

Design para Modularidade: uma revisão sistemática

Palavras-chave: DfX, Design modular, Economia circular.

Arthur Neis Pinheiro; UFPel; Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil;
aneispinheiro@gmail.com;

Guilherme Parolin; UFPel; Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil;
guilherme.parolin@ufpel.edu.br.

1. Problema estudado

Design para X (DfX) é uma abreviação comumente utilizada na literatura técnica, na qual o "X" representa uma variável dependente do foco do projeto, como sustentabilidade (DfS/DfSu), manutenção (DfMa), reciclagem (DfR) ou modularidade (DfM). Aplicações para estas abordagens podem ser percebidas em garrafas de aço inoxidável, que tornam desnecessária a alta produção das plásticas convencionais (DfS). Filtros de torneiras convencionais que após o fim da vida útil o próprio usuário pode fazer a troca em casa trocando apenas o filtro interno (DfMa). Garrafas PET sem pigmento no plástico e com rótulos de fácil remoção para o fim de vida (DfR). Cada enfoque do DfX implica na adoção de metodologias específicas que visam identificar lacunas e propor soluções durante o processo de desenvolvimento de produtos.

O presente estudo tem como foco o Design para Modularidade (DfM), abordagem que vem ganhando espaço nas áreas de engenharia de produto, inovação e sustentabilidade (Muztoba A. et al., 2018). O DfM possibilita a criação de famílias de produtos por meio da recombinação de módulos padronizados, promovendo customização, prolongamento do ciclo de vida e redução de impactos ambientais. A startup de aparelhos móveis, Fairphone, é um exemplo a ser citado, eles possuem como objetivo principal a criação de dispositivos que possuam o mínimo de danos ambientais, para isso seus aparelhos possuem um design modular e de fácil montagem, possibilitando que o próprio usuário faça a manutenção do seu dispositivo, permitindo a confecção de peças sob demanda, além de possuir um preço menor em seus produtos (UNFCCC, 2023).

Segundo Hackl et al. (2020), Do ponto de vista das empresas, o uso de módulos pode implicar em maior complexidade na fase de planejamento, sendo notório o aumento de investimento inicial para o desenvolvimento de famílias de produtos e aumento do tempo inicial para implementação no mercado. Porém, ainda segundo os mesmos autores, há ganhos significativos em termos de flexibilidade produtiva, manutenção, transporte e reaproveitamento de componentes.

2. Relevância

Diante da crescente demanda por produtos sustentáveis (Bocken et al., 2014) normas da economia circular (Ellen MacArthur Foundation, 2013-2020) e novas exigências de personificação em massa (Barata et al., 2021), compreender os papéis da modularidade no decorrer do ciclo de vida de um produto tornou-se um requisito para os negócios. Embora existam diversos estudos sobre o DfM, como os desenvolvidos por Shamsuzzoha et al. (2018), Tunsoiu et al. (2023) e Mesa et al. (2018), para citar somente alguns exemplos, é notável a carência de uma revisão sistemática a respeito dos conteúdos abordados até o momento que falem sobre o DFM como critério de projeto, além de uma funcionalidade para um produto, e suas repercussões sob diferentes perspectivas.

3. Objetivos

Este artigo tem como objetivo identificar os resultados obtidos a partir da adoção da metodologia advinda do DfM em estudos recentes sobre sua abordagem na etapa de planejamento e desenvolvimento de produtos. É dada ênfase no impacto do DfM nas diferentes etapas do ciclo de vida, como produção, manutenção, transporte e descarte.

4. Metodologia

Para alcançar esse objetivo, foi conduzida uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL). A base de dados utilizada foi a Scopus, escolhida por sua ampla cobertura científica e robustez nos filtros de busca.

A *string* de busca utilizada foi “design for modularity AND life cycle”. A estratégia para a escolha destes termos visou captar artigos cujo conteúdo abordasse modularidade

V COLÓQUIO DE PESQUISA EM DESIGN E ARTES

5, 6 e 7 de novembro 2025

de forma integrada ao ciclo de vida do produto, ainda que o termo não estivesse necessariamente presente no título. O recorte temporal adotado foi de 2017 a 2024, de modo a abranger contribuições relativamente recentes ao tema. A pesquisa identificou originalmente 12 artigos. Destes, selecionaram-se apenas aqueles artigos que apresentassem “modularidade”, “sustentabilidade” ou “ciclo de vida” como palavras-chave. Ao final, foram selecionados 4 artigos para compor a análise final.

5. Resultados

O Quadro 1 apresenta uma síntese do quadro comparativo desenvolvido para a análise comparativa dos artigos selecionados.

Título	Palavras-chave	Referência	Abordagem do DfM
Life cycle assessment of a modular LED luminaire and quantified environmental benefits of replaceable components	Eco-design; Environmental impact; Exchangeable LED Module; Life cycle assessment (LCA); Light emitting diode (LED); Modular LED Luminaire	Ferreira et al. (2021)	Evidencia como a modularidade e componentes substituíveis podem melhorar a sustentabilidade ambiental de produtos de iluminação.
Impact of Modularity Decisions on a Firm's Economic Objectives	Cause and effect model; Life cycle analysis and design; Modularity; Product development; Product family design; Product platform design	Hackl et al. (2020)	Evidência os resultados ocasionados da adoção de uma fase de planejamento que seja adotada os princípios do design modular, além de desenvolver uma ferramenta para empresas escolherem o tipo de modularidade condizente com sua situação
Modular architecture principles–MAPs: a key factor in the development of sustainable open architecture products	design; Modular architecture principles; modularity; open architecture; personalization; sustainability	Mesa et al. (2019)	Proporciona uma base teórica sólida, apresentando 5 diferentes tipos de modularização aplicadas à sustentabilidade e personalização de produtos.

Quadro 1 – Síntese do quadro comparativo
Fonte: autor (2025)

V COLÓQUIO DE PESQUISA EM DESIGN E ARTES

5, 6 e 7 de novembro 2025

Título	Palavras-chave	Referência	Abordagem do DfM
An integrated modular design methodology based on maintenance performance consideration	design structure matrix; maintenance performance; Modularity; optimization	Zheng et al. (2014)	A pesquisa demonstra que a otimização dos módulos resulta em redução de custos sem comprometer o desempenho.

Quadro 1 – Síntese do quadro comparativo (continuação)

Fonte: autor (2025)

Em linhas gerais, os estudos selecionados indicam que o Design para Modularidade contribui de forma relevante ao desempenho ambiental e econômico dos produtos. Um dos artigos analisados estudou luminárias de LED modulares e mostrou uma redução de até 50% nos impactos ambientais. Outro estudo apresentou um modelo quantitativo que relaciona modularidade a custos e tempo de desenvolvimento, evidenciando os trade-offs entre flexibilidade e complexidade. Também foram identificadas abordagens que integram modularidade com estratégias de remanufatura e com princípios de arquitetura sustentável, ampliando o escopo de aplicação do DfM. Os artigos selecionados não apresentam uma aplicação em contextos reais, sendo os resultados elaborados a partir de pesquisas e análises de modelos já existentes, ou questionários com equipes para validação de modelos.

6. Conclusão

A revisão evidencia que o Design para Modularidade tem potencial para alavancar práticas mais sustentáveis e adaptáveis no design de produto. Contudo, também revela que a adoção da modularidade envolve gastos financeiros e de tempo maiores comparados com outras metodologias, especialmente na fase de planejamento e tomada de decisão. Os estudos analisados contribuem com modelos conceituais, métodos quantitativos e diretrizes práticas.

V COLÓQUIO DE PESQUISA EM DESIGN E ARTES

5, 6 e 7 de novembro 2025

De modo geral os estudos analisados demonstram que é possível unir objetivos econômicos e ambientais, embora que cada estudo tenha sua área de pesquisa mais nichada, evidenciando a necessidade de trabalhos futuros que estudem o DfM de forma mais abrangente e aplicada a contextos reais.

REFERÊNCIAS

BARATA, J.; CARDOSO, J. C. S.; CUNHA, P. R. Mass customization and mass personalization meet at the crossroads of Industry 4.0: A case of augmented digital engineering. **Systems Engineering**, v. 26, n. 6, p. 715–727, nov. 2023.

BOCKEN, N. M. P. et al. A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 42–56, fev. 2014.

FAIRPHONE | THE NETHERLANDS | UNFCCC. Disponível em: <<https://unfccc.int/climate-action/momentum-for-change/ict-solutions/fairphone>>. Acesso em: 30 jul. 2025.

FERREIRA, V. J. et al. Life cycle assessment of a modular LED luminaire and quantified environmental benefits of replaceable components. **Journal of Cleaner Production**, v. 317, p. 128575, out. 2021.

HACKL, J. et al. Impact of Modularity Decisions on a Firm's Economic Objectives. **Journal of Mechanical Design**, v. 142, n. 4, p. 041403, 1 abr. 2020.

How to Build a Circular Economy | Ellen MacArthur Foundation. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/>>. Acesso em: 31 jul. 2025.

KHAN, M. A. et al. Review on upgradability – A product lifetime extension strategy in the context of product service systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 204, p. 1154–1168, dez. 2018.

MESA, J. A. et al. Functional characterisation of mechanical joints to facilitate its selection during the design of open architecture products. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 24, p. 7390–7404, 17 dez. 2018.

MESA, J. A.; ESPARRAGOZA, I.; MAURY, H. Modular architecture principles – MAPs: a key factor in the development of sustainable open architecture products. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 13, n. 2, p. 108–122, 3 mar. 2020.



**V COLÓQUIO DE
PESQUISA EM
DESIGN E ARTES**
5, 6 e 7 de novembro 2025

SHAMSUZZOHA, A. et al. Metrics of product modularity: lessons learned from case companies.

Journal of Modelling in Management, v. 13, n. 2, p. 331–350, 14 maio 2018.

TUNSOIU, N. et al. Functional Prototype Design for a Programmable Equipment in Personalized Football Training. **Macromolecular Symposia**, v. 411, n. 1, p. 2200177, out. 2023.

ZHENG, H. et al. An integrated modular design methodology based on maintenance performance consideration. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 231, n. 2, p. 313–328, jan. 2017.