



Revisão sistemática da literatura sobre a reconfiguração de células de manufatura.

Rodrigo Franco de Lima¹, Juliana Keiko Sagawa²; Fábio Molina da Silva³

Resumo: A flexibilidade dos ambientes produtivos aumentam a complexidade das decisões nos ambientes produtivos, em especial naqueles que operam sob alta variação do mix de produtos e redução dos prazos de entrega. Neste contexto, o presente trabalho realiza uma revisão sistemática da literatura, dos últimos 10 anos, para identificar e estratificar os trabalhos que estudam a implementação de células flexíveis de manufatura por meio da aplicação do roteiro de Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS Roadmap), direcionando a busca, análise e avaliação de materiais de forma metódica. A revisão identificou 31 artigos, esses artigos foram classificados em relação aos sistemas de produção reconfiguráveis e elencados os objetivos dos estudos, a validação dos modelos propostos e das meta-heurísticas conforme suas respectivas características, além de evidenciar possíveis lacunas na literatura e a escassez de pesquisas empíricas.

Palavras-chave: *Cellular manufacturing; Flexible manufacturing; Group Analysis; Programação da Produção; ambiente Make-to-Order.*

Abstract: *The flexibility of production environments increases the complexity of decisions in production environments, especially those that operate under a high variation in the product mix and reduced delivery times. In this context, the present work performs a systematic literature review, over the last 10 years, to identify and stratify the works that study the implementation of flexible manufacturing cells through the application of the Systematic Literature Review (RBS Roadmap), directing the search, analysis and evaluation of materials in a methodical way. The review identified 31 articles, these articles were classified in relation to reconfigurable production systems and listed the objectives of the studies, the validation of the proposed models and meta-heuristics according to their respective characteristics, in addition to highlighting possible gaps in the literature and the scarcity of empirical research.*

Keywords: *Cellular manufacturing; Flexible manufacturing; Group Analysis; Production Scheduling; Make-to-Order. Environment*

¹ rodrigo.lima@estudante.ufscar.br

² juliana@dep.ufscar.br

³ fabio@dep.ufscar.br

1. Introdução

Ambientes complexos, voláteis e incertos são desafios críticos a serem enfrentados pelos sistemas de manufatura, onde exigem-se curtos prazos de entrega, variedades de produtos, variação na demanda e baixos custos. Algumas estratégias foram desenvolvidas e são adequadas para o atendimento destes desafios aos diferentes tipos sistemas de manufatura, como o Sistema de Manufatura Dedicado (DMS) sendo mais adequado em um mercado estável, porém ineficiente no mercado dinâmico, o Sistema de Manufatura Celular (CMS) que visa a eficiência quando há grande variedade de tipos de produtos que possam ser agrupados em famílias ou Sistema Flexível de Fabricação (FMS), que utiliza de recursos automatizados com máquinas de Comando Numérico Computadorizado (CNC) gerenciados por software, que enfrentam dificuldades em flutuações abruptas de mercados, possuem projeto complexo e têm alto custo de implantação. Já o Sistema de Manufatura Reconfigurável (RMS), traz um modelo emergente no ambiente de fabricação, adaptando o sistema as variações de mercado de modo eficiente (EGUIA ET AL., 2017).

Existem várias metodologias para a elaboração de um Sistema de Manufatura Celular, apresentados em diversos estudos, como a teoria de gráfico, matriz, clusterização, programação matemática, meta-heurística, redes neurais, dentre outras (EGUIA ET AL., 2017).

O objetivo deste trabalho é de levantar, por meio de revisão bibliográfica sistemática, as pesquisas existentes sobre a reconfiguração das células de manufatura em um CMS, buscando identificar os métodos mais utilizados na atualidade, suas características e as lacunas dentro da literatura para desenvolvimento de futuras pesquisas.

Esta pesquisa torna-se relevante considerando que os métodos tradicionais de formação de células consideram a composição de um layout funcional, com máquinas dedicadas para operações específicas. Com as evoluções tecnológicas uma mesma máquina desempenha diversas operações, além de diversos métodos de formação de células que foram desenvolvidos e estudados ao longo do tempo. Além das tecnologias, o mercado está em constante mudança e com tendência para uma customização em massa, demonstrando a importância da flexibilização dos sistemas produtivos em conjunto da melhor utilização dos recursos para atendimento das necessidades dos clientes.

Visto que a manufatura celular é a mais indicada para os sistemas produtivos do tipo *job shop* e que temos um mercado volátil e com necessidade diversificada de produtos e volumes, é necessário que o Sistema de Manufatura Celular não fique estagnado e que possa ser reconfigurado para se adequar ao mercado.

O artigo está estruturado da seguinte forma: referencial teórico básico a respeito do Sistema de Manufatura Celular (CMS) e da reconfiguração das células, método de pesquisa, resultados das buscas e análises das pesquisas encontradas e, finalmente, conclusões e direcionamentos para pesquisas futuras.

2. Sistema de Manufatura Celular (CMS) e reconfiguração das células

O CMS visa a eficiência do sistema produtivo quando há grande variedade de tipos de produtos que possam ser agrupados em famílias e colabora para a redução do tempo de configuração de máquina, para a redução do tempo de atravessamento do produto na fábrica, e melhora a produtividade (WEMMERLÖV E JOHNSON, 1997), porém tem dificuldades em responder a ambientes com uma combinação dinâmica de peças e variação na demanda destes produtos, necessitando de maior flexibilidade (EGUIA ET AL., 2017).

Na literatura pode-se encontrar os problemas relacionados a formação de células de manufatura para atender as mudanças de demanda, variedade de produtos e a variação na demanda de cada produto sendo dividido em duas categorias básicas: implementação uma nova formação da célula de manufatura, assunto mais explorado, ou reconfiguração da célula existente, que também é um problema importante a ser abordado (YILMAZ E EROL, 2015).

3. Método de Pesquisa

Para a elaboração da pesquisa foi utilizado o roteiro para Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS Roadmap) de Conforto, Amaral e Silva (2011).

A revisão bibliográfica sistemática (RBS) permite a busca, análise, sintetização e avaliação de materiais na literatura de forma metódica, transparente, confiável e replicável, pois é feita através de uma estratégia definida em um método sistemático para realização das pesquisas, permitindo a repetição dos ciclos contínuos do roteiro até que os objetivos da revisão sejam alcançados e possam ser replicados para colaborar com pesquisas futuras (CONFORTO; AMARAL; SILVA, 2011).

A revisão bibliográfica tem como objetivo encontrar materiais na literatura que contribuam para o desenvolvimento do trabalho. Com isso, será possível estudar os materiais e estruturar uma análise comparativa entre os artigos com foco no método utilizado, relações com o cenário de estudo e foco nas necessidades que acionam a reconfiguração das células.

4. Resultado da análise das publicações

4.1 Análise Bibliométrica

Para a obtenção dos artigos foi utilizada a base Scopus, sendo adotada as palavras chaves *Cellular Manufacturing*, *Group Analysis*, *flexible machines* e *reconfigurable* para a construção da *string* de busca, conforme o Quadro 1. As expressões referentes a cada constructo foram ligadas entre si pelo conector “AND”.

Com a definição das palavras chaves foi desenvolvida a *string* e foram atribuídos filtros para busca do material, sendo estes definidos para se considerar apenas artigos, dentro do período de 2012 a 2021, nas áreas de engenharia, negócios e de decisões e gestão.

Quadro 1 - Constructo, palavra chave e *string* de busca

Constructo	Palavra chave	String
<u>Cellular manufacturing</u>	<u>Cellular Manufacturing</u>	(((<u>cel*</u> AND(<u>manufact*</u> OR <u>formation</u> "OR" <u>system</u> "))OR(<u>group</u> "AND(<u>analys</u> "OR" <u>cel</u> "OR <u>machine</u> "))))
	<u>Cellular formation</u>	
	<u>Cellular system</u>	
	<u>Group Analysis</u>	
	<u>Group Cell</u>	
<u>Flexible/ Reconfigurable</u>	<u>Group Machine</u>	((<u>flexible</u> "AND(<u>machine</u> "OR <u>manufact*</u>)"OR" <u>reconfigurable</u> "))
	<u>Flexible machine</u>	
	<u>Flexible manufacturing</u>	
	<u>Reconfigurable</u>	

Fonte: Elaborado pelo autor

A busca com a *string* foi restrita ao título dos artigos para limitar a quantidade de artigos encontrados, com o foco em localizar apenas o material mais dedicado ao assunto relacionado ao problema de pesquisa.

Os filtros foram determinados visando a obtenção de material mais recente e que aborde o sistema de manufatura celular com máquinas flexíveis, diferentemente da abordagem tradicional onde o sistema de manufatura celular é amplamente explorado com aplicação em cenários com máquinas funcionais.

Pela busca com a *string* formada, foram obtidos 52 artigos únicos com a utilização apenas da base da Scopus. As informações sobre os artigos foram exportados para o Parsifal, que auxilia na estruturação da pesquisa e organização dos artigos, contribuindo para melhor desenvolvimento das fases de entrada e processamento do RBS Roadmap

Para a seleção dos artigos foi executado a leitura do título e do abstract determinando o aceite ou exclusão do material. Para os artigos aceitos, foi realizado uma classificação de 1 a 5 conforme o nível de relevância e conexão com a manufatura celular reconfigurável, sendo o número 1 de menor aderência e 5 o de maior relação ao assunto, possibilitando a priorização da leitura dos artigos conforme a relevância do abstract com o assunto da pesquisa.

Dos 52 artigos obtidos, 21 (40,38%) foram rejeitados e 31 (59,62%) artigos foram aceitos. A classificação com base nas notas é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos artigos

Classificação dos artigos	Quantidade de artigos	% do total
Nota 5	13	41,94%
Nota 4	6	19,35%
Nota 3	10	32,26%
Nota 2	1	3,23%
Nota 1	1	3,23%
Total Geral	31	100%

Fonte: Elaborado pelo autor

Os motivos de rejeição dos documentos foram os seguintes:

- a) O artigo não estava relacionado ao sistema de células de produção;
- b) Os temas dos artigos não correspondiam a células como sistema de manufatura, mas abordam outros significados em diferentes áreas de pesquisa, como biologia, medicina, comunicação, energia e outros;
- c) A linguagem era diferente da inglesa ou portuguesa.

Os artigos com nota 5, dispostos no Quadro 2, serão estudados com maior profundidade pois possuem uma correlação mais forte ao tema pesquisado que os outros e tiveram prioridade na leitura completa dos artigos para direcionamento da pesquisa; será realizada uma análise qualitativa dos problemas abordados, objeto de pesquisa, método de pesquisa utilizado e do objetivo do estudo.

Os artigos foram buscados entre os anos de 2012 e 2021, e a distribuição daqueles aceitos ao longo dos anos é demonstrado na Figura 1, sendo os anos de 2012 e 2015, seguidos de 2019, aqueles com maior quantidade de artigos publicados.

Figura 1 - Publicação ao longo dos anos



Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 2 - Artigos selecionados com classificação de nível 5

Título	Ano	Periódico
<i>An optimisation model for the dynamic management of cellular reconfigurable manufacturing systems under auxiliary module availability constraints</i>	2021	<i>Journal of Manufacturing Systems</i>
<i>A digital twin-based flexible cellular manufacturing for optimization of air conditioner line</i>	2021	<i>Journal of Manufacturing Systems</i>
<i>Stochastic models for performance analysis of multistate flexible manufacturing cells</i>	2020	<i>Journal of Manufacturing Systems</i>
<i>A methodology of setting module groups for the design of reconfigurable machine tools</i>	2019	<i>International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i>
<i>Particle swarm optimisation algorithm and multi-start simulated annealing algorithm for scheduling batches of parts in multi-cell flexible manufacturing system</i>	2019	<i>International Journal of Services and Operations Management</i>
<i>Manufacturing cell formation with flexible processing capabilities and worker assignment: Comparison of constraint programming and integer programming approaches</i>	2018	<i>Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture</i>
<i>Cell design and multi-period machine loading in cellular reconfigurable manufacturing systems with alternative routing</i>	2017	<i>International Journal of Production Research</i>
<i>A mathematical model for designing reconfigurable cellular hybrid manufacturing-remanufacturing systems</i>	2016	<i>International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i>
<i>Modeling and scheduling a flexible manufacturing cell with parallel processing capability</i>	2015	<i>CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology</i>
<i>A mathematical programming model for reconfiguration of flexible manufacturing cells</i>	2015	<i>Engineering Optimization</i>
<i>Reconfigurable dynamic cellular manufacturing system: A new Bi-objective mathematical model</i>	2014	<i>RAIRO - Operations Research</i>
<i>Adaptive production control system for a flexible manufacturing cell using support vector machine-based approach</i>	2013	<i>International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i>
<i>Iterative algorithms for part grouping and loading in cellular reconfigurable manufacturing systems</i>	2012	<i>Journal of the Operational Research Society</i>

Fonte: Elaborado pelo autor

Antes da análise dos artigos considerados mais relevantes, com a classificação com a nota 5, foi realizada a leitura da introdução dos artigos com classificação menores que 5, sendo todos eles descartados para a análise do conteúdo das publicações, por não serem aderentes ao tema de reconfiguração de células de manufatura.

Finalmente, os artigos com classificação 5 foram lidos integralmente e os artigos de Zhang et al. (2020) e Wang, Zhang e Han (2019) também foram excluídos pois não tratavam da formação de células e sua reconfiguração, mas da otimização dos índices de desempenho para avaliação de um FMC (*Flexible Manufacturing Cells*) e da formulação de módulos RMT (*Reconfigurable Machine Tools*) para fabricação de caixas de engrenagens, respectivamente.

4.2 Análise do conteúdo dos trabalhos publicados

Com a seleção dos artigos mediante ao tema sobre a formação do Sistema de Manufatura Celular e da reconfiguração das células, foi elaborado o Quadro 3 com os objetivos e métodos de formação de células utilizadas pelos autores.

Quadro 3 - Objetivo dos artigos e métodos utilizados

Autores	Objetivo do artigo	Método de pesquisa
Aljuneidi; Bulgak (2016)	Sistema de manufatura reconfigurável e híbrida (Sistema de manufatura sustentável), visando minimizar os custos de máquina (manutenção, realocação/remoção, instalação/aquisição e operacional), Manufatura/fabricação (componentes novos/remanufaturados, manutenção para componentes novos e remanufaturados) e de produtos devolvidos para remanufatura (aquisição do produto devolvido, desmontagem do produto devolvido e estoque do produto devolvido)	Modelagem axiomática. Programação Linear Inteira Mista (MILP)
Balaji; Porselvi; Jawahar (2019)	Encontrar a melhor sequência de lotes; Minimizar o tempo para conclusão de todas as tarefas; Comparar a performance entre as modelagens PSO e MSA (BAM) Batch Availability Model (JAM) Job Availability Model	Modelagem axiomática. Modelagem PSO (Particle Swarm Optimization) e MSA (Multi-start Simulated Annealing) - recozimento.
Baykasoğlu; Topaloğlu; Şenyüzülür (2018)	Minimização do custo total para a formação de célula (Duplicação de máquina e duplicação de trabalhadores). Incorpora máquina, processamento de peças e flexibilidade do trabalhador juntos.	Modelagem axiomática. Programação de restrição (CP); Programação Inteira (IP).
Bortolini et al (2021)	Propor um modelo de otimização com programação linear para o gerenciamento dinâmico de RMSs e equilibrando melhor a reconfiguração de RMTs, considerando a disponibilidade dos módulos auxiliares. Para fazer isso, a função objetivo busca a minimização do tempo de movimentação intercelular, o tempo de movimentação do módulo auxiliar e o tempo de reconfiguração para instalação e desmontagem dos módulos auxiliares.	Modelagem matemática axiomática com programação linear. O modelo é codificado em linguagem AMPL
Eguia et al (2017)	O objetivo da pesquisa de Eguia et al (2017) é desenvolver um modelo para formação de células e efetuar o seu plano de carregamento em determinados período utilizando-se de um modelo secundário, visando o balanceamento da carga. O faz buscando a minimização do transporte intracelular total e custos de fabricação, bem como equilibrar a utilização das máquinas e células de manufatura.	Modelagem axiomática. Para a formação das células ele utiliza da programação linear inteira e no carregamento a programação linear inteira mista com o objetivo de conseguir um melhor balanceamento da produção.
Guo et al (2021)	Proposta de um sistema de manufatura celular flexível baseado em Digital Twin, que é um novo método para otimização de linhas de produção tradicionais.	Modelagem baseada em Digital Twin.
Manupati et al (2013)	Este artigo examina e compara o desempenho da abordagem de simulação baseada em SVM com o competências de regras de programação em dois ambientes operacionais diferentes, que se caracterizam pela incerteza da demanda. O objetivo desta pesquisa é a introdução de uma simulação de máquinas de vetores de suporte como base para a abordagem do sistema de controle de produção adaptativo. objetivo é construir cronogramas para maximizar o tempo total de processamento e minimizar os atrasos ponderados	Modelagem axiomática e simulação
Naderi; Azab (2015)	Minimização dos tempos de processamento. Comparação dos resultados encontrados a partir dos cinco algoritmos meta-heurísticos desenvolvidos.	Modelagem axiomática. Modelo de programação linear inteira mista para pequenas instâncias. Cinco Metaheurísticas são desenvolvidas para estâncias maiores. Genetic algorithm (GA), simulated annealing (SA), iterated greedy algorithm (IGA), iterated local search (ILS) and artificial immune algorithm (AIA).
Rabbani et al (2014)	Propor um modelo para resolução do problema de formação de células. Algoritmo Competitivo Imperialista (ICA) é desenvolvido, cujo os resultados obtidos são comparados com os do Algoritmo Genético (GA), mostrando o desempenho superior do ICA desenvolvido.	Modelagem axiomática. Modelo matemático não linear inteiro misto. Algoritmo Competitivo Imperialista (ICA).
Yilmaz; Erol (2015)	Desenvolvem uma abordagem com o objetivo de decidir quando e como a reconfiguração da célula existente de manufatura deve ser realizada, no entanto, a função objetiva do modelo desenvolvido busca a minimização do custo total de reconfiguração.	Modelagem axiomática. Utilizada a programação linear, cujo a função objetiva é a minimização do custo total de reconfiguração.
Yu et al (2012)	Sugerir dois algoritmos iterativos nos quais os dois problemas são resolvidos repetidamente até que uma solução seja obtida. A função objetivo junto com a restrição minimiza a carga de trabalho máxima, ou seja, equilibrar as cargas de trabalho atribuídas às máquinas.	Modelagem axiomática. Um modelo de programação inteiro é sugerido para representar os dois problemas ao mesmo tempo para o objetivo de equilibrar as cargas de trabalho atribuídas às máquinas

Fonte: Elaborado pelo autor

Em análise dos artigos, foi verificado que Eguia et al. (2017) apresentam em seu estudo uma metodologia para a formação de células através de um modelo de programação linear inteiro, utilizando-se de múltiplos planos de produção. Assim, as células são formadas pela relação entre máquina e plano de processo. Eles se utilizam de uma biblioteca de módulos de ferramentas de máquinas reconfiguráveis, auxiliares, para a formação das células, visando atender a demanda em determinados períodos de tempo para cada tipo de produto, considerando o custo de transporte e de manutenção como a função objetivo principal. Após o problema de célula ser resolvido, é implementado o plano de carregamento das células, que consistem em determinar a programação para fabricação de cada tipo de peças em um determinado período e o tipo e quantidade de módulos de ferramentas que devem ser alocados para a fabricação.

O objetivo da pesquisa supracitada é desenvolver um modelo para formação de células e efetuar o seu plano de carregamento em determinados período utilizando-se de um modelo secundário, visando o balanceamento da carga. Busca-se a minimização do transporte intracelular total e custos de fabricação, bem como equilibrar a utilização das máquinas e células de manufatura. Bertolini et al. (2021) aborda foco similar com a busca da minimização do tempo de transporte intracelular e o balanceamento das cargas, que foi assunto de estudos anteriores, como o de Yu et al. (2012), e parte do objetivo secundário de Yilmaz e Erol (2015).

Outro aspecto estudado é o que trata da minimização do custo total para formação das células ou do movimento entre elas, demonstrando serem focos de importância nos estudos atuais sobre o tema. Tais focos são abordados nos trabalhos de Baykasoğlu, Topaloğlu e Şenyüzlüler (2018) e Aljuneidi e Bulgak (2016), que adicionam ao seu estudo os aspectos da flexibilidade dos trabalhadores dentro da configuração do sistema. Yilmaz e Erol (2015) desenvolvem uma abordagem com o objetivo de decidir quando e como a reconfiguração da célula existente de manufatura deve ser realizada, utilizando como função objetiva o custo total de reconfiguração.

Balaji, Porselvi e Jawahar (2019), Naderi e Azab (2015) e Manupati et al. (2013) tem objetivos similares, pois buscam encontrar o melhor tempo de conclusão das tarefas ou a redução do tempo de processamento. Os primeiros fazem uma comparação entre modelagens PSO (*particle swarm optimisation*) e MSA (*multi-start simulated annealing*), já o segundo artigo faz a comparação dos resultados encontrados a partir dos cinco algoritmos meta-heurísticos desenvolvidos. O estudo de Manupati et al. (2013), além da minimização do tempo de processamento, aborda como objetivo a minimização dos atrasos ponderados e o equilíbrio das cargas de trabalho. Um objetivo secundário similar a este último (equilíbrio das cargas) é buscado nos trabalhos de Eguia et al. (2017) e Yilmaz e Erol (2015).

Rabbani et al. (2014) propõem modelo para resolução do problema de formação das células, porém, o objetivo é de comparação do modelo desenvolvido ICA (Algoritmo Competitivo Imperialista) com o GA (Algoritmo Genético).

Guo et al. (2021) trazem uma proposta de manufatura celular flexível baseado em Digital Twin em comparação com os modelos tradicionais. No modelo proposto, amplia-se a interação entre o mundo real e os softwares de controle e simulação, com larga utilização de sensores para captação dos dados.

Diferentemente dos demais, ele não trabalha com modelagem ou construção de algoritmos, mas foca na comunicação entre mundo real e virtual para o gerenciamento das células de manufatura em um conceito aproximado dos sistemas físicos cibernéticos introduzidos pela Indústria 4.0.

Vários estudos demonstrados no quadro 3 utilizam da modelagem para condução da pesquisa e resolução do problema explorado nos artigos, porém, um estudo interessante é o de Yilmaz e Erol (2015), que utiliza a programação linear onde a função objetivo é a minimização do custo total de reconfiguração e as restrições são baseadas em custos de rotas de peças e parâmetros do sistema de manufatura, este sendo uma restrição apresentada como lacuna dentro da literatura e possibilidade de trabalhos futuros em alguns dos artigos pesquisados.

Eles ampliam o escopo das decisões de reconfiguração considerando parâmetros de fabricação, como o volume de produção de peças, roteiros alternativos de fabricação, custos dos roteamentos alternativos, número e capacidade das máquinas, tempos adicionais de preparação de máquinas, limites requeridos de taxa de utilização das máquinas, limites de tempos de ciclo de máquina, quantidade e tipos de ferramentas e limites máximos do tamanho de célula. As questões são trabalhadas para minimizar os impactos de alguns caminhos tradicionalmente tomados para resolução dos problemas de reconfiguração, como a utilização de rotas alternativas, aquisição de novas máquinas, duplicação de máquinas existentes, subutilização de máquinas e atribuição de ferramentas adicionais para as máquinas das células.

Já Eguia et al. (2017), desenvolvem uma modelagem para formação de células utilizando-se de rotas alternativas de fabricação, assim como Yilmaz e Erol (2015), porém, os primeiros elaboram outra modelagem que gera o plano de carregamento das máquinas das células em um horizonte de tempo. Com isso, busca o melhor fluxo entre as células para favorecer a flexibilidade e o balanceamento do carregamento das máquinas nas células.

De maneira geral, os artigos utilizam a programação linear (Yilmaz e Erol, 2015; Bortolini et al. 2021), programação não linear mista e algoritmo ICA (Algoritmo Competitivo Imperialista) (Rabbani et al., 2014), programação linear inteira (Yu et al., 2012), programação linear inteira mista (Aljuneidi; Bulgak, 2016), programação inteira e inteira mista (Eguia et al., 2017), programação inteira e programação de restrição (Baykasoğlu; Topaloğlu; Şenyüzlüler, 2018), programação inteira mista e algoritmos (Naderi; Azab, 2015), utilização exclusiva de algoritmos (Balaji; Porselvi; Jawahar, 2019; Manupati et al., 2013) e modelagem baseada em Digital Twin (Guo et al., 2021) para a resolução dos problemas para formação de células e sua reconfiguração.

Ponto importante a ressaltar é que todos os artigos estudados utilizam como método de pesquisa a modelagem axiomática, que tem como base a produção de conhecimento sobre o comportamento de variáveis do modelo estudado, que não é baseado em um sistema real, com exceção para a modelagem baseada em Digital Twin de Guo et al. (2021).

Para validação dos modelos (Quadro 4), os autores utilizam procedimentos similares, como a simulação dos modelos propostos com números e valores aleatórios (dados hipotéticos) ou determinados pelos autores (Aljuneidi; Bulgak, 2016; Bortolini et al., 2021). A maior parte dos autores estudados utiliza simulação e comparação entre os modelos propostos ou utiliza modelos encontrados em bases da literatura, para validação (Balaji; Porselvi; Jawahar, 2019; Baykasoğlu; Topaloğlu; Şenyüzlüler, 2018; Eguia et al., 2017; Manupati et al., 2013; Rabbani et

al., 2014; Yu et al., 2012). Outros validam mediante a comparação entre modelos desenvolvidos no artigo por meio de dados hipotéticos combinados a testes, como o de sensibilidade (Yilmaz; Erol, 2015), o teste de ANOVA (Naderi; Azab, 2015) e a comparação com indicadores de desempenho do sistema (Guo et al., 2021).

Quadro 4 - Validação dos modelos

Autores	Validação
Aljuneidi; Bulgak (2016)	Simulação com o modelo proposto
Balaji; Porselvi; Jawahar (2019)	Teste dos problemas encontrados na literatura; Teste com 80 casos aleatórios; Análise comparativa entre os modelos.
Baykasoğlu; Topaloğlu; Şenyüzlüler (2018)	Análise comparativa entre os modelos. CP - Modelagem mais fácil e flexível, representa o problema de forma mais explícita que o IP e diferencia a estratégia de ordenação de valor por busca mais eficiente. IP - Melhor para problemas maiores.
Bortolini et al (2021)	Simulação com o modelo proposto, representando um cenário industrial.
Eguia et al (2017)	Comparação de resultados e tempos de processamento mediante a alteração de variáveis e outras abordagens.
Guo et al (2021)	Aplicação do modelo na prática e demonstração de melhoria de indicadores de desempenho (work in process, capacidade produtiva, taxa de balanceamento da linha, capacidade de produção per capita e quantidade de funcionários) em comparação com o sistema tradicional.
Manupati et al (2013)	O desempenho do SVM foi comparado aos de regras concorrentes por dois critérios: taxa de transferência máxima ponderada e atraso mínimo ponderado. Foram comparadas duas medidas de desempenho (tempo de processamento máximo e atraso mínimo) com as regras heurísticas simples.
Naderi; Azab (2015)	Atribuído tabela com informações para conjunto de testes do modelo inteiro misto e dos cinco algoritmos metaheurísticos. Comparação entre os algoritmos metaheurísticos. Para análises estatísticas adicionais, ANOVA (análise de variância) é realizado.
Rabbani et al (2014)	Exemplo hipotético randomizado. Algoritmo Competitivo Imperialista (ICA) é comparado com o Algoritmo Genético (GA)
Yilmaz; Erol (2015)	Comparação de resultados com e sem a reconfiguração. Simulação de cenários com variação de demanda e análise de sensibilidade.
Yu et al (2012)	Experimentos computacionais foram feitos em várias instâncias de teste e os resultados são relatados. A eficácia de cada algoritmo é mostrada com duas medidas de desempenho: (a) lacunas de porcentagem do valores de solução ideais ou limites inferiores para teste de tamanho para pequenas instâncias; e (b) índices de desempenho relativo (RPRs) para as instâncias de teste de grande porte.

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao final dos estudos, os autores relataram as lacunas e oportunidades de pesquisas futuras, como a atualização dos parâmetros de forma independente para otimização com uso de aprendizagem de máquina e da big data (Guo et al., 2021), a validação dos modelos com simulação (Eguia et al., 2017), o ajuste de parâmetros e manipulação do modelo para maior eficiência e melhoria (Balaji;

Porselvi; Jawahar, 2019; Baykasoğlu; Topaloğlu; Şenyüzlüler, 2018 e Rabbani et al., 2014), a oportunidade de consideração dos roteiros de fabricação no modelo e consideração da flexibilização do sistema produtivo (Baykasoğlu; Topaloğlu; Şenyüzlüler, 2018). Muitos estudos têm proposto métodos de formação de células com carregamento utilizando roteiros alternativos das peças, e consideram as capacidades dos grupos de células, porém não as relacionam com problemas de carregamento dessas células de manufatura. Além disso, poucas pesquisas foram publicadas sobre a reconfiguração de uma célula de manufatura existente (EGUIA ET AL., 2017).

Outras oportunidades de pesquisas futuras seriam a elaboração de um modelo de reconfiguração que determina o número ideal de células para cada período (Yilmaz; Erol, 2015), ou a restrição de disponibilidade de módulos auxiliares na gestão da dinâmica (Bortolini et al., 2021).

A adição da abordagem de dimensão econômica ao modelo com envolvimento de custos de formação das células ou reconfigurações (Bortolini et al., 2021; Aljuneidi; Bulgak, 2016) é outro ponto a ser abordado.

Como destaques relevantes, devido as citações de modo mais abrangente pelos autores como oportunidades, tem-se a possibilidade de utilização dos modelos desenvolvidos em cenários reais (Bortolini et al., 2021; Baykasoğlu; Topaloğlu; Şenyüzlüler, 2018; Rabbani et al., 2014; Yu et al., 2012), a modelagem de instâncias maiores (já que os modelos geralmente envolvem instâncias pequenas) e a utilização de meta-heurísticas para a solução (Bortolini et al., 2021; Aljuneidi; Bulgak, 2016; Balaji; Porselvi; Jawahar, 2019; Eguia et al., 2017; Manupati et al., 2013) e, por fim, a oportunidade da consideração de outras variáveis do sistema estudado (Baykasoğlu; Topaloğlu; Şenyüzlüler, 2018; Eguia et al., 2017; Rabbani et al., 2014; Yilmaz; Erol, 2015; Yu et al., 2012).

5. Conclusão

A partir da revisão sistemática da literatura considerando um período de tempo de 10 anos (2012 a 2021), percebeu-se que os trabalhos focados no problema de formação de células utilizam, em sua maioria, o método de modelagem e simulação através de ferramentas computacionais.

Para instâncias pequenas são utilizados modelos de programação linear inteira e mista, normalmente com aplicação de ambos em casos específicos do problema. Para instâncias maiores, percebeu-se que a utilização de algoritmos meta-heurísticos são mais adequados para obtenção de boas soluções com tempos melhores de execução se comparados com os modelos matemáticos desenvolvidos. Portanto, a técnica de modelagem pode variar conforme o problema de pesquisa, objetivos do estudo e tamanho da instância a ser resolvida.

Em sua maioria, a validação é feita através de simulações e comparações entre os modelos desenvolvidos ou dos modelos desenvolvidos com modelos existentes na literatura, uma vez que os artigos pesquisados utilizam modelagem axiomática, onde é simulado um cenário produtivo e as simulações dos modelos ocorrem com dados aleatórios/hipotéticos, de forma generalizada, não sendo gerados a partir de um cenário real.

Por fim, os trabalhos ressaltam diversas oportunidades de pesquisas futuras citadas anteriormente, porém, podem-se destacar a amplificação do uso de variáveis do sistema produtivo abordado, a modelagem de

problemas/instâncias maiores e aplicação de modelagem meta-heurística para estas instâncias (pois a maioria das pesquisas adotam pequenas ou médias instâncias), e a aplicação em cenários reais (porque os estudos utilizam de modelagem axiomática para o desenvolvimento da pesquisa).

Referências

ALJUNEIDI, T.; BULGAK, A. A. *A mathematical model for designing reconfigurable cellular hybrid manufacturing-remanufacturing systems*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 87, n. 5–8, p. 1585–1596, 2016.

BALAJI, A. N.; PORSEVI, S.; JAWAHAR, N. *Particle swarm optimisation algorithm and multi-start simulated annealing algorithm for scheduling batches of parts in multi-cell flexible manufacturing system*. International Journal of Services and Operations Management, v. 32, n. 1, p. 83–129, 2019.

BAYKASOĞLU, A.; TOPALOĞLU, Ş.; ŞENYÜZLÜLER, F. *Manufacturing cell formation with flexible processing capabilities and worker assignment: Comparison of constraint programming and integer programming approaches*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, v. 232, n. 11, p. 2054–2068, 2018.

BORTOLINI, M. et al. *An optimisation model for the dynamic management of cellular reconfigurable manufacturing systems under auxiliary module availability constraints*. Journal of Manufacturing Systems, v. 58, n. PA, p. 442–451, 2021.

BURBIDGE JOHN L.: *Planejamento e Controle da Produção*. Editora Atlas S.A., 1981.

BURBIDGE JOHN L.: *Production Flow Analysis for Planning Group Technology*. Clarendon Press. Oxford, 1996.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. DA. *Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos*. 8º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto, n. 1998, p. 1–12, 2011.

EGUIA, I. et al. *Cell design and multi-period machine loading in cellular reconfigurable manufacturing systems with alternative routing*. International Journal of Production Research, v. 55, n. 10, p. 2775–2790, 2017.

GUO, H. et al. *A digital twin-based flexible cellular manufacturing for optimization of air conditioner line*. Journal of Manufacturing Systems, v. 58, n. July, p. 65–78, 2021.

MANUPATI, V. K. et al. *Adaptive production control system for a flexible manufacturing cell using support vector machine-based approach*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 67, n. 1–4, p. 969–981, 2013.

NADERI, B.; AZAB, A. *Modeling and scheduling a flexible manufacturing cell with parallel processing capability*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, v. 11, p. 18–27, 2015.

RABBANI, M. et al. *Reconfigurable dynamic cellular manufacturing system: A new Bi-objective mathematical model*. RAIRO - Operations Research, v. 48, n. 1, p. 75–102, 2014.

WANG, Y.; ZHANG, G.; HAN, L. *A methodology of setting module groups for the design of reconfigurable machine tools*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 104, n. 5–8, p. 2133–2147, 2019.

WEMMERLÖV, U., and D. J. JOHNSON. 1997. "Cellular Manufacturing at 46 User Plants: Implementation Experiences and Performance Improvements." International Journal of Production Research, 35 (1): 29–49.

YILMAZ, E.; EROL, R. *A mathematical programming model for reconfiguration of flexible manufacturing cells*. Engineering Optimization, v. 47, n. 2, p. 184–203, 2015.

YU, J. M. et al. *Iterative algorithms for part grouping and loading in cellular reconfigurable manufacturing systems*. Journal of the Operational Research Society, v. 63, n. 12, p. 1635–1644, 2012.

ZHANG, X. et al. *Stochastic models for performance analysis of multistate flexible manufacturing cells*. Journal of Manufacturing Systems, v. 55, n. June 2019, p. 94–108, 2020.