



PROPOSTA DE CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE CONCEITOS DE PRODUTOS FÍSICOS

Marcelo Ruy*

Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de São Carlos, Brasil

Universidade Federal de Uberlândia, Brasil

marceloruy@fagen.ufu.br

Dario Henrique Alliprandini

Doutor em Engenharia Mecânica pela Escola de Engenharia de São Carlos, Brasil

Centro Universitário da FEI, Brasil

dario.allip@fei.edu.br

RESUMO

O objetivo do trabalho é propor critérios de avaliação ambiental de conceitos de produtos físicos (bens). A proposta foi desenvolvida em duas etapas. Inicialmente, por meio de uma pesquisa teórico-conceitual, criou-se uma hierarquia de critérios ambientais a ser utilizada com métodos existentes de seleção de conceitos. Na segunda etapa a proposta foi avaliada tanto do ponto de vista de requisitos teóricos, quanto relativamente a seu potencial de utilidade prática por meio de entrevistas semiestruturadas com especialistas. A proposta concebida contribui para ampliar o portfólio de métodos para o desenvolvimento de produtos ambientalmente responsáveis.

Palavras-chave: Projeto conceitual; Avaliação ambiental de conceitos; DfE; Ecodesign.

*Autor para correspondência/ Author for correspondence/ Autor para la correspondencia: Avenida João Naves de Ávila 2121 - Bloco 1F, Sala 1F216, Campus Santa Mônica, Uberlândia/MG/Brasil CEP 38408-100, Tel.: (34) 3239-4132

Data do recebimento do artigo (received): 24/abr./2015

Data do aceite de publicação (accepted): 13/ago./2015

Desk Review

Double BlindReview

PROPOSAL OF CRITERIA FOR ENVIRONMENTAL EVALUATION OF PHYSICAL PRODUCTS CONCEPTS

ABSTRACT

The objective of the paper is to propose criteria for environmental evaluation of physical products concepts (goods). The proposal was developed in two stages. Initially, by means of a theoretical-conceptual research, we create a hierarchy of environmental criteria to be used with existing methods of concept selection. In the second stage, the proposal was assessed by theoretical requirements and relatively to its practical utility potential using semi-structured interviews with experts. The proposal contributes to augment the portfolio of methods to the development of environmental responsible products.

Keywords: Conceptual design, Environmental assessment of concepts, DfE; Ecodesign.

PROPUESTA DE CRITERIOS DE AVALUACIÓN AMBIENTAL DE CONCEPTOS DE PRODUCTOS FÍSICOS

RESUMEN

El objetivo del trabajo es proponer criterios de evaluación ambiental de conceptos de productos físicos (bienes). La propuesta se desarrolló en dos etapas. Inicialmente, a través de una investigación teórico-conceptual, se ha creado una jerarquía de criterios ambientales para ser usada con métodos existentes de selección de conceptos. En la segunda etapa la propuesta fue evaluada tanto desde el punto de vista de los requisitos teóricos, como por su potencial para el uso práctico a través de entrevistas semiestructuradas con expertos. La propuesta concebida contribuye para ampliar la cartera de métodos para el desarrollo de productos responsables con el medio ambiente

Palabras Clave: Diseño conceptual; Evaluación ambiental de conceptos; DfE; Ecodesign.

INTRODUÇÃO

Há um crescente consenso de que o desenvolvimento sustentável é um dos temas de maior importância da atualidade e um dos maiores desafios enfrentados pela sociedade moderna (Bernstein *et al.*, 2010; Klöpffer, 2003; Maxwell & Vorst, 2003; Rebitzer & Hunkeler, 2003).

Segundo Klöpffer (2008) e Labuschagne e Brent (2005), a definição mais difundida é a que a sustentabilidade é formada por três pilares: Ambiente, Economia e Sociedade. No pilar ambiental da sustentabilidade residem grandes desafios, pois segundo Hart (1995), há riscos de se danificar irreversivelmente o sistema ecológico do planeta caso não seja alterada a natureza atual das atividades econômicas.

De acordo com Knight e Jenkins (2009) e Ramani *et al.* (2010), o processo de desenvolvimento de produtos é uma das atividades que mais influencia o pilar ambiental da sustentabilidade uma vez que a maioria dos impactos ambientais podem ser atribuíveis aos produtos consumidos pelas pessoas.

A importância de se incorporar as questões ambientais durante o desenvolvimento de produto se deve ao fato de que até 80% dos impactos ambientais de um produto são determinados por seu projeto. (Ellram, Tate & Carter, 2008; Kengpol & Boonkanit, 2011; Mascle & Zhao, 2008; Maxwell & Vorst, 2003).

As etapas iniciais do projeto do produto e em especial a fase de projeto conceitual são as mais determinantes para o desempenho ambiental do produto, pois as decisões tomadas não podem ser facilmente desfeitas ou retificadas em fases posteriores (Bernstein *et al.*, 2010; Devanathan, Ramanujan, Bernstein, Zhao & Ramani, 2010; Kengpol & Boonkanit, 2011; Poudelet, Chayer, Margni, Pellerin & Samson, 2012; Ramani *et al.*, 2010).

Ecodesign ou DfE (*design for environment* – projeto voltado para o ambiente) é definido como qualquer ação tomada durante o desenvolvimento de produtos voltada a minimizar o impacto ambiental do produto durante todo o seu ciclo de vida, sem comprometer outros critérios essenciais tais como qualidade, custo, aparência, etc. (Borchardt, Wendt, Pereira & Sellitto, 2011; Bovea & Pérez-Belis, 2012; Ramanujan *et al.*, 2014). A lógica é que o desempenho ambiental do produto não pode ser obtido à custa de outros atributos, pois o potencial de melhoria do produto só será plenamente realizado caso ele seja comprado e substitua o concorrente ambientalmente inferior.

O método mais poderoso para se analisar as consequências ambientais das decisões tomadas durante o projeto do produto é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). A ACV é uma estrutura metodológica para estimar e avaliar os impactos ambientais atribuíveis ao produto durante todo o seu ciclo de vida.

É bem documentado que a utilização da ACV durante o projeto do produto não é uma tarefa trivial (Bernstein *et al.*, 2010; Devanathan *et al.*, 2010; Knight & Jenkins, 2009; Millet, Bistagnino, Lanzavecchia, Camous, & Poldma, 2007; Poudelet *et al.*, 2012; Ramani *et al.*, 2010; Telenko,

Seepersad & Webber, 2008). Sua utilização requer um projeto de produto completamente especificado, além de demandar, tempo, recursos, *expertise* e uma grande quantidade de dados, muitos dos quais não inteiramente disponíveis no início do projeto.

Em suma, o método mais poderoso para se detectar e melhorar os pontos críticos ambientais do produto na prática acaba sendo utilizado apenas depois que o projeto do produto foi encerrado ou na fase de projeto detalhado, onde o potencial de melhoria é mínimo (Millet *et al.*, 2007). Ou seja, particularmente na fase de projeto conceitual, onde a quantidade de alternativas é grande e diversa, os detalhes são escassos e o tempo é curto, a ACV não é a ferramenta ideal (Bernstein *et al.*, 2010; Devanathan *et al.*, 2010; Ramani *et al.*, 2010).

Uma alternativa seria a utilização das ACV simplificadas. Entretanto, de acordo com Millet *et al.* (2007), uma das dificuldades em seu uso é relacionar os impactos ambientais potenciais com as características e requisitos do produto. E este relacionamento é de especial importância quando o objetivo é utilizar os resultados da ACV como fonte de informação para guiar as decisões do desenvolvimento.

Os materiais, energia e substâncias químicas que entram no sistema do produto estão de certa forma incorporados no produto, direta ou indiretamente. Dessa forma, uma vertente de autores propõe a especificação de estratégias e diretrizes de projeto que guardam relação com impactos ambientais potenciais da ACV. Segundo Telenko e Seepersad (2010), tais diretrizes constituem-se de generalizações de lições aprendidas a partir de avaliações que apontaram falhas ou potenciais de melhoria ambiental em produtos e são denominadas de Estratégias de DfE.

Porém, um cuidado especial deve ser tomado com esse tipo de ferramenta. Muitas vezes, algumas das estratégias são conflitantes entre si e, o que é pior, podem ser contraproducentes para certos tipos de produtos. De acordo com Ramanujan *et al.* (2014), é fundamental escolher apenas o subconjunto de estratégias certas para cada caso, de forma a se otimizar o desempenho ambiental do produto. Devido às complexidades associadas ao ciclo de vida do produto, a incorporação da sustentabilidade ambiental no projeto requer métodos e ferramentas de suporte (Boks, 2006; Devanathan *et al.*, 2010; Vargas Hernandez, Okudan Kremer, Schmidt & Acosta Herrera, 2012). A falta de ferramentas adequadas ao projeto e especialmente voltadas para o projetista faz com que a sustentabilidade ambiental não seja tratada como um parâmetro crítico do projeto, mas um problema a ser resolvido a posteriori (Devanathan *et al.*, 2010; Knight & Jenkins, 2009; Lofthouse, 2006).

De acordo com Gremyr, Siva, Raharjo e Goh (2014), uma área que necessita de mais atenção e futuro desenvolvimento é a de práticas e ferramentas voltadas para a fase de projeto conceitual. Diversos autores apontam a escassez de métodos orientados aos aspectos ambientais que sejam apropriados a essa fase (Choia, Niesb, & Ramanic, 2008; Devanathan *et al.*, 2010; Gremyr *et al.*, 2014; Kengpol & Boonkanit, 2011; Ramani *et al.*, 2010).

Nesta fase do projeto, é fundamental ferramentas que permitam resolver o conflito entre funcionalidade e impacto ambiental do produto e que não sejam apenas utilizáveis por *experts* ambientais (Gremyr *et al.*, 2014; Fitzgerald, Herrmann & Schmidt, 2010; Knight & Jenkins, 2009). Assim, segundo Gremyr *et al.* (2014), a tendência das pesquisas nesta área aponta na direção da integração das considerações ambientais aos métodos e práticas de engenharia já existentes e utilizados pelos projetistas ao invés da criação de ferramentas totalmente novas.

A partir dessas considerações, o objetivo do presente trabalho é propor critérios para a avaliação ambiental de conceitos de produtos baseados nas Estratégias de DfE. Criou-se uma hierarquia de critérios ambientais a ser utilizada com métodos existentes de seleção de conceitos, tais como a matriz de Pugh, AHP ou matriz de pontuação. O foco é nos produtos físicos, principalmente os bens de consumo duráveis e os bens de capital e o propósito é auxiliar na avaliação do conceito do produto que mais bem atenda aos critérios do DfE, considerando todo o ciclo de vida do produto e sem negligenciar outros requisitos essenciais de um produto.

O presente artigo encontra-se dividido nas seguintes seções: inicialmente são apresentadas a metodologia da pesquisa e a compilação de estratégias de DfE. A seguir, é descrita uma tipologia ambiental para produtos e sua relação com as estratégias de DfE é exposta. Na sequência, a proposta de critérios de avaliação ambiental de conceitos de produtos físicos é apresentada, bem como sua avaliação. Encerra-se o artigo com as considerações finais.

MÉTODOS DE PESQUISA

Para atingir o objetivo proposto, o trabalho foi desenvolvido em duas etapas. A primeira etapa seguiu a abordagem denominada desenvolvimento teórico-conceitual, que inclui revisão bibliográfica e discussões e sínteses conceituais (Miguel, 2004, 2007). Nesta etapa, Estratégias de DfE foram compiladas e posteriormente relacionadas a uma tipologia ambiental de produtos. A seguir, as estratégias relacionadas com as dimensões físicas do produto (expressas pelo uso e consumo de recursos materiais) foram condensadas em critérios de avaliação. Estes critérios foram subsequentemente agrupados por grau de semelhança, formando uma hierarquia de critérios ambientais.

Na segunda etapa, a proposta foi avaliada inicialmente de um ponto de vista teórico utilizando-se a teoria da Decisão Multicriterial. Em um segundo momento, a proposta também foi avaliada com relação a seu potencial de utilidade prática por 3 profissionais ligados ao desenvolvimento de produtos de 3 empresas e por um consultor em DfE.

O procedimento para a avaliação consistiu de entrevistas semiestruturadas com os especialistas. As entrevistas seguiram uma ordem fixa. Inicialmente, por meio de *slides*, foi apresentada a teoria na qual a proposta se baseia. Foram abordados os temas desenvolvimento de produtos, a fase de projeto conceitual, a etapa de seleção de conceitos, o ciclo de vida do produto, as

estratégias de DfE e uma tipologia ambiental de produtos. A seguir, foi apresentada a proposta de critérios para avaliação ambiental de conceitos de produtos físicos. Concomitantemente à apresentação, o entrevistado podia manifestar suas dúvidas e opiniões.

Por fim, foi solicitado ao entrevistado avaliar a proposta. Utilizou-se um protocolo de entrevista contendo 15 questões (Figura 1).

- 1) A proposta facilita a estruturação do problema e orienta o usuário no processo de avaliação do conceito do produto que mais bem atenda aos critérios ambientais, dentro de um a perspectiva de ciclo de vida do produto?
- 2) O nível de detalhamento da proposta é adequado para auxiliar a avaliação do conceito do produto ambientalmente mais correto?
- 3) A proposta é precisa, isto é, representa bem a realidade modelada e evita a geração de soluções por acaso?
- 4) A proposta é aplicável a diversos tipos de produtos físicos?
- 5) A proposta é compatível com os conhecimentos das áreas de gerenciamento de projetos, gestão de desenvolvimento de produtos, DfE e do raciocínio de ciclo de vida?
- 6) A proposta é eficiente, ou seja, possibilita a resolução do problema sem a necessidade de nenhuma alteração ou adaptação em sua estrutura básica?
- 7) A estrutura da proposta é clara e objetiva e apresenta lógica e consistência no fluxo de informações?
- 8) A proposta é aplicável a vários tipos de projetos e empresas?
- 9) A proposta contém toda a informação necessária para a escolha do conceito ambientalmente mais correto?
- 10) A proposta pode ajudar a evitar decisões inapropriadas, de maneira a harmonizar as demandas ambientais com os demais requisitos do produto?
- 11) A proposta pode servir de orientação e diretriz para gerentes de projetos de produtos introduzirem os princípios do DfE no desenvolvimento de produtos?
- 12) Na etapa de projeto conceitual, é possível fazer as comparações entre os critérios ambientais exigidos pela proposta?
- 13) Cite os principais pontos negativos da proposta.
- 14) Cite os principais pontos positivos da proposta (se houver algum em sua opinião).
- 15) Comentários, sugestões e críticas.

Figura 1 – Protocolo de entrevista

Fonte: elaborado pelos autores

O pesquisador tomou notas das respostas do entrevistado e ao final revisou com ele a síntese dos resultados. As questões foram construídas a partir das características pretendidas pela proposta e de critérios de avaliação de modelos de referência de Vernadat (1996).

COMPILAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE DfE

Está seção apresenta uma compilação de Estratégias de DfE encontradas na literatura. Para definir quais materiais seriam considerados válidos para a pesquisa bibliográfica, foi realizada uma triagem inicial baseada em quatro critérios.

O primeiro critério utilizado foi que as estratégias deveriam prioritariamente estar relacionadas com decisões tomadas pelos projetistas do produto, tais como *layout* do produto, formas e tipos de componentes, seleção de materiais, dentre outras. O segundo critério foi o nível de aplicação, isto é, que as estratégias, em sua maioria, fossem maneiras úteis de se melhorar o projeto do produto. O terceiro critério foi que o conjunto de estratégias propostas pelos autores deveria ter como objetivo todas as etapas do ciclo de vida do produto. O último critério foi que as estratégias deveriam ser aplicáveis a um número diverso de produtos.

Ao final desse processo, terminou-se com a seguinte lista de autores: Brezet e Hemel (1997 *as cited in* Lee e Park, 2005), Crul e Dihel (2006), Fiksel (2009), Giudice, Rosa e Risitano (2006), Graedel e Allenby (1998), Keoleian e Menerey (1993), Lee e Park (2005), Luttrup and Lagerstedt (2006), Telenko, Seepersad e Webber (2008), Thompson (1999), Vezzoli e Manzini (2003), Wimmer e Züst (2003), Züst (2002).

Para compilar as estratégias, a partir das propostas desses autores, foi utilizado o diagrama de afinidades. O diagrama de afinidades destina-se a reunir fatos e ideias que estão em estado de desorganização. Os dados são agregados de acordo com sua afinidade mútua. O desenvolvimento de um diagrama de afinidades envolve as seguintes etapas: inicialmente, um tema ou problema é selecionado. A seguir, dados verbais são coletados. Em um terceiro momento, os dados verbais são reduzidos a frases que devem ser transferidas a cartões independentes. Na sequência, os cartões são agrupados e cada grupo é rotulado; esse processo continua até que o número de grupos identificados seja satisfatório.

Especificamente, as estratégias propostas por cada autor foram transcritas para os cartões. Estratégias idênticas ou muito semelhantes foram agrupadas e renomeadas. A seguir, essas estratégias renomeadas foram novamente transcritas em cartões e esses foram agrupados. Desse processo, surgiram 38 estratégias que foram agrupadas em torno de 7 temas: materiais, energia, toxicidade e emissões do produto, vida do produto, desmontagem do produto, embalagem do produto e sistema de produção e sua gestão. Os temas e estratégias são apresentados a seguir.

- Materiais

- Estratégia 1: Minimizar quantidade de materiais e partes e reduzir o peso do produto;
- Estratégia 2: Diminuir a variedade de materiais;
- Estratégia 3: Utilizar materiais reciclados;
- Estratégia 4: Utilizar materiais recicláveis, compatíveis entre si e com tecnologia de reciclagem eficiente;

- Estratégia 5: Evitar o uso de materiais escassos e preferir materiais abundantes ou renováveis;
- Estratégia 6: Restaurar e reutilizar partes e componentes (entre produtos do mesmo modelo ou entre famílias de produtos);
- Estratégia 7: Padronizar materiais e componentes;
- Estratégia 8: Eliminar ou minimizar a quantidade dos itens consumíveis do produto;
- Estratégia 9: Evitar materiais incompatíveis entre si, compósitos, ligas e materiais misturados que não possam ser separados;
- Estratégia 10: Utilizar materiais melhores e tratamentos superficiais para proteger o produto de sujeira, corrosão e desgaste;
- Estratégia 11: Identificar materiais e incluir instruções sobre o descarte.

- Energia

- Estratégia 12: Utilizar materiais com baixo conteúdo energético;
- Estratégia 13: Minimizar o consumo de energia dos processos;
- Estratégia 14: Minimizar o consumo de energia no transporte e armazenagem;
- Estratégia 15: Minimizar o consumo de energia em uso;
- Estratégia 16: Fonte de energia do produto: dar preferência a fontes de energia renováveis;
- Estratégia 17: Fonte de energia do processo: utilizar fontes renováveis ou mais limpas de energia.

- Toxicidade e Emissões do Produto

- Estratégia 18: Selecionar materiais atóxicos e inofensivos e evitar o uso de materiais ou substâncias tóxicas nos componentes;
- Estratégia 19: Evitar a utilização dos itens consumíveis tóxicos no produto;
- Estratégia 20: Garantir o uso seguro do produto e eliminar o potencial de dano ambiental em caso de falha;
- Estratégia 21: Minimizar a geração de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas durante o uso do produto.

- Vida do Produto

- Estratégia 22: Facilitar a manutenção;
- Estratégia 23: Facilitar o reparo;
- Estratégia 24: Facilitar a atualização e a adaptação do produto a mudanças no desempenho;
- Estratégia 25: Projetar para durabilidade apropriada;
- Estratégia 26: Aumentar a confiabilidade;
- Estratégia 27: Facilitar o reuso do produto;
- Estratégia 28: Facilitar a remanufatura do produto;

- Estratégia 29: Otimizar a funcionalidade (projetar produtos multifuncionais ou que possuam diversas funções integradas);
- Estratégia 30: Substituir produto por serviço; arrendar o produto ao invés de vendê-lo.

- Desmontagem do Produto

- Estratégia 31: Concentrar elementos tóxicos, perigosos ou valiosos, de forma a facilitar e tornar rápida a remoção para a reutilização, reciclagem ou descarte adequados;
- Estratégia 32: Facilitar a desmontagem do produto.

- Embalagem do Produto

- Estratégia 33: Reduzir o volume do produto;
- Estratégia 34: Minimizar a quantidade, o volume e o peso da embalagem;
- Estratégia 35: Especificar materiais adequados, padronizar, reciclar e reutilizar a embalagem.

- Sistema de Produção e sua Gestão

- Estratégia 36: Minimizar a geração de resíduos sólido, efluentes líquidos e emissões gasosas durante a produção (processo de produção mais limpo);
- Estratégia 37: Aumentar a eficiência do processo, diminuir perdas, reduzir quantidade de materiais e reutilizar e/ou reciclar perdas internas;
- Estratégia 38: Implantar sistema de gestão de suprimentos verde.

Classificação Ambiental de Produtos

De acordo com Wimmer e Züst (2003), do ponto de vista ambiental, os produtos podem ser classificados nos seguintes tipos básicos: produtos intensivos em matérias-primas, produtos intensivos na fabricação, produtos intensivos em transporte, produtos intensivos no uso e produtos intensivos no descarte.

Nos produtos intensivos em matérias-primas (tipo A), o consumo de energia e de materiais necessários para o processamento das matérias-primas contidas no produto claramente excedem os impactos ambientais que ocorrem nas fases subsequentes do ciclo de vida. Exemplos são computadores e dispositivos eletrônicos com baixo consumo de energia.

Nos produtos intensivos na fabricação (tipo B), os maiores impactos são devidos à provisão de energia e materiais para sua fabricação, bem como às emissões e ao consumo de recursos requeridos pelos processos produtivos. Adicionalmente, esses produtos podem conter partes e montagens que envolvem muitos estágios produtivos individuais ou que são manufaturadas em diferentes locais, exigindo muito transporte. Exemplos são peças de mobília.

Nos produtos intensivos em transporte (tipo C), o transporte da planta industrial até o local de uso do produto e a embalagem são os fatores determinantes para o desempenho ambiental global do produto. Os produtos do tipo C são caracterizados por uma forma especial de distribuição. Isso

ocorre quando produtos pesados ou volumosos são transportados por longas distâncias. Exemplos são cerâmicas, embalagens e garrafas.

Para os produtos intensivos no uso (tipo D), os impactos durante o uso do produto dominam o impacto ambiental global do produto. O consumo de energia e/ou materiais ou a geração de emissões gasosas, efluentes líquidos ou resíduos sólidos durante o uso causam impactos substanciais. Exemplos típicos são máquinas de lavar louças e de lavar roupas.

Produtos intensivos no descarte (tipo E) são caracterizados pelo fato de o descarte, retomada e desmontagem serem os fatores dominantes no impacto global do produto. Isto pode ser causado por substâncias problemáticas ou por materiais combinados inseparáveis que causam problemas no descarte. A desmontagem e separação dos materiais consomem muito tempo, são intensivas em mão de obra e causam um ônus adicional ao ambiente. Além disso, uma mistura desvantajosa de materiais pode reduzir dramaticamente a possibilidade de reciclagem. Ainda, outro problema é o descarte do produto, pelo usuário, juntamente com lixo doméstico, sem a separação e o descarte adequado dos materiais perigosos. Esta prática pode gerar emissões venenosas e ambientalmente perigosas. Exemplos são as baterias.

Algumas vezes não é possível designar inequivocamente um produto a um dos 5 tipos vistos anteriormente. Nesses casos, é aconselhável investigar pelo menos dois picos de impactos em detalhes e combinar as estratégias pertencentes aos tipos básicos para realizar a melhoria do produto.

Na literatura consultada, os autores que relacionaram estratégias de DfE com tipos de produtos ou impactos das mesmas nas etapas do ciclo de vida do produto foram Wimmer e Züst (2003), Vezzoli e Manzini (2008) e Giudice, Rosa e Risitano (2006). A partir da análise dos mesmos, foi possível determinar quais são as estratégias mais indicadas em função da tipologia de produtos apresentada anteriormente, como indica a Figura 2.

Estratégias de DfE	Tipos de Produtos					Estratégias de DfE	Tipos de Produtos				
	A	B	C	D	E		A	B	C	D	E
Estratégia 1	✓		✓			Estratégia 20				✓	
Estratégia 2	✓				✓	Estratégia 21				✓	
Estratégia 3	✓					Estratégia 22	✓	✓		✓	
Estratégia 4	✓				✓	Estratégia 23	✓	✓			✓
Estratégia 5	✓				✓	Estratégia 24	✓	✓		✓	
Estratégia 6	✓	✓			✓	Estratégia 25	✓	✓			✓
Estratégia 7	✓	✓			✓	Estratégia 26	✓	✓		✓	
Estratégia 8				✓		Estratégia 27	✓	✓			✓
Estratégia 9	✓				✓	Estratégia 28	✓	✓			✓
Estratégia 10	✓	✓			✓	Estratégia 29	✓	✓		✓	
Estratégia 11	✓				✓	Estratégia 30	✓	✓			✓
Estratégia 12	✓					Estratégia 31	✓				✓
Estratégia 13		✓				Estratégia 32	✓	✓			✓
Estratégia 14			✓			Estratégia 33			✓		
Estratégia 15				✓		Estratégia 34			✓		
Estratégia 16				✓		Estratégia 35			✓		
Estratégia 17		✓				Estratégia 36		✓			
Estratégia 18	✓				✓	Estratégia 37		✓			
Estratégia 19				✓		Estratégia 38		✓			

Figura 2. Relação das Estratégias de DfE com os Tipos de Produtos.

Fonte: Elaborada pelos Autores.

CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE CONCEITOS DE PRODUTOS FÍSICOS

Nem todas as estratégias compiladas na seção 3 consistem de intervenções diretamente ligadas aos parâmetros-chave do produto. Algumas delas se relacionam com o projeto dos processos produtivos, que muito embora seja de suma importância e intimamente ligado ao desenvolvimento de produto, não é diretamente relevante aos objetivos deste trabalho.

Uma segunda categoria de estratégias a serem desconsideradas são aquelas direcionadas à redução dos recursos utilizados na fabricação do produto e incluem todas as intervenções e escolhas que favorecem a redução do uso de materiais e de recursos energéticos na produção.

Outra categoria inclui as estratégias tais como a desmaterialização e o arrendamento e podem ser alocadas ao domínio das estratégias de negócio.

Neste artigo, a atenção está focada no produto como um objeto material – um conjunto de componentes materiais projetados de forma a constituir um sistema funcional que satisfaz certos requisitos. Seguindo a proposta de Giudice, Rosa e Risitano (2006), serão consideradas apenas as estratégias relacionadas à dimensão física do produto e expressas pelo uso e consumo de recursos materiais:

(...) esta visão parcial do problema ambiental pode parecer limitada, mas na realidade é bem abrangente; o único aspecto completamente ignorado é aquele intervindo sobre os vários processos tecnológicos que constituem o ciclo de vida. (...). Com relação ao modo com que o conteúdo energético e de emissões dos materiais contribuem para os impactos ambientais, ambos são claramente atribuíveis ao fluxo de materiais. Relativamente à energia utilizada para abastecer os processos produtivos e às emissões diretas advindas da mesma, ambas também podem ser geralmente atribuídas aos volumes de materiais ou a parâmetros de processo dependentes de propriedades físicas ou geométricas dos materiais. Estes todos podem ser gerenciados por meio de escolhas no projeto do produto; a definição de materiais e os principais parâmetros geométricos condicionam a escolha dos processos e como esses processos são executados. (p. 194)

Este foco no fluxo de materiais e, portanto, na dimensão física do produto, permite que sejam excluídas as seguintes estratégias de DfE tratadas na seção 3: 11, 13, 14, 17, 30, 34, 35, 36, 37 e 38. Após essas exclusões, as estratégias remanescentes foram agrupadas em torno de critérios de avaliação mais genéricos, enquanto outras apenas foram renomeadas de forma adequada, gerando, então, os critérios para a avaliação ambiental de conceitos de produtos físicos, como indica a Figura 3.

Critério	Estratégias	Critério	Estratégias
1. Peso dos materiais.	1	11. Impacto ambiental durante o uso.	8; 19; 20; 21
2. Volume do produto.	33	12. Durabilidade	10; 25
3. Fração de materiais reciclados	3	13. Facilidade de manutenção	22
4. Energia incorporada nos materiais	12	14. Adaptabilidade do produto	24
5. Grau de reciclagem dos materiais	2; 4; 9	15. Confiabilidade	26
6. Grau de escassez dos materiais.	5	16. Multifuncionalidade	29
7. Grau de toxicidade dos materiais.	18	17. Facilidade de reparo	23

8. Grau de reuso de partes e componentes	6; 7	18. Grau de reuso	27
9. Consumo de energia do produto em uso.	15	19. Facilidade de remanufatura	28
10. Fonte de energia do produto.	16	20. Facilidade de desmontagem.	31; 32

Figura 3. Derivação dos Critérios de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos Físicos.

Fonte: Elaborada pelos Autores.

Por fim, após sua derivação, a última etapa foi a construção da hierarquia dos critérios. A Figura 4 mostra os critérios agrupados segundo uma hierarquia, bem como seu relacionamento com a tipologia ambiental de produtos adotada na seção 3.1.

Critérios		Tipo de Produto				
		A	B	C	D	E
Volume do Produto (2)				✓		
Materiais	Quantidade	Peso (1)	✓		✓	
		Fração de Reciclados (3)	✓			
		Energia Incorporada (4)	✓			
	Tipo	Escassez (6)	✓			✓
Toxicidade (7)		✓			✓	
Uso	Energia	Consumo de Energia (9)			✓	
		Fonte de Energia (10)			✓	
	Impacto Ambiental no Uso (11)				✓	
Vida Útil	Vida Física	Durabilidade (12)	✓	✓		✓
		Facilidade de Manutenção (13)	✓	✓		✓
		Confiabilidade (15)	✓	✓		✓
		Facilidade de Reparo (17)	✓	✓		✓
	Vida Tecnológica	Adaptabilidade (14)	✓	✓		✓
		Multifuncionalidade (16)	✓	✓		✓
Fim de Vida	Grau de Reciclagem dos Materiais (5)		✓			✓
	Grau de Reuso de Partes e Componentes (8)		✓	✓		✓
	Grau de Reuso do Produto (18)		✓	✓		✓
	Facilidade de Remanufatura (19)		✓	✓		✓
Facilidade de Desmontagem (20)		✓	✓			✓

Figura 4. Hierarquia dos Critérios *versus* Tipos de Produtos.

Fonte: Elaborada pelos Autores.

Para se avaliar os conceitos (alternativas) com relação aos critérios, é necessária a definição de cada um dos critérios, bem como, em alguns casos, os parâmetros a serem utilizados para sua avaliação. Isso é mostrado a seguir.

O critério 1 compara a relação estimada entre os pesos das alternativas sendo consideradas. Produtos para os quais este critério é relevante são os do tipo A e C (figura 4). Para eles, esta variável tem a estrutura de valor invertida, ou seja, quanto maior a quantidade de materiais, pior é a situação, pois há maior necessidade de extração e processamento de matérias-primas e, além disso, produtos mais pesados gastam mais energia para o seu transporte.

O critério 2 compara os volumes estimados das alternativas, sendo, também invertido, pois produtos volumosos ocupam maior espaço nos meios de transporte, causando maior gasto energético para seu traslado.

O critério 3 compara a fração de materiais reciclados incorporada nas alternativas. Quanto maior essa fração, menor a demanda pela extração e processamento de matérias-primas novas. Portanto, este critério tem estrutura de valor positiva, ou seja, quanto maior o seu valor, melhor sua avaliação. Se nenhuma das alternativas possuir reciclados, o critério pode ser eliminado. Se houver alternativas com alguma fração de reciclados e outras não, as primeiras tem avaliação positiva e as últimas são neutras com relação ao critério.

O critério 4 compara a energia incorporada nos materiais das alternativas. Quanto maior a energia incorporada, maior quantidade de energia é necessária na fabricação dos materiais do produto, aumentando os impactos ambientais desses materiais. Logo, o critério é invertido.

O critério 5 é relativo ao grau de reciclagem dos materiais das alternativas, ou seja, a proporção dos materiais que podem ser reciclados. Este critério é do tipo positivo, pois quanto maior esse grau, menor é a necessidade do processamento de novos materiais e menor a quantidade de materiais descartados. O grau de reciclagem é influenciado pela variedade de materiais presentes no produto, a existência de combinações de materiais incompatíveis entre si e as tecnologias de reciclagem existentes. Aqui valem as mesmas observações relativas ao critério 3, caso haja algumas ou todas alternativas com 0% de grau de reciclagem.

O critério 6 compara o grau de escassez dos materiais que compõem as alternativas. Materiais escassos são aqueles cujo tempo de depleção (tempo das reservas conhecidas) é curto. É um critério invertido, pois, do ponto de vista ambiental, o ideal é a utilização de materiais renováveis ou que não tenham previsão de restrição de fornecimento no curto e no médio prazo.

O critério 7 avalia a toxicidade dos materiais das alternativas. Dependendo dos tipos de conceitos de produtos existentes na análise, este critério deve ser avaliado de maneira diferente. Há três situações distintas. O primeiro caso é se nenhum dos conceitos contiver substâncias tóxicas ou perigosas. Nesta situação, o critério não é importante e pode ser eliminado. O segundo caso é se todos os conceitos contiverem substâncias tóxicas. Sob esta hipótese, este critério pode ser tratado como um critério invertido, sendo a maior avaliação alocada ao “menor dos males”. O terceiro caso é aquele onde alguns conceitos não contêm substâncias tóxicas, enquanto outros as possuem por proporcionarem ganhos em outros critérios. As alternativas que não contêm elementos tóxicos são opções com avaliação elevada no critério comparativamente àquelas que possuem esses elementos.

O critério 8 compara o grau de possibilidade de reuso de partes e componentes das alternativas. Da figura 3 nota-se que este critério é influenciado pelo grau de padronização das peças e componentes. É um critério positivo, pois quanto maior este grau, menos partes novas serão necessárias, diminuindo o uso de recursos e o impacto ambiental devido ao descarte. Sob este

critério, assim como os de números 3 e 5, as alternativas podem apresentar possibilidade de reuso zero, valendo, assim, as mesmas considerações relativas a aqueles critérios.

O critério 9 é importante para produtos que consomem energia durante o uso. Quanto maior o consumo de energia, maior o impacto ambiental do produto. A avaliação desse critério é similar à avaliação da toxicidade. Se todas as alternativas consomem energia, o critério é invertido. Se algumas consumirem energia e outras não, as primeiras receberão avaliações mais baixas comparativamente às últimas.

O critério 10 também é importante para produtos ativos e compara o quanto um tipo de fonte de energia de um produto é mais benigno que outra sendo, portanto, um critério positivo. Este critério só será importante caso haja alternativas com fontes de energia diferentes.

O critério 11 compara o impacto ambiental das alternativas que utilizam itens consumíveis (quantidade e toxicidade), que podem representar potencial de dano ambiental em caso de falha ou que geram resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas durante seu uso. Sua avaliação é similar aos critérios 7 e 9. Caso todas as alternativas causarem esses problemas, o critério é invertido. Se algumas forem problemáticas e outras não, as primeiras receberão avaliações mais baixas comparativamente às últimas.

O critério 12 compara a durabilidade das alternativas. Produtos para os quais este critério é relevante são os do tipo A, B e E (Figura 4). Para tais produtos, esta variável tem a estrutura de valor positiva; quanto maior a durabilidade, menor a necessidade da extração e processamento de novos materiais e menor a quantidade de materiais descartados.

O critério 13 compara a facilidade de manutenção relativa das alternativas. Uma manutenção apropriada ajuda a evitar os impactos ambientais de reparos, do descarte e da produção de um novo produto. Segundo Vezzoli e Manzini (2008) e Giudice, La Rosa e Risitano (2006), as seguintes diretrizes podem auxiliar na avaliação da facilidade de manutenção das alternativas: facilidade de acesso e de desmontagem dos componentes que passarão por manutenção; facilidade de acesso às partes a serem limpas; o arranjo e a facilidade de substituição de partes que se deterioram mais rapidamente; o grau de agrupamento de componentes de acordo com as propriedades físicas, mecânicas, níveis de confiabilidade e funções compartilhadas; facilidade de diagnóstico de quais são as partes que irão necessitar de manutenção; os tipos ferramentas de manutenção necessários (fáceis de utilizar, padronizados, etc.); e projetos que impliquem menos manutenção. Este critério é do tipo positivo.

O critério 14 compara a facilidade com que as alternativas são adaptáveis e podem ser atualizadas. Como a adaptação e a atualização podem estender a vida do produto, diminuindo, dessa maneira, o consumo de recursos e a geração de resíduos, este é um critério do tipo positivo. Para Giudice, La Rosa e Risitano (2006), as seguintes diretrizes auxiliam na avaliação deste critério: grau de modularidade do *design*; grau com que a arquitetura do produto é reconfigurável, permitindo sua

adaptação a diferentes ambientes; grau com que função, desempenho e estética são adaptáveis à evolução e mudanças do usuário.

O critério 15 é relativo à confiabilidade. Uma vez que produtos mais confiáveis devem ser consertados ou substituídos com menor frequência, este critério é do tipo positivo. De acordo com Vezzoli e Manzini (2008), a confiabilidade é influenciada pelo número de componentes, pela complexidade do produto e pelos tipos de uniões entre os componentes.

O critério 16 relaciona-se com a multifuncionalidade das alternativas. Produtos multifuncionais são melhores do ponto de vista ecológico na medida em que a mesma quantidade de material proporciona um nível maior de funcionalidade. Logo, este é um critério do tipo positivo.

O critério 17 compara a facilidade de reparo das alternativas. As vantagens ambientais do reparo são semelhantes às da manutenção. Desta maneira, este critério também é positivo. Vezzoli e Manzini (2008) fornecem as seguintes diretrizes que podem auxiliar na avaliação deste critério: facilidade de acesso a partes a serem reparadas; intercambiabilidade e padronização das partes; facilidade de remoção e remontagem de componentes críticos sujeitos à deterioração e avarias; facilidade de diagnosticar a necessidade de reparos; e facilidade de reparo *in loco*.

O critério 18 é relativo ao reuso direto do produto. O reuso permite obter os benefícios ambientais advindos da redução do processamento de materiais e partes novas. Provavelmente, antes de ser utilizado novamente, o produto deverá ser checado e reparado. Dessa forma, este critério avalia a viabilidade das alternativas consideradas serem reutilizadas. Por isso, este é um critério positivo. Vezzoli e Manzini (2008) fornecem as seguintes diretrizes relativas ao reuso do produto: resistência dos componentes irrecuperáveis passíveis de danos; facilidade de acesso e remoção dos componentes recuperáveis; modularidade, padronização e grau de substituição de componentes; possibilidade de utilização secundária do produto.

O critério 19 avalia a facilidade de remanufatura das alternativas. A remanufatura é o processo de recondicionar produtos desgastados pelo uso e retorná-los a uma condição próxima a de um novo. Os benefícios da remanufatura são semelhantes ao do reuso, porém em menor grau. É, também, um critério positivo. As seguintes diretrizes podem ser úteis para se avaliar a facilidade de remanufatura do produto: facilidade de remoção e substituição de componentes recuperáveis; facilidade de separar as partes estruturais dos componentes externos; facilidade de acesso aos componentes a serem remanufaturados (Vezzoli & Manzini, 2008).

O critério 20 avalia a facilidade com que as alternativas podem ser completamente desmontadas. É um critério com impacto em manutenção, reparo, recuperação de partes e componentes para reuso e reciclagem. A facilidade de desmontagem depende dos seguintes parâmetros: quantidade de uniões e interfaces; simplicidade da arquitetura do produto, quantidade de componentes e número de partes em cada nível de desmontagem; facilidade de acesso aos componentes; sequência de desmontagem; facilidade de separação de componentes e materiais,

incluindo os incompatíveis; reversibilidade dos sistemas de união; número de paralelismos presentes no processo de desmontagem; e facilidade de identificação dos materiais contidos no produto pelo indivíduo que procederá com o desmonte (Fiksel, 2009; Giudice, La Rosa & Risitano, 2006; Keoleian & Menerey, 1993; Luttrup & Lagerstedt, 2006; Telenko, Seepersad & Webber, 2008; Thomson 1999; Vezzoli & Manzini, 2008, Wimmer & Züst, 2001). É um critério positivo.

AVALIAÇÃO DA PROPOSTA

Este capítulo apresenta a avaliação baseada em requisitos e a Avaliação Baseada na Opinião de Especialistas

Avaliação Baseada em Requisitos Teóricos

Tendo se construído uma hierarquia, é necessário julgar se a mesma é uma representação precisa e útil do problema. Para isso, foram utilizados os conhecimentos de uma das áreas da Pesquisa Operacional denominada Decisão Multicriterial. Esta linha de pesquisa estuda métodos de escolha de alternativas de ação que levam em consideração um conjunto de objetivos e critérios que podem ser multidimensionais e conflitantes. Goodwin e Wright (2004) sugerem que uma boa hierarquia deva possuir cinco atributos: totalidade, operacionalidade, decomposição, ausência de redundância e tamanho mínimo. É necessário determinar um “meio termo” entre esses cinco atributos, uma vez que eles são conflitantes.

A totalidade indica se todos os critérios de interesse foram incluídos. Considera-se que todos os critérios necessários foram incluídos, pois estes foram derivados de uma compilação de estratégias de DfE executada a partir de uma ampla revisão bibliográfica.

A operacionalidade significa que os critérios no nível mais baixo da hierarquia são suficientemente específicos para poderem ser avaliados e comparados. Considera-se que este atributo foi atendido, pois no processo de escolha das referências bibliográficas para a compilação das estratégias de DfE, houve as seguintes considerações: as estratégias deveriam prioritariamente estar relacionadas com decisões tomadas pelos projetistas do produto; as estratégias seriam, em sua maioria, maneiras úteis de se melhorar o projeto do produto; as estratégias deveriam ser aplicáveis a um número diverso de produtos.

A decomposição requer que o desempenho de cada alternativa possa ser julgado independentemente de seu valor nos outros critérios. Alguns dos critérios derivados das estratégias de DfE não são totalmente independentes entre si. O critério desmontagem influencia a manutenção, o reparo, a recuperação de partes e componentes para reuso e a reciclagem. A durabilidade do produto depende da manutenção e da confiabilidade. Manutenção e reparo facilitam o reuso. Portanto, a hierarquia apresentada atende parcialmente ao critério decomposição. Segundo

Lootsma (1999), na prática é muito difícil atender plenamente a esse critério e sobreposições acabam ocorrendo, principalmente em situações complexas, onde há muitos critérios de decisão.

Ausência de redundância ocorre quando critérios não duplicam outros, caso contrário haveria uma “contagem em dobro”, levando certos critérios a terem um peso indevido no final. Com relação à ausência de redundância, considera-se que os critérios não duplicam outros, pois houve a preocupação de agregar aqueles que eram comuns (Figura 4).

Uma hierarquia excessivamente grande torna uma análise significativa impossível. Os critérios não devem ser decompostos além do nível que possam ser medidos. Com relação ao tamanho mínimo, considera-se que a quantidade de critérios é adequada para se avaliar a questão ambiental na etapa de projeto conceitual. Durante todo o processo de conversão das estratégias de DfE para os critérios de avaliação ambiental de conceitos, houve a preocupação de síntese. As 38 estratégias compiladas originalmente foram reduzidas para 20 critérios. Além disso, como indica a Figura 3, não necessariamente todos os critérios serão utilizados simultaneamente, pois dependem do tipo de produto apresentado na seção 3.1.

Em face dessas considerações, conclui-se que a hierarquia apresentada na Figura 4 é uma representação adequada do objeto de estudo.

Avaliação Baseada na Opinião de Especialistas

Nesta subseção, a proposta de critérios para a avaliação ambiental de conceitos de produtos físicos foi avaliada com relação à sua adequação e grau de aplicação prática por 3 profissionais ligados ao desenvolvimento de produtos de 3 empresas e por um consultor em DfE.

O avaliador A é graduado e mestre em engenharia mecânica e doutor em engenharia de produção e assessora empresas a estruturarem suas ações de sustentabilidade por meio do conceito de *Life Cycle Management* focado na definição de estratégias e programas de ecodesign. O avaliador B é graduado e mestre em engenharia mecânica e trabalha como gerente sênior de tecnologia de produtos em uma empresa multinacional de linha branca, divisão de lavadoras. O avaliador C é graduado e mestre em engenharia de produção e trabalha como gerente de projetos em uma empresa nacional de máquinas e implementos agrícolas. O avaliador D é graduado em engenharia mecânica, atua há 17 anos como projetista de produtos e atualmente trabalha como engenheiro de desenvolvimento e projetos de bombas centrífugas especiais em uma empresa multinacional.

Durante a entrevista, o avaliador A realçou que a grande virtude da proposta consiste em ser quantitativa, o que combina muito bem com o estilo de raciocínio analítico de engenheiros e projetistas. Em sua experiência com consultorias em empresas, explicou que o uso de ferramentas quantitativas goza de maior credibilidade junto aos clientes. Por outro lado, o mesmo apontou que a maior deficiência da proposta consiste na tipologia ambiental adotada. Na sua visão, normalmente não é tarefa trivial para os integrantes de uma equipe de projeto escolher entre os tipos de produto

(A, B, C, D ou E), exceto nos casos onde a empresa já tenha feito estudos ambientais anteriores em produtos similares ao que está sendo projetado.

Esta visão foi corroborada pelas observações dos avaliadores C e D. O avaliador C sugeriu que seria interessante orientar o usuário na escolha do tipo de produto, talvez com um roteiro de perguntas cuja combinação de respostas determinasse qual o tipo de produto (A, B, C, D ou E). O avaliador D também julgou que a escolha do tipo de produto é dependente da experiência do usuário. Na realidade, nenhum dos três profissionais ligados ao PDP de empresas considerou a tipologia difícil de entender. Porém, eles a julgaram difícil de ser determinada, exceto B, cuja empresa claramente manufatura um produto intensivo no uso.

Assim como A, o avaliador C também apontou como um aspecto positivo a característica quantitativa e objetiva da proposta. O mesmo considerou como um dos pontos fortes da proposta a sua característica hierárquica e, por consequência, a possibilidade de a avaliação ambiental ser combinada com os demais requisitos do produto.

O avaliador D destacou como aspecto positivo o fato de a proposta ser concebida para ser utilizada nas etapas iniciais do projeto do produto e também a natureza dos critérios de avaliação. Na visão de D, os critérios baseados nas estratégias do DfE são fáceis de serem entendidos pelos responsáveis pelo projeto, pois estão relacionados aos parâmetros do produto. Ainda segundo D, como a melhoria destes critérios, além de trazer benefícios ao ambiente, tem impactos econômicos, isto seria um fator facilitador para a sua adoção prática. Adicionalmente, o avaliador D também teceu quatro comentários relativos à necessidade de se ter alguma experiência e conhecimento especializado em questões ambientais para operar a proposta.

Por fim, tem-se o avaliador B. Como principal ponto positivo, ele realçou que a proposta é muito bem estruturada. Durante a entrevista, o avaliador B, assim como D, viu potencial para a proposta ser adaptada para ser aplicada em outros domínios além da avaliação de conceitos, tais como avaliação entre tecnologias concorrentes. Similarmente aos demais, este especialista também avaliou ser possível utilizar a proposta para uma gama de produtos físicos, bem como não haver dificuldades em se julgar os critérios ambientais na etapa de projeto conceitual.

O especialista B também comentou que os critérios de avaliação ambiental poderiam servir de premissas a orientar a geração de requisitos do produto. Esta é uma atividade desenvolvida no início da fase de projeto conceitual ou, dependendo do grau de estruturação do processo de desenvolvimento de produtos da empresa, na fase imediatamente anterior denominada projeto informacional. A proposta de critérios para a avaliação ambiental de conceitos de produtos teve como escopo a etapa subsequente de seleção de conceitos. Não obstante, os critérios foram obtidos a partir de regras de projeto denominadas estratégias de DfE, que realmente podem servir de maneiras para gerar requisitos do produto para orientar a concepção de produtos. Inclusive, um dos critérios utilizados na seleção das estratégias de DfE para compilação (seção 3) foi que as mesmas

deveriam ser maneiras úteis de se melhorar o projeto do produto. Um aspecto chave da seção 3.1 é que foram fornecidas quais seriam as estratégias de DfE mais indicadas dependendo do tipo de produto em desenvolvimento (A, B, C, D ou E). Desta maneira, um subproduto da proposta é um conhecimento que pode ser utilizado também para orientar a geração de requisitos ambientais para produtos, muito embora esse não tenha sido o seu foco principal. Além das estratégias de DfE, há, por exemplo, métodos para a determinação de requisitos de produtos ambientalmente responsáveis baseados no QFD (Bernstein *et al.*, 2010; Devanathan *et al.*, 2010; Ramani *et al.*, 2010).

Contudo, o avaliador B manifestou dúvidas se seria possível haver discriminação entre os conceitos no caso de a proposta ser aplicada a produtos cuja tecnologia de fabricação seja madura e as inovações no produto sejam do tipo incremental, como é o caso da empresa em que ele atua (denominados de projetos do tipo derivado). Isto é, ao se comparar os conceitos com relação aos critérios ambientais, todos seriam aproximadamente equivalentes. Esta questão só pode ser totalmente esclarecida por meio da utilização da proposta em um ou mais casos práticos. Como isto não foi o foco do presente trabalho, duas hipóteses são discutidas.

A primeira hipótese é que, com relação aos critérios ambientais que compõem a proposta, os conceitos são próximos, mas há a possibilidade de nas comparações saber qual é marginalmente superior ao outro. A etapa de seleção de conceitos é iterativa e novos conceitos podem surgir nesta etapa. Muito embora a etapa de geração de conceitos tenha sido completada antes do início da etapa de seleção de conceitos, alguns dos refinamentos e melhorias mais criativos ocorrem durante o processo de avaliação e seleção de conceitos, na medida em que a equipe percebe quais são os pontos positivos e negativos de certas características dos conceitos.

Por outro lado, há a possibilidade da dificuldade de comparação dos conceitos relativamente aos critérios ser devido ao fato de o critério ser muito genérico. Dessa forma, ao se tentar comparar alternativas muito próximas, tal comparação ficaria inviável devido ao nível de abstração do critério. Nesta situação a solução se relaciona com a operacionalidade dos critérios (seção 5.1), isto é, se elementos no nível mais baixo da hierarquia são suficientemente específicos para poderem ser avaliados e comparados. Quando um critério não é operacional ele deve ser adicionalmente dividido em subcritérios mais específicos. Isto demandaria acrescentar um nível à hierarquia da Figura 4. No entanto, esta mesma crítica só foi levantada para produtos do tipo derivado, ou seja, quando as inovações no produto são do tipo incremental.

Em síntese, pode-se registrar os seguintes pontos com relação a avaliação pelos especialistas: a avaliação dos critérios ambientais com base quantitativa é positiva e uma forma adequada de se abordar a seleção de conceitos; os critérios ambientais propostos podem ser utilizados na avaliação dos conceitos e também como orientação prévia antes do início da concepção dos conceitos; a compreensão da tipologia ambiental de produtos é fundamental para a utilização prática da proposta.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo propor critérios de avaliação ambiental de conceitos de produtos físicos, principalmente bens de consumo duráveis e bens de capital. A justificativa por esta escolha se deveu: à atualidade da temática da sustentabilidade, em particular, à premência do tratamento da questão ambiental; sua forte dependência do processo de desenvolvimento de produtos; e à necessidade de métodos e ferramentas apropriados para se incorporar as questões ambientais às fases iniciais do projeto do produto, devido à sua escassez na literatura.

A proposta foi construída a partir da compilação de Estratégias de DfE relacionadas à dimensão física do produto e expressas pelo uso e consumo de recursos materiais. Estas estratégias foram condensadas em critérios de avaliação ambiental de conceitos de produtos. Tais critérios foram relacionados a uma tipologia ambiental de produtos e agrupados por grau de semelhança, formando uma hierarquia de critérios ambientais para o uso com métodos existentes de seleção de conceitos, tais como a matriz de Pugh, AHP ou matriz de pontuação.

Desta maneira, buscou-se criar uma hierarquia de critérios voltada a minimizar o impacto ambiental do produto durante todo o seu ciclo de vida, sem negligenciar outros requisitos essenciais de um produto, tais como qualidade, custo, aparência, etc.

A proposta foi analisada de um ponto de vista teórico e por profissionais ligados ao desenvolvimento de produtos de três empresas e por um consultor em DfE, de forma a se avaliar sua adequação e grau de aplicação prática. Como o foco principal do trabalho foi a proposição dos critérios, não foi possível avaliar de forma direta o seu grau de utilidade na solução de problemas para os quais a ferramenta foi desenvolvida. Assim, optou-se por se avaliá-la de maneira indireta, por meio do conhecimento dos profissionais. Muito embora tenham sido escolhidos apenas respondentes relevantes para o desenvolvimento teórico do assunto, ou seja, profissionais ligados ao processo de desenvolvimento de produtos de empresas que executam a fase de projeto conceitual e um especialista em DfE, o pouco tempo que eles tiveram para avaliar a proposta e a falta de uma aplicação prática limitam o alcance de suas avaliações.

Em face dos resultados obtidos, pode-se considerar que o objetivo do trabalho foi atingido. Assim, os critérios de avaliação ambiental de conceitos de produtos físicos se constitui em uma contribuição para o desenvolvimento de produtos ambientalmente responsáveis.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à PROPP/UFU pelo apoio à consecução deste trabalho.

Os autores agradecem aos comentários e sugestões dos dois revisores anônimos.

REFERÊNCIAS

- Bernstein, W., Ramanujan, D., Devnathan, S., Zhao, F., Ramani, K., & Sutherland, J. (2010). *Development of a framework for sustainable conceptual design*. Proceedings of 17th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, LCE2010, China, 242–247.
- Boks, C. (2006). The soft side of ecodesign. *Journal of Cleaner Production*, 14(15), 1346-1356.
- Borchardt, M., Wendt, M. H., Pereira, G. M., & Sellitto, M. A. (2011). Redesign of a component based on eco-design practices: environmental impact and cost reduction achievements. *Journal of Cleaner Production*, 19(1), 49–57.
- Bovea, M. D., & Pérez-Belis, V. (2012). A taxonomy of eco-design tools for integrating environmental requirements into the product design process. *Journal of Cleaner Production*, 20(1), 61–71.
- Choia, J. K., Niesb, L. F., & Ramanic, K. (2008). A framework for the integration of environmental and business aspects toward sustainable product development. *Journal of Engineering Design*, 19(5), 431–446.
- Crul, M. R. M., & Diehl, J. C. (2006). *Design for sustainability: a practical approach for developing economies*. Paris: UNEP Division of Technology, Industry, and Economics.
- Devanathan, S., Ramanujan, D., Bernstein, W. Z., Zhao, F., & Ramani, K. (2010). Integration of sustainability into early design through the function impact matrix. *Journal of Mechanical Design*, 132(8), 081004-1–081004-8.
- Ellram, L. M., Tate, W., & Carter, C. R. (2008). Applying 3DCE to environmentally responsible manufacturing practices. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1620-1631.
- Fiksel, J. (2009). *Design for environment: a guide to sustainable product development* (2nd ed.). New York: Mc Graw Hill.
- Fitzgerald, D. P., Herrmann, J. W., & Schmidt, L. C. (2010). A conceptual design tool for resolving conflicts between product functionality and environmental impact. *Journal of Mechanical Design*, 132(9), 091006-1–091006-11.
- Giudice, F., Rosa, G. Ia, & Risitano, A. (2006). *Product design for the environment: a life cycle approach*. Florida: CRC Press.
- Goodwin, P., & Wright, G. (2004). *Decision analysis for management judgment* (3rd ed.). West Sussex: John Wiley & Sons.
- Graedel, T. E., & Allenby, B. R. (1998). *Design for environment*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Gremyr, I., Siva, V., Raharjo, H., & Goh, T. N. (2014). Adapting the robust design methodology to support sustainable product development. *Journal of Cleaner Production*, 79, 231–238.
- Hart, S. L. (1995). A natural-resource-based view of the firm. *The Academy of Management Review*, 20(4), 986–1014.
- Kengpol, A., & Boonkanit, P. (2011). The decision support framework for developing eco-design at conceptual phase based upon ISO/TR14062. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 4–14.
- Keoleian, G. A., & Menerey, D. (1993). *Life cycle design guidance manual: environmental requirements and the product system* (EPA/600/R-92/226), U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, D.C.

- Klöpffer, W. (2003). Life-cycle based methods for sustainable product development. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(3), 157–159.
- Klöpffer, W. (2008). Life cycle sustainability assessment of products (with Comments by Helias A. Udo de Haes p.95). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(2), 89–94.
- Knight, P., & Jenkins, J. O. (2009). Adopting and applying eco-design techniques: a practitioners perspective. *Journal of Cleaner Production*, 17(5), 549–558.
- Labuschagne, C., & Brent, A. C. (2005). Sustainable project life cycle management: the need to integrate life cycles in the manufacturing sector. *International Journal of Project Management*, 23(2), 159-168.
- Lee, K. M., & Park, P. J. (2005). *Ecodesign: best practice of ISO/TR 14062*. Korea: Eco-product Research Institute (ERI), Ajou University.
- Lofthouse, V. (2006). Ecodesign tools for designers: defining the requirements. *Journal of Cleaner Production*, 14(15–16), 1386–1395.
- Lootsma, F. A. (1999). *Multi-criteria decision analysis via ratio and difference judgment*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Luttrupp, C., & Lagerstedt, J. (2006). EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. *Journal of Cleaner Production*, 14(15), 1396-1408.
- Masclé, C., & Zhao, H. P. (2008). Integrating environmental consciousness in product/process development based on life-cycle thinking. *International Journal of Production Economics*, 112(1), 5-17.
- Maxwell, D., & Van der Vorst, R. (2003). Developing sustainable products and services. *Journal of Cleaner Production*, 11(8), 883-895.
- Miguel, P. A. C. (2004). An investigation of qualitative research in an industrial engineering post graduate program. *Anais do XI Simpósio de Engenharia de Produção*, Bauru, SP, Brasil.
- Miguel, P. A. C. (2007). Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. *Produção*, 17(1), 216–229.
- Millet, D., Bistagnino, L., Lanzavecchia, C., Camous, R., & Poldma, T. (2007). Does the potential of the use of LCA match the design team needs? *Journal of Cleaner Production*, 15(4), 335–346.
- Poudelet, V., Chayer, J. A., Margni, M., Pellerin, R., & Samson, R. (2012). A process-based approach to operationalize life cycle assessment through the development of an eco-design decision-support system. *Journal of Cleaner Production*, 33, 192-201.
- Rebitzer, G., & Hunkeler, D. (2003). Life cycle costing in LCM: ambitions, opportunities, and limitations. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(5), 253–256.
- Ramani, K., Ramanujan, D., Bernstein, W. Z., Zhao, F., Sutherland, J., Handwerker, C., Choi, J.-K.; Kim, H., & Thurston, D. (2010). Integrated sustainable life cycle design: a review. *Journal of Mechanical Design*, 132(9), 091004-1–091004-15.
- Ramanujan, D., Bernstein, W. Z., Choi, J.-K., Koho, M., Zhao, F., & Ramani, K. (2014). Prioritizing design for environment strategies using a stochastic analytic hierarchy process. *Journal of Mechanical Design*, 136(7), 071002-1–071002-10.
- Telenko, C., Seepersad, C. C.; & Webber, M. E. (2008). A compilation of design for environment principles and guidelines. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, Brooklyn, NY, USA, 289–301.

- Telenko, C., & Seepersad, C. C. (2010). A methodology for identifying environmentally conscious guidelines for product design. *Journal of Mechanical Design*, 132(9), 091009-1–091009-9.
- Thompson, B. S. (1999). Environmentally-sensitive design: Leonardo WAS right!. *Materials & design*, 20(1), 23-30.
- Vargas Hernandez, N., Okudan Kremer, G., Schmidt, L. C., & Acosta Herrera, P. R. (2012). Development of an expert system to aid engineers in the selection of design for environment methods and tools. *Expert Systems with Applications*, 39(10), 9543–9553.
- Vernadat, F. B. *Enterprise modeling and integration: principles and applications*. London: Chapman & Hall, 1996.
- Vezzoli, C., & Manzini, E. (2008). *Design for environmental sustainability*. London: Springer-Verlag.
- Wimmer, W., & Züst, R. (2003). *Ecodesign Pilot: product investigation, learning and optimization tool for sustainable product development* (with CD-ROM). New York: Kluwer Academic Publishers.
- Züst, R. (2002). Decision support for planning ecoeffective product systems. In: Hundal, M. S. (Ed.). *Mechanical life cycle handbook: good environmental design and manufacturing* (Vol. 1, Chap. 8, pp. 177–198). New York: Marcel Dekker, Inc.