de reparo (provenientes da Tabela 3-3), e liga essas questões ao design de produto e ao modelo de negócio adotado pelas empresas. As dificuldades enfrentadas por usuários e centros de reparo podem ser provenientes do design do produto, do modelo de negócio adotado pelas empresas ou por ambos. Portanto, ressalta-se a necessidade de um modelo de negócios sustentável para garantir as informações e peças para realizar o reparo que, por sua vez, é facilitado pela adoção da arquitetura modular.

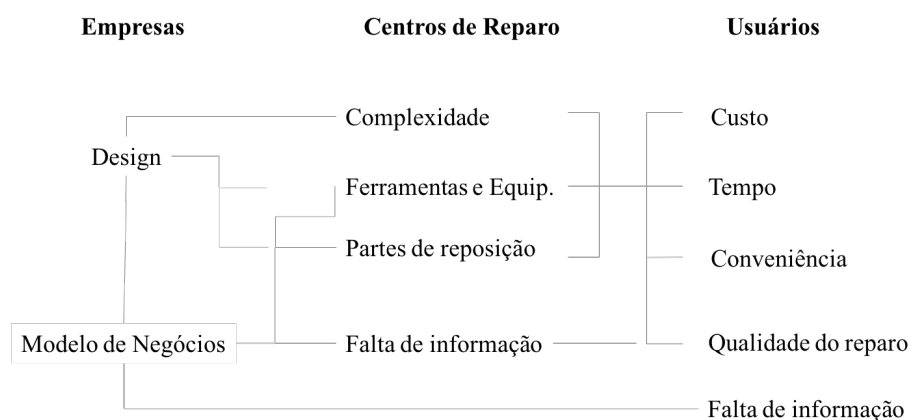


Figura 3-2: Barreiras e dificuldades e sua relação com o design e o modelo de negócios da empresa

3.4.3 Uma visão sistêmica para promover o reparo

Nesta seção, são discutidas algumas idéias para contribuir para uma visão mais sistêmica do design sustentável que contempla iniciativas que podem ser adotadas em conjunto com o design modular para garantir uma maior reparabilidade.

É interessante apontar uma discrepância entre a literatura especializada em modularidade e esta revisão sobre reparos. Enquanto a literatura em modularidade apresenta os benefícios para o design sustentável e a ascensão de produtos mais modulares, sustentados por uma variedade de métodos de modularização (SONEGO et al., 2018), a literatura de reparos aponta a tendência de produtos mais integrais, levando a uma dificuldade crescente para o reparo (SABBAGHI et al., 2016; SABBAGHI et al., 2017; BOVEA et al., 2017; WIESER; TRÖGER, 2018). Segundo Sabbaghi et al. (2017), "os produtos não são mais tão modulares como eram antes". Isso poderia ser explicado como uma tendência no campo da modularidade para analisar situações contexto específicas e generalizar as conclusões (ERNST, 2005), bem como a falta de análise sistêmica em relação ao ciclo de vida e os *stakeholders* envolvidos. Bonvoisin et al. (2016) argumentam que muitos benefícios estão ligados ao design modular, mas evidências concretas para apoiar esses benefícios raramente são fornecidas.

Essa discrepância mostra a importância de pensar e considerar todo o sistema para promover a extensão da vida útil de produtos e, conseqüentemente, diminuir o impacto ambiental. Adams et al. (2016) discutem que as inovações orientadas para a sustentabilidade evoluíram de uma visão técnica limitada para um nível de sistema. O nível do sistema reconhece as empresas como parte de um sistema mais amplo que integra "ecologias, políticas, legislação, incentivos, mercados, valores culturais e comportamento". Os autores apresentam três dimensões da inovação orientada para o desenvolvimento sustentável:

Stand-alone/integrate: "*stand-alone*" é associado a produtos, departamentos ou processos individuais, enquanto *integrate* refere-se à integração de valores à estratégia da empresa. Uma arquitetura modular não garante, por si só, um impacto ambiental reduzido, é preciso também um modelo de negócios que promova a sustentabilidade.

Technology/Socio-technological: de uma visão técnica para uma visão sociotécnica, além dos limites da empresa, incluindo o comportamento do usuário (CESCHIN; GAZIULUSOY, 2016). Uma empresa deve criar um arranjo propício para reparo e comunicá-lo claramente aos clientes, em vez de apenas modularizar o produto.

Insular/systemic: uma mudança de aparte da sociedade para uma parte da sociedade. Empresas como parte da solução, facilitando ações de reparo, reutilização e reciclagem, em vez de promover propositadamente a compra de novos produtos.

Como proposto por Cooper (2010), há uma gama complexa e multidisciplinar de questões associadas à vida útil do produto, incluindo design, marketing, direito, política, comportamento do consumidor, tecnologia, economia e outros. Práticas sustentáveis são responsabilidade de todos os *stakeholders* (HUME, 2010). É obrigatório considerar todas as *stakeholders*, seu contexto e motivações, e garantir que as informações estejam disponíveis para todos. É urgente projetar um sistema que rompa a idéia reinante de uma sociedade descartável, oferecendo informações e incentivos aos consumidores para apresentar o reparo e a atualização de produtos como uma alternativa interessante frente a aquisição de novos modelos.

Os principais atores do consumo sustentável são governos, empresas, usuários e organizações não-governamentais (MONT; PEPLYS, 2008). Para Cooper (2004), se a decisão de reparar cabe ao consumidor, os demais *stakeholders* devem aumentar a conscientização e oferecer incentivos para influenciá-los a tomar uma decisão sustentável. Hume (2010) defende que um framework desenvolvido para explorar a sustentabilidade deve se concentrar no usuário. A Figura 3-3 apresenta uma visão geral das ações do governo, empresas e ONGs para influenciar os usuários e promover o reparo, conforme a definição de Mont e Peplys (2008) de *stakeholders* principais para a sustentabilidade.

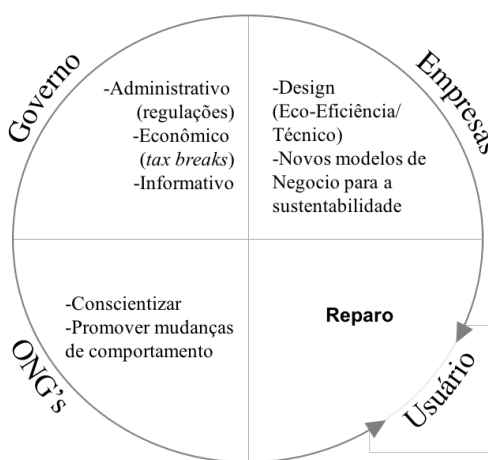


Figura 3-3: O papel dos stakeholders na promoção do reparo

A Tabela 3-4 mostra exemplos de iniciativas relacionadas a ações dos Governos, Empresas e ONG's para promover a reparabilidade do produto em diferentes países. Estes exemplos não estão limitados somente a indústria eletrônica. Essas iniciativas existem para mitigar alguns dos problemas e barreiras descritos nesta revisão, tanto para os clientes quanto para os centros de reparos, e para criar um sistema que promova e possibilite o reparo de produtos. Estas iniciativas podem ser adotadas em conjunto com as mudanças na arquitetura do

produto, criando soluções mais abrangentes para a questão do reparo dos produtos.

Table 3-4: exemplos de iniciativas dos *stakeholders* para promover o reparo

Stakeholder	Iniciativas
Governo	
<i>Administrativo</i>	<p>Real Decreto 110/2015 (Espanha): o objetivo principal é reduzir os impactos da geração de EEE, mas também promover práticas para prolongar a vida útil (como reparo, reutilização e desmontagem, e estimular as empresas a compartilhar informações para o correto reparo e reutilização de seus produtos...) (Pérez-Belis et al., 2017; Real Decreto 110/2015, 2015)</p> <p>Décret n° 2014-1482 du 9 décembre 2014 (França): obriga os varejistas a informar por quanto tempo as peças de reposição de um produto estarão disponíveis. Também especifica como esse tipo de informação deve ser passado para o cliente no momento da compra. (Cases i Sampere, 2015; Décret n° 2014-1482, 2014)</p> <p>Ecodesign Working Plan 2016–2019 (União Européia): contribui para o Plano de Ação da Economia Circular através da promoção da durabilidade, reparabilidade (projeto para reparo, disponibilidade de peças de reposição e manuais), capacidade de atualização, facilidade de reutilização e reciclagem. (Rreuse, 2015; European Commission, 2016).</p> <p>Directive on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) 2012/19 (União Européia): Estende a responsabilidade do produtor para incentivar o projeto e a produção considerando facilidade de reparo, atualização, reutilização, fácil desmontagem e reciclagem dos produtos. (Bocken et al., 2016; Rreuse, 2015; Directive 2012/19/EU, 2012)</p> <p>Action Plan for the Circular Economy (União Européia): suporta a economia circular em todas as etapas da cadeia de valor - produção, consumo, reparo, remanufatura e gerenciamento de resíduos. Também incentiva o design de produtos mais duráveis e fáceis de reparar, englobando a disponibilidade de peças de reposição e informações de reparo). (Cases i Sampere, 2015; European Commission, 2015)</p> <p>Directive 2009/125/EC (Parlamento Europeu): consiste em requisitos de eco-design para produtos relacionados à energia, promovendo a extensão da vida útil do produto por meio da disponibilidade de peças de reposição, reparabilidade, modularidade e capacidade de atualização. (Cases i Sampere, 2015; Directive 2009/125/EC, 2009)</p>
<i>Econômico</i>	<p>Tax breaks for repair (Suécia): reduz o custo de reparo reduzindo o VAT em certos tipos de produtos. Permite a dedução de 50% do custo de mão de obra de conserto de eletrodomésticos dos impostos. Taxa produtos que são difíceis de reparar e reciclar. (Durand, 2016; The Guardian, 2016; European Commission, 2017)</p>
<i>Informativo</i>	<p>Label of excellence for durable, repair-friendly designed electrical and electronic appliances (ONR 192102) (Austria): rótulo de excelência para produtos duráveis e de fácil manutenção (abrangendo aspectos como desmontagem não destrutiva, disponibilidade de peças por dez anos, acesso livre a documentação de reparo ...) (Durand, 2016)</p> <p>Blue Angel Standard (Alemanha): rótulo ecológico do governo federal alemão desde 1978. Fornece informações ambientais para ajudar os consumidores a escolher produtos ecologicamente corretos (facilidade de reparo e disponibilidade do manual de reparo são requisitos). Cases i Sampere, 2015; blauer-engel.de)</p>
Empresas	
<i>Design (Eco-eficiência/técnico)</i>	<p>Modularidade: facilita o reparo (Cheng 2012; Gu Sosale, 1999; Umeda et al., 2008; Yan; Feng 2014) e a desmontagem dos produtos (Go et al. 2015; Gu; Sosale, 1999; Umeda et al., 2008) através da independência estrutural e funcional, padronização de interfaces e minimização de interações entre módulos e influências externas (Stewart; Yan, 2008).</p> <p>Ecodesign: é uma abordagem proativa que orienta o desenvolvimento de produtos para a minimização de impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida (Johansson, 2002). Luttropp e Lagerstedt (2006) discutem que reparos e atualizações, extensão da vida útil, uso de materiais simples e o menor número possível de elementos de junção (preferir parafusos, travamento geométrico...) são componentes das regras de ouro do Ecodesign.</p>

Novos modelos de negócio

Modelos de negócio sustentáveis: “Um modelo de negócio sustentável alinha os interesses de todos os grupos de partes interessadas e considera explicitamente o meio ambiente e a sociedade como principais interessados” (Bocken et al., 2014). Há uma discrepância entre os benefícios privados e públicos, e modelos de negócios sustentáveis são criados para gerar valor para a empresa, os clientes e a sociedade (Lüdeke-Freund, 2010). Bocken et al. (2016) citam Patagonia e Fairphone como empresas com abordagens sustentáveis:

Patagonia: sua *Common Threads Initiative*, descrita como uma parceria entre clientes, empresa e eBay, busca estimular o reparo e a reciclagem de produtos, e a redução nos padrões de consumo (compre apenas o que você precisa). Eles oferecem um site em colaboração com o iFixit para ensinar os clientes a reparar seus produtos e informá-los sobre a importância do reparo e reutilização.

Fairphone: o smartphone modular permite fácil reparo, atualização, reutilização e reciclagem. Além do design duradouro, a empresa também utiliza materiais justos (ouro Fairtrade) e uma abordagem transparente para os processos de fornecimento e fabricação.

PSS sustentável (Product Service System): fornece soluções para satisfazer os clientes sem a propriedade de produtos físicos. Como o fabricante mantém a propriedade dos ativos, essa abordagem pode aumentar a longevidade e a durabilidade do produto e incentivar o design dos produtos, considerando a capacidade de atualização, a reparabilidade e o gerenciamento aprimorado do fim da vida útil. (Bocken et al., 2014)

ONG's

Conscientizar e mudar comportamentos

Repair Association (EUA): engajada em aprovar a legislação de Fair Repair no nível estadual nos EUA. Ela exige que as empresas vendam peças e ferramentas de reposição e disponibilize a documentação de reparo para qualquer pessoa. (Reuse, 2015, Repair.org)

iFixit (iFixit.com) (EUA): um site para compartilhar guias de reparo passo a passo para ajudar usuários a repararem seus produtos. Os manuais são feitos por pessoas que compartilham suas habilidades técnicas.

Em uma parceria com o Greenpeace, iFixit publica as “Pontuações de reparabilidade” para informar às pessoas o quão fácil é reparar um produto específico (por exemplo, pontuação de reparabilidade do smartphone, pontuação de reparabilidade do tablet...) (Reuse, 2015; Mashadi et al., 2016; Sabbaghi et al., 2016)

Rreuse (Bélgica): representa empresas sociais ativas na reutilização, reparo e reciclagem. Ela está envolvida em políticas para tornar as atividades de reparo mais competitivas e defende o design de fácil manutenção, a disponibilidade de peças de reposição e o livre acesso a informações de reparo. (Reuse, 2015; rreuse.org)

Repair Cafes: os “cafés reparo” são locais onde as pessoas podem encontrar ferramentas, materiais e a ajuda de voluntários para reparar uma variedade de produtos de forma gratuita. O site Repaircafe.org oferece uma lista de mais de 1400 cafés reparo em todo o mundo. (Cases i Sampere, 2015; repaircafe.org; The Guardian, 2018)

The Restart Project (Londres): uma iniciativa que incentiva as pessoas a usar seus eletrônicos por mais tempo. Promove eventos comunitários para ajudar as pessoas a reparar seus produtos eletrônicos e informar os consumidores sobre reparos e resiliência. (European Commission, 2017, therestartproject.org)

Greenpeace: por meio do Rethink-it.org, o Greenpeace informa o consumidor sobre o reparo dos produtos e promove uma petição para acabar com a obsolescência programada. (rethink-it.org; greenpeace.org)

A modularidade é uma estratégia que facilita o reparo e desempenha um papel importante na operacionalização dos objetivos enfatizados pelos regulamentos e iniciativas dos *stakeholders* que visam o reparo. Entretanto, seu sucesso na redução do impacto ambiental dos produtos depende de todo um sistema que favoreça o reparo, promovendo mudanças na forma

como as empresas lidam com ele e, principalmente, mudanças na forma como os consumidores percebem o reparo. Como estratégia, a modularidade funciona como um facilitador, mas sem um ambiente favorável e um consumidor consciente, ela não pode garantir um resultado sustentável por si só.

3.5 Conclusões

Este estudo combinou uma revisão sistemática da literatura e uma revisão de iniciativas práticas dos *stakeholders* para promover o reparo. Conforme apresentado nos resultados, os consumidores enfrentam muitas barreiras que desestimulam o reparo. Essas barreiras estão relacionadas principalmente à arquitetura do produto e aos modelos de negócios adotados pelas empresas. Esta análise apontou para uma situação em que os produtos são mais integrais do que antes e as informações de reparo não são compartilhadas entre os *stakeholders*.

Além disso, esta pesquisa revelou situações em que o reparo não é uma opção vantajosa para os usuários. Nestes casos, é necessário considerar se vale a pena incentivá-los a reparar os produtos ou preparar a arquitetura modular para a reciclagem. Como no Paradoxo de Jevons, é importante ter uma perspectiva mais ampla para escolher qual estratégia sustentável é melhor para cada situação.

Esses achados apontam para a necessidade de considerar todo o sistema e as relações entre todos os *stakeholders*. Estratégias como eco-design e modularidade não garantem um produto mais sustentável. É necessário considerar o usuário e sua influência no ciclo de vida do produto. No entanto, não é possível esperar uma atitude sustentável do usuário quando o sistema não contribui para isso. É importante promover comportamentos mais sustentáveis, juntamente com o desenvolvimento de um sistema que permita esses comportamentos.

Como ressaltado por este estudo, a literatura que aborda o reparo como um comportamento ecológico é recente. Mais estudos em diferentes contextos econômicos e sociais, considerando todo o ciclo de vida de um produto e todas as partes interessadas, é fundamental para uma melhor compreensão do problema de reparo.

3.6 Referências

- ADAMS, R.; JEANRENAUD, S.; BESSANT, J.; DENYER, D.; OVERY, P. Sustainability-oriented Innovation: a systematic review. *Int. J. Manag. Rev* 18, 180-205, 2016.
- BABBITT, C.W.; KAHNAT, R.; WILLIAMS, E.; BABBITT, G.A. Evolution of product lifespan and implications for environmental assessment and management: a case study of personal computers in higher education. *Environ. Sci. Technol.* 43, 5106–5112, 2009.

- BAKKER, C.; WANG, F.; HUISMAN, J.; DEN HOLLANDER, M. Products that go round: exploring product life extension through design. *J Clean Prod* 69, 10-16, 2014.
- BALDE, C.P.; WANG, F.; KUEHR, R.; HUISMAN, J. The Global E-waste Monitor 2014. Quantities Flows and Resources, 1-74, 2015.
- BENZIES, K.M.; PREMJI, S.; HAYDEN, K.A.; SERRETT, K. State-of-the-evidence reviews: advantages and challenges of including grey literature. *Worldviews Evid Based Nurs.* 3, 55-61, 2006.
- BIGGEMANN, S.; WILLIAMS, M.; KRO, G. Building in sustainability, social responsibility and value co-creation. *JBIM* 29, 304-312, 2014.
- BLAUER ENGEL. The German Ecolabel. Disponível em < <https://www.blauer-engel.de/en>>. Acesso 16 Agosto 2018.
- BOCKEN, N.M.P.; DE PAUW, I.; BAKKER, C.; VAN DER GRINTEN, B. Product design and business model strategies for a circular economy. *JIFE* 33, 308-320, 2016.
- BOCKEN, N.M.P.; SHORT, S.W.; RANA, P.; EVANS, S. A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. *J Clean Prod* 65, 42-56, 2014.
- BONVOISIN, J.; HALSTENBERG, F.; BUCHERT, T.; STARK, R. A systematic literature review on modular product design. *J Eng Design* 27, 488–514, 2016.
- BOVEA, M.D.; IBÁÑEZ-FORÉS, V.; PÉREZ-BELIS, V.; JUAN, P. A survey on consumer's attitude towards storing and end of life strategies of small information and communication technology devices in Spain. *Waste Manag* 71, 589-602, 2018.
- BOVEA, M.D.; PÉREZ-BELIS, V.; QUEMADES-BELTRÁN, P. ATTITUDE of the stakeholders involved in the repair and second-hand sale of small household electrical and electronic equipment: Case study in Spain. *J Environ Manage.* 196, 91-99, 2017.
- BOYLAN, J. E.; SYNTETOS, A.A. Spare parts management: A review of forecasting research and extensions. *IMA Journal of Management Mathematics*, 21, 227–237, 2009.
- CASES I SAMPERE, N. Making more durable and repairable products: building a rating system to inform consumers and trigger business innovation. Report for the European Environmental Bureau, Belgium. Disponível em: < http://makersourcescount.eu/wp-content/uploads/2015/07/Durability_and_reparability-report_FINAL.pdf >. Acesso 02 Maio 2018.
- CESCHIN, F.; GAZIULUSOY, I. Evolution of design for sustainability: from product design to design for system innovations and transitions. *Design Stud* 47, 118-163, 2016.
- CHANG, T.; WANG, C.; WANG, C. A systematic approach for green design in modular product development. *Int J Adv Manuf Technol* 68, 2729–2741, 2013.
- CHENG, J. Product design research based on sustainable concept. *Adv. Mater. Res.* 479-481, 1070-1073, 2012.
- COOPER, T. Inadequate life? Evidence of consumer attitudes to product obsolescence. *J Consum Policy* 27, 421-449, 2004.
- COOPER, T. The significance of product longevity. In: Cooper, T. (Ed.), *Longer Lasting Products: Alternatives to the Throwaway Society*. Routledge, New York, 2010.
- COX, J.; GRIFFITH, S.; GIORGI, S.; KING, G. Consumer understanding of product lifetimes. *Resour Conserv Recycl.* 79, 21–29, 2013.

DECRET N° 2014-1482, 2014. Relatif aux obligations d'information et de fourniture concernant les pièces détachées indispensables à l'utilisation d'un bien. Disponível em: <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/decret/2014/12/9/EINC1424543D/jo/texte>. Acesso 02 Maio 2018.

DIETZ, T., STERN, P. C., GUAGNANO, G.A. Social structural and social psychological bases of environmental concern. *Environ Behav* 30, 450, 1998.

DIRECTIVE 2009/125/EC, 2009. Directive establishing a framework for the setting of eco-design requirements for energy-related products. Disponível em < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32009L0125>>. Acesso 02 Maio 2018.

DIRECTIVE 2012/19/EU, 2012. Directive on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Disponível em: < https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2012.197.01.0038.01.ENG>. Acesso 02 Maio 2018.

DURAND, P. Draft report on a longer lifetime for products: benefits for consumers and companies (2016/2272(INI)). Disponível em: < <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT%20REPORT%20A8-2017-0214%200%20DOC%20XML%20V0//EN>>. Acesso 02 Maio 2018.

ERNST, D. Limits to modularity: reflections on recent developments on chip design. *Ind. Innov.* 12, 303-335, 2005.

EUROPEAN COMMISSION, 2015. Closing the loop – An EU action plan for the circular economy. Disponível em: < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52015DC0614> >. Acesso 02 Maio 2018.

EUROPEAN COMMISSION, 2016. Ecodesign working plan 2016-2019. Disponível em: < https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/com_2016_773.en_.pdf>. Acesso 02 Maio 2018.

EUROPEAN COMMISSION, 2017. Promoting remanufacturing, refurbishment, repair, and direct reuse. Disponível em: < <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ac22b439-370c-11e7-a08e-01aa75ed71a1/language-en>>. Acesso 02 Maio 2018.

FLETCHER, K. Durability, Fashion, Sustainability: the processes and practices of use. *Fashion Pract* 4, 221-238, 2012.

FRYE-LEVINE, L.A. Sustainability through design science: re-imagining option spaces beyond eco-efficiency. *Sustainable Dev.* 20, 166–179, 2012.

GO, T.F.; WAHAB, D.A.; HISHAMUDDIN, H. Multiple generation life-cycles for product sustainability: the way forward. *J Clean Prod.* 95, 16-29, 2015.

GOFFIN, K. Design for Supportability: essential componente of new product development. *Res Technol Manage* 43, 40-47, 2000.

GREENPEACE. Disponível em: < <https://www.greenpeace.org/international/>>. Acesso 16 Agosto 2018.

GU, P.; SOSALE, S. Product Modularization for life cycle engineering. *Robot Comput Integr Manuf* 15, 387- 401, 1999.

GURAUSKIENE, I. The behaviour of consumers as one of the most important factors in E-waste problem. *Environ. Res. Eng.* 4, 56–65, 2008.

HENNIES, L.; STAMMINGER, R. An empirical survey on the obsolescence of appliances in German households. *Resour Conserv Recycl.* 112, 73-82, 2016.

- HOLMQVIST, T.K.P.; PERSSON, M.L. Analysis and improvement of product modularization methods: their ability to deal with complex products. *Syst. Eng.* 6, 195-209, 2003.
- HUME, M. Compassion without action: examining the young consumers consumption and attitude to sustainable consumption. *J World Bus* 45, 385-394, 2010.
- JOHANSSON, G. Success factors for integration of ecodesign in product development: a review of the state of the art. *Environmental Management and Health* 13, 98-107, 2002.
- JORNAL GLOBO. Com orçamento apertado, consumidor recorre ao reparo. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/economia/com-orcamento-apertado-consumidor-recorre-ao-reparo-19537505>>. Acesso 03 Maio 2018.
- KIATIKITTIPONG, W.; WONGSUCHOTO, P.; MEEVANASANA, K.; PAVASANT, P. When to buy new electrical/electronic products? *J Clean Prod.* 16, 1339-1345, 2008.
- KIM, T.Y.; DEKKER, R.; HEIJ, C. Spare part demand forecasting for consumer goods using installed base information. *Comput Ind Eng* 103, 201-215, 2017.
- KING, A.M.; BURGESS, W.; IJOMAH, W.; BURGESS, S.C.; MCMAHON, C. Reducing Waste: repair, recondition, remanufacture or recycle? *Sustain Dev*, 14(4), 257-267, 2006.
- KUDERER, K. Benefits of Modularity. The 4th student conference on Development of Modular Products, 74-81, 2006.
- KUMAR, S.; CRAIG, S. Dell, Inc.'s Closed loop supply chain for computer assembly plants. *Information Knowledge Systems Management* 6, 197-214, 2007.
- LÜDEKE-FREUND, F. Towards a conceptual framework of business models for sustainability. *Knowledge Collaboration & Learning for Sustainable Innovation*, R. Wever, J. Quist, A. Tukker, J. Woudstra, F. Boons, N. Beute, eds., Delft, 2010.
- LUTTROP, C.; LAGERSTEDT, J. EcoDesign and the Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. *J. Clean. Prod.* 14, 1396-1408, 2006.
- MA, J.; KREMER, G.E.O. A systematic literature review of modular product design (MPD) from the perspective of sustainability. *Int. J Adv Manuf Technol* 86, 1509-1539, 2016.
- MANZINI, E.; VEZZOLI, C. O desenvolvimento de produtos sustentáveis/ os requisitos ambientais de produtos industriais. São Paulo: EDUSP, 2008.
- MASHHADI, A.R.; ESMAEILIAN, B.; CADE, W.; WIENS, K.; BEHDAD, S. Mining consumer experiences of repairing electronics: product design insights and business lessons learned. *J. Clean. Prod.* 137, 716-727, 2016.
- MCCOLLOUGH, J. Factors impacting the demand for repair services of household products: the disappearing repair trades and the throwaway society. *International Journal of Consumer Studies* 33, 619-626, 2009.
- MONT, O.; PLEPYS, A. Sustainable consumption progress: should we be proud or alarmed? *J. Clean. Prod.* 16, 531-537, 2008.
- NEWCOMB, P.J.; BRAS, B.; ROSEN, D.W. Implications of modularity on product design for the life cycle. *J Mech Design* 120, 483-490, 1998.
- NNOROM, I.C.; OSIBANJO, O. Overview of electronic waste (e-waste) management practices and legislations, and their poor applications in the developing countries. *Resour Conserv Recycl.* 52, 843-858, 2008.

PÉREZ-BELIS, V.; BRAULIO-GONZALO, M.; JUAN, P.; BOVEA, M.D. Consumer attitude towards the repair and second-hand purchase of small household electrical and electronic equipment. A Spanish case study. *J. Clean. Prod.* 158, 261-275, 2017.

REAL DECRETO 110/2015. Sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Disponível em < <https://www.boe.es/boe/dias/2015/02/21/pdfs/BOE-A-2015-1762.pdf>>. Acesso 02 Maio 2018.

REPAIR CAFÉ. Disponível em < <https://repaircafe.org/en/>>. Acesso 16 Agosto 2018.

REPAIR.ORG. The repair association. Disponível em: < <https://repair.org/>>. Acesso 16 Agosto 2018.

RESTART PROJECT. Disponível em: < <https://therestartproject.org/>>. Acesso 16 Agosto 2018.

RETHINK-IT. Disponível em: < <https://www.rethink-it.org/en/>>. Acesso 16 Agosto 2018.

RO, Y.K.; LIKER, J.K.; FIXSON, S.K. Modularity as a Strategy for Supply Chain Coordination: The Case of U.S. Auto. *IEEE Transactions on Engineering Management* 54, 172-89, 2007.

ROBINSON, B.H. E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Sci Total Environ* 408, 183–191, 2009.

RREUSE. Improving product reparability: policy options at the EU level. Disponível em: < <http://www.rreuse.org/wp-content/uploads/Routes-to-Repair-RREUSE-final-report.pdf>>. Acesso 02 Maio 2018.

SABBAGHI, M.; BEHDAD, S. Consumer decisions to repair mobile phones and manufacturer pricing policies: The concept of value leakage. *Resour Conserv Recycl.* 133, 101-111, 2018.

SABBAGHI, M., BEHDAD, S., ZHUANG, J. Managing consumer behavior toward on-time return of the waste electrical and electronic equipment: A game theoretic approach. *Int. J. Production Economics* 182, 545–563, 2016.

SABBAGHI, M.; CADE, W.; BEHDAD, S.; BISANTZ, A.M. The current status of the consumer electronics repair industry in the U.S.: a survey-based study. *Resour Conserv Recycl.* 116, 137-151, 2017.

SABBAGHI, M.; ESMAEILIAN, B.; MASHHADI, A.R.; BEHDAD, S., CADE, W. An investigation of used electronics return flows: A data-driven approach to capture and predict consumer's storage and utilization behavior. *Waste Manag* 36, 305–315, 2015.

SANYE.MENGUAL, E.; PEREZ-LOPEZ, P.; GONZALEZ-GARCIA, S.; LOZANO, R.G.; FEIJOO, G.; MOREIRA, M. T.; GABARRELL, X.; RIERADEVALL, J. Eco-Designing the Use Phase of Products in Sustainable Manufacturing. *J Ind Ecol* 18, 545-557, 2006.

SAUER, J.; WIESE, B.S.; RÜTTINGER, B. The utilisation phase as a critical element in ecological design. In: Hundal, M.S. (Ed.), *Mechanical Life Cycle Handbook: Good Environmental Design and Manufacturing*. Marcel Dekker, New York, 2009.

SMITH, S.; YEN, C. Green product design through product modularization using atomic theory. *Robot Comput Integr Manuf* 26, 790–798, 2010.

SONEGO, M.; ECHEVESTE, M.E.S.; GALVAN DEBARBA, H. The role of modularity in sustainable design: a systematic review. *J. Clean. Prod.* 176, 196-209, 2018.

STEWART, B.; YAN, X. Modular product family development within a SME. In: Yan, X., Ion, W.J., Eynard, B. (Eds.), *Global Design to Gain a Competitive Edge: A Holistic and Collaborative Design Approach Based on Computational Tools*. Springer, 2008.

TANG, T.; BHAMRA, T.A. Understanding consumer behavior to reduce environmental impacts through sustainable product design. In *DRS Conference*, Sheffield, UK, 2009.

THE ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Disponível em: <<http://www.ellenmacarthurfoundation.org>>. Acesso 02 Maio 2018.

THE GUARDIAN. Waste not want not: Sweden to give tax breaks for repairs. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/world/2016/sep/19/waste-not-want-not-sweden-tax-breaks-repairs>>. Acesso 02 Maio 2018.

THE GUARDIAN. Can we fix it? The repair cafes waging war on throwaway culture. Disponível em: < <https://www.theguardian.com/world/2018/mar/15/can-we-fix-it-the-repair-cafes-waging-war-on-throwaway-culture>>. Acesso 02 Maio 2018.

TSENG, H.; CHANG, C.; LI, J. Modular design to support green life-cycle engineering. *Expert Syst Appl* 34, 2524-2537, 2008.

UMEDA, Y.; FUKUSHIGE, S.; TONOIKE, K.; KONDOH, S. Product modularity for life cycle design. *CIRP Ann- Manuf Tech* 57, 13–16, 2008.

VAN NES, N. Understanding replacement behaviour and exploring design solutions. In: Cooper, T. (Ed.), *Longer Lasting Products: Alternatives to the Throwaway Society*. Routledge, New York, 2010.

WATSON, M. A Review of literature and research on public attitudes, perceptions and behaviour relating to remanufactured, repaired and reused products. Report for the Centre for Remanufacturing and Reuse: 1-26, 2008.

WIESER, H.; TRÖGER, N. Exploring the inner loops of the circular economy: replacement, repair and reuse of mobile phones in Austria. *J. Clean. Prod.* 172, 3042-3055, 2018.

WILLIAMS, I.D.; TAYLOR, C. Maximising household waste recycling at civic amenity sites in Lancashire, England. *Waste Manag* 24, 861–874, 2004.

YAN, J.; FENG, C. Sustainable design-oriented product modularity combined with 6R concept: a case study of rotor laboratory bench. *Clean. Techn Environ. Policy* 16, 95-109, 2014.

ZETTL, M.; SELIGER, G.; BILGEN, E. Product Life Cycle Oriented Methodology Supporting the Development of Modular Product Structures. In *Global Conference on Sustainable Development and Life Cycle Engineering 4*, São Carlos, 2006.

4. MODULARIDADE E O FIM DA VIDA DE PRODUTOS ELETRONICOS: PRATICAS E INICIATIVAS PARA RECUPERAÇÃO DE VALOR

Resumo: A modularidade desempenha um papel importante no final do ciclo de vida dos produtos através de sua capacidade de facilitar a desmontagem do produto para reutilização, remanufatura e reciclagem. No entanto, a facilidade de desmontar o produto não garante a recuperação do valor, pois esta depende da destinação dada a ele pelo usuário. O objetivo deste artigo é identificar as destinações mais comuns dadas aos produtos eletrônicos ao final da vida útil e relacioná-los com a recuperação de valor proporcionada pela modularidade. Para atingir este objetivo, foram realizadas uma revisão sistemática da literatura e uma revisão de iniciativas dos demais stakeholders para promover a escolha por destinações com maior recuperação de valor. Na revisão sistemática, 44 artigos foram selecionados e analisados. Como resultado, são apresentadas as destinações mais comuns para o lixo eletrônico, suas vantagens e desvantagens, a recuperação de valor associada a cada uma delas; e a necessidade de educação e incentivo para promover as destinações nas quais há maior recuperação de valor. A revisão de iniciativas complementa essa discussão com exemplos práticos adotados em diferentes países. Pretende-se, com base na compilação e organização destes resultados, contribuir para uma visão mais sistêmica de design sustentável, que contemple iniciativas que possam ser adotadas em conjunto com o design modular para garantir maior recuperação de valor no fim da vida útil dos produtos.

Palavras chave: modularidade, descarte, recuperação de valor, lixo eletrônico, resíduo eletrônico

Abstract: Modularity plays an important role at the end of the product life cycle through its ability to facilitate product disassembly for reuse, remanufacturing and recycling. However, easy disassembly of the product does not guarantee the recovery of value, as this depends on the destination given to it by the user. The objective is to make a survey of the most common destinations given to electronic waste and relate them to the recovery of value allowed by modularity. To achieve this goal, we conducted a systematic literature review and a review of stakeholder's initiatives to promote disposal choices that maximize value recovery. In the systematic review, 44 articles were selected and analyzed. As a result, we present the most common destinations for e-waste, their advantages and disadvantages, the value recovery associated to each destination, and discuss the need for education and incentives to promote end of life destinations with the highest value recovery. The review of initiatives to raise awareness and encourage users to seek destinations where there is greater value recovery adds to this discussion with practical examples adopted by different countries. Based on the compilation and organization of these results, we contribute to a more systemic vision of sustainable design, contemplating initiatives that can be adopted in conjunction with modular design to ensure greater end of product life value recovery.

Keywords: modularity, disposal, value recovery, e-waste

4.1 Introdução

A geração de resíduo eletrônico é impulsionada pelas rápidas mudanças tecnológicas e pelo ciclo de vida cada vez mais curto dos produtos (SABBAGHI et al., 2015; BALDE et al., 2015). O resíduo eletrônico é formado por equipamentos eletroeletrônicos (EEE – *electric and electronic equipment*) descartados, como computadores, televisores, *smartphones* e

eletrodomésticos. Ele é quimicamente e fisicamente distinto de outros resíduos, contendo materiais valiosos e perigosos e requerendo manuseio especial para evitar danos ao meio ambiente e à saúde humana (ROBINSON, 2009). Como consequência, é fundamental reduzir o impacto ambiental dos produtos eletrônicos ao longo de todo o seu ciclo de vida e, principalmente, garantir uma destinação adequada no seu descarte (NNORON; OSIBANJO, 2008; SABBAGHI et al., 2016).

A modularidade é uma estratégia associada ao desenvolvimento de produtos sustentáveis por sua capacidade de vincular diferentes objetivos para o ciclo de vida ao design de produto (NEWCOMB et al., 1998; ZETTL et al., 2006; UMEDA et al., 2008; TSENG et al., 2008, SMITH; YEN, 2010). Em relação ao resíduo eletrônico, a modularidade pode facilitar as operações de recuperação de valor no final do ciclo de vida (EoL – *end of life*) e prolongar a vida útil do produto através de esforços de manutenção, reparos e atualizações (GU; SOSALE, 1999; TSENG et al., 2008; NIELSEN; BRUNO, 2013; GO et al., 2015; SONEGO et al., 2018). A possibilidade de reparar, remanufaturar ou reciclar um produto depende, em grande parte, do design inicial do produto (BOVEA et al., 2018).

No entanto, a recuperação de valor possibilitada pela arquitetura modular defendida pela literatura consiste de exemplos teóricos, com poucas evidências de concretização (BONVOISIN et al., 2016) e que não consideram todo o ciclo de vida dos produtos e os *stakeholders* envolvidos (SONEGO et al., 2018). A recuperação de valor é dependente da destinação dada aos produtos eletrônicos pelos usuários. Segundo Atlason et al. (2017), é desafiador saber se os usuários vão lidar com o produto da maneira que a equipe planejou na fase de desenvolvimento. Portanto, faz-se necessário um alinhamento entre as percepções do usuário em relação aos cenários de EoL e as intenções das empresas em alcançar o resultado sustentável (ATLASON et al., 2017).

Para colaborar com essa discussão, este artigo busca identificar as destinações mais comuns dadas aos produtos eletrônicos ao final da vida útil e relacioná-las com a recuperação de valor propiciada pela modularidade. A contribuição deste estudo está na compreensão das práticas dos usuários e na apresentação de iniciativas que podem ser adotadas em conjunto com a modularidade para promover a recuperação do valor ao final do ciclo de vida dos produtos eletrônicos.

4.2 Método

Com o intuito de levantar as destinações dadas aos produtos eletrônicos ao final da vida útil pelos usuários, foram combinadas uma revisão sistemática da literatura e uma revisão de

iniciativas já postas em prática para lidar com a questão do descarte do resíduo eletrônico.

4.2.1 Revisão sistemática da literatura

A revisão sistemática foi realizada para identificar pesquisas e estudos de caso com usuários sobre a destinação dada aos produtos eletrônicos. Esta revisão incluiu duas fases principais: seleção e análise. A seleção compreendeu a coleta de um conjunto de publicações na área desejada, enquanto a análise compreendeu o exame crítico dessas publicações para responder à questão de pesquisa. Como proposto por Kitchenham (2007), essas duas fases foram executadas em cinco etapas: questão de pesquisa, estratégia de busca, seleção do estudo, avaliação da qualidade do estudo e extração de dados.

A pesquisa foi realizada no banco de dados *Web of Science Core Collection* em julho de 2018, procurando artigos e revisões publicados nos últimos 10 anos (2008 - 2018). A seguinte combinação de palavras foi usada: (*disposal** OU *discard** OU *return**) AND (“*electronic* product**” OR “*consumer electronic**” OR WEEE OR “*E-waste*” OR “*electronic waste*”) AND (*survey** OR *questionnaire**). As palavras foram escolhidas após uma rodada de testes com termos relacionados.

A pesquisa resultou em 76 artigos. Após a leitura de títulos e abstracts, 44 artigos foram considerados adequados para esta revisão (apresentados no apêndice B). Esses artigos não consideram os mesmos produtos em um mesmo contexto. Alguns deles têm escopo amplo e discutem outros aspectos além do descarte do produto. Portanto, nesta revisão foram consideradas as destinações dadas aos produtos pelo consumidor final (residências) e não por usuários corporativos.

Os 44 artigos foram então analisados para o levantamento das destinações. Além disso, foram compiladas sugestões para educar e incentivar os usuários a escolherem destinações com menor impacto ambiental e maior recuperação de valor.

4.2.2 Pesquisa de iniciativas na web

Para complementar a discussão, foram buscadas iniciativas em pesquisa na *Web*, usando termos como “*e-waste awareness*”, “*e-waste awareness campaign*”, “*e-waste collection incentives*”, “*e-waste responsibility*” para exemplificar algumas das sugestões encontradas na literatura. A busca por iniciativas tem a finalidade de apresentar casos ainda não discutidos pela literatura, e que podem trazer bons resultados para os problemas levantados por esta pesquisa.

A Figura 4-1 apresenta as duas etapas executadas por este estudo: os procedimentos para a revisão sistemática da literatura, e os procedimentos para a busca de iniciativas na *Web*.

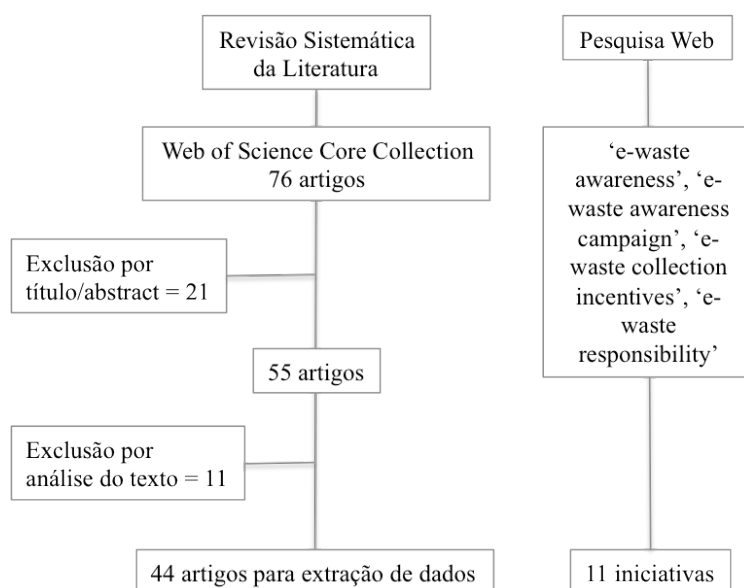


Figura 4-1: Procedimentos metodológicos

4.3 Resultados e Discussão

A análise dos 44 artigos estudados nesta revisão demonstra um aumento do interesse relacionado ao descarte de produtos eletrônicos, com um crescente número de publicações ao longo dos anos, conforme apresentado na Tabela 4-1. Os periódicos que publicaram mais artigos no período selecionado relativos a este tema são *Waste Management* (10 artigos) e *Journal of Cleaner Production* (8 artigos).

Tabela 4-1: Publicações ao longo dos anos

Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Publicações	2	3	2	3	4	3	5	7	10	4

Dos 44 artigos, 26 deles apresentam estudos realizados em países asiáticos, sendo 9 estudos realizados na China. A China tornou-se o maior produtor e consumidor de *smartphones* (BAI et al., 2018) e o maior produtor e receptor de resíduo eletrônico global (CHI et al., 2014), justificando o crescente número de estudos. Países como Bangladesh, Paquistão e Índia também estão experimentando o crescimento do resíduo eletrônico, seja por consequência do rápido crescimento econômico ou por meio de rotas comerciais ilegais (ISLAM et al., 2016). Segundo Robinson (2009), apesar de ilegal sob a perspectiva da Convenção de Basel, países desenvolvidos seguem exportando e-waste para países em desenvolvimento.

Muitos artigos estudaram o EEE em geral, considerando eletrodomésticos (como refrigeradores, máquinas de lavar, televisores) e dispositivos de tecnologia e comunicação (ICT

– *information and communication technologies*), mas é interessante notar um grande número de artigos (9) focando em *smartphones*. Como discutido por Guo e Yan (2017), de todos os tipos de equipamentos eletrônicos, os *smartphones* são os mais difundidos. O Relatório da *International Communication Union - ITU* (2017) discute que os smartphones agora dominam o fornecimento de serviços básicos de telecomunicações e o número de assinaturas excede a população global, enquanto o telefone fixo está diminuindo sua presença. No entanto, Welfens et al. (2016) apontam que menos de 10% dos *smartphones* são reciclados globalmente. O pequeno tamanho do smartphone incentiva o armazenamento (o produto não é descartado de fato, mas sim armazenado pelo usuário, postergando o descarte) e pode influenciar a percepção que o usuário tem do dano que ele pode causar se descartado incorretamente (JANG; KIM, 2010; DENG et al., 2017; BAI et al., 2018).

4.3.1 Destinação dada ao final da vida útil

As destinações citadas pelos usuários para seus produtos eletrônicos encontradas nos artigos analisados por esta revisão foram agrupadas nas seguintes categorias: reuso, armazenamento, coleta formal, coleta informal e lixo doméstico. A Tabela 4-2 apresenta a definição destas categorias.

Tabela 4-2: Definição das destinações dada ao produto eletrônico

Categorias	Definição
Reuso	•Acontece quando o produto é doado/vendido para outra pessoa ou entidade.
Armazenamento	•Acontece quando usuário decide armazenar o produto (em gavetas e garagens, por exemplo).
Coleta formal	•Acontece quando o usuário entrega o produto em centros ou pontos de coleta formais, ligados a empresas fabricantes e/ou terceiros com a intenção de recuperação de valor (remanufatura, reciclagem...).
Coleta informal	•Acontece quando o usuário entrega o produto para catadores informais e/ou pontos de coleta informais, onde o objetivo é a extração dos materiais valiosos presentes no resíduo eletrônico.
Lixo doméstico	•Acontece quando o usuário descarta o produto eletrônico com o lixo doméstico comum, que pode ter como destino aterros sanitários ou incineramento.

A Tabela 4-3 apresenta as percentagens de ações declaradas nos estudos relativas a cada uma das categorias pre-definidas na Tabela 4.2. Este resultado está baseado em 17 artigos desta revisão. Estes artigos questionaram usuários sobre a destinação dada aos produtos eletrônicos em suas residências e apresentaram os achados de forma similar. Bovea et al. (2018), Gutiérrez et al. (2010) e Lau et al. (2013) apresentam as destinações e suas percentagens para cada produto analisado.

As destinações apresentadas são provenientes dos artigos analisados nesta revisão. No

entanto, algumas destinações foram agrupadas em categorias. A categoria “reuso”, por exemplo, é resultado da soma de todas as respostas na qual pode acontecer o reuso do produto: doação para amigos e familiares, doação para instituições de caridade, venda para terceiros; assim como a categoria “coleta formal” é uma soma das respostas dadas para todos os tipos de coleta realizadas formalmente, seja por entrega em lojas, em pontos de coletas, e até mesmo em programas *take back*. Em seguida são discutidas as vantagens e limitações relacionadas a cada uma das categorias e, por fim, sua relação com a recuperação de valor possibilitada pela modularidade.

A tabela apresenta discrepância entre as destinações dadas conforme diferentes países, e também conforme os tipos de produtos analisados. Borthakuer e Govind (2017) defendem que as atitudes dos usuários com relação ao descarte de produtos eletrônicos são dinâmicas entre países e é influenciada por fatores como cultura, familiaridade com atividades de reciclagem, idade, renda e educação. Coletores informais, por exemplo, foram citados como responsáveis pela coleta de EEE principalmente em países asiáticos (China, Tailândia, Bangladesh, Hong Kong, Índia). A percepção de valor do produto eletrônico fora de uso pode ser diferente conforme os países, influenciando as destinações dadas aos produtos. Borthakur e Govind (2017) discutem que em países em desenvolvimento o resíduo eletrônico é considerado valioso, justificando a existência de coletores informais, que pagam aos usuários um valor referente a sucata.

Produtos com alto valor de revenda, como os atuais *smartphones*, apresentam altos índices de reuso, principalmente de venda para terceiros (MISHIMA; NISHIMURA, 2015). No entanto, apesar do grande mercado para *smartphones* usados, a proteção dos dados contidos nos smartphones é um dos motivos citados para o alto índice de armazenamento (DENG et al., 2017; BAI et al., 2018).

Igualmente, estudos relatam altos índices de descarte de eletrônicos em conjunto com o lixo doméstico. O estudo de Araújo et al. (2017) que apresenta o maior índice de descarte em lixo doméstico (81,82%) refere-se a um caso atípico de uma ilha no nordeste brasileiro, onde não existe uma infraestrutura adequada de coleta.

Tabela 4-3: Destinações dadas aos produtos eletrônicos

Autor e país	Produto/n	Reuso	Armaz.	Coleta formal	Coleta informal	Lixo doméstico
Afroz et al., 2013 Malásia	EEE 330	34%	27%	3%	-	30%
Islam et al., 2016 Bangladesh	EEE 400	28%	17%	5%	30%	20%
Manomaiviboola; Vassanadumrongdee Tailândia	EEE 1529	23%	52%	5%	8%	11%
Chi et al., 2014 China	EEE 430	8,4%	29,4%	12,1%	38%	10,5%
Colesca et al., 2014 Romênia	EEE 253	28,45%	-	42,29%	14,23%	15,02%
Song et al., 2012 Macau	EEE 400	11,25%	12,99%	50,62%	-	25,09%
Araujo et al., 2017 Brasil	EEE 83	2,42%	-	15,66	-	81,82
Li et al., 2012 China	EEE de grande porte 346	8%	8%	32%	51%	1%
Streicher-Porte et al., 2010 China	EEE de grande porte 225	17%	30%	4%	28%	14%
Pérez-Belis et al., 2015 Espanha	Brinquedos 474	74,5%	-	10%	-	15,5%
Dhingra; Maheshwari, 2018 India	ICT 157	53%	-	17,9%	12,8%	16,2%
Yin et al., 2014 China	Smartphones 1035	24,08%	47,1%	28,1%	12,4%	6,8%
Ylä-Mella et al., 2015 Finlândia	Smartphones 53	30%	45%	22%	-	-
Jang; Kim, 2010 Coréia do Sul	Smartphones 109	11,60%	40,03%	42,20%	-	5,09%
Li et al., 2012 China	Smartphones 346	25%	31%	15%	14%	15%
Bai et al., 2018 China	Smartphones 820	46,1%	79,3%	-	6%	-
Milovantseva; Saphores, 2013a EUA	Smartphones 1746	51,3%	22,7%	23,6%	-	2,4%
Wilson et al, 2017 Reino Unido	Smartphones 181	25,96%	54,14%	7,74%	-	5,52%

O maior índice de reuso é encontrado no estudo de Pérez-Belis et al. (2015), no qual é analisado o descarte de brinquedos eletrônicos em uma cidade da Espanha. O alto índice de reuso (74,5%) está ligado diretamente a tipologia do produto, uma vez que o rápido desenvolvimento das crianças influencia a troca constante dos brinquedos. O destino observado neste caso são repasses à amigos/familiares ou doações para instituições de caridade.

Milovantseva e Saphores (2013a) e Saphores et al. (2009) discutem que usuários que tem residências maiores armazenam mais produtos; complementarmente, Wang et al. (2011), sugerem que usuários em casas pequenas e/ou alugadas armazenam menos. Esse conhecimento pode influenciar o design de um sistema formal de coleta que responda diretamente as características das moradias de um determinado local, como por exemplo, um bairro.

Adicionalmente, os estudos analisados também defendem que produtos menores tendem a ser armazenados por mais tempo (SAPHORES et al., 2009; LI et al., 2012; LAU et al., 2013; THIÉBAUD-MÜLLER et al., 2017). Essa observação é condizente com os achados relacionados ao tamanho das residências, e também com o armazenamento de pequenos aparelhos de ICT que contém dados pessoais, como os *smartphones*. Igualmente, aponta para a necessidade de conscientização com relação a esses produtos, cujo armazenamento é prático para os usuários.

4. 3.1.1 Reuso

O reuso acontece quando o produto é doado ou vendido para amigos, familiares, instituições de caridade ou organizações não-governamentais (ONG's). Essa doação/venda permite a extensão da vida útil do produto. De todas as possíveis destinações, o reuso é aquela com menor impacto ambiental associado, pois adia os impactos do descarte e também os impactos relacionados à substituição do produto.

Porém, é preciso considerar quem nem todo o produto que é repassado a terceiros será, de fato, reutilizado. Enquanto a venda e a doação para caridades e ONG's tem um maior potencial de reutilização, a doação para amigos e familiares pode terminar em armazenamento. Atlason et al. (2017) enfatizam que a reutilização do produto pode parecer atraente para o primeiro usuário, mas não necessariamente para o segundo.

Embora a venda dos produtos para terceiros seja citada como uma destinação recorrente, a compra de produtos usados ainda é pouco praticada: estudos recentes mostram que entre 89% e 99% dos consumidores pesquisados não compram produtos usados (CHI et al., 2014; PEREZ BELIS et al., 2017; BOVEA et al., 2017; BOVEA et al., 2018; WIESER; TROGER, 2018). Watson (2008) discute o estigma de produtos usados, que podem ser vistos como não confiáveis, e ligados a uma percepção de pobreza e 'contaminação'. Essa ideia de contaminação varia conforme diferentes categorias de produtos, explicando por que é possível conceber um mercado para *smartphones* usados, mas não para aparelhos de cuidados pessoais. Griskevicius e Kendrick (2013) relacionam essa impressão de contaminação a motivos evolutivos profundos, em que os seres humanos evitam a disseminação de doenças, levando-os a preferir a compra de

produtos novos. Segundo Watson (2008), a compra de produtos usados é mais fortemente ligada a razões econômicas, e não a questões relacionadas à proteção do meio ambiente.

4.3.1.2 Armazenamento

O armazenamento não é tecnicamente uma destinação, mas sim um período em que os produtos estão fora do ciclo econômico aguardando seu destino final. Acontece quando os usuários armazenam seus produtos em garagens ou gavetas, por exemplo. No armazenamento, existe uma possível chance de reuso do produto ou de seus componentes. Usuários citaram como razões para este comportamento a possibilidade de remoção de peças (para um futuro reparo ou substituição) e a posse de um produto *backup*, por vezes referido como "sacrificial", para ser usado em caso de problemas com os dispositivos atuais (ONGONDO; WILLIAMS, 2011; LAU et al., 2013; YLÄ-MELLA et al., 2015; DENG et al., 2017; WILSON et al., 2017; BOVEA et al., 2018).

No entanto, essa opção deve ser também considerada como uma destinação, pois nesse tempo em que o produto fica armazenado diminuem-se as possibilidades de recuperação de valor (OBERENDER; BIRKHOFFER, 2003; Watson, 2008). Para produtos modulares, esse período fora do ciclo econômico pode arruinar a possibilidade de reutilização de módulos planejada no design do produto. O armazenamento pode surgir como uma opção pela simples falta de informação, na qual os consumidores não sabem o que fazer com o produto (ONGONDO; WILLIAMS, 2011; YLÄ-MELLA et al., 2015; WILSON et al., 2017) ou pela crença de que a reciclagem é difícil (YLÄ-MELLA et al., 2015). A percepção de que o produto tem algum valor (GUTIÉRREZ et al., 2010), contrasta com a percepção de que ele não tem valor algum (WILSON et al., 2017), levando à inércia de atitude e, portanto, ao armazenamento.

4.3.1.3 Coleta formal

A coleta formal se refere a todos os sistemas formais de coleta, estabelecidos por empresas, governos ou terceiros com a intenção de recuperação de valor do resíduo eletrônico (entrega do produto para centros de coleta, em ações *take back*, e em pontos de venda de produtos similares). Dentre as destinações levantadas, essa é a opção com maior possibilidade de recuperação de valor para o fim de vida do produto. No entanto, entre os estudos analisados, este destino é pouco popular entre os consumidores (conforme apresentado na Tabela 3).

A coleta formal, entre todas as possíveis destinações analisadas, é a única opção que exige do usuário um conhecimento prévio dos pontos e formas de coleta, além do efetivo deslocamento até esses pontos. Portanto, além do conhecimento sobre o assunto é preciso

também considerar a existência de pontos de coleta, e a facilidade de acesso dos usuários a esses pontos.

Outras limitações relacionadas a coleta formal são a possível promoção da obsolescência programada e o desestímulo ao reuso. A promoção da obsolescência pode ocorrer através de programas *take back*, que incentivam os usuários a devolverem o produto antigo em troca de benefícios na compra de um novo. Kumar (2017) exemplifica essa limitação discutindo que os upgrades e esquemas de troca de *smartphones* visam aumentar as vendas de novos lançamentos, e não necessariamente existem para tratar de questões ambientais.

O desestímulo ao reuso ocorre quando o produto retornado é diretamente reciclado ou remanufaturado, sem a consideração do seu estado de funcionamento e possibilidade de reuso. Enquanto alguns centros tratam o produto retornado apenas como componentes, os usuários ainda vêem valor econômico em seus produtos e preferem vendê-los a coletores informais ou armazená-los (AFROZ et al., 2013; ISLAM et al., 2016). Segundo Chi et al. (2014), a condição de funcionamento é um dos fatores mais importantes relacionados ao resíduo eletrônico.

4.3.1.4 Coleta informal

A coleta informal ocorre quando o usuário entrega o produto para coletores informais e/ou pontos de coleta informais, onde o objetivo é a extração dos materiais valiosos presentes no resíduo eletrônico.

O recolhimento porta-a-porta fornecido por esses coletores é um meio conveniente de descartar os produtos, apresentando vantagens aos usuários, porém não ao meio ambiente. Embora alguns consumidores questionem o impacto ambiental gerado pela gestão inadequada do EEE por coletores informais (WANG et al., 2011), esse ainda é o método mais comum apontado por recentes pesquisas (LI et al., 2012; LAU et al., 2013; CHI et al., 2014; ISLAM et al., 2016). Além da conveniência da coleta porta-a-porta, o preço pago por esses coletores pela sucata é geralmente mais vantajoso para os consumidores do que os preços pagos por meios de coleta formais (WANG et al., 2011; LAU et al., 2013). Manomaivibool e Vassanadumrongdee (2012), em pesquisa realizada na Tailândia, relatam que, diante das propostas de mudanças nas políticas de gestão de EEE, os usuários expressaram preocupação com o destino dos coletores, em sua maioria pessoas pobres - enfatizando o papel central dessa classe no atual sistema de coleta do EEE na Ásia.

Enquanto muitos dos produtos coletados dessa maneira podem ter um segundo uso, outros podem ser descartados incorretamente, gerando maior impacto ambiental. Segundo Afroz et al. (2013), o desmonte praticado pelos coletores informais visa a extração dos valiosos

metais contidos no EEE, utilizando técnicas inseguras que podem gerar impactos ambientais e sanitários. Chi et al. (2014) citam a desmontagem manual desprotegida, os banhos ácidos e a queima aberta como técnicas rudimentares usadas por coletores informais na China.

4.3.1.5 Lixo doméstico

A destinação de lixo doméstico refere-se à ação do usuário quando este descarta o produto eletrônico com o lixo doméstico comum, que pode ter como destino aterros sanitários ou incineramento.

Apesar do perigo associado ao descarte de lixo eletrônico em aterros sanitários, em muitos artigos analisados nesta revisão pode-se perceber que o descarte com resíduos domésticos continua sendo um destino recorrente (conforme Tabela 4-3). Quando o resíduo eletrônico é descartado incorretamente gera impactos negativos não apenas no meio ambiente, mas também na saúde humana (ROBINSON, 2009). O resíduo eletrônico contém mais de 1000 substâncias diferentes, muitas das quais são tóxicas, como mercúrio e cádmio, e hoje cerca de 70% desses metais em aterros sanitários nos Estados Unidos vieram de resíduo eletrônico (WIDMER et al., 2005).

4.3.1.6 Destinações e a recuperação de valor

Na tabela 4-4 são sumarizadas as limitações e vantagens relacionadas a cada destinação com relação a sustentabilidade, e a recuperação de valor de acordo com as categorias de valor de Bocken et al. (2015). Segundo Sabaghi et al. (2015), a maior parte do lixo eletrônico contém materiais que podem ser reutilizados, reciclados e recuperados.

A classificação de Bocken et al. (2015) foi selecionada neste estudo por representar uma nova perspectiva de inovação sustentável, na qual o valor é criado para todos os *stakeholders*, incluindo meio ambiente e sociedade. Segundo esta classificação, o valor por ser recuperado (trazendo benefícios positivos aos *stakeholders*); perdido (onde existe uma falha em recuperar todo o valor potencial); e destruído (trazendo resultados negativos para o sistema e o meio ambiente).

Tabela 4-4: Destinações e sua relação com a recuperação de valor

Destinação	Vantagens	Limitações	Valor
Reuso	•Extensão da vida útil	•Risco de armazenamento •Compra de produtos usados pouco praticada •Estigmas relacionados ao produto usado •Compra e uso de produtos usados relacionados a questões econômicas, e não de sustentabilidade	• <i>Valor recuperado:</i> Extensão de vida útil (reparos, upgrades, manutenção)
Armazenamento	•Possível chance de reuso	•Atraso na recuperação de valor	• <i>Valor perdido:</i> Possível recuperação de valor adiada
Coleta formal	•Retorno ao ciclo para recuperação de valor	•Requer conhecimento e fácil acesso aos pontos de coleta •Promoção da obsolescência •Desestímulo ao reuso	• <i>Valor recuperado:</i> Recuperação de valor
Coleta informal	•Praticidade para os usuários (coleta porta a porta) •Valor pago pela sucata •Fonte de renda para pessoas pobres •Possível reparo e revenda	•Impacto ambiental associado a práticas inseguras de extração de materiais (danos ao meio ambiente e a saúde humana)	• <i>Valor perdido:</i> Recuperação de materiais gerando dano ao meio ambiente
Lixo doméstico	• <i>não aplicável</i>	•Danos ao meio ambiente e à saúde humana	• <i>Valor destruído:</i> Nenhuma recuperação de valor, dano ao meio ambiente

A modularidade tem papel não somente no final da vida do produto, visando reciclagem e remanufatura, mas também possibilitando reparos, upgrades e manutenções que viabilizam o reuso do produto. Essa capacidade de possibilitar a extensão da vida útil, bem como as atividades de remanufatura e reciclagem faz da modularidade uma estratégia capaz de atuar em todos os ciclos técnicos da Economia Circular (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2018).

4.3.2 Sugestões e iniciativas

Além das destinações dadas ao lixo eletrônico, foram coletadas sugestões dos autores para lidar com o problema e incentivar os usuários a descartarem seus produtos de forma mais consciente. Estas sugestões foram divididas em duas categorias, consideradas decisivas para promover a mudança do comportamento do usuário: educação e incentivo (YLLA-MELLA et al., 2015). Em conjunto, são apresentadas iniciativas existentes em diferentes partes do mundo para exemplificar as sugestões da literatura.

4.3.2.1 Educação

Muitos estudos analisados nesta revisão relataram um baixo nível de conscientização sobre os problemas gerados pelo descarte incorreto de produtos eletrônicos (WANG et al., 2011; AFROZ et al., 2013; YIN et al., 2014; JENA; SARMAH, 2015; CAO et al., 2016; ISLAM et al., 2016; SINGH et al., 2018). Alguns estudos que relatam baixa conscientização são de países em desenvolvimento, principalmente do continente asiático. Em geral, estes países não possuem tecnologia apropriada, legislação e programas formais para a gestão do EEE (AFROZ et al., 2013). Isso indica o papel dos governos, empresas e ONGs na regulação, fiscalização e conscientização dos impactos ambientais causados pelo descarte incorreto dos produtos eletrônicos e pelo mau gerenciamento deste tipo de resíduo.

Para lidar com esta questão, diversos autores reconhecem a importância de conscientizar os usuários a respeito do problema em geral (SONG et al., 2012; JENA; SARMAH, 2015; ISLAM et al., 2016); das leis e regulamentações (LIANG; SHARP, 2017); da importância de reciclar (MISHIMA; NISHIMURA, 2015); e da sua responsabilidade para atingir a sustentabilidade (SONG et al., 2012; CAO et al., 2016). Os artigos revisados neste estudo (Apêndice B) sugerem a conscientização sobre o o problema do resíduo eletrônico nos currículos escolares, da escola primária à universidade (NDUNESEOKWU et al., 2017); através de workshops de conscientização ambiental, eventos comunitários e mídia (CHI et al., 2014; MISHIMA; NISHIMURA, 2015).

- A iniciativa **Greene**, suportada pelo governo da Índia, promove campanhas de conscientização sobre o problema do resíduo eletrônico para todos os *stakeholders*, incluindo a conscientização em instituições de ensino de todos os níveis.
- **International E-waste Day**, uma parceria entre o *WEEE Forum (European Association of Electrical and Electronic Waste Take Back Systems)* e 27 instituições sem fins lucrativos em 21 diferentes países (incluindo o Brasil), é uma iniciativa para conscientizar usuários a respeito dos problemas do resíduo eletrônico e da importância da reciclagem.

O reconhecimento do problema e das leis que regem o gerenciamento de lixo eletrônico não significa que os consumidores saibam que destino dar aos seus produtos (SAPHORES et al., 2009). Estudos recentes relatam uma grande porcentagem de consumidores que desconhecem os sistemas formais de coleta de produtos eletrônicos (ONGONDO; WILLIAMS, 2011; MANOMAIVIBOOLA; VASSANADUMRONGDEEC, 2012; MILOVANTSEVA; SAPHORES, 2013a; YIN et al., 2014; COLESCA et al., 2014; JENA; SARMAH, 2015). Portanto, a conscientização deve abordar não somente a problemática do resíduo eletrônico,

mas as questões práticas relacionadas ao descarte correto do produto eletrônico.

- Iniciativas como a *Consumer Electronics Association – Greener Gadgets EUA*, e a *SERI (Sustainable Electronics Recycling International)* oferecem aos usuários informações sobre utilização de produtos eletrônicos e sobre a destinação correta ao final do ciclo de vida, além de listarem pontos formais de coleta.

A ideia de que todos os *stakeholders* compartilham a responsabilidade de reduzir o impacto ambiental gerado pelos produtos foi discutida na literatura recente (BIGGEMANN et al., 2014; ADAMS et al., 2016; ATLASON et al., 2017). No entanto, alguns consumidores não acreditam compartilhar essa responsabilidade, creditando-a ao governo, empresas e terceiros (SONG et al., 2012; CAO et al., 2016). Essa crença pode vir da falta de conscientização, mas também da resistência em aceitar uma nova perspectiva que difere do entendimento vigente do papel do usuário. Wang et al. (2016), sugerem a imposição de responsabilidade aos usuários através de legislação, aplicando penalidades aos que não descartam seus equipamentos de forma correta, e cobrando um depósito antecipado que será devolvido quando do retorno do equipamento a um centro de coleta formal.

- A lei LRHA (**Law for the Recycling of Specified Kinds of Home Appliances**), adotada no Japão, afirma que os consumidores são responsáveis pelos custos de reciclagem da maioria dos equipamentos eletrônicos. Na Suíça, líder mundial na coleta de eletrônicos, os consumidores pagam taxas de reciclagem de forma adiantada – **Advances Recycling Fees ARF** - quando compram os equipamentos, financiando os sistemas *take-back* e de reciclagem estabelecidos pelos órgãos responsáveis no país.

Essa abordagem que coloca responsabilidade financeira sobre o consumidor (ECR – *Extended Consumer Responsibility*) pode não ser bem aceita em determinados países. Como já discutido na análise da tabela 4-3, nos países em desenvolvimento o resíduo eletrônico é considerado valioso, gerando uma relutância em pagar por taxas de reciclagem e ocasionando a preferência pela venda da sucata para coletores informais, como observado também neste estudo.

4.3.2.2 Incentivo à recuperação de valor

Para Nduneseokwu et al. (2017), o desenvolvimento de um sistema de coleta de lixo eletrônico formal e bem-sucedido deve levar em consideração a situação e a cultura do país,

contando com a participação de todos os *stakeholders*. Também é necessário levar em consideração o tipo de produto e o nicho de mercado, pois muitos fatores podem influenciar o descarte correto do EEE, inclusive a infraestrutura disponível (ATLASON et al., 2017; NDUNESEOKWU et al., 2017).

Os artigos consultados nessa revisão sugerem como incentivo à coleta formal a parceria com companhias logísticas e oferecimento de *pick up service* (BAI et al., 2018); o estabelecimento de pontos convenientes de coleta próximos as residências (CHI et al., 2014; ISLAM et al., 2016; NOWAKOWSKI, 2016; NDUNESEOKWU et al., 2017), considerando o perfil das mesmas (WANG et al., 2011).

- A iniciativa da **Swico Recycling Switzerland** permite que consumidores possam devolver seus produtos eletrônicos a qualquer loja que venda produtos similares àqueles que serão descartados sem custo.

A idéia de melhores práticas, amplamente difundida na literatura de desenvolvimento de produtos, poderia ser usada neste caso com reservas. Chi et al. (2014) exemplificam que a China não poderia replicar o sistema europeu, devido às diferenças no fluxo de resíduos, a disponibilidade de mão-de-obra barata e as práticas já estabelecidas. Borthakur e Govind (2017) também defendem a impossibilidade de reproduzir as experiências de gestão de resíduo eletrônico de outros países sem considerar o contexto local, mas citam a possibilidade de aprender com essas experiências para criar um plano abrangente de gerenciamento. Portanto, é preciso atentar para as condições econômicas, sociais e culturais, além do conhecimento e acesso a pontos de coleta (BORTHAKUR; GOVIND, 2017).

Além de incentivos financeiros (JANG; KIM, 2010; ONGONDO; WILLIAMS, 2011; JENA; SARMAH, 2015; YLA-MELLA et al., 2015), outros tipos de incentivos podem influenciar a destinação dada ao EEE. Segundo Mishima e Nishimura (2015), no Japão, a informação sobre a importância da reciclagem é mais efetiva na mudança de comportamento dos usuários que a recompensa financeira. Segundo os autores, a conscientização ambiental dos respondentes pode influenciar essa questão, reforçando a afirmação de Nduneseokwu et al. (2017) de que é preciso considerar a cultura de um país para desenvolver meios bem-sucedidos de coleta, incluindo o meio mais efetivo de recompensa. Essa recompensa “moral” pode vir também do senso de responsabilidade trazido pela conscientização.

- Iniciativas como a **SwissCom Mobile Aid**, na Suíça, **Mobile Muster**, na Austrália e **Verizon Wireless**, nos EUA, atuam na coleta de smartphones e revertem os lucros em doações monetárias para programas de auxílio a pessoas em vulnerabilidade e projetos

educacionais. Smartphones em condições de uso são revendidos, estendendo a vida útil dos mesmos.

- **Best Buy Trade Inn Program** é um programa da multinacional americana Best Buy, que oferece aos usuários um valor na forma de cartão presente pela entrega de equipamentos eletrônicos, que pode ser utilizado na loja para a compra de um novo produto.

Empresas, governos e organizações não governamentais tem papel importante na mudança da percepção e do comportamento dos usuários (DIXIT, 2016). Afroz et al. (2013) e Islam et al. (2016), discutem como a maioria dos países desenvolvidos está gerenciando o EEE por meio de legislação específica, infraestrutura e apoio para a Responsabilidade Estendida do Produtor (EPR – *Extended Producer Responsibility*), para incentivar os fabricantes e importadores a retomar os produtos usados. Através do EPR, as empresas tornam-se responsáveis, financeira ou fisicamente, pelo tratamento e descarte dos seus produtos após o consumo. Essa responsabilidade busca não somente priorizar um manejo mais sustentável no final da vida do produto, mas também incentivar as empresas a prevenir desperdícios no desenvolvimento de produto e a desenvolvê-los com vista a um ciclo de vida mais sustentável (OECD, 2018). Entre os preceitos do EPR está a responsabilidade do produtor em conscientizar o usuário a respeito da correta destinação do produto ao final do ciclo de vida.

Como defendido por Ceschin e Gaziulusoy (2016), a sustentabilidade é propriedade de um sistema, e não de elementos individuais de um sistema. Para que haja a diminuição do impacto ambiental dos produtos eletrônicos é preciso que os usuários deem a eles a destinação correta ao final de seu ciclo de vida. A concretização das estratégias utilizadas na fase de design do produto é dependente das decisões do usuário, e para que estas estratégias tenham sucesso, é preciso alinhar as intenções dos produtores com as intenções dos usuários. Portanto, além das estratégias e decisões ligadas a arquitetura do produto, também é preciso informar e educar o usuário, incentivá-lo a fazer escolhas mais conscientes e oferecer a ele uma infra-estrutura de coleta formal. Segundo Atlason et al., (2017), entender o usuário é necessário para guiar o desenvolvimento de produto de acordo.

4.4 Conclusões

O objetivo deste estudo foi identificar as destinações dadas pelos usuários ao resíduo eletrônico ao final do uso e relacioná-las com a recuperação de valor possibilitada pela modularidade. Como apresentado nos resultados, atualmente a maioria dos produtos eletrônicos são descartados por meios onde o valor é destruído ou, em grande parte, perdido. Desta forma,

a adoção de estratégias visando sustentabilidade no desenvolvimento de produtos, como a modularidade, tem seu propósito diminuído. O uso da modularidade no desenvolvimento de produtos pode torná-lo mais complexo, mais caro e, inclusive mais danoso ao meio ambiente. Quando da utilização desta estratégia para fins sustentáveis, é preciso garantir que os benefícios que ela traz para o ciclo de vida sejam alcançados, justificando esse investimento na fase de produção do produto.

Citam-se como barreiras para essa recuperação de valor a falta de informação, de infraestrutura de coleta e de incentivos para os usuários. É imperativo que se passe a enxergar a sustentabilidade como fruto de um sistema, onde todos os stakeholders são responsáveis e buscam por soluções com menor impacto ambiental. Nesta perspectiva, é preciso conscientizar aos usuários, para que estes se utilizem dos benefícios projetados no design do produto.

Apêndice B: Lista dos artigos analisados nesta revisão

- EEE: eletrodomésticos, ICT (equipamento de tecnologia e comunicação).

Autores	Periódico	País	Produtos Analisados
Afroz et al., 2013	Journal of Cleaner Production	Malásia	EEE
Alavi et al., 2015	Journal of the Air & Waste Management Association	Irã	EEE
Araujo et al., 2017	Environmental science and Pollution Research	Brasil	EEE
Atlason et al., 2017	Journal of Cleaner Production	Dinamarca	EEE
Bai et al., 2018	Journal of Cleaner Production	China	Smartphones
Bovea et al., 2018	Waste Management	Espanha	ICT
Cao et al., 2016	Renewable and Sustainable Energy Reviews	China	EEE
Chi et al., 2014	Journal of Cleaner Production	China	EEE
Colesca et al., 2014	International Journal of Environmental Research	Romênia	EEE
Deng et al., 2017	Journal of Environmental Management	Hong Kong	Smartphones
Dhingra and Maheshwari, 2018	Int. J. Indian Culture and Business Management	India	ICT
Dixit and Badgaiyan, 2016	Resources, Conservation and Recycling	India	Smartphones
Gutiérrez et al., 2010	Waste Management	Espanha	EEE
Islam et al., 2016	Journal of Cleaner Production	Bangladesh	EEE
Jang and Kim, 2010	Resources, Conservation and Recycling	Coréia do Sul	Smartphones
Jena and Sarmah, 2015	Journal of Cleaner Production	India	EEE
Kianpour et al., 2017	Sustainability	Malásia	EEE
Kochan et al., 2016	The International Journal of Logistics Management	EUA	EEE
Kumar, 2017	Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics	India	Smartphones

Lau et al., 2013	Waste Management	Hong Kong	Televisão, máquina de lavara, ar condicionado, refrigerador e computador
Li et al., 2012	Waste Management and Research	China	EEE
Liang and Sharp, 2017	Journal of Material Cycles and Waste Management	China, Laos, Tailândia	EEE
Liang and Sharp, 2016	Waste Management and Research	China, Laos, Tailândia	EEE
Manomaivibool e Vassanadumrongdee, 2012	Resources, Conservation and Recycling	Tailândia	EEE
Milovantseva and Saphores, 2013a	Journal of Environmental Management	EUA	EEE
Milovantseva and Saphores, 2013b	Waste Management	EUA	Televisões
Mishima and Nishimura, 2015	Waste Management and Research	Japão	EEE pequeno porte
Nduneseokwu et al., 2017	Sustainability	Nigéria	EEE
Nguyen et al., 2009	Journal of Material Cycles and Waste Management	Vietnã	EEE de grande porte
Nowakowski, 2016	Waste Management and Research	Polônia	EEE
Ongondo et al., 2016	Waste Management	Inglaterra	Televisões
Ongondo and Williams, 2011	Waste Management	Reino Unido	Smartphones
Othmann et al., 2015	Jurnal Teknologi	Malásia	EEE
Pérez-Belis et al., 2015	Waste Management	Espanha	Brinquedos
Pierron et al., 2017	Waste Management	Reino Unido	EEE pequeno porte
Saphores et al., 2009	Journal of Environmental Management	EUA	EEE
Singh et al., 2018	Journal of Material Cycles and Waste Management	India	EEE
Song et al., 2012	Journal of Environmental Management	Macau	EEE
Streicher-Porte e Geering, 2010	Environmental Engineering Science	China	Refrigeradores, máquinas de lavar e televisees
Thiébaud et al., 2017	Journal of Industrial Ecology	Suíça	EEE
Wang et al., 2011	Journal of Cleaner Production	China	EEE
Wilson et al., 2017	Waste Management	Reino Unido	Smartphones
Yin et al., 2014	Journal of Cleaner Production	China	Smartphones
Ylä-Mella et al., 2015	Waste Management	Finlândia	Smartphones

4.5 Referências

ADAMS, R.; JEANRENAUD, S.; BESSANT, J.; DENYER, D.; OVERY, P. Sustainability-oriented Innovation: a systematic review. *Int. J. Manag. Rev* 18, 180-205, 2016.

AFROZ, R.; MASUD, M.M.; AKHTAR, R.; DUASA, J.B. Survey and analysis of public knowledge, awareness and willingness to pay in Kuala Lumpur, Malaysia – a case study on household WEEE management. *Journal of Cleaner Production* 52, 185-193, 2013.

ALAVI, N.; SHIRMARDI, M.; BABAEI, A.; TAKDASTAN, A.; BAGHERI, N. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) estimation: a case study of Ahvaz City, Iran. *Journal of the Air & Waste Management Association* 65, 298-305, 2015.

ARAUJO, D.R.R.; OLIVEIRA, J.D.; SELVA, V.F.; SILVA, M.M.; SANTOS, S.M. Generation of domestic waste electrical and electronic equipment on Fernando de Noronha

- Island: qualitative and quantitative aspects. *Environ Sci Pollut Res* 24, 19703-19713, 2017.
- ATLASON, R.S.; GIACALONE, D.; PARAJULY, K. Product design in the circular economy; User's perception of end-of-life scenarios for electrical and electronic appliances. *Journal of Cleaner Production* 168, 1059-1069, 2017.
- BAI, H.; WANG, J.; ZENG, A.Z. Exploring Chinese consumers' attitude and behavior toward smartphone recycling. *Journal of Cleaner Production* 188, 227-236, 2018.
- BALDE, C.P.; WANG, F.; KUEHR, R.; HUISMAN, J. The Global E-waste Monitor 2014. Quantities Flows and Resources, 1-74, 2015.
- BEST BUY. Best Buy Trade In. Disponível em <<https://www.bestbuy.com/site/services/best-buy-trade-in/>>. Acesso 13 Novembro 2018.
- BIGGEMANN, S., WILLIAMS, M., KRO, G. Building in sustainability, social responsibility and value co-creation. *JBIM* 29, 304-312, 2014.
- BOCKEN, N.M.P.; RANA, P.; SHORT, S.W. Value mapping for sustainable business thinking. *Journal of Industrial and Production Engineering* 32, 67-81, 2015.
- BONVOISIN, J.; HALSTENBERG, F.; BUCHERT, T.; STARK, R. A systematic literature review on modular product design. *J Eng Design* 27, 488-514, 2016.
- BORTHAKUR, A.; GOVIND, M. Emergins trends in consumers' E-waste disposal behavior and awareness: a worldwide overview with special focus on India. *Resources, Conservation and Recycling* 117, 102-113, 2017.
- BOVEA, M.D.; IBÁÑEZ-FORÉS, V.; PÉREZ-BELIS, V.; JUAN, P. A survey on consumers' attitude towards storing and end of life strategies of small information and communication technology devices in Spain. *Waste Management* 71, 589-602, 2018.
- BOVEA, M.D.; PÉREZ-BELIS, V.; QUEMADES-BELTRÁN, P. Attitude of the stakeholders involved in the repair and second-hand sale of small household electrical and electronic equipment: Case study in Spain. *J Environ Manage.* 196, 91-99, 2017.
- CAO, J.; LU, B.; CHEN, Y.; ZHANG, X.; ZHAI, G.; ZHOU, G.; JIANG, B.; SCHNOOR, J.L. Extended producer responsibility system in China improves e-waste recycling: Government policies, enterprise, and public awareness. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62, 882-894, 2016.
- CESCHIN, F.; GAZIULUSOY, I. Evolution of design for sustainability: from product design to design for system innovations and transitions. *Design Stud* 47, 118-163, 2016.
- CHI, X.; WANG, M.Y.L.; REUTER, M.A. E-waste collection channels and household recycling behaviors in Taizhou of China. *Journal of Cleaner Production* 80, 87-95, 2014.
- COLESCA, S.E.; CIOCOIU, C.N.; POPESCU, M.L. Determinants of WEEE Recycling Behaviour in Romania: A fuzzy Approach. *Int. J. Environ Res.* 8, 353-366, 2014.
- CONSUMER TECHNOLOGY ASSOCIATION. Greener Gadgets. Disponível em <<https://www.cta.tech/Consumer-Resources/Greener-Gadgets.aspx>>. Acesso em 13 Novembro 2018.
- DENG, W.; GIESY, J.P.; SO, C.S.; ZHENG, H.L. End-of-life (EoL) mobile phone management in Hong Kong households. *Journal of Environmental Management* 200, 22-28, 2017.
- DHINGRA, S.; MAHESHWARI, N.S. E-waste management: awareness and intentions among youth consumers: the mediating role of motivation. *Int. J. Indian Culture and Business*

Management 16, 359-370, 2018.

DIXIT, S.; BADGAIYAN, A.J. Towards improved understanding of reverse logistics – Examining mediating role of return intention. *Resources, Conservation and Recycling* 107, 115-128, 2016.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Disponível em <www.ellenmacarthurfoundation.org>. Acesso em 07 Novembro 2018.

GO, T.F.; WAHAB, D.A.; HISHAMUDDIN, H. Multiple generation life-cycles for product sustainability: the way forward. *J Clean Prod.* 95, 16-29, 2015.

GREENE. An e-waste awareness initiative. Disponível em <<http://greene.gov.in/>>. Acesso em 13 Novembro 2018.

GRISKEVICIUS, V.; KENRICK, D.T. Fundamental motives: how evolutionary needs influence consumer behavior. *Journal of consumer psychology* 23, 372-386, 2013.

GU, P.; SOSALE, S. Product Modularization for life cycle engineering. *Robot Comput Integr Manuf* 15, 387- 401, 1999.

GUO, X.; YAN, K. Estimation of obsolete cellular phones generation: a case study of China. *Sci. Total Environ.* 575, 321-329, 2017.

GUTIÉRREZ, E.; ADENSO-DÍAZ, B.; LOZANO, S.; GONZÁLEZ-TORRE, P. A competing risks approach for time estimation of household WEEE disposal. *Waste Management* 30, 1643-1652, 2010.

INTERNATIONAL COMMUNICATION UNION. Measuring the Information Society Report. Disponível em <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/publications/misr2017/MISR2017_Volume1.pdf>. Acesso em 25 Setembro 2018.

ISLAM, M.T.; ABDULLAH, A.B.; SHAHIR, S.A.; KALAM, M.A.; MASJUKI, H.H.; SHUMON, R.; RASHID, M.H. A public survey on knowledge, awareness, attitude and willingness to pay for WEEE management: case study in Bangladesh. *Journal of Cleaner Production* 137, 728-740, 2016.

JANG, Y.; KIM, M. Management of used & end-of-life mobile phones in Korea: A review. *Resources, Conservation and Recycling* 55, 11-19, 2010.

JENA, S.K.; SARMAH, S.P. Measurement of consumers' return intention index towards returning the used products. *Journal of Cleaner Production* 108, 818-829, 2015.

KIANPOUR, K.; JUSOH, A.; MARDANI, A.; STREIMIKIENE, D.; CAVALLARO, F.; NOR, K.M.; ZAVADSKAS, E.K. Factors influencing consumers' intention to return the end of life electronic products through reverse supply chain management for reuse, repair and recycling. *Sustainability* 9, 1657, 2017.

KITCHENHAM, B. Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering. EBSE Technical Report, UK, 2007.

KOCHAN, C.G.; POURREZA, S.; TRAN, H.; PRYBUTOK, V.R. Determinants and logistics of e-waste recycling. *The international Journal of Logistics Management* 27, 52-70, 2016.

KUMAR, A. Extended TPB model to understand consumer “selling” behavior: Implications for reverse supply chain design of mobile phones. *Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics* 29, 721-742, 2017.

- LAU, W.K.; CHUNG, S.; ZHANG, C. A material flow analysis on current electrical and electronic waste disposal from Hong Kong households. *Waste Management* 33, 714-721, 2013.
- LI, J.; LIU, L.; REN, J.; DUAN, H.; ZHENG, L. Behavior of urban residents towards the discarding of waste electrical and electronic equipment: a case study in Baoding, China. *Waste Management and Research* 30, 1187-1197, 2012.
- LIANG, L.; SHARP, A. Determination of the knowledge of e-waste disposal impacts on the environment among different educational and income levels in China, Laos and Thailand. *J Mater Cycles Waste Manag* 19, 906-916, 2017.
- LIANG, LI.; SHARP, A. Determination of the Knowledge o e-waste disposal impacts on the environment among different gender and age groups in China, Laos and Thailand. *Waste Management and Research* 34, 388-395, 2016.
- MANOMAIVIBOOL, P.; VASSANADUMRONGDEE, S. Buying back household waste electrical and electronic equipment: Assessing Thailand's proposed policy in light of past disposal behavior and future preferences. *Resources, Conservation and Recycling* 68, 117-125, 2012.
- MILOVANTSEVA, N.; SAPHORES, J.D. E-waste bans and U.S. households' preferences for disposing of their e-waste. *Journal of Environmental Management* 124, 8-16, 2013a.
- MILOVANTSEVA, N.; SAPHORES, J.D. Time bomb or hidden treasure? Characteristics of junk TVs and of the US households who store them. *Waste Management* 33, 519-529, 2013b.
- MISHIMA, K., NISHIMURA, H. Requirement analysis to promote small-sized E-waste collection from consumers. *Waste Management and Research* 34, 122-128, 2015.
- MOBILE MUSTER. Disponível em <<https://www.mobilemuster.com.au/>>. Acesso em 13 Novembro 2013.
- NDUNESEOKWU, C.K.; QU, Y.; APPOLLONI, A. Factors influencing Consumers' Intentions to participate in a formal e-waste collection system: a case study of Onitsha, Nigeria. *Sustainability* 9, 881, 2017.
- NEWCOMB, P.J.; BRAS, B.; ROSEN, D.W. Implications of modularity on product design for the life cycle. *J Mech Design* 120, 483-490, 1998.
- NGUYEN, D.Q.; YAMASUE, E.; OKUMURA, H.; ISHIHARA, K.N. Use and disposal of large home electronic appliances in Vietnam. *J. Mater Cycles Waste Manag* 11, 358-366, 2009.
- NIELSEN, K.; BRUNØ, T. Closed Loop Supply Chains for Sustainable Mass Customization. Vittal Prabhu; Marco Taisch; Dimitris Kiritsis. 20th Advances in Production Management Systems (APMS). State College, PA, United States, 2013.
- NNOROM, I.C.; OSIBANJO, O. Overview of electronic waste (e-waste) management practices and legislations, and their poor applications in the developing countries. *Resources, Conservation and Recycling* 52, 843-858, 2008.
- NOWAKOWSKI, P. The influence of residents' behavior on waste electrical and electronic equipment collection effectiveness. *Waste Management & Research* 34, 1126-1135, 2016.
- OBERENDER, C.; BIRKHOFFER, H. Estimating environmental impacts: the use-phase analysis matrix – a use phase centered approach. In ICED Conference, Stockholm, 2003.
- OECD. Extended producer responsibility. Disponível em <<http://www.oecd.org/env/tools-evaluation/extendedproducerresponsibility.htm>>. Acesso em 13 Novembro 2018.
- ONGONDO, F.O.; WILLIAMS, I.D. Greening Academia: Use and disposal of mobile phones

among university students. *Waste Management* 31, 1617-1634, 2011.

ONGONDO, F.O.; WILLIAMS, I.D.; KEYNES S. Estimating the impact of the “digital switchover” on disposal of WEEE at household waste recycling centres in England. *Waste Management* 743-753, 2011.

OTHMAN, N.; MOHAMMAD, R.; KAMARUDDIN, S.A. Prediction of electronic waste disposals from residential areas in Malaysia. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)* 74, 1-6, 2015.

PÉREZ-BELIS, V.; BOVEA, M.D.; SIMÓ, A. Consumer behavior and environmental education in the field of waste electrical and electronic toys: A Spanish case study. *Waste Management* 36, 277-288, 2015.

PÉREZ-BELIS, V.; BRAULIO-GONZALO, M.; JUAN, P.; BOVEA, M.D. Consumer attitude towards the repair and second-hand purchase of small household electrical and electronic equipment. A Spanish case study. *J. Clean. Prod.* 158, 261-275, 2017.

PIERRON, X.; WILLIAMS, I.D.; SHAW, P.J.; CLEAVER, V. Using choice architecture to exploit a university Distinct Urban Mine. *Waste Management* 68, 547-556, 2017.

ROBINSON, B.H. E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of the Total Environment* 408, 183–191, 2009.

SABBAGHI, M.; BEHDAD, S.; ZHUANG, J. Managing consumer behavior toward on-time return of the waste electrical and electronic equipment: A game theoretic approach. *Int. J. Production Economics* 182, 545–563, 2016.

SABBAGHI, M.; ESMAEILIAN, B.; MASHHADI, A.R.; BEHDAD, S.; CADE, W. An investigation of used electronics return flows: A data-driven approach to capture and predict consumers storage and utilization behavior. *Waste Management* 36, 305–315, 2015.

SAPHORES, J.D.M.; NIXON, H.; OGUNSEITAN, O.A.; SHAPIRO, A.A. How much e-waste is there in US basements and attics? Results from a national survey. *Journal of Environmental Management* 90, 3322-3331, 2009.

SINGH, M.; THIND, P.S.; JOHN, S. An analysis on e-waste generation in Chandigarh: quantification, disposal pattern and future predictions. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 20, 1625-1637, 2018.

SMITH, S.; YEN, C. Green product design through product modularization using atomic theory. *Robot Comput Integr Manuf* 26, 790–798, 2010.

SONEGO, M.; ECHEVESTE, M.E.S.; GALVAN DEBARBA, H. The role of modularity in sustainable design: a systematic review. *J. Clean. Prod.* 176, 196-209, 2018.

SONG, Q.; WANG, Z.; LI, J. Residents’ behaviors, attitudes, and willingness to pay for recycling e-waste in Macau. *Journal of Environmental Management* 106, 8-16, 2012.

STREICHER-PORTE, M.; GEERING, A.C. Opportunities and Threats of current e-waste collection system in China: a case study from Taizhou with a focus on refrigerators, washing machines, and televisions. *Environmental Engineering Science* 27, 29-36, 2010.

SUSTAINABLE ELECTRONICS RECYCLING INTERNATIONAL. Disponível em <<https://sustainableelectronics.org/>>. Acesso em 13 Novembro 2018.

SWICO Recycling. Disponível em <<http://www.swicorecycling.ch/>>. Acesso 13 Novembro 2018.

SWISSCOM. Swisscom Mobile Aid. Disponível em

<<https://www.swisscom.ch/en/about/company/sustainability/mobile-aid.html>>. Acesso em 13 Novembro 2018.

THIÉBAUD-MÜLLER, E.; HILTY, L.M.; SCHLUEO, M.; WIDMER, R.; FAULSTICH, M. Service lifetime, storage time and disposal pathways of electronic equipment: a Swiss case study. *Journal of Industrial Ecology* 22, 196-208, 2017.

TSENG, H.; CHANG, C.; LI, J. Modular design to support green life-cycle engineering. *Expert Syst Appl* 34, 2524-2537, 2008.

UMEDA, Y.; FUKUSHIGE, S.; TONOIKE, K.; KONDOH, S. Product modularity for life cycle design. *CIRP Ann- Manuf Tech* 57, 13-16, 2008.

VERIZON WIRELESS. Disponível em <<https://www.verizonwireless.com/od/trade-in/>>. Acesso 13 Novembro 2013.

WANG, Z.; ZHANG, B.; GUAN, D. Take Responsibility for electronic-waste disposal. *Nature* 536, 23-25, 2016.

WANG, Z.; ZHANG, B.; YIN, J.; ZHANG, X. Willingness and behavior towards e-waste recycling for residents in Beijing City, China. *Journal of Cleaner Production* 19, 977-984, 2011.

WATSON, M. A Review of literature and research on public attitudes, perceptions and behaviour relating to remanufactured, repaired and reused products. Report for the Centre for Remanufacturing and Reuse: 1-26, 2008.

WEEE FORUM. International E-waste Day. Disponível em <<https://www.weee-forum.org/international-e-waste-day-0>>. Acesso em 13 Novembro 2018.

WELFENS, M.J.; NORDMANN, J.; SEIBT, A. Drivers and barriers to return and recycling of mobile phones. Case studies of communication and collection campaigns. *J. Clean. Prod.* 132, 108-121, 2016.

WIDMER, R.; OSWALD-KRAPF, H.; SINHA-KHETRIWAL, D.; SCHNELLMANN, M.; BONI, H. Global perspectives on e-waste. *Environmental Impact Assessment Review* 25, 436-458, 2005.

WIESER, H.; TRÖGER, N. Exploring the inner loops of the circular economy: replacement, repair and reuse of mobile phones in Austria. *J. Clean. Prod.* 172, 3042-3055, 2018.

WILSON, G.T.; SMALLEY, G.; SUCKLING, J.R.; LILLEY, D.; LEE, J.; MAWLE, R. The hibernating mobile phone: dead storage as a barrier to efficient electronic waste recovery. *Waste Management* 60, 521-533, 2017.

YIN, J.; GAO, Y.; XU, H. Survey and analysis of consumers' behavior of waste mobile phone recycling in China. *Journal of Cleaner Production* 65, 517-525, 2014.

YLÄ-MELLA, J.; KEISKI, R.L.; PONGRÁCZ, E. Electronic waste recovery in Finland; Consumer's perceptions towards recycling and re-use of mobile phones. *Waste Management* 45, 374-384, 2015.

ZETTL, M.; SELIGER, G.; BILGEN, E. Product Life Cycle Oriented Methodology Supporting the Development of Modular Product Structures. In *Global Conference on Sustainable Development and Life Cycle Engineering* 4, São Carlos, 2006

5. CONCLUSÕES

5.1 Análise conclusiva

A modularidade é uma estratégia amplamente reconhecida na área de desenvolvimento de produtos. A importância desta estratégia foi primeiramente associada à otimização de processos na fase de produção, garantindo economia de escala e permitindo a customização em massa.

Pesquisas mais atuais têm relacionado a modularidade ao desenvolvimento de produtos sustentáveis. Ma e Kremer (2016), em revisão sistemática sobre modularidade e sustentabilidade, reafirmam o impacto positivo que a modularidade tem para a sustentabilidade e relacionam benefícios do design modular com diferentes indicadores de sustentabilidade (econômicos, ecológicos e sociais). Os autores apontam benefícios objetivos, como o agrupamento de componentes conforme similaridades para o ciclo de vida, e também benefícios subjetivos, como o oferecimento de uma variedade de produtos que melhor respondam às necessidades dos usuários.

Esses benefícios objetivos apontadas pelo estudo de Ma e Kremer (2016) incentivam a criação de métodos de modularização com vista à sustentabilidade. Esses métodos auxiliam as equipes de desenvolvimento a agrupar os componentes dos produtos em módulos, usando diferentes técnicas e ferramentas, buscando otimizar o resultado desse processo. Os métodos de modularização são encontrados na literatura desde a década de 90, e alguns deles já incorporavam a questão ambiental (NEWCOMB et al., 1998; ERIXON, 1998).

No entanto, a grande maioria dos trabalhos que apresentam métodos de modularização sustentáveis consiste de aplicações teóricas, que supostamente preparam a arquitetura do produto para a geração de menor impacto ambiental, mas que não levam em conta o real ciclo de vida do produto e os *stakeholders* envolvidos. Em revisão sistemática de literatura sobre modularidade, Bonvoisin et al. (2016) discutem que muitos benefícios têm sido associados ao design modular, porém evidências da concretização destes benefícios são raramente apresentadas na literatura. Portanto, o objetivo geral desta tese é analisar a realização dos benefícios da modularidade visando sustentabilidade no ciclo de vida dos produtos.

Primeiramente, foi explorada a intersecção entre modularidade e design sustentável através da perspectiva do ciclo de vida do produto, na intenção de identificar os benefícios que a modularidade pode trazer para o desenvolvimento de produtos sustentáveis, e as categorias de assuntos mais trabalhadas na junção dos dois temas. Na realização desta fase inicial do trabalho, apontou-se a necessidade de se considerar o ciclo de vida dos produtos e a realização

dos benefícios propiciados pela modularidade, e o papel decisivo que o usuário tem nesse processo.

- *Contribuição 1: o papel do usuário da realização dos benefícios propiciados pela modularidade nas fases de uso e descarte dos produtos.*

A importância do usuário

Essa apresentação da modularidade como uma estratégia capaz de gerar um resultado mais sustentável sem levar em conta o contexto de utilização dos produtos e os *stakeholders* envolvidos não é condizente com as mais recentes pesquisas em sustentabilidade e valor, que reconhecem a importância das necessidades e interesses de todos os *stakeholders*, e apontam o valor como uma criação das interações entre eles. Atribuir a esta estratégia, ou qualquer outra utilizada no desenvolvimento do produto, à capacidade de diminuição do impacto ambiental é negar a complexidade das relações de compra/venda, uso e descarte de produtos nos dias atuais.

Quando analisados os benefícios que a literatura aponta para a modularidade no desenvolvimento de produtos sustentáveis, percebe-se que muitos deles estão na fase de uso e descarte do produto. A decisão de reparar, atualizar e a forma de descartar o produto são decisões tomadas pelo usuário. E essas decisões podem não estar em consonância com as premissas das equipes de desenvolvimento.

Na década de 90, Erixon (1998) propôs a ideia de ‘*modularity drivers*’, que seriam diferentes diretrizes para guiar o processo de modularização de um produto. Entre elas, encontram-se diretrizes para facilitar reparo, atualizações, manutenção e reciclagem do produto. Essa ideia de diretrizes exemplifica como a modularidade pode ser usada para diferentes fins, mesmo quando visando a sustentabilidade. Conhecer melhor o usuário fornece o conhecimento de quando e como usar a modularidade em cada caso específico, garantindo um resultado mais em consonância com suas atitudes. Por exemplo: produtos que tem demanda potencial para um mercado de produtos usados podem ser desenvolvidos visando reparo, garantindo a extensão de sua vida útil e sua circulação entre usuários. Produtos que tem uma aceitação mais difícil no mercado de produtos usados podem ser desenvolvidos visando a facilidade de desmontagem para reciclagem e remanufatura.

- *Contribuição 2: investigar práticas dos usuários e o contexto de uso dos produtos para decidir como usar a modularidade.*

Segundo os preceitos da Economia Circular, é preciso priorizar, primeiramente, a manutenção do produto, depois o seu reuso, remanufatura e, por último, sua reciclagem (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2018). Esses ciclos, chamados ciclos técnicos, buscam manter o produto em uso em seu estado original pelo maior tempo possível, evitando os danos gerados pelos processos de transformação e pela substituição por um novo produto.

Portanto, o capítulo 3 desta tese abordou os benefícios da modularidade na fase de uso dos produtos, exemplificados pelo reparo de produtos eletrônicos. O levantamento das atuais práticas dos usuários e demais stakeholders foi realizado através de uma revisão da literatura e de uma revisão de iniciativas de stakeholders. Nesta fase do estudo, pode-se perceber que os usuários encontram muitas barreiras que desencorajam o reparo. Essas barreiras tanto podem estar relacionadas à arquitetura do produto quanto aos modelos de negócio adotados pelas empresas, que não incentivam e não possibilitam o reparo dos produtos. Como conclusão, enfatiza-se a importância de uma visão sistêmica para atingir a sustentabilidade: não é possível esperar que o usuário busque pelo reparo quando não há um sistema que contribua para isso.

O papel da modularidade no reparo de produtos é reconhecido pela Diretiva 2009/125/EC do Parlamento Europeu, que estabelece um *framework* para os requisitos de Ecodesign de produtos que dependem de energia. A modularidade é reconhecida como ferramenta para a extensão da vida útil dos produtos. A Associação *Right to Repair* também reconhece e defende a incorporação da modularidade nos *standards* de desenvolvimento de produtos eletrônicos, juntamente com o compartilhamento de informações. O relatório de 2017 da associação aponta, inclusive, para uma realidade onde os produtos são cada vez menos modulares, contrariando essa visão de sustentabilidade e design duradouro.

Essa constatação evidencia um desalinhamento entre os objetivos do desenvolvimento sustentável e as atuais práticas das empresas. Portanto, é preciso elevar a discussão do uso da modularidade para a sustentabilidade e avançar a discussão para o contexto de desenvolvimento. Reconhecer a sustentabilidade como uma meta da empresa, a qual reflete não somente em escolhas para a arquitetura do produto, mas também em um modelo de negócios que contemple valores de sustentabilidade, envolvendo todos os *stakeholders*.

- *Contribuição 3: além de projetar produtos modulares, é preciso um modelo de negócio que vise a sustentabilidade, possibilitando aos usuários a realização dos benefícios projetados no design do produto.*

A fase de descarte

O quarto capítulo desta tese abordou a fase final da vida dos produtos. Assim como no capítulo 3, o capítulo 4 abordou os benefícios da modularidade na fase de descarte, exemplificados pela destinação dada pelos usuários aos produtos eletrônicos. O levantamento das destinações também foi realizado por meio de uma revisão sistemática da literatura e de uma revisão de iniciativas práticas.

Nesta fase do estudo pode-se perceber que grande parte dos produtos eletrônicos que não são mais utilizados não recebem uma destinação que possibilite a recuperação de valor propiciada pela modularidade. Muitos são armazenados em garagens e gavetas, e muitos são descartados informalmente ou em conjunto com o lixo doméstico. A falta de informação sobre os riscos associados a estas práticas influencia as decisões dos usuários, assim como a falta de uma infraestrutura eficiente e de ampla divulgação de recolhimento destes produtos. Como levantado pela literatura, é preciso informação e incentivo para que os usuários possam tomar decisões mais conscientes no descarte de seus produtos.

Para lidar com esta questão, muitos países já adotaram práticas de Responsabilidade Estendida do Produtor (EPR), e a modularidade tem papel reconhecido nestas práticas. A EPR estende a responsabilidade do produtor/importador até o final da vida do produto, financeira ou fisicamente, e incentiva os produtores a considerarem a questão ambiental ainda no desenvolvimento dos produtos. Um dos objetivos da EPR é promover uma gestão integrada do meio ambiente colocando uma ênfase no ciclo de vida do produto, enfatizando o papel do usuário, que precisa conhecer o EPR e entender a importância da sua participação na devolução dos produtos para o correto manejo de seu fim de vida.

- *Contribuição 4: é preciso informação e incentivo para que os stakeholders busquem a realização dos benefícios.*

O papel em abordagens mais amplas

Após a realização desta pesquisa, pode-se perceber que a modularidade é sim importante para o desenvolvimento de produtos sustentáveis, mas essa discussão precisa ir além de simples métodos de modularização visando sustentabilidade e suas aplicações teóricas. É preciso situar a modularidade como uma estratégia dentro de uma visão sistêmica, que considere todas as particularidades das relações entre *stakeholders* e todo o ciclo de vida do produto. Como defendido por Ceschin e Gaziulusoy (2016), recentes pesquisas sugerem sustentabilidade como

propriedade de um sistema, e não de elementos individuais que compõe o sistema. Portanto, a mudança na arquitetura do produto, por mais fundamental que seja, não é capaz de garantir a sustentabilidade.

O papel da modularidade enquanto uma estratégia para preparar o produto com vista a objetivos mais sustentáveis é evidenciada pelo seu reconhecimento em outras abordagens. Segundo a Fundação Ellen McArthur, o design modular é o aspecto central da Economia Circular, priorizando a modularização para a fácil desmontagem. A Economia Circular busca, gradualmente, a transição para um modelo econômico dissociado do consumo de recursos finitos, em um sistema regenerativo. Um dos princípios da Economia Circular é a “Construção da resiliência através da diversidade”, na qual a modularidade e a adaptabilidade são priorizadas em um mundo incerto e de rápida evolução. Os quatro blocos formadores da Economia Circular são: (i) design e produção de produtos circulares; (ii) novos modelos de negócio; (iii) construções de ciclos reversos; (iv) facilitadores para melhorar o desempenho de ciclos cruzados.

- *Contribuição 5: mudanças feitas na arquitetura do produto visando sustentabilidade são essenciais, mas não garantem a sustentabilidade: é preciso situar a modularidade como uma estratégia em abordagens mais amplas, envolvendo todos os stakeholders e considerando o ciclo de vida dos produtos.*

O reconhecimento na prática

Os *Sustainable Development Goals* das Organizações das Nações Unidas são um conjunto de dezessete objetivos, estabelecidos em 2015 pelo programa de Desenvolvimento da ONU, abordando desenvolvimento social e econômico. O objetivo número 12, chamado “*Responsible Consumption and Production*” prega um melhor entendimento dos impactos ambientais e sociais dos produtos e serviços, e de como o ciclo de vida dos produtos é afetado pelo uso conforme o estilo de vida do usuário. Este objetivo também enfatiza a necessidade de foco em todos os integrantes da cadeia, desde produtores até consumidores – incluindo sua educação com relação a estilos de vida e consumo mais sustentáveis, e provendo a eles informações que gerem engajamento.

Para as empresas, o objetivo número 12 sugere usar de seu poder de inovação para desenhar soluções que, ao mesmo tempo, permitam e inspirem usuários a adotar estilos de vida mais sustentáveis, reduzindo o impacto no meio ambiente e aumentando sua qualidade de vida. Para os usuários, o objetivo 12 sugere a atenção com o que é comprado, e a escolha de opções

mais sustentáveis sempre que possível.

O *Greenpeace* divulga anualmente uma análise das principais empresas de eletrônicos do mundo com relação as suas atitudes para com a sustentabilidade, chamado *The Guide to Greener Electronics*. O guia de 2017 aponta a empresa *Fairphone* como a empresa com melhores práticas, destacando o design modular com reparo e atualizações facilitadas, em oposição aos designs de grandes companhias que tem se tornado cada vez mais integrais. Além do design modular, a *Fairphone* também possui uma cadeia de suprimentos transparente, fornecimento de ouro certificado para seus aparelhos, tornou público o *Live Cycle Assessment* de seus produtos, e disponibiliza aos usuários manuais e módulos para reposição.

Outro ponto importante citado no objetivo 12 da ONU e também nos preceitos da Economia Circular é a redução nos níveis atuais de consumo. O próprio relatório do *Greenpeace* de 2017 enfatiza o papel das empresas de eletrônicos no lançamento incessante de novos modelos, encurtando o ciclo de vida dos produtos e dificultando a manutenção e upgrades dos modelos mais antigos. O relatório cita Apple e Samsung, líderes no mercado de *smartphones*, como empresas atuando na direção contrária a sustentabilidade, por se utilizarem da obsolescência programada como um recurso de design. O mesmo relatório mais uma vez cita a *Fairphone* como um bom exemplo, graças a reparabilidade e capacidade de atualização de seus produtos propiciados pela modularidade.

Uma visão sistêmica

De forma geral, esta tese evidenciou a importância de considerar o ciclo de vida dos produtos e os *stakeholders* envolvidos para o alcance da sustentabilidade. É preciso ir além do investimento na arquitetura do produto e das premissas de desenvolvimento e, de fato, conhecer os *stakeholders* e suas necessidades, principalmente o usuário. Como enfatizado pelo relatório da ONU, inovar para permitir e inspirar as pessoas e tomarem ações mais conscientes.

A figura 5.1 apresenta um diagrama de influências que engloba os principais *stakeholders* para a sustentabilidade discutidos por esta tese: governos, ONG's, empresas e usuários. As setas representam ações que estes *stakeholders* podem tomar e como elas formam um sistema que promove e possibilita atitudes mais sustentáveis dos usuários. Os *stakeholders* e seus papéis foram levantados na pesquisa feita no capítulo 3, e apresentada na Figura 3.3 e na Tabela 3.4. As setas indicam relações entre stakeholders, e os sinais “+” e “-” indicam influências positivas e negativas. Este diagrama ilustra a visão sistêmica defendida por esta tese, que contempla diferentes ações que devem ser adotadas em conjunto com as modificações na

arquitetura do produto para garantir resultados mais sustentáveis. Os capítulos 3 e 4 apresentam iniciativas que exemplificam essas ações, podendo servir de inspiração para empresas que buscam por abordagens mais integradas de design sustentável.

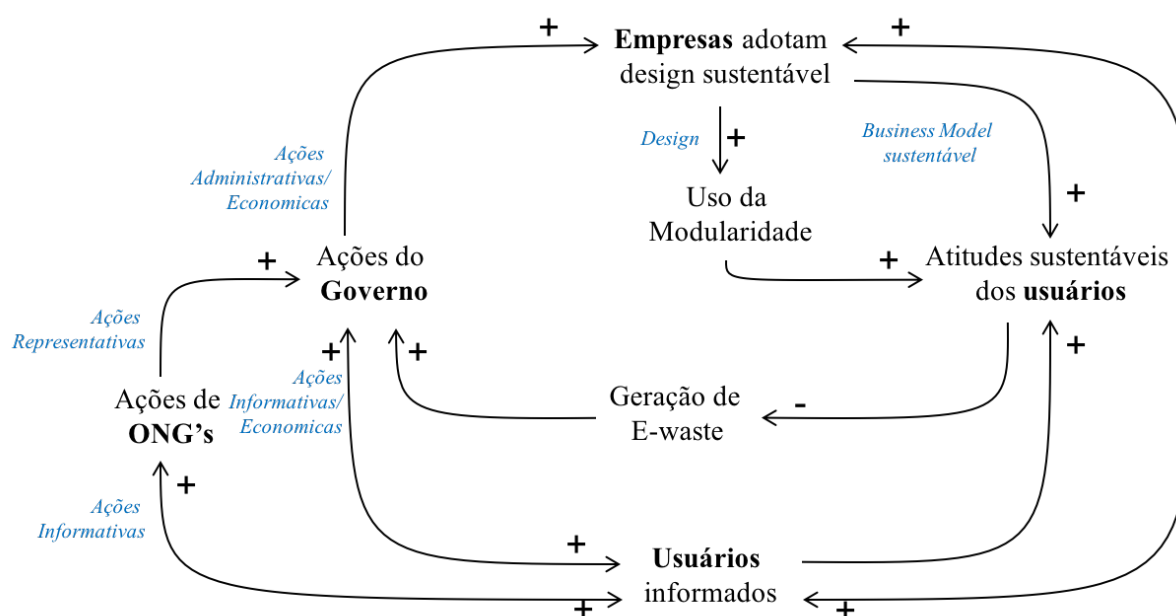


Figura 5-1: Diagrama de influência das ações dos stakeholders

Portanto, é preciso elevar os patamares de discussão da modularidade, transcender os exemplos teóricos, e buscar entender qual o melhor uso da modularidade em cada caso e quais outras medidas devem ser tomadas em simultâneo para que se possa tirar máxima vantagem desta estratégia.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

As contribuições discutidas por este trabalho geram oportunidades para trabalhos e desenvolvimentos futuros, como:

- Verificar a percepção dos usuários a respeito da modularidade e se eles reconhecem a ligação dessa estratégia com a sustentabilidade. Esse conhecimento é importante para entender se a modularidade pode ser um fator de promoção da mudança no comportamento esperada para se atingir a sustentabilidade;
- Aprofundar a discussão dos diferentes benefícios alcançados com o uso da modularidade para sustentabilidade e entender qual utilizar em cada caso específico;

- Discutir melhores práticas associadas ao modelo de negócios das empresas que podem ser adotadas em conjunto com a modularidade;
- Situar os métodos de modularização em contextos mais amplos de sustentabilidade, oferecendo às empresas uma solução mais completa para a diminuição de impactos ambientais.

5.3 Referências

BONVOISIN, J.; HALSTENBERG, F.; BUCHERT, T.; STARK, R. A systematic literature review on modular product design. *J Eng Design* 27, 488–514, 2016.

CESCHIN, F.; GAZIULUSOY, I. Evolution of design for sustainability: from product design to design for system innovations and transitions. *Design Stud* 47, 118-163, 2016.

DIRECTIVE 2009/125/EC. Directive establishing a framework for the setting of eco-design requirements for energy-related products. Disponível em < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32009L0125>>. Acesso em 02 Maio 2018.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Disponível em <www.ellenmacarthurfoundation.org>. Acesso em 07 Novembro 2018.

ERIXON, G. Modular Function Deployment – a method for product modularization. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technnology, Stockholm, 1998.

OECD. Extended Producer Responsibility. Disponível em <<http://www.oecd.org/env/tools-evaluation/extendedproducerresponsibility.htm>>. Acesso em 07 novembro 2018.

GREENPEACE. Guide to greener electronics. Disponível em <<https://www.greenpeace.org/usa/wp-content/uploads/2017/10/Guide-to-Greener-Electronics-2017.pdf>>. Acesso em 07 Novembro 2018.

MA, J.; KREMER, G.E.O. A systematic literature review of modular product design (MPD) from the perspective of sustainability. *Int. J Adv Manuf Technol* 86, 1509-1539, 2016.

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

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Sustainable Development Goals. Disponível em <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>> Acesso em 07 Novembro 2018.

THE REPAIR ASSOCIATION. Right to Repair. Disponível em <<https://repair.org/>>. Acesso em 07 Novembro 2018.