



## **ANÁLISE DE CAPACIDADE DE MÉDIO PRAZO COM FORMAÇÃO DE CÉLULAS DE MANUFATURA: UMA MODELAGEM EM EMPRESA DE USINAGEM AEROESPACIAL.**

Desenvolvimento de modelagem e interface de pós processamento para análise de carga e capacidade, o que possibilita melhor visualização da solução resultante para auxiliar na tomada de decisão.

Rodrigo Franco de Lima

e-mail: [rodrigo.lima@estudante.ufscar.br](mailto:rodrigo.lima@estudante.ufscar.br)

Prof. Dra. Juliana Keiko Sagawa

e-mail: [juliana@dep.ufscar.br](mailto:juliana@dep.ufscar.br)

Prof. Dr. Fábio Molina da Silva

e-mail: [fabio@dep.ufscar.br](mailto:fabio@dep.ufscar.br)

2023

### **Resumo**

**Objetivo:** Elaborar e propor um modelo de programação inteira mista para a formação de células de manufatura temporárias, visando o uso otimizado da capacidade no médio prazo.

**Questão de Pesquisa:** Como formar células temporárias de manufatura, diante da variação do volume e da variedade de produtos, otimizando o uso da capacidade produtiva da empresa?

**Originalidade:** Utilização de um modelo para a formação das células e para o carregamento das ordens nas células em uma única etapa de execução, em um ambiente real, e a aplicação de interface de pós processamento para facilitar a sua aplicação pelo usuário na prática.

**Impactos:** Rapidez na alocação dos roteiros de produção e melhor visualização da solução resultante do modelo para tomada de decisão.

**Palavras-chave:** Manufatura celular; Análise de Grupo; Programação da Produção; Sistema de produção conforme pedido; setor aeroespacial; otimização; capacidade.

O Sistema de Manufatura na indústria aeroespacial é diferente de outros setores, pois produz produtos altamente personalizados, com alta complexidade tecnológica e em baixas taxas de produção. A flexibilidade e a capacidade de reconfiguração dos recursos de produção no setor aeroespacial tem sido um assunto de grande discussão na ciência da manufatura e várias definições têm sido delineadas a respeito, pois as flutuações nas demandas de produtos aeroespaciais exigem um sistema de fabricação confiável, flexível e que possa ser facilmente adaptável. A flexibilidade do sistema de manufatura é um fator importante para tornar o setor manufatureiro mais resiliente, especialmente, após a crise pandêmica do COVID-19 (ARISTA R. ET AL, 2022).

Esta variedade e variabilidade exige grande flexibilidade do sistema produtivo e, ao mesmo tempo, exige que o sistema seja mais produtivo para maior competitividade e melhor atendimento ao cliente. Para obtenção de um fluxo mais contínuo e diminuição do tempo de atravessamento (*lead time*), algumas estratégias de produção foram desenvolvidas. O Sistema de Manufatura Celular (CMS) é uma abordagem utilizada quando se almeja suprir diversos objetivos concomitantemente, pois visa a eficiência quando há grande variedade de tipos de produtos que possam ser agrupados em famílias (EGUIA *et al.*, 2017). Wemmerlöv e Johnson (1997) acrescentam que o sistema colabora para a redução do tempo de preparação de máquina (*set up*), para a redução do tempo de atravessamento do produto na fábrica, e para consequente melhora da produtividade.

Ferramentas e métodos da manufatura celular, manufatura flexível e clusterização podem ser um diferencial competitivo na indústria aeroespacial, tornando a empresa resiliente frente às oscilações do mercado.

O trabalho, contendo o modelo de Programação Linear Inteira Mista e a interface de pós processamento, foi desenvolvido no âmbito do mestrado profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), e pode ser acessado na íntegra em <https://repositorio.ufscar.br/>.

## **MÉTODOS DE PESQUISA**

Para a elaboração da pesquisa bibliográfica, foram utilizados os roteiros de Revisão Sistemática da Literatura (RSL) de Thomé *et al.* (2016) e de Conforto, Amaral e Silva (2011).

Segundo Thomé *et al.* (2016), a Revisão Sistemática da Literatura resume e fornece uma avaliação crítica da literatura, proporcionando transparência, reprodutibilidade e

confiabilidade na pesquisa científica. Ela se utiliza de critérios bem definidos e rigorosos para identificar, avaliar e sintetizar a literatura, testar hipóteses e teorias, buscando limitar erros ou vieses sistêmicos. Segundo os autores, essa abordagem possui oito etapas, sendo: planejamento e formulação do problema, pesquisa na literatura, coleta de dados, avaliação da qualidade, análise e síntese dos dados, interpretação, apresentação dos resultados e atualização da revisão.

A segunda parte da pesquisa engloba o desenvolvimento do modelo de programação inteira mista (MILP), e foi realizada com base no método de modelagem e simulação, comumente empregado na área de Pesquisa Operacional. Em especial, a ênfase do trabalho é em pesquisa empírica descritiva, ou seja, em entender e modelar a situação real.

O modelo desenvolvido foi implementado em linguagem de programação com o Python 3.10 e, para a sua resolução, foi utilizado o solver IBM ILOG CPLEX 22.1.0.

## **MODELO PARA FORMAÇÃO DE CÉLULAS**

A formação de células é realizada por meio da definição e agrupamento das máquinas em que as famílias de produtos serão processadas. Os produtos são alocados às células conforme seus roteiros de fabricação e a carga gerada, simultaneamente, ou seja, a alocação considera os roteiros e o uso da capacidade das máquinas pelos produtos.

A Função Objetivo da modelagem busca a minimização da maior falta do produto, ou seja, a maior falta daquele produto intermediário em uma determinada etapa de fabricação, assim como a melhor qualidade na formação das células de manufatura, medida a partir do movimento entre células e dos vazios intracelulares. Busca-se minimizar as faltas para atender o máximo possível da demanda. Esse é um importante quesito de desempenho frente ao cliente e, por isso, foi definido como critério de otimização primário do modelo.

## **ANÁLISE GERENCIAL DA SOLUÇÃO OBTIDA**





O modelo gera diversos dados de saída, e o tamanho do problema os torna de difícil interpretação e análise para tomada de decisão. Por essa dificuldade, se faz necessário o desenvolvimento de um ambiente que facilite a avaliação dos resultados.

Para transformar os dados em informações que agreguem valor ao processo decisório, foi desenvolvida uma interface de pós-processamento que possibilita a visualização das




informações a partir da atualização das saídas do modelo, gerando novos cenários de formação das células com base na demanda ao longo do tempo. Cada vez que se roda o modelo com dados diferentes de demanda pode-se visualizar o cenário resultante, facilitando a análise gerencial dos resultados.

A Figura 1 mostra a composição das células, identificada por meio dos números posicionados acima das ilustrações das máquinas e de cores distintas, para a identificação visual.




**Figura 1:** Formação de células

CÉLULA	9			1		7		5	
									
	CNC35			CNC37		CNC20		CNC39	
Não utilização	7			7		2		13	
Operação EXT	4			1		2		9	





  

CÉLULA	2			8		4	
							
	CNC38			CNC30		CNC28	
Não utilização	5			0		10	
Operação EXT	60			2		2	


  

CÉLULA	8			8		6	
							
	CNC48			CNC41		CNC40	
Não utilização	1			0		9	
Operação EXT	3			12		8	

CÉLULA	8			8		3		7	
									
	CNC44			CNC25		CNC43		CNC42	
Não utilização	1			1		16		5	
Operação EXT	2			1		1		3	

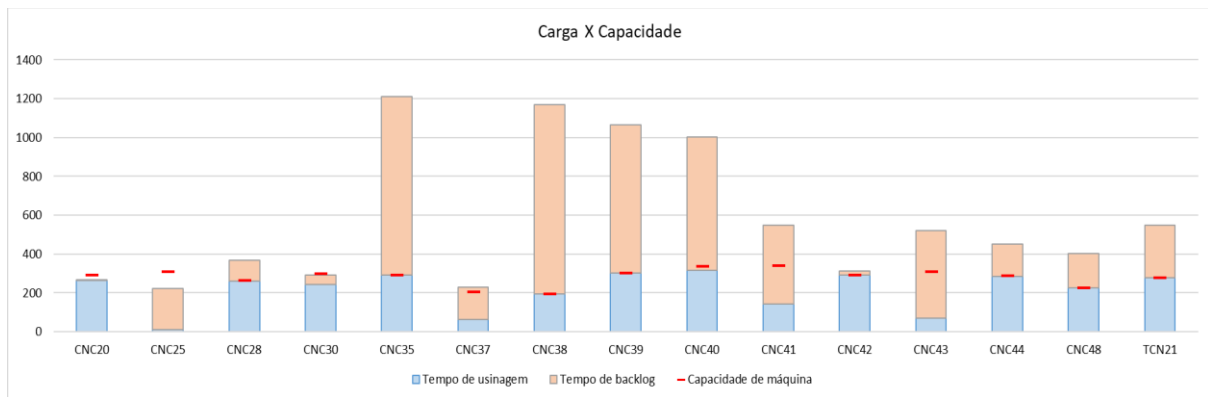
CÉLULA	8		
			
	TCN21		
Não utilização	0		
Operação EXT	9		

**Fonte:** Elaborado pelo autor

Foram formadas duas células com mais de uma máquina e sete células com uma máquina em cada célula, que poderiam ser tratados na prática como um centro de serviços para as demais células/máquinas.

Ainda, a solução do modelo resultou na alocação das ordens de produção e das cargas nas máquinas respeitando a capacidade destas, conforme a Figura 2.

**Figura 2:** Relação carga e capacidade - dados reais



**Fonte:** Elaborado pelo autor

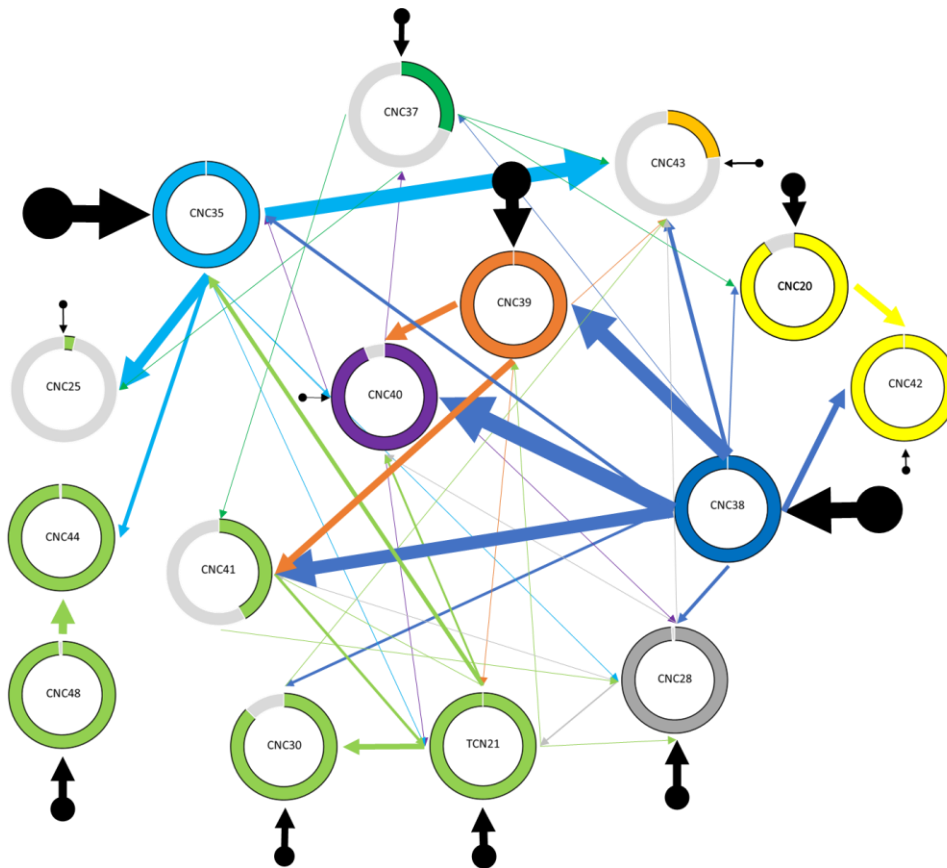
A capacidade das máquinas é mostrada nas linhas em vermelho, as cargas alocadas são apresentadas nas barras em azul e o tempo correspondente à fabricação de produtos cuja demanda não foi atendida (*backlog*), é mostrado com as barras na cor salmão.

Com o gráfico da relação carga e capacidade, é possível identificar as máquinas que estão sendo mais utilizadas e aquelas que estão ociosas porque a carga é menor que a capacidade ou porque possuem horas de *backlog*, e que poderiam ser melhor aproveitadas com ajustes no planejamento dessa carga.

Para melhorar a visualização desta relação e do fluxo entre as máquinas, em termos de carga (em horas de fabricação) transferida de uma máquina para a outra, foi desenvolvida uma rede de grafos (Figura 3). Nesta rede, os nós possuem as cores das células em que as máquinas estão alocadas. A área colorida dos anéis representa a proporção de horas alocadas aos produtos efetivamente fabricados, ou seja, a carga, e a área em cor cinza corresponde à proporção de horas ociosas do equipamento.

As arestas (setas) representam o fluxo, e estão formatadas com a cor da célula de origem do fluxo. A espessura da aresta é proporcional à intensidade de fluxo entre as máquinas (em termos de carga, em horas). As arestas pretas são fluxos que se iniciam na máquina apontada, vindos de outros setores da empresa, como o corte ou recebimento, por exemplo.

**Figura 3:** Demonstração dos fluxos de produção (carga em horas de fabricação – utilização de máquina)



Fonte: Elaborado pelo autor

A visualização do cenário gerado possibilita ajustes no fluxo dos produtos para melhorar o atendimento à demanda do cliente, atuando nas máquinas de entrada do sistema, identificadas como gargalo pelas análises. Com base no modelo e nas análises, pode-se propor a utilização de máquinas alternativas e aumento da capacidade com horas extras, abertura de turno e/ou subcontratação para o atendimento no médio e curto prazo.

Ainda, é possível realizar mais alguns ajustes finos na alocação das cargas e até mesmo no tamanho do lote para a fabricação de mais produtos e melhoria no atendimento das necessidades do cliente.

A visualização da formação de células e da relação entre carga e capacidade das máquinas possibilita melhores análises e decisões mais ágeis e eficazes durante o planejamento da produção, sustentando diversas aplicações na prática, como:

1. Planejamento para aumento ou redução de turnos produtivos;
2. Avaliação das máquinas ociosas que poderiam ser utilizadas para suprir máquinas com excesso de trabalho, mesmo penalizando o processo de

fabricação (fabricar o produto em máquina que não seja a ideal, reduzindo o desempenho da produção);

3. Priorização dos projetos de Engenharia de Manufatura, direcionando os esforços para projetos de redução das paradas de máquina (planejadas ou não planejadas), projetos de migração de tecnologias para redução dos gargalos e projetos para redução do tempo de fabricação dos produtos;
4. Administração da mão de obra para operação das máquinas, possibilitando o direcionamento do foco em máquinas mais carregadas, deixando as que não possuem carga completa funcionando parcialmente ao longo do tempo;
5. Identificação das máquinas e roteiros físicos por cores para facilitar a gestão visual no chão de fábrica, agilizando as tomadas de decisão, facilitando a movimentação e melhorando a organização das entradas e saídas das células e das máquinas;
6. Alterar a alocação de algumas máquinas (troca-las de células) conforme os fluxos mostrados no grafo. Isso não influenciará no atendimento a demanda, mas tem a finalidade de facilitar a gestão dos fluxos de materiais e informação;
7. Avaliar sobre a possibilidade de mudança do *layout* físico no caso de as máquinas serem agrupadas frequentemente nas mesmas células quando se fazem aplicações sucessivas do modelo aos diferentes dados de demanda ao longo de um tempo;
8. Executar ajustes finos nas cargas alocadas para atender melhor o cliente com relação ao *mix* de produtos;
9. Avaliar a possibilidade de terceirização da fabricação ou de parte dela;
10. Comunicar ao cliente sobre o risco ou possibilidade de não atendimento e negociar novos prazos ou volumes de entrega.

No modelo desenvolvido, a formação de células e o carregamento das ordens ocorrem simultaneamente. A utilização de um único modelo para a formação das células e para o carregamento das ordens células em uma única etapa de execução é um diferencial, e facilita a aplicação do modelo pelo usuário, na prática.

Além da contribuição para a literatura, o trabalho traz um produto tecnológico que possibilita melhor visualização da solução resultante do modelo matemático de otimização. O modelo e o produto tecnológico auxiliam na tomada de decisão num contexto em que

geralmente as decisões são dependentes das informações e correlações baseadas em experiências adquiridas com a prática empresarial ao longo do tempo.

## 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.
- ARISTA R.; *et al.* Industrial Resources in the design of Reconfigurable Manufacturing Systems for aerospace: A systematic literature. **Computers in Industry Journal**, v. 142, Article 103719, 2022.
- BALAJI, A. N.; PORSELEVI, 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.
- FERNANDES, F. C. F.: Concepção de um Sistema de Controle da Produção para a manufatura celular. **Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos**. São Carlos – SP, 1991.
- GODINHO FILHO, M.: Paradigmas Estratégicos de Gestão da Manufatura: configuração, relações com o Planejamento e Controle da Produção e estudo exploratório na indústria de calçados. **Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos**. São Carlos – SP, 2004.
- 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.





THOMÉ, A. M. T.; SCAVARDA, L. F.; SCAVARDA, A. J. Conducting systematic literature review in operations management. **Production Planning & Control: The Management of Operations**, v. 7287, 27:5, p. 408-420, 2016.

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.