



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ

CAMPUS FLORIANO

CURSO ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS

TIAGO RIBEIRO DE SOUSA OLIVEIRA

**DECOMPOSIÇÃO DE ARQUITETURAS DE PRODUTOS EXISTENTES EM
MÓDULOS PARA A FORMAÇÃO DE FAMÍLIAS DE PRODUTOS MODULARES:
UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

FLORIANO

2026

TIAGO RIBEIRO DE SOUSA OLIVEIRA

Decomposição de Arquiteturas de Produtos Existentes em Módulos para a Formação de
Famílias de Produtos Modulares: uma Revisão Sistemática da Literatura

Trabalho de Conclusão de Curso (artigo científico)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Análise e
Desenvolvimento de Sistemas do Instituto Federal
de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí,
Campus Floriano.

Orientador: Prof^o. Me. Francisco Eduardo Pires de
Moraes

FLORIANO

2026

Decomposição de Arquiteturas de Produtos Existentes em Módulos para a Formação de Famílias de Produtos Modulares: uma Revisão Sistemática da Literatura

Tiago Ribeiro de Sousa Oliveira¹
Francisco Eduardo Pires de Moraes²

RESUMO

Esta pesquisa analisa como a literatura científica aborda a decomposição de arquiteturas de produtos físicos existentes em módulos, com ênfase nos métodos empregados, nas técnicas de agrupamento, nos dados de entrada, nos direcionadores de modularização e nas formas de representação utilizadas para apoiar a formação de famílias de produtos modulares. Para isso, foi conduzida uma Revisão Sistemática da Literatura na base de dados Scopus. A busca inicial retornou 931 registros, reduzidos para 661 após a aplicação dos filtros de idioma e área do conhecimento. Os estudos foram organizados e submetidos à triagem com o apoio da ferramenta *Rayyan*, utilizada para o registro das decisões de inclusão e exclusão. Após a análise dos títulos, resumos e palavras-chave, 320 estudos foram considerados potencialmente aderentes. A aplicação do recorte temporal de 2025 a 2026 resultou em 18 artigos para leitura integral, dos quais quatro constituíram o corpus final da revisão. Os resultados indicam a predominância de abordagens bottom-up, do emprego de Design Structure Matrices (DSMs) quadradas e ponderadas e de algoritmos de clusterização destinados ao aumento da coesão interna e à redução do acoplamento entre módulos. Verificou-se, ainda, que a obtenção dos dados depende, em grande parte, de julgamentos de especialistas e do preenchimento manual das matrizes. As DSMs retangulares foram empregadas apenas em etapas complementares, não sendo utilizadas como estrutura principal para a identificação dos módulos. Conclui-se que existem oportunidades para o desenvolvimento de métodos que utilizem DSMs retangulares no processo principal de agrupamento, realizem a extração automatizada de dados a partir de modelos CAD ou tridimensionais e possibilitem a geração e a comparação de diferentes alternativas de arquitetura modular.

Palavras-chave: arquitetura de produtos; modularização; Design Structure Matrix; clusterização; famílias de produtos.

ABSTRACT

This research analyzes how the scientific literature addresses the decomposition of existing physical product architectures into modules, with emphasis on methods, clustering techniques, input data, modularization drivers, and representation forms used to support the formation of modular product families. To this end, a Systematic Literature Review was conducted, limited to the Scopus database. The initial search returned 931 records, a number reduced to 661 after applying language and subject area filters. The studies were then organized and screened with the support of the Rayyan tool, which was used to assist in the selection process, the reading of titles, abstracts, and keywords, and the recording of inclusion and exclusion decisions. After this stage, 320 studies were considered potentially relevant. The application of the time frame covering the years 2025 and 2026 resulted in 18 articles for full-text reading, of which four composed the final review corpus. The results indicate the

¹ Graduando do curso de Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas. IFPI Campus Floriano. caflo.2023114tads0029@aluno.ifpi.edu.br.

² Mestre em Engenharia de Software - CESAR School. IFPI - Campus Floriano. E-mail: professoreduardo.pires@ifpi.edu.br.

predominance of bottom-up approaches, the use of square and weighted Design Structure Matrices (DSMs), and clustering algorithms aimed at increasing internal cohesion and reducing coupling between modules. It was also observed that data collection still largely depends on human assessments and the manual completion of matrices. Rectangular matrices appear only in complementary stages and are not directly used as the main structure for module formation. It is concluded that there are still opportunities for the development of methods based on rectangular matrices, the automated extraction of data from CAD or three-dimensional models, and the generation of different modular architecture alternatives.

Keywords: product architecture; modularization; Design Structure Matrix; clustering; product families.

Data de aprovação: 10/07/2026 (data de apresentação do TCC)

1 INTRODUÇÃO

O ambiente industrial contemporâneo é marcado pelo aumento da variedade de produtos e pela necessidade de atender a demandas cada vez mais específicas dos clientes. Embora a ampliação do portfólio possa fortalecer a competitividade das organizações, também tende a elevar os custos e a complexidade associados ao desenvolvimento e à produção. Nesse contexto, a arquitetura do produto exerce papel relevante, pois define a forma como as funções são alocadas aos componentes físicos e como esses elementos se relacionam por meio de suas interfaces, influenciando a variedade, a padronização de componentes e as alterações realizadas ao longo do desenvolvimento (Ulrich, 1995).

Conforme apontam Gauss, Lacerda e Miguel (2021), a crescente demanda por maior variedade de produtos exige que as empresas desenvolvam famílias modulares capazes de ampliar as opções oferecidas ao mercado sem comprometer a eficiência produtiva. Uma família de produtos reúne diferentes variantes que compartilham componentes, tecnologias, funções ou estruturas, mas apresentam características específicas para atender a distintos segmentos do mercado.

Nesse contexto, a modularização permite organizar componentes em unidades relativamente independentes, conectadas por interfaces definidas ou padronizadas. Essa estratégia pode favorecer o compartilhamento de componentes, a flexibilidade produtiva, a redução da complexidade e o equilíbrio entre variedade e custos. Entretanto, uma decomposição inadequada pode resultar em módulos excessivamente dependentes e limitar os benefícios esperados (Capellari et al., 2024).

A modularização pode ser aplicada tanto na concepção de novos produtos quanto na reorganização de arquiteturas já definidas. Esta revisão sistemática da literatura concentra-se na decomposição de arquiteturas de produtos físicos existentes. Nesse recorte, produto existente não se refere apenas a um produto antigo ou já comercializado, mas também a um

protótipo, equipamento ou projeto cuja arquitetura física esteja suficientemente definida por componentes e interfaces, mesmo que ainda se encontre em processo de desenvolvimento, aperfeiçoamento ou redesenho. A decomposição de uma arquitetura pode considerar perspectivas funcionais ou físicas. A decomposição funcional parte das funções e subfunções desempenhadas pelo produto, enquanto a decomposição física considera a disposição real de seus componentes, podendo ser realizada por meio de desmontagem física ou virtual. Nesse processo, os conjuntos são progressivamente divididos até que se alcance o nível de detalhamento necessário para representar os componentes e suas relações (Gauss; Lacerda; Miguel, 2021; Capellari et al., 2024).

A decomposição física aproxima-se da abordagem bottom-up, na qual a análise começa pelos elementos de uma arquitetura já existente. Em termos práticos, essa abordagem observa as peças do produto, registra suas relações em uma Design Structure Matrix (DSM) quadrada e procura agrupamentos de componentes fortemente relacionados que possam se tornar módulos. A DSM é denominada quadrada porque os mesmos componentes são representados nas linhas e nas colunas, enquanto as demais células registram as relações entre eles. As relações representadas na DSM podem ser físicas, funcionais, espaciais, estruturais, energéticas ou informacionais. Após o preenchimento da matriz, técnicas de clusterização e particionamento podem reorganizar os componentes, buscando aumentar as conexões internas de cada agrupamento e reduzir as conexões entre agrupamentos distintos. Essa análise pode considerar a força, a densidade e a distribuição das relações, auxiliando na identificação de componentes fortemente conectados e na definição dos limites entre os módulos (Jung e Simpson, 2017).

Os agrupamentos identificados podem contribuir para a formação de famílias de produtos, permitindo avaliar quais módulos podem ser compartilhados entre diferentes variantes, quais componentes devem permanecer específicos e quais interfaces precisam ser padronizadas. Dessa forma, uma arquitetura existente pode servir como base para o desenvolvimento de uma plataforma comum, conciliando o compartilhamento interno de componentes com a variedade exigida pelo mercado. Apesar da existência de diferentes métodos, métricas e algoritmos, a decomposição de arquiteturas em módulos permanece um processo desafiador, pois os resultados podem variar conforme as relações consideradas, o nível de detalhamento, os critérios de agrupamento e as características do produto. Diante desse contexto, o presente estudo busca responder à seguinte questão de pesquisa: como a literatura tem abordado a decomposição da arquitetura de produtos existentes em módulos?

Para responder a essa questão, o estudo tem como objetivo identificar como a literatura tem abordado a decomposição da arquitetura de produtos existentes em módulos para a formação de famílias de produtos modulares. Para isso, são analisados os métodos, as técnicas e as ferramentas empregados, com destaque para as DSMs, as métricas de modularidade, as técnicas de clusterização e os algoritmos de particionamento. Espera-se, assim, sistematizar o conhecimento disponível sobre a transformação de arquiteturas físicas em estruturas modulares e suas contribuições para o compartilhamento de componentes e a formação de famílias de produtos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A remodelação estrutural de produtos físicos existentes exige métodos capazes de representar, analisar e reorganizar as relações entre seus elementos. No contexto industrial, grande parte dos projetos não se inicia a partir de uma arquitetura totalmente nova, mas de produtos, plataformas ou sistemas já consolidados. Segundo Wong e Wynn (2023) e Vasawade, Deshmukh e Pawar (2015), a intervenção em arquiteturas existentes envolve desafios relacionados ao acoplamento entre componentes, à propagação de mudanças e à preservação de requisitos já incorporados ao produto.

Nesse contexto, a decomposição modular surge como uma estratégia para reduzir a complexidade estrutural, favorecer a reutilização de componentes e apoiar a formação de famílias de produtos. Ao dividir um produto acoplado em módulos relativamente independentes, torna-se possível limitar os efeitos de alterações de projeto a partes específicas da arquitetura. Em consonância com Zambrzycka, Almeida e Gómez (2023) e Mollajan e Iranmanesh (2021), a decomposição modular contribui para controlar a propagação de mudanças e reduzir impactos indesejados em sistemas complexos.

Para fundamentar esta pesquisa, este capítulo apresenta os principais conceitos relacionados à decomposição de arquiteturas existentes em módulos. A seção 2.1 discute a engenharia reversa e o redesenho adaptativo de produtos existentes. A seção 2.2 aborda o mapeamento de interfaces e a análise de propagação de mudanças por meio da Design Structure Matrix (DSM). A seção 2.3 trata da modularização, da clusterização e das formas de representação matricial empregadas na identificação de módulos.

2.1 ENGENHARIA REVERSA E MODELAGEM DE REDESENHO ADAPTATIVO DE PRODUTOS EXISTENTES

Para transformar um produto existente em uma arquitetura modular mais flexível, o primeiro passo consiste em compreender sua configuração atual, seus componentes, suas funções e suas relações de dependência. Em indústrias que trabalham com produtos customizados sob pedido, como no modelo Engineer-to-Order (ETO), essa compreensão é especialmente relevante, pois muitos produtos são desenvolvidos a partir de soluções anteriores, adaptações específicas e conhecimentos acumulados ao longo do tempo.

Nesse sentido, Wong e Wynn (2023) propõem uma abordagem de redesenho adaptativo baseada na modelagem detalhada do produto. Os autores destacam a importância de mapear a estrutura do produto de forma granular, de modo a identificar como características físicas, funções e relações entre elementos contribuem para o funcionamento do sistema. Essa compreensão permite avaliar quais componentes podem ser mantidos, modificados, separados, agrupados ou substituídos em uma nova configuração arquitetural.

O redesenho de produtos existentes também precisa considerar as condições reais de produção. Albers et al. (2022), ao discutirem o Product-Production-CoDesign, argumentam que o desenvolvimento de soluções modulares deve articular produto e sistema produtivo. Isso significa que a reorganização da arquitetura não deve ser tratada como uma atividade isolada de projeto, mas como um processo integrado às capacidades produtivas, às ferramentas disponíveis, aos recursos técnicos e às restrições de fabricação da empresa.

Sob uma perspectiva prática, a reorganização modular de produtos existentes pode contribuir para reduzir custos, simplificar processos de manutenção e aumentar a agilidade da empresa frente às demandas de mercado. Vasawade, Deshmukh e Pawar (2015) destacam que a análise da estrutura do produto pode auxiliar na identificação de relações indesejadas entre componentes e na formação de módulos com maior independência. Assim, a decomposição da arquitetura contribui para diminuir falhas de montagem, facilitar alterações futuras e tornar o fluxo de desenvolvimento mais previsível.

2.2 MAPEAMENTO DE INTERFACES E ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE MUDANÇAS VIA DSM

A gestão de produtos físicos complexos exige estratégias sistemáticas de representação das relações entre seus elementos. Em arquiteturas com elevado grau de acoplamento, uma alteração em determinado componente pode gerar efeitos em cadeia sobre outras partes do produto. Segundo Gauss, Lacerda e Miguel (2021), a gestão da modularidade é relevante para organizar famílias de produtos e apoiar decisões relacionadas à estruturação de arquiteturas modulares.

Nesse cenário, a Design Structure Matrix (DSM) destaca-se como uma ferramenta de representação das interdependências entre elementos de um sistema. A DSM permite mapear relações entre componentes, funções, subsistemas ou atividades, favorecendo a visualização das conexões internas da arquitetura. Ao representar essas interações de forma matricial, torna-se possível identificar elementos fortemente relacionados, pontos de acoplamento, potenciais agrupamentos e possíveis caminhos de propagação de mudanças.

A necessidade de adaptação rápida dos produtos também está relacionada à redução dos ciclos de vida tecnológicos e comerciais. Korohodova e Lashyna (2021) apontam que, no contexto da Indústria 4.0, as empresas precisam responder com maior velocidade às mudanças do mercado e às exigências de personalização. Nesse contexto, arquiteturas modulares podem favorecer maior flexibilidade, pois permitem modificar partes específicas do produto sem comprometer toda a estrutura.

A análise das interfaces também é relevante quando produtos físicos passam a ser integrados a serviços e sistemas mais amplos. Riesener et al. (2021) observam que a diferenciação baseada apenas em atributos físicos tem se tornado mais difícil em alguns mercados, levando empresas a integrar produtos e serviços em sistemas produto-serviço. Essa integração amplia a complexidade das relações entre arquitetura funcional, estrutura física, serviços e processos de mudança, reforçando a importância de métodos capazes de mapear e analisar dependências entre diferentes dimensões do sistema.

2.3 MODULARIZAÇÃO, CLUSTERIZAÇÃO E REPRESENTAÇÃO MATRICIAL

A modularização busca organizar produtos complexos em módulos com alta coesão interna e baixo acoplamento externo. Em termos práticos, isso significa agrupar elementos que possuem relações fortes entre si e, ao mesmo tempo, reduzir a intensidade das relações entre grupos diferentes. Essa lógica favorece a reutilização de componentes, a manutenção, a customização, a atualização de produtos e a formação de famílias de produtos modulares. As técnicas de clusterização são frequentemente empregadas para apoiar esse processo. A partir de uma matriz de relações, os algoritmos de agrupamento procuram identificar conjuntos de elementos com maior dependência interna.

Em abordagens *bottom-up*, esse processo parte dos componentes, subsistemas ou relações existentes no produto, em vez de iniciar exclusivamente por uma definição funcional idealizada. Essa perspectiva é particularmente relevante para produtos físicos já desenvolvidos, nos quais a arquitetura existente precisa ser compreendida antes de ser

reorganizada. Grande parte dos métodos de modularização utiliza a DSM como estrutura principal de representação.

A DSM tradicional é uma matriz quadrada, na qual linhas e colunas representam o mesmo conjunto de elementos, permitindo identificar dependências entre componentes, funções ou subsistemas de um mesmo domínio. Essa estrutura é útil para mapear relações internas da arquitetura e apoiar a aplicação de algoritmos de clusterização. Entretanto, produtos físicos reais frequentemente envolvem relações heterogêneas entre diferentes domínios, como componentes, funções, requisitos, interfaces, processos de fabricação, operações de montagem e informações técnicas.

Nesses casos, a representação por DSMs quadradas pode exigir a conversão de relações multidomínio para relações entre elementos homogêneos, o que pode reduzir a rastreabilidade entre os domínios analisados. Por isso, estruturas matriciais alternativas, como matrizes retangulares, matrizes de domínio múltiplo e abordagens baseadas em co-clustering ou biclustering, representam possibilidades relevantes para estudos futuros.

Assim, a literatura sobre modularização de produtos físicos existentes envolve três elementos centrais: a compreensão da arquitetura atual do produto, a representação das dependências por meio de estruturas matriciais e a aplicação de técnicas de agrupamento para identificar módulos. Esses elementos fundamentam a análise realizada nesta revisão, especialmente no que se refere aos métodos, dados de entrada, formas de representação, critérios de agrupamento e limitações associadas à decomposição de arquiteturas existentes em módulos.

3 METODOLOGIA

3.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

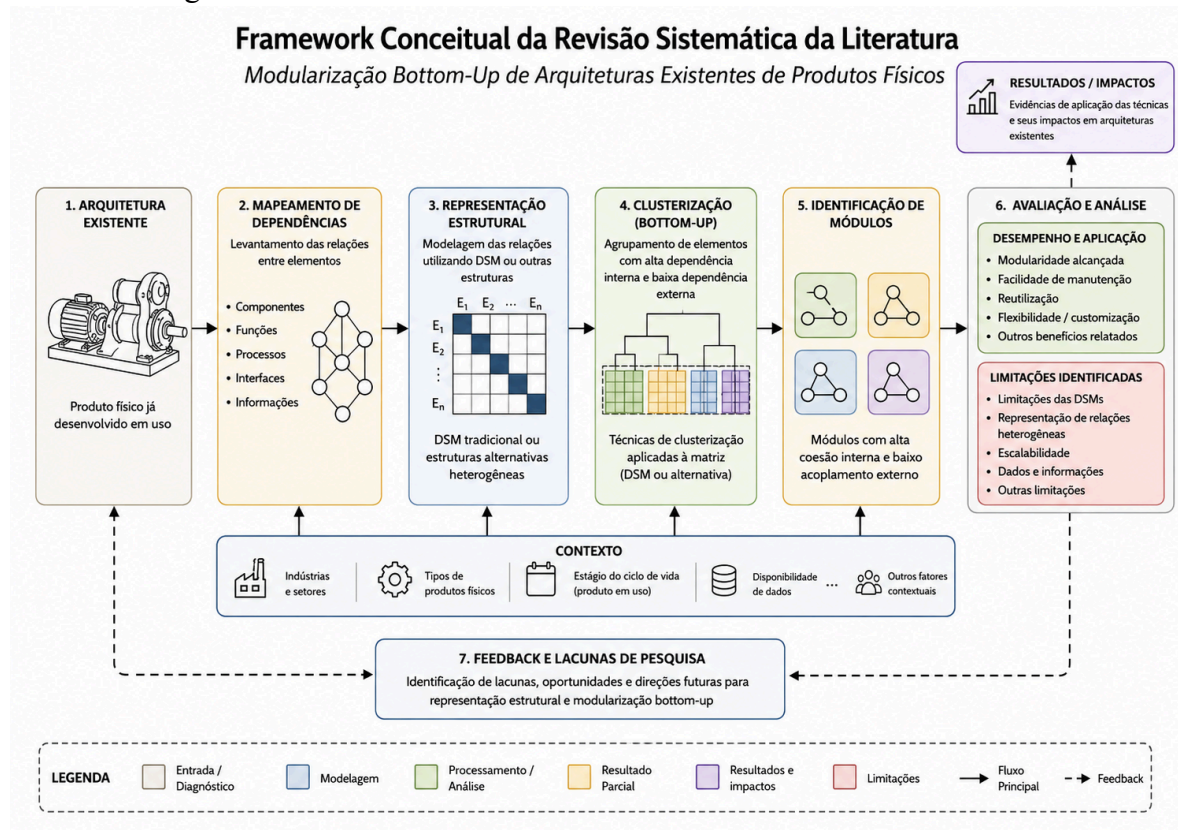
A Revisão Sistemática da Literatura (RSL) caracteriza-se como uma metodologia estruturada de levantamento, seleção, análise e síntese de estudos científicos relacionados a determinado objeto de investigação. Esse tipo de revisão permite organizar o conhecimento existente sobre um tema, identificar lacunas na literatura e oferecer fundamentos para o desenvolvimento de novas pesquisas. Nesta pesquisa, o planejamento da revisão foi orientado por um protocolo de RSL elaborado com base nas orientações metodológicas de Ermel, Lacerda, Morandi e Gauss (2022), que compreendem as revisões de literatura como métodos capazes de integrar revisão, análise e síntese de conhecimento científico e tecnológico. O protocolo utilizado nesta investigação foi previamente analisado e ajustado, sendo empregado

como guia para a definição do objetivo da revisão, formulação das questões de pesquisa, construção da estratégia de busca, definição dos critérios de inclusão e exclusão, seleção dos estudos, extração dos dados e organização da síntese final.

De forma complementar, a condução da revisão dialoga com as etapas propostas por Kitchenham (2004), segundo a qual uma revisão sistemática pode ser organizada em três momentos principais: planejamento, execução e relato dos resultados. No planejamento, são definidos o problema, as questões de pesquisa, a estratégia de busca e os critérios de seleção.

Na execução, são realizadas a busca, a triagem, a leitura dos estudos, a extração dos dados e a análise das evidências. No relato, são apresentados os resultados, a síntese dos estudos analisados, as lacunas identificadas e as oportunidades de pesquisa. A Figura 1 apresenta o framework conceitual adotado nesta revisão sistemática da literatura. Embora o planejamento metodológico tenha sido orientado por protocolos de RSL, a Figura não representa todas as etapas formais do método, como busca, triagem, seleção, extração e síntese dos estudos. Seu objetivo é organizar conceitualmente o fenômeno investigado, evidenciando como a literatura aborda a modularização *bottom-up* de arquiteturas existentes de produtos físicos.

Figura 1 – Framework conceitual da revisão sistemática da literatura



Fonte: Adaptado de Ermel et al. (2022).

O framework parte da arquitetura de um produto físico já desenvolvido e em uso, passa pelo mapeamento das dependências entre componentes, funções, processos, interfaces e informações, pela representação estrutural dessas relações, pela aplicação de técnicas de clusterização e pela identificação dos módulos resultantes. Em seguida, contempla a avaliação dos benefícios, limitações e impactos das técnicas analisadas, bem como a identificação de lacunas e oportunidades de pesquisa. Dessa forma, a figura funciona como estrutura orientadora para a extração, comparação e discussão dos artigos incluídos na revisão.

Para alcançar os objetivos do trabalho, foram seguidas as seguintes etapas: definição do objetivo da revisão; formulação da questão principal e das questões secundárias de pesquisa; definição da estratégia de busca; construção da string de busca; escolha da base de dados; definição dos critérios de inclusão e exclusão; aplicação da busca na base Scopus; organização dos registros recuperados; triagem dos estudos; leitura integral dos artigos selecionados; extração dos dados; análise comparativa; e síntese qualitativa dos resultados.

A seleção dos estudos foi realizada em duas etapas. O Filtro 01 compreendeu a leitura dos títulos, resumos e palavras-chave dos registros recuperados, com o objetivo de identificar os artigos potencialmente aderentes ao escopo da revisão. Quando essas informações não foram suficientes para uma decisão segura, outras partes do texto, como introdução e conclusão, foram consultadas para evitar a exclusão prematura de estudos relevantes. Após essa etapa, foi aplicado o recorte temporal correspondente aos anos de 2025 e 2026, conforme a delimitação estabelecida para a pesquisa.

O Filtro 02 correspondeu à leitura integral dos artigos selecionados após o recorte temporal. Nessa etapa, os critérios de inclusão e exclusão foram novamente aplicados, considerando o conteúdo completo dos estudos e sua capacidade de contribuir para o objetivo e para as questões de pesquisa. Os artigos considerados aderentes constituíram o corpus final da revisão e foram submetidos à extração, organização, comparação e síntese dos resultados.

A ferramenta Rayyan, apresentada na seção 2.3, foi utilizada para apoiar o gerenciamento dos registros recuperados na base Scopus e a organização do processo de triagem dos estudos. Os artigos foram importados para a plataforma, classificados durante o Filtro 01 e posteriormente organizados para a etapa de leitura integral. Dessa forma, o uso da ferramenta contribuiu para a rastreabilidade do processo de seleção, sem substituir a análise qualitativa e interpretativa realizada pelos autores.

3.1.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A ferramenta *Rayyan* foi utilizada como apoio ao gerenciamento dos registros recuperados na base Scopus e à organização do processo de triagem dos estudos. Conforme Ouzzani et al. (2016), o *Rayyan* é uma ferramenta desenvolvida para auxiliar revisões sistemáticas da literatura, permitindo a importação de metadados, a classificação dos estudos, a identificação de duplicidades e o acompanhamento das decisões de seleção.

Nesta pesquisa, os registros foram importados para a plataforma em formato compatível, organizados e classificados durante o Filtro 01, correspondente à leitura de títulos, resumos e palavras-chave. Após essa etapa, os artigos potencialmente aderentes foram organizados para o Filtro 02, correspondente à leitura integral. Dessa forma, o *Rayyan* contribuiu para a rastreabilidade e a organização do processo de seleção, sem substituir a análise qualitativa e interpretativa realizada pelos autores. Como registro complementar do uso da ferramenta, uma imagem da tela de organização dos estudos no *Rayyan* é apresentada no Apêndice A deste artigo.

3.2 OBJETIVO E QUESTÕES DE PESQUISA

3.2.1 Objetivo da revisão

A presente revisão bibliográfica sistematizada tem como objetivo identificar, organizar e analisar como a literatura científica aborda a decomposição de arquiteturas de produtos físicos existentes em módulos, considerando os métodos, as técnicas, os dados de entrada, os direcionadores de modularização e as formas de representação da arquitetura empregados nesse processo, bem como suas contribuições para a formação de famílias de produtos modulares.

3.2.2 Questão principal de pesquisa

A questão principal que orienta esta revisão é:

- Como a literatura científica tem abordado a decomposição de arquiteturas de produtos físicos existentes em módulos para a formação de famílias de produtos modulares?

Com o propósito de orientar a coleta, a organização e a análise das informações extraídas dos estudos, foram estabelecidas as seguintes questões secundárias:

QP1: Como o processo de decomposição da arquitetura de produtos existentes é conduzido?

QP2: Quais métodos, técnicas, modelos, frameworks ou algoritmos são empregados no processo de decomposição?

QP3: Quais tipos de dados de entrada e formas de representação da arquitetura são utilizados, como Design Matrix e Design Structure Matrix (DSM)?

QP4: Quais direcionadores de modularização e critérios de agrupamento são utilizados na identificação e na formação dos módulos?

QP5: O processo de decomposição é aplicado a uma única arquitetura de produto ou considera múltiplas arquiteturas?

QP6: Quais são as fontes utilizadas para gerar os dados de entrada do processo, como arquivos CAD, modelos tridimensionais, listas de materiais, estruturas de produtos, documentos técnicos ou avaliações de especialistas?

3.3 ESTRATÉGIA DE BUSCA

A estratégia de busca foi definida com base nos principais conceitos relacionados ao objeto de investigação, abrangendo arquitetura e estrutura de produtos, decomposição, clusterização, particionamento, modularização e formação de famílias de produtos modulares. A busca bibliográfica foi realizada em 15 de março de 2026, na base de dados Scopus.

Na etapa inicial, não foi estabelecida restrição quanto ao período de publicação, com a finalidade de recuperar o conjunto mais abrangente possível de estudos relacionados ao tema. A pesquisa foi realizada nos campos de título, resumo e palavras-chave, mediante a aplicação da seguinte string de busca apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 – String de busca aplicada na base de dados Scopus

TITLE-ABS-KEY (("product architecture" OR "product structure" OR "design structure matrix" OR DSM OR "design matrix") AND (decompos* OR cluster* OR partition* OR modular* OR modulari*) AND ("product famil*" OR "modular product*" OR "modular architecture*" OR module*)) AND NOT TITLE-ABS-KEY (software OR "software

architecture" OR "source code" OR programming OR microservice* OR "web service*" OR "cloud computing" OR "information system*" OR "computer network*")

Fonte: Autores, 2026.

A string foi estruturada em três grupos conceituais. O primeiro reúne termos relacionados à arquitetura, à estrutura e às formas de representação de produtos. O segundo contempla os processos de decomposição, clusterização, particionamento e modularização. O terceiro grupo compreende termos associados aos módulos, às arquiteturas modulares e às famílias de produtos.

O operador booleano AND foi empregado para estabelecer a ocorrência simultânea dos grupos conceituais, enquanto o operador OR possibilitou a inclusão de termos equivalentes ou semanticamente relacionados. O operador NOT foi utilizado para reduzir a recuperação de estudos pertencentes ao domínio de software, programação, microsserviços, computação em nuvem, sistemas de informação e redes de computadores, por não integrarem o escopo desta pesquisa. Após a aplicação da string, foram utilizados os filtros disponíveis na Scopus. Quanto ao idioma, foram mantidos somente os estudos publicados em língua inglesa.

Em relação às áreas do conhecimento, foram selecionadas as seguintes categorias: engineering, computer Science e decision sciences. A opção por uma única base de dados e pelas referidas áreas do conhecimento constitui uma delimitação metodológica da revisão e deverá ser considerada na interpretação dos resultados.

O processo de seleção dos estudos foi organizado em duas etapas. O filtro 01 compreendeu a leitura dos títulos, resumos e palavras-chave, considerando os critérios de inclusão e exclusão previamente estabelecidos. Após essa etapa, foi aplicado o recorte temporal correspondente aos anos de 2025 e 2026, com a finalidade de delimitar a análise às publicações mais recentes sobre o tema.

Os estudos resultantes desse procedimento foram encaminhados ao filtro 02, correspondente à leitura integral dos textos. Nessa etapa, será verificada a aderência definitiva dos artigos ao objetivo e às questões de pesquisa, definindo-se o corpus final da revisão. Como a busca foi realizada em 15 de março de 2026, os estudos referentes ao ano de 2026 correspondem somente àqueles que estavam publicados e indexados na Scopus até essa data

3.4 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Os critérios de inclusão e exclusão foram estabelecidos para orientar, de maneira transparente e padronizada, a seleção dos estudos recuperados pela estratégia de busca. Conforme Kitchenham (2004), esses critérios devem ser definidos de acordo com o objetivo e as questões de pesquisa, possibilitando a identificação dos estudos efetivamente pertinentes ao escopo da revisão. Os critérios temáticos foram aplicados durante a leitura dos títulos, resumos e palavras-chave no Filtro 01. O recorte temporal foi aplicado posteriormente aos estudos aprovados nessa etapa.

3.4.1 Critérios de inclusão

Foram definidos os seguintes critérios de inclusão:

CI1: Estudos relacionados à modularização, à decomposição ou à arquitetura de produtos físicos existentes.

CI2: Estudos que abordam procedimentos de decomposição, clusterização, particionamento, agrupamento de componentes ou formação de módulos.

CI3: Estudos que apresentem framework, método, modelo, técnica, algoritmo, estudo de caso ou aplicação prática relacionada à decomposição da arquitetura de produtos.

CI4: Estudos relacionados aos conceitos de Product Architecture, Product Structure, Design Structure Matrix - DSM, Design Matrix, Product Family, Modular Design ou Modular Product Architecture.

CI5: Estudos que permitam extrair pelo menos uma das seguintes informações:

a) método ou técnica empregada; **b)** tipo de dado de entrada utilizado; **c)** direcionador de decomposição ou modularização; **d)** aplicação em uma arquitetura única ou em múltiplas arquiteturas; **e)** fonte utilizada para gerar os dados de entrada.

CI6: Estudos publicados nos anos de 2025 e 2026 e indexados na base de dados Scopus até 15 de março de 2026.

3.4.2 Critérios de exclusão

Foram definidos os seguintes critérios de exclusão:

CE1: Estudos centrados em software, arquitetura de software, código-fonte, programação, computação em nuvem, microsserviços, serviços web, sistemas de informação ou redes de computadores.

CE2: Estudos que apenas mencionam modularidade, módulos ou arquitetura modular, sem abordar a decomposição da arquitetura de produtos.

CE3: Estudos relacionados exclusivamente a serviços, processos administrativos, estruturas organizacionais ou sistemas não físicos.

CE4: Estudos exclusivamente conceituais que não apresentem método, modelo, técnica, algoritmo, framework, estudo de caso ou aplicação relacionada ao processo de decomposição modular.

CE5: Estudos secundários, como revisões sistemáticas da literatura, revisões bibliográficas, mapeamentos sistemáticos, surveys e análises bibliométricas.

3.5 PROCESSO DE SELEÇÃO DOS ESTUDOS

Após a execução da estratégia de busca na base de dados Scopus, os registros recuperados foram exportados e organizados na ferramenta *Rayyan*, utilizada para apoiar o gerenciamento e a triagem dos estudos. Inicialmente, foi realizada a verificação dos registros e a remoção de eventuais duplicatas. O processo de seleção foi desenvolvido em duas etapas. A primeira, denominada Filtro 01, consistiu na leitura dos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos recuperados.

Nessa etapa, foram aplicados os critérios de inclusão e exclusão previamente estabelecidos, com o objetivo de identificar os estudos potencialmente aderentes ao escopo da revisão. Nos casos em que as informações apresentadas no título, no resumo e nas palavras-chave não foram suficientes para fundamentar a decisão, foram consultadas outras partes do texto, especialmente a introdução e a conclusão, evitando-se a exclusão prematura de estudos potencialmente relevantes.

Após a conclusão do Filtro 01, foi aplicado o recorte temporal correspondente aos anos de 2025 e 2026, conforme a delimitação estabelecida para a revisão. Os estudos selecionados nessa etapa foram encaminhados ao Filtro 02, que compreende a leitura integral dos textos. Durante o Filtro 02, os critérios de inclusão e exclusão serão novamente aplicados, considerando o conteúdo completo dos artigos e sua capacidade de contribuir para o objetivo e para as questões de pesquisa. Os motivos de exclusão identificados nessa etapa foram registrados, de modo a assegurar a transparência e a rastreabilidade do processo de seleção.

Ao final da leitura integral, os artigos considerados aderentes constituíram o corpus final da revisão e foram encaminhados para as etapas de extração, organização e análise dos dados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS PRELIMINARES DA SELEÇÃO DOS ESTUDOS

A aplicação da string de busca na base de dados Scopus resultou inicialmente na recuperação de 931 registros. Após a aplicação do filtro de idioma, mantendo-se apenas as publicações em língua inglesa, e dos filtros referentes às áreas de *Engineering*, *Computer Science* e *Decision Sciences*, permaneceram 661 estudos para a realização do Filtro 01. O Filtro 01 consistiu na leitura dos títulos, resumos e palavras-chave dos 661 estudos, com base nos critérios de inclusão e exclusão previamente estabelecidos. Ao final dessa etapa, 320 estudos foram considerados potencialmente aderentes ao objetivo da revisão.

Posteriormente, aplicou-se o recorte temporal correspondente aos anos de 2025 e 2026, resultando na seleção de 18 artigos. Esses artigos foram submetidos ao Filtro 02, correspondente à leitura integral dos textos e à avaliação de sua elegibilidade. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão durante a leitura integral, quatro artigos foram considerados adequados para compor o corpus final da revisão. Esses estudos foram, então, encaminhados para as etapas de extração de dados, análise comparativa e síntese dos resultados.

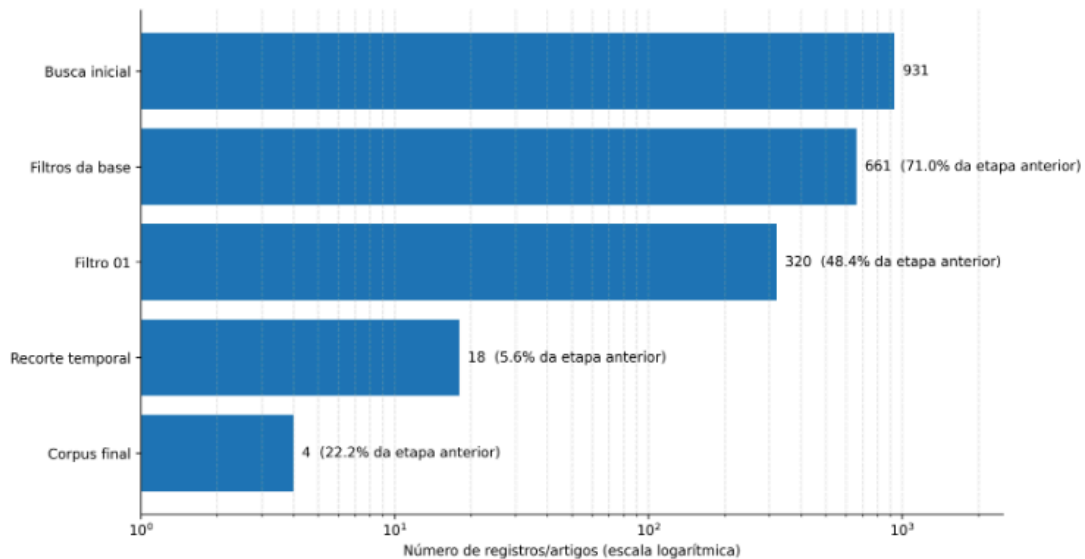
Quadro 2 – Etapa do processo de busca e seleção dos estudos

Etapa	Procedimento realizado	Quantidade resultante
Busca inicial	Aplicação da string de busca na base de dados Scopus.	931 registros
Aplicação dos filtros da base	Restrição às publicações em língua inglesa e às áreas de Engineering, Computer Science e Decision Sciences.	661 artigos
Filtro 01	Leitura dos títulos, resumos e palavras-chave dos 661 artigos, com base nos critérios de inclusão e exclusão estabelecidos.	320 artigos potencialmente aderentes
Recorte temporal	Seleção dos artigos publicados nos anos de 2025 e 2026.	18 artigos
Filtro 02	Leitura integral dos 18 artigos e aplicação dos critérios de elegibilidade, considerando a aderência ao objetivo e à questão de pesquisa da revisão.	4 artigos incluídos
Corpus final	Seleção dos estudos destinados à extração dos dados, à análise comparativa e à síntese dos resultados.	4 artigos

Fonte: Autores, 2026.

O Quadro 2 sintetiza as etapas do processo de busca e seleção dos estudos, apresentando os procedimentos realizados e a quantidade de registros ou artigos resultantes em cada etapa. Conforme apresentado no Gráfico 1, o número de estudos foi reduzido progressivamente em cada etapa do processo de seleção. A redução proporcional mais expressiva ocorreu com a aplicação do recorte temporal, quando permaneceram apenas 18 dos 320 artigos potencialmente aderentes, correspondendo a 5,6% do conjunto da etapa anterior.

Gráfico 1 — Evolução quantitativa do processo de busca e seleção dos estudos



Fonte: Autores, 2026.

Após a leitura integral e a aplicação dos critérios de elegibilidade, quatro artigos foram incluídos no corpus final, o equivalente a 22,2% dos estudos avaliados nessa etapa e a aproximadamente 0,43% dos 931 registros inicialmente recuperados. Esses resultados evidenciam o caráter criterioso da seleção e demonstram que apenas uma pequena parcela das publicações atendia simultaneamente ao período definido, ao objetivo e às questões da revisão. A escala logarítmica foi empregada para facilitar a visualização das diferenças entre as quantidades registradas nas diferentes etapas.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ESTUDOS

Foram selecionados 04 (quatro) artigos para a etapa final da Revisão Sistemática da Literatura. Os estudos analisam a modularização de diferentes produtos físicos: um purificador de ar inteligente (Wang e Zhou, 2025), um laptop (Yamada et al., 2025), uma bicicleta elétrica (Wang et al., 2025) e um produto de suporte à segurança para pesca no gelo (Li et al., 2025). Apesar da diversidade das aplicações, os artigos compartilham uma orientação metodológica baseada na identificação dos elementos do produto, na representação

de suas relações por meio de matrizes ponderadas e na aplicação de técnicas de agrupamento para determinar as fronteiras dos módulos.

Wang e Zhou (2025), Yamada et al. (2025) e Wang et al. (2025) adotam predominantemente abordagens bottom-up, pois partem de componentes ou subsistemas existentes. Li et al. (2025), por sua vez, utilizam uma abordagem híbrida, iniciada pela identificação das necessidades dos usuários e pelo desdobramento funcional, em uma perspectiva top-down, seguida pelo agrupamento dos parâmetros físicos do produto. Os objetivos da modularização variam conforme o contexto de aplicação. Wang e Zhou (2025) buscam reduzir a complexidade das dependências entre subsistemas; Yamada et al. (2025) relacionam a arquitetura modular ao desempenho da cadeia de suprimentos; Wang et al. (2025) procuram reduzir a complexidade da análise de produtos com grande quantidade de peças; e Li et al. (2025) orientam o processo para a desmontabilidade, a adaptabilidade e a segurança.

4.3 PROCESSO DE DECOMPOSIÇÃO E TÉCNICAS UTILIZADAS

O processo de decomposição identificado nos artigos compreende, de forma geral, a seleção dos elementos do produto, a definição das relações relevantes, a construção da representação matricial, a aplicação do método de agrupamento e a avaliação dos módulos resultantes. Wang e Zhou (2025) utilizam uma Design Structure Matrix (DSM) quadrada e ponderada, processada pelo algoritmo de Clusterização por Picos de Densidade Otimizada. O método combina estimação de densidade por Kernel Gaussiano, K-NN, regra de Silverman, Informação Mútua e Divergência de Kullback-Leibler.

Essa combinação reduz a necessidade de seleção manual de determinados parâmetros do algoritmo e permite considerar relações não lineares entre os subsistemas. Yamada et al. (2025) constroem DSMs para cinco tipos de interação: tamanho, contato, eletricidade, informação e calor. As matrizes são integradas e processadas pelo algoritmo IGTA. Depois da formação dos módulos, as arquiteturas são avaliadas com base em qualidade, custo, tempo de entrega e carga ambiental da cadeia de suprimentos. Wang et al. (2025) dividem a decomposição em duas etapas. Os componentes centrais são agrupados por clusterização hierárquica aplicada a uma DSM quadrada. Em seguida, os componentes não centrais são associados aos módulos anteriormente formados por meio de uma matriz retangular e de um critério de máxima intensidade de relacionamento.

Li et al., (2025) combinam o modelo Kano, o Projeto Axiomático, uma matriz de transição e uma DSM. As necessidades dos usuários são traduzidas em requisitos funcionais e parâmetros de projeto. Posteriormente, as relações entre os parâmetros físicos são ponderadas e submetidas a um agrupamento hierárquico. Os estudos empregam técnicas distintas, mas compartilham a utilização de representações matriciais como etapa intermediária entre a caracterização do produto e a formação dos módulos.

4.4 INFORMAÇÕES DE ENTRADA E REPRESENTAÇÃO MATRICIAL

As informações de entrada abrangem relações físicas, funcionais, geométricas, energéticas, informacionais, produtivas e relacionadas ao ciclo de vida. Os quatro estudos utilizam dados ponderados, capazes de representar diferentes intensidades de relacionamento. Wang e Zhou (2025) consideram dependências físicas e funcionais entre subsistemas. Yamada et al., (2025) integram relações de tamanho, contato, eletricidade, informação e calor, complementadas por dados de fornecedores, custos, transportes e emissões.

Wang et al. (2025) incorpora conexões estruturais, relações funcionais, fluxos de energia, material e informação, além de critérios de manutenção e reciclagem. Li et al., (2025) utilizam necessidades dos usuários, requisitos funcionais, tipos de união, relações geométricas, sinergia funcional e evolução dos componentes.

A DSM quadrada é a principal representação utilizada na formação dos módulos. Nessa estrutura, as linhas e as colunas correspondem ao mesmo conjunto de componentes, subsistemas ou parâmetros físicos. As matrizes retangulares aparecem em Wang et al., (2025) e Li et al. (2025), porém com funções complementares. Em Wang et al., (2025), a matriz relaciona componentes não centrais aos módulos já definidos.

Em Li et al. (2025) a matriz de projeto representa relações entre requisitos funcionais e parâmetros de design, mas é posteriormente convertida em uma DSM quadrada para a aplicação da clusterização. Assim, mesmo quando são representadas relações entre entidades heterogêneas, a formação principal dos módulos permanece apoiada em matrizes quadradas. Não foi identificada a utilização direta de uma matriz retangular para agrupar simultaneamente seus elementos de linha e de coluna.

4.5 FORMAÇÃO DOS MÓDULOS E DRIVERS DE MODULARIZAÇÃO

A formação dos módulos é orientada, de modo geral, pela concentração das relações mais intensas no interior dos agrupamentos e pela redução das relações entre módulos diferentes. Essa lógica é implementada por funções objetivo, medidas de densidade, custos de acoplamento, índices de modularidade e cortes em dendrogramas. Em Wang e Zhou (2025), os elementos com maior densidade local e distância relativa são selecionados como centros dos agrupamentos.

Yamada et al. (2025) utilizam o IGTA para reduzir as interações entre clusters. Wang et al. (2025) empregam o índice de modularidade Q e uma avaliação de engenharia para selecionar o corte do dendrograma. Li et al. (2025) adotam uma distância de associação e um limiar de corte para definir os módulos.

Os drivers estruturais e funcionais são os mais recorrentes, mas os artigos também incorporam critérios econômicos, logísticos, ambientais e relacionados ao ciclo de vida. Yamada et al. (2025) consideram custos, qualidade, tempo de entrega e emissões na avaliação das arquiteturas. Wang et al. (2025) incluem manutenção, reciclagem e descarte, enquanto Li et al. (2025) incorporam desmontabilidade e evolução conjunta dos componentes.

Esses resultados indicam que os módulos obtidos dependem tanto das relações existentes no produto quanto dos objetivos definidos para a modularização. Por essa razão, arquiteturas produzidas a partir de drivers distintos não podem ser comparadas apenas pelo número ou pela composição dos módulos.

4.6 ALTERNATIVAS DE ARQUITETURA E VALIDAÇÃO

Os estudos apresentam diferentes níveis de exploração das alternativas de arquitetura. Yamada et al. (2025) comparam explicitamente duas arquiteturas e diferentes configurações de fornecedores e transportes. Wang et al. (2025) utilizam um dendrograma que permite analisar diferentes níveis de granularidade, embora uma configuração com dez módulos seja selecionada. Wang e Zhou (2025) e Li et al. (2025) apresentam predominantemente uma solução principal.

A modularização é, portanto, tratada principalmente como a busca por uma arquitetura preferencial. Não foram identificadas abordagens que apresentem formalmente conjuntos de soluções de compromisso ou fronteiras de otimização multiobjetivo. Os estudos utilizam exemplos numéricos, estudos de caso, comparação com algoritmos, métricas de modularidade, simulações, modelagem tridimensional e avaliação de usuários.

Entretanto, as evidências estão concentradas em aplicações individuais, sem replicação em diferentes classes de produtos ou utilização de bases comuns de comparação. Embora os resultados demonstrem a viabilidade das propostas, ainda são limitadas as evidências relacionadas à generalização, à escalabilidade e à robustez dos métodos.

4.7 SÍNTESE COMPARATIVA

O Quadro 3 apresenta uma síntese comparativa dos estudos incluídos na revisão, destacando os produtos analisados, as abordagens de decomposição, as representações matriciais, as técnicas de agrupamento, os principais drivers de modularização, as alternativas geradas e as limitações identificadas.

Quadro 3 — Síntese dos artigos analisados

Estudo	Produto	Abordagem	Representação principal	Técnica de agrupamento	Principais drivers	Alternativas	Limitação principal
Wang e Zhou (2025)	Purificador de ar	Bottom-up	DSM quadrada ponderada	Clusterização por Picos de Densidade Otimizada	Estruturais e funcionais	Uma solução principal	Escalabilidade e validação em ambientes dinâmicos
Yamada et al. (2025)	Laptop	Bottom-up	DSMs quadradas integradas	IGTA	Estruturais, funcionais, econômicos, ambientais e logísticos	Duas arquiteturas e configurações logísticas	Pesos uniformes e modelo logístico estático
Wang et al. (2025)	Bicicleta elétrica	Bottom-up em duas etapas	DSM quadrada e matriz retangular de associação	Clusterização hierárquica	Estruturais, funcionais, manutenção e reciclagem	Diferentes cortes do dendrograma	Subjetividade e extração CAD incompleta
Li et al. (2025)	Produto de segurança para pesca no gelo	Híbrida	Matriz funcional convertida em DSM quadrada	Agrupamento hierárquico	Estruturais, funcionais e desmontabilidade	Uma solução com quatro módulos	Ausência de protótipo físico

Fonte: Autores, 2026.

A comparação evidencia que os estudos se diferenciam principalmente quanto às relações consideradas, aos métodos de agrupamento e aos objetivos atribuídos à modularização. Apesar dessas diferenças, a DSM quadrada permanece como a estrutura predominante na etapa principal de decomposição. A comparação evidencia a predominância de abordagens bottom-up, do uso de DSMs quadradas e de métodos de clusterização voltados à formação de módulos com maior coesão interna e menor acoplamento externo.

4.8 LACUNAS E OPORTUNIDADES DE PESQUISA

As limitações declaradas pelos autores incluem a necessidade de avaliar a escalabilidade e a aplicação em ambientes dinâmicos (Wang e Zhou, 2025), a utilização de pesos uniformes e de um modelo logístico estático (Yamada et al., 2025), a dependência do julgamento de especialistas e a extração ainda incompleta de dados CAD (Wang et al., 2025), além da aplicação de uma única rodada de clusterização e da ausência de protótipo físico (Li et al., 2025).

A comparação dos estudos permite identificar quatro lacunas principais: a dependência do preenchimento manual das matrizes, a predominância das DSMs quadradas, a limitada exploração de alternativas de arquitetura e a validação concentrada em aplicações individuais. A conversão das relações entre requisitos, funções, componentes e processos para uma DSM quadrada pode reduzir a rastreabilidade entre esses domínios. Essa observação constitui uma inferência da presente revisão, e não um resultado diretamente mensurado pelos artigos.

Nesse contexto, identifica-se uma oportunidade para investigar métodos de decomposição baseados em matrizes retangulares, capazes de preservar relações entre entidades heterogêneas. Essa investigação pode envolver a adaptação de algoritmos desenvolvidos para DSMs quadradas ou a aplicação de técnicas de co-clustering e biclustering. Outra oportunidade está na extração automatizada de relações a partir de modelos tridimensionais, estruturas de montagem e dados CAD. A tentativa apresentada por Wang et al. (2025) indica a relevância dessa integração, mas também demonstra que a automatização da obtenção dos dados ainda não está plenamente desenvolvida.

4.9 MAPA DE RASTREABILIDADE DAS SÍNTESES

Com o objetivo de assegurar a rastreabilidade dos resultados, o Quadro 4 relaciona as principais sínteses produzidas pela revisão aos estudos que fornecem evidências para sustentá-las. Essa organização permite distinguir os resultados diretamente observados nos artigos das interpretações decorrentes da comparação do conjunto analisado, especialmente no que se refere ao uso das DSMs quadradas, à obtenção dos dados, à geração de alternativas e às possibilidades de aplicação de matrizes.

Quadro 4 -Rastreabilidade das Sínteses

Síntese ou conclusão	Estudos que oferecem evidência	Observação
A DSM quadrada predomina na etapa principal de agrupamento.	Wang e Zhou (2025); Yamada et al. (2025); Wang et al. (2025); Li et al. (2025)	Todos utilizam DSM quadrada na formação principal dos módulos.
Os módulos são formados pela concentração de relações internas e redução das relações externas.	Os quatro estudos	São utilizadas funções, densidades, custos, índices ou distâncias.
As relações são representadas por dados ponderados.	Os quatro estudos	Os valores expressam diferentes intensidades de relacionamento.
A obtenção dos dados permanece dependente de avaliações humanas.	Os quatro estudos	A automatização concentra-se no processamento das matrizes.
Matrizes retangulares são utilizadas somente em etapas complementares.	Wang et al. (2025); Li et al. (2025)	Não conduzem a formação principal dos módulos.
Drivers relacionados ao ciclo de vida ampliam os objetivos da modularização.	Yamada et al. (2025); Wang et al. (2025); Li et al. (2025)	Incluem logística, emissões, manutenção, reciclagem e desmontabilidade.
A geração e a comparação de alternativas são limitadas.	Os quatro estudos	Apenas Yamada et al., (2025) comparam arquiteturas de forma explícita.
As validações estão concentradas em aplicações individuais.	Os quatro estudos	Não foram identificadas replicações em diferentes classes de produtos.
Não foi identificado agrupamento principal diretamente sobre matriz retangular.	Os quatro estudos.	Síntese resultante da comparação do conjunto.

A extração automática de dados de modelos 3D permanece limitada.	Principalmente Wang et al. (2025).	O estudo apresenta uma tentativa ainda insuficiente de extração CAD.
Matrizes retangulares e agrupamento multidomínio constituem oportunidades de pesquisa.	Síntese dos quatro estudos.	Interpretação da revisão, não resultado validado pelos artigos.

Fonte: Autores, 2026.

De modo geral, o quadro evidencia que os estudos convergem quanto ao uso de matrizes quadradas e ponderadas, à busca por maior coesão interna dos módulos e à dependência de avaliações humanas para a obtenção dos dados de entrada. As matrizes retangulares aparecem apenas em etapas complementares e não são utilizadas diretamente na formação principal dos módulos.

Também se observa que a automatização permanece concentrada no processamento das matrizes, enquanto a extração dos dados, a geração de diferentes alternativas de arquitetura e a validação em diferentes classes de produtos ainda representam oportunidades de avanço. Estes resultados fundamentam a investigação de métodos baseados em matrizes retangulares, agrupamento multidomínio e extração automatizada de dados de modelos tridimensionais.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos analisados demonstram que a decomposição modular de produtos físicos é tratada predominantemente como um problema de representação e agrupamento das relações entre componentes. A DSM quadrada e ponderada constitui a estrutura mais utilizada, enquanto os métodos de clusterização variam conforme os objetivos e os contextos de aplicação. Apesar dessas diferenças, as propostas convergem para a formação de módulos com maior intensidade de relações internas e menor acoplamento externo. A comparação dos estudos evidencia quatro lacunas principais: a dependência do preenchimento manual das matrizes e do julgamento de especialistas; a predominância de DSMs quadradas; a exploração limitada de diferentes alternativas de arquitetura modular; e a validação concentrada em aplicações individuais.

Além disso, embora matrizes retangulares apareçam em etapas auxiliares de alguns métodos, não foi identificada sua utilização direta como estrutura principal para a formação

dos módulos. Essa ausência é relevante porque a matriz quadrada representa, em suas linhas e colunas, elementos pertencentes ao mesmo domínio, geralmente componentes ou subsistemas.

Uma matriz retangular, por outro lado, poderia representar diretamente relações entre entidades de naturezas diferentes, como componentes e funções, componentes e requisitos, componentes e processos de fabricação ou componentes e operações de montagem. Com isso, seria possível preservar a rastreabilidade entre os diferentes domínios e evitar que essas relações fossem simplificadas ou convertidas previamente em vínculos componente–componente. O uso de uma matriz retangular também poderia contribuir para a identificação simultânea dos componentes que formam cada módulo e das funções, dos requisitos ou dos processos aos quais esses componentes estão relacionados. Desse modo, as fronteiras modulares poderiam ser definidas não apenas pelas interações físicas entre as partes, mas também por critérios funcionais, produtivos e relacionados ao ciclo de vida do produto.

Outra oportunidade está na automatização da obtenção dos dados utilizados para construir as matrizes. Atualmente, mesmo quando a clusterização é realizada computacionalmente, a identificação e a ponderação das relações ainda dependem, em grande parte, de atividades manuais.

Como alternativa, produtos físicos existentes poderiam ser digitalizados por tecnologias de escaneamento tridimensional, enquanto modelos CAD e estruturas digitais de montagem poderiam fornecer informações sobre geometria, contatos, interfaces, proximidades, restrições e sequências de montagem.

Essas informações poderiam ser extraídas e organizadas automaticamente em uma DSM ou, preferencialmente, em uma matriz retangular que preserva as relações entre diferentes domínios. Em seguida, algoritmos adaptados de clusterização, co-clustering ou biclustering poderiam processar os dados e produzir diferentes alternativas de arquitetura modular. Dessa forma, a integração entre digitalização tridimensional, modelos CAD, extração automatizada de relações, matrizes retangulares e algoritmos de agrupamento constitui uma oportunidade de continuidade da pesquisa. Essa integração poderia reduzir a dependência do preenchimento manual, aumentar a rastreabilidade e a reprodutibilidade do processo e permitir a análise de diferentes configurações modulares para produtos físicos existentes.

REFERÊNCIAS

- ULRICH, Karl. The role of product architecture in the manufacturing firm. **Research Policy**, v. 24, n. 3, p. 419-440, 1995. Disponível em: doi.org. Acesso em: 16 jul. 2026.
- ALBERS, A. et al. Product-Production-CoDesign: an approach on integrated product and production engineering across generations and life cycles. **Procedia CIRP**, [S. l.], v. 109, p. 167-172, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.231>. Acesso em: 27 jun. 2026.
- ERMEL, Ana Paula Cardoso; LACERDA, Daniel Pacheco; MORANDI, Maria Isabel W. M.; GAUSS, Leandro. **Revisões da literatura: um método para a geração de conhecimento científico e tecnológico**. 1. ed. Rio de Janeiro: Fólio Digital, 2022. E-book. Disponível em: <https://www.foliodigital.com.br/product-page/revisoes-da-literatura>. Acesso em: 4 jul. 2026.
- GAUSS, Leandro; LACERDA, Daniel Pacheco; MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick. Module-based product family design: systematic literature review and meta-synthesis. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 32, n. 1, p. 265–312, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10845-020-01572-3>. Acesso em: 16 jul. 2026.
- JUNG, Sangjin; SIMPSON, Timothy W. New modularity indices for modularity assessment and clustering of product architecture. **Journal of Engineering Design**, [S. l.], v. 28, n. 1, p. 1-22, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09544828.2016.1252835>. Acesso em: 1 jul. 2026.
- KITCHENHAM, Barbara et al. Procedures for performing systematic reviews. **Keele, UK, Keele University**, v. 33, n. 2004, p. 1-26, 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228756057_Procedures_for_Performing_Systematic_Reviews. Acesso em: 1 jul. 2026.
- KOROHODOVA, O.; LASHYNA, Y. **Product development approaches in Industry 4.0. Economic Bulletin of NTUU “KPI”**, Kiev, n. 18, p. 256-257, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.19.2021.231168>. Acesso em: 29 jun. 2026.
- LI, Cuiyu; HAO, Zhongjie; SU, Chen; BAI, Licen. Development of a modular design and detachable mechanism for safety support products in winter ice fishing. **Applied Sciences**, [S. l.], v. 15, n. 7, art. 3496, p. 1-21, mar. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app15073496>. Acesso em: 1 jul. 2026.
- MOLLAJAN, A.; IRANMANESH, S. H. Modularisation of system architecture to improve system recoverability: a unique application of design structure matrix. **Journal of Engineering Design**, [S. l.], v. 32, n. 10, p. 533-581, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09544828.2021.1971634>. Acesso em: 27 jun. 2026.
- OUZZANI, M.; HAMMADY, H.; FEDOROWICZ, Z.; ELMAGARMID, A. Rayyan: a web and mobile app for systematic reviews. **Systematic Reviews**, [S. l.], v. 5, n. 210, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>. Acesso em: 1 jul. 2026.

RIESENER, Michael; DÖLLE, Christian; KREß, Julian; BOßMANN, Carsten; SCHUH, Günther. Methodology for Structuring and Bundling Product-Service Systems. In: **INTERNATIONAL DEPENDENCY AND STRUCTURE MODELING CONFERENCE**, 23., 2021, Montréal. Proceedings [...]. Montréal: The Design Society, 2021. p. 60-69.

VASAWADE, R.; DESHMUKH, B.; PAWAR, P. The design structure matrix (DSM) approach to product modelling, analysis and improvement. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, [S. l.], v. 5, n. 6, p. 275-280, jun. 2015. Disponível em: <https://www.ijetae.com/Volume5Issue6.html>. Acesso em: 27 jun. 2026.

WANG, Shuai; SONG, Yi-Fei; ZOU, Guang-Yu; MAN, Jia-Xiang. Module partition of mechatronic products based on core part hierarchical clustering and non-core part association analysis. **Applied Sciences**, [S. l.], v. 15, n. 5, art. 2322, p. 1-22, fev. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app15052322>. Acesso em: 1 jul. 2026.

WANG, Ting; ZHOU, XiangZhen. An Intelligent Optimization Method for Product Design Based on Optimal Density Peak Clustering. **J. Inf. Hiding Multim. Signal Process.**, v. 16, n. 2, p. 496-508, 2025. Disponível em: <http://bit.kuas.edu.tw/~jihmsp/2025/vol16/N2/01.JIHMS-240602.pdf>. Acesso em: 1 jul. 2026.

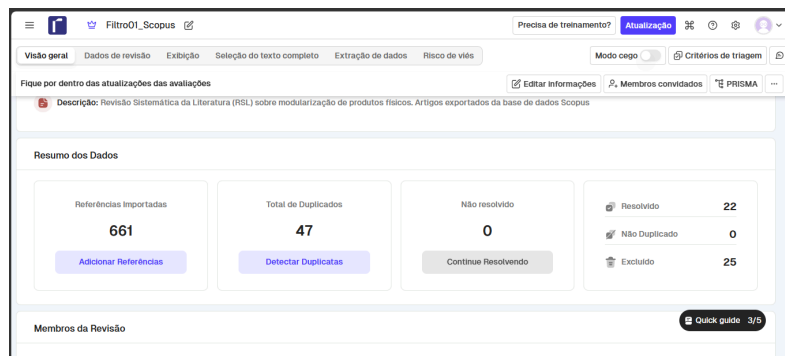
WONG, F. S.; WYNN, D. C. A systematic approach for product modelling and function integration to support adaptive redesign of product variants. **Research in Engineering Design**, [S. l.], v. 34, p. 153-177, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00163-022-00401-3>. Acesso em: 27 jun. 2026.

YAMADA, Shuho; KOMATSU, Yuki; BRACKE, Stefan; INOUE, Masato. Product architecture derivation methodology based on multi-objective design structure matrix integration and supply chain evaluation. **International Journal of Automation Technology**, [S. l.], v. 19, n. 2, p. 88-99, mar. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.20965/ijat.2025.p0088>. Acesso em: 1 jul. 2026.

ZAMBRZYCKA, Klaudia; ALMEIDA, Fabio Dias; GÓMEZ, Alejandro Pradas. Facilitating Quick Change Introduction in Aerospace Products with DSM-Based Risk Change Analysis and Clustering Technique. In: **Proceedings of the 25th International DSM Conference, DSM 2023**. 2023. p. 97-105. Disponível em: <https://doi.org/10.35199/dsm2023.11>. Acesso em: 27 jun. 2026.

APÊNDICE

Figura A1 – Tela de organização dos estudos na ferramenta Rayyan



Fonte: elaborado pelos autores (2026).