

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

RODRIGO FRANCO DE LIMA

Análise de capacidade de médio prazo com formação de células de manufatura: uma modelagem em empresa de usinagem aeroespacial.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre profissional em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dra. Juliana Keiko Sagawa

Coorientador: Prof. Dr. Fábio Molina da Silva

SÃO CARLOS-SP

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Rodrigo Franco de Lima, realizada em 23/11/2023.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Juliana Keiko Sagawa (UFSCar)

Prof. Dr. Fábio Molina da Silva (UFSCar)

Prof. Dr. Victor Claudio Bento de Camargo (UFSCar)

Prof. Dr. Cleber Damião Rocco (UNICAMP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção.

RESUMO

O ambiente produtivo característico do setor de usinagem aeroespacial é o *Make-to-Order*, com a fabricação de pequenos e médios lotes de produção. Em face da possibilidade da variação na demanda, seja em volume ou variedade, o sistema de produção deve ser responsivo, atendendo aos quesitos de custo, qualidade e tempo. Esta flexibilidade dos ambientes produtivos aumenta a complexidade das decisões, em especial naqueles ambientes que operam sob alta variação do *mix* de produtos e redução dos prazos de entrega. A adequada programação de produção influencia diretamente nos objetivos de desempenho da produção e tem grande impacto no desempenho de atendimento ao cliente. O trabalho visa o desenvolvimento de um sistema utilizando modelo de programação inteira mista e uma interface de pós processamento para a formação de células de manufatura temporárias e alocação de pedidos, considerando a demanda do cliente final em um dado período e visando o uso otimizado da capacidade no médio prazo. O modelo é desenvolvido com base em um caso real de uma empresa de usinagem aeroespacial, e contribui para a utilização adequada dos meios de fabricação, tomada de decisão em função do cenário apresentado e melhoria no desempenho de atendimento ao cliente. O diferencial do modelo proposto, em relação aos modelos existentes na literatura, é o fato de ser desenvolvido considerando um ambiente de manufatura real (estudo empírico), com a busca da melhor formação e reconfiguração da célula considerando a demanda e a capacidade produtiva, por meio da minimização de três objetivos em apenas um modelo: não atendimento a demanda, não utilização da máquina pelo roteiro alocado na célula e movimentação intercelular. Nos trabalhos existentes, são modelados sistemas hipotéticos, e a formação de células e alocação das ordens são feitas em duas etapas, ao invés de simultaneamente, como neste presente trabalho. A análise gerencial da solução obtida, em termos de carga e dos fluxos de produtos entre as máquinas, permitiu a identificação de gargalos e ociosidades e de possibilidades de mudanças tecnológicas nos processos, para melhor atender a demanda e equilibrar as cargas. O trabalho, ainda, resultará em um produto tecnológico para a empresa estudada.

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

ABSTRACT

The production environment characteristic of the aerospace machining sector is the Make-to-Order, with the manufacture of small and medium production batches. Given the possibility of variation in demand, whether in volume or variety, the production system must be responsive and attend the performance targets in terms of cost, quality and time. This flexibility of production environments increases the complexity of decisions, especially in those environments that operate under high variation in the product mix and reduced delivery times. Proper production scheduling directly influences production performance goals and has a great impact on customer service performance. The work aims at the development of a system using a mixed integer programming model and a post-processing interface for temporary cell formation and orders' allocation, considering the demand of final customer of a given period, and aiming at an optimized use of capacity in the medium term. The model is based on a real case of an aerospace machining company, and contributes to the adequate use of manufacturing resources, to an accurate decision making based on the presented scenario and to the improvement of customer service performance. The differential of the proposed model, in relation to the existing models in the literature, is the fact that it was developed considering a real manufacturing environment (empirical study), with the search for the best formation and reconfiguration of the cell considering the demand, the productive capacity and the machine setup, through the minimization of three objectives in just one model: backlog of orders, non-use of the machine by the route allocated in the cell and intercellular movement. In prior literature, hypothetical systems are modelled, and the cell formation and order allocation are done in two steps, instead of simultaneously, as in the proposed model. The management analysis of the solution obtained, in terms of load and product flows between the machines, made it possible to identify bottlenecks and idleness and possibilities for technological changes in the processes, to better meet demand and balance loads. The work will also result in a technological product for the studied company.

Key-words: Cellular manufacturing; Group Analysis; Production Scheduling; Make-to-Order; aerospace sector; optimization; capacity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas de seleção dos artigos e desenvolvimento da revisão de literatura	15
Figura 2: A forma de resposta à demanda na empresa estudada.	32
Figura 3: Fluxo produtivo da empresa	34
Figura 4: Visões de carga e capacidade mensal	35
Figura 5: Interface com a formação de células de manufatura	46
Figura 6: Gráfico com relação de carga e capacidade	47
Figura 7: Formação de células	60
Figura 8: Relação carga e capacidade - dados reais	61
Figura 9: Matriz DE PARA - quantidade horas utilizadas para fabricação efetiva	62
Figura 10: Matriz DE PARA - quantidade horas de backlog	63
Figura 11: Demonstração dos fluxos dos roteiros (carga de tempo – utilização de máquina)	64
Figura 12: Matriz de tempo (h) entre produtos com fabricação efetiva e máquinas utilizadas	67
Figura 13: Matriz de tempo (h) entre backlog de produtos e máquinas	67
Figura 14: Identificação visual das máquinas e documentos físicos	69

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Publicação ao longo dos anos

18

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Constructo, palavra-chave e string de busca	14
Quadro 2: Artigos selecionados com classificação de nível 5	17
Quadro 3: Objetivo dos artigos e métodos utilizados	22
Quadro 4: Validação dos modelos	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos artigos	16
Tabela 2: Configurações para teste	49
Tabela 3: Resultado dos testes	49
Tabela 4: Tabela com variação dos parâmetros de entrada de dados para cada estratégia (V1, V2, V3 e V4)	53
Tabela 5: Resultados da comparação entre as estratégias adotadas com variação em parâmetros individuais das configurações	54
Tabela 6: Resultados gerados pelas estratégias utilizando-se valores reais, coletados na empresa	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REVISÃO DE LITERATURA	13
3	PROPOSTA DE MODELO PARA FORMAÇÃO DE CÉLULAS E MELHORIA NO PROCESSO DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO	29
3.1	MÉTODO DE PESQUISA E FONTES DE DADOS	29
3.2	ESTUDO DE CASO E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	30
3.3	MODELO EXISTENTE NA LITERATURA PARA FORMAÇÃO DE CÉLULAS E ATRIBUIÇÃO DE ROTEIROS	36
3.4	PROPOSTA DE MODELO	39
4	IMPLEMENTAÇÃO E INTERFACE DE PÓS-PROCESSAMENTO	44
4.1	IMPLEMENTAÇÃO	44
4.2	INTERFACE DE PÓS-PROCESSAMENTO	44
4.3	VARIAÇÕES DO MODELO E TESTES COM INSTÂNCIAS GERADAS ALEATORIAMENTE	47
4.4	HEURÍSTICA RELAX AND FIX	55
4.5	ANÁLISE GERENCIAL DA MELHOR SOLUÇÃO OBTIDA	59
5	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

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).

O ambiente do fornecimento de produtos aeroespaciais usinados possui características específicas, como a produção em lotes conforme a emissão de pedidos pelo cliente, fabricação de pequenos e médios lotes de peças, variação na demanda de produtos ao longo do tempo e alta variedade de tipos de produtos.

Inserida nesta cadeia produtiva, a empresa estudada contribui e concorre dentro desta realidade, num mercado de características próprias, onde o cliente busca aquela que mais atende suas exigentes expectativas.

Apesar das diferenças regionais e tecnológicas, as empresas devem buscar cumprir os objetivos estratégicos da produção, concentrando suas ações e alavancar os objetivos no âmbito da qualidade, rapidez, confiabilidade, flexibilidade e custo, o que deve trazer inúmeros benefícios e vantagens.

O atendimento aos requisitos de entrega dos produtos é fundamental para a competitividade neste mercado e, sendo assim, o cliente adota rígido monitoramento e medições baseadas no cumprimento ao tempo de atravessamento esperado do produto, que é o tempo especificado pelo cliente para que o pedido do cliente seja recebido pela empresa, processado (usinagem, tratamento térmico e/ou de superfície e montagem mecânica) e entregue conforme as especificações do cliente, além do atendimento a prazos de entrega acordados ou exigidos independentemente do tempo de atravessamento esperado. Sendo assim, o tempo de atravessamento esperado do produto e o cumprimento dos prazos acordados são importantes indicadores de desempenho monitorados pela empresa.

A empresa de usinagem estudada possui um *layout* funcional com máquinas flexíveis que desempenham diferentes tipos de operação ou etapa de usinagem, diferente das

abordagens tradicionais onde necessitam de vários tipos de máquinas para a fabricação dos produtos, como operações em fresadoras, tornos e mandrilhadoras.

Diante deste cenário com inúmeras possibilidades de configuração da produção e intensamente dependente do comportamento da demanda, é notória a complexidade da programação da produção, visto que a empresa deve produzir um *mix* com grande variedade de produtos em pequenos e médios lotes.

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 atendimento ao cliente. Para obtenção de um fluxo mais contínuo e aumento do volume de produção com este sistema, algumas estratégias de produção foram desenvolvidas para suprir esse desafio, o Sistema de Manufatura Celular (CMS), é uma abordagem utilizada por diversos modelos de produção que almejam suprir diversos objetivos concomitantemente, pois a CMS 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) afirmam que o CMS visa a eficiência do sistema produtivo quando há grande variedade de tipos de produtos que possam ser agrupados em famílias e acrescentam que o sistema 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.

A partir do contexto discutido, este trabalho se propõe a responder a seguinte questão de pesquisa:

Como formar células temporárias de manufatura para melhorar o fluxo de produção e o tempo de atravessamento, diante da variação do volume e da variedade de produtos, otimizando o uso da capacidade produtiva da empresa?

A partir da questão de pesquisa foi proposto o seguinte objetivo de pesquisa:

Elaborar e propor um modelo de programação inteira mista para a formação de células de manufatura temporárias e alocação de ordens de fabricação, considerando a demanda do cliente final em um dado período e visando o uso otimizado da capacidade no médio prazo. O modelo busca melhorar o fluxo de produção e o processo de análise de carga e capacidade na empresa de usinagem no setor aeroespacial. As ordens de produção são alocadas de forma a minimizar as faltas (ou atrasos nos pedidos), a movimentação intercelular e a não utilização da máquina pelo roteiro alocado na célula.

Posteriormente, as células existentes devem ser reconfiguradas conforme as peças a serem fabricadas em um período futuro.

Mediante a configuração de células temporárias, os recursos deverão ser melhor aproveitados para a fabricação dos lotes com pedidos efetivados pelo cliente, buscando atender as necessidades de priorização do cliente com maior flexibilidade e cumprir os tempos de atravessamento previstos para os lotes.

A pesquisa trará contribuições para a literatura e para a prática, demonstrando os benefícios da aproximação do meio acadêmico ao ambiente empresarial.

O estudo científico como meio de busca de soluções para os problemas e para alcance dos objetivos estratégicos da empresa é, não apenas factíveis, mas fundamental para a inovação e aumento de competitividade.

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 contribuirá com um produto tecnológico voltado à melhoria do fluxo de produção, tempo de atravessamento e análise de capacidade de médio prazo da empresa, baseado em um modelo que auxilia na formação de células de manufatura conforme a demanda se altera ao longo do tempo.

De maneira geral, os artigos estudados desenvolvem modelos axiomáticos e de pequenas instâncias. Foram encontrados dois artigos que se aproximam do problema a ser resolvido neste trabalho, porém, um deles (EGUIA *et al.*, 2017) é executado em duas etapas, não apresenta a validação dos resultados obtidos e é baseado nos tempos de processamento, não considerando o tempo de *setup* de máquina e a capacidade do sistema produtivo. O outro (YILMAZ; EROL, 2015), foca na abordagem de como e quando reconfigurar a célula, porém, não determina o número de células e não considera variáveis de produção, como *setup* das máquinas. Como contribuição para a literatura, o trabalho visa adaptar modelos existentes e desenvolver novo modelo aplicado aos problemas reais encontrados na empresa estudada (modelagem empírica), considerando os tempos de *setup* de máquina e contribuindo para a melhoria do processo de análise da carga e capacidade no médio prazo. Busca-se a reconfiguração das células de maneira otimizada, mediante as restrições de demanda ao longo do tempo, minimizando o não atendimento da demanda, redução das movimentações intercelulares e ociosidade de máquina alocada à célula, em apenas uma etapa.

Pelas pesquisas realizadas, o carregamento das células existentes é pouco explorado. No modelo de Eguia *et al.* (2017), a alocação de máquinas (formação da célula) e a alocação de ordens às células (carregamento) são executados em mais de uma etapa. Os modelos geralmente não consideram variáveis produtivas como a capacidade de produção e o tempo de

setup de máquina para fabricação dos produtos (como em Eguia et al., 2017 e Yilmaz e Erol, 2015). Modelos desenvolvidos com dados empíricos (e reais) raramente são encontrados, o que é citado por diversos autores como temas para pesquisas futuras pois, normalmente, os modelos são axiomáticos e validados com valores aleatórios. Estes pontos citados não foram encontrados em uma única pesquisa, evidenciando uma lacuna que deve ser explorada por este trabalho.

O Capítulo posterior apresenta uma revisão bibliográfica sistemática sobre a formação de células de manufatura e sua reconfiguração, demonstrando o processo de pesquisa, avaliação e seleção dos artigos relacionados aos assuntos, relacionando os objetivos dos artigos e os métodos de pesquisa encontrados na literatura.

No Capítulo 3 é demonstrado o método de pesquisa utilizado no projeto e o modelo matemático desenvolvido para resolução do problema de pesquisa. Aborda o estudo de caso da empresa, descrevendo as características de mercado, características do sistema de fabricação e planejamento e programação da produção.

No Capítulo 4 temos os resultados obtidos com a execução dos modelos sugeridos para o problema e, por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões e considerações finais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Para a elaboração da pesquisa foi utilizada a roteirização baseada na Revisão Sistemática da Literatura (RSL) de Thomé *et al.* (2016) e no RBS *Roadmap* de Conforto, Amaral e Silva (2011), que é uma estrutura desenvolvida com foco na revisão bibliográfica sistemática (RBS), sendo dividido em três fases: Entrada, processamento e saída.

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 feito 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).

Segundo Thomé *et al.* (2016), a Revisão Sistemática da Literatura resume e fornece uma avaliação crítica da literatura, onde utiliza de critérios bem definidos e rigorosos para identificar, avaliar e sintetizar a literatura, que testa hipóteses e teorias, além de limitar erros ou vieses sistêmicos, formando uma ferramenta científica que aborda oito etapas, sendo: planejar e formular o problema, pesquisa na literatura, coleta de dados, avaliação da qualidade, análise e síntese dos dados, interpretação, apresentação dos resultados e atualização da revisão, proporcionando transparência, reprodutibilidade e confiabilidade na pesquisa científica.

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.

Para a obtenção dos artigos foi utilizado a base *Scopus*, sendo adotado as palavras chaves *Cellular Manufacturing*, *Group Analysis*, *flexible machines* e *reconfigurable* para a construção da *string* de busca, conforme o quadro 1.

Com a definição das palavras chaves foi desenvolvido a *string* e atribuído filtros para busca do material, sendo restringido para encontrar 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

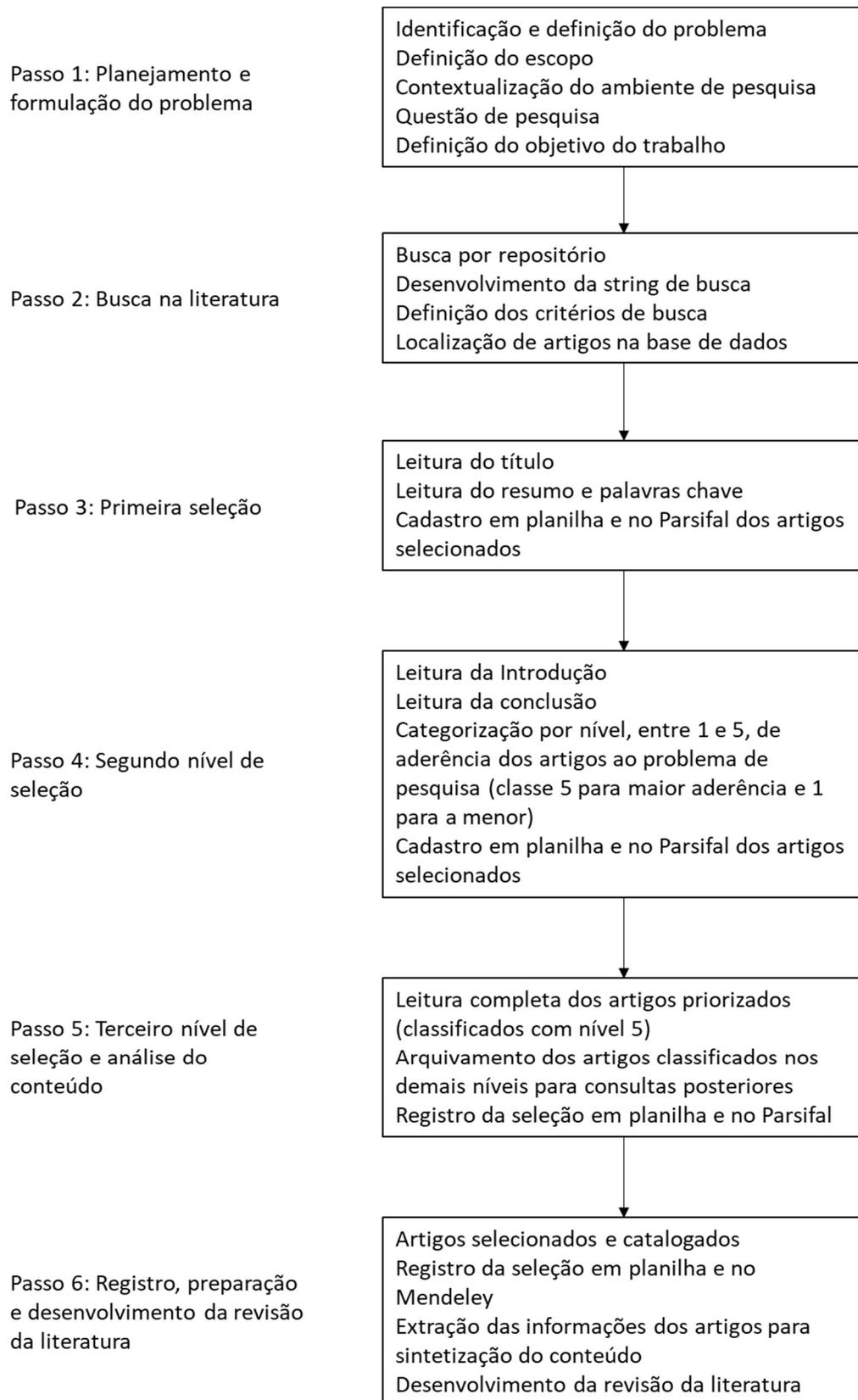
Constructo	Palavra chave	String
Cellular manufacturing	Cellular Manufacturing	(((("cel*"AND("manufact*"OR"formation"OR"system"))OR("group"AND("analys"OR"cell"OR"machine"))))
	Cellular formation	
	Cellular system	
	Group Analysis	
	Group Cell	
Flexible/ Reconfigurable	Group Machine	(("flexible"AND("machine"OR"manufact*"))OR"reconfigurable"))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

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 exportadas 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*, passando pelas fases de seleção conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Etapas de seleção dos artigos e desenvolvimento da revisão de literatura

Fonte: Elaborado pelo autor

Para a seleção dos artigos foi executada a leitura do título e do *abstract* determinando o aceite ou o rejeito do material. Para os artigos aceitos, foi realizada 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. Na classificação dos 31 artigos, 13 (41,94%) deles foram atribuídos a nota 5, onde apresentam maior grau de aderência ao tema abordado, 6 (19,35%) artigos com a nota 4, 10 (32,26%) artigos foram classificados com a nota 3, para 1 (3,23%) artigo foi atribuído a nota 2 e apenas 1 (3,23%) artigo obteve a nota 1, como sendo de menor relevância com relação ao foco do estudo, conforme ilustrado 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	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor

Ainda dentro dos artigos classificados com nota 5, foram encontrados 2 artigos que possuem uma correlação mais forte ao tema pesquisado que os outros e tiveram prioridade na leitura completa dos artigos para direcionamento da pesquisa.

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) Linguagem diferente da inglesa ou portuguesa.

Com a classificação dos artigos aceitos em notas de 1 a 5 conforme a aderência ao tema, foi possível gerar a lista abaixo (quadro 2) com aqueles que foram estudados com maior profundidade, com nota 5, onde houve uma análise qualitativa entre os artigos, dos problemas abordados, objeto de pesquisa, método de pesquisa utilizado e do objetivo do estudo.

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

Os artigos foram buscados entre os anos de 2012 e 2021, e a distribuição daqueles aceitos ao longo dos anos é demonstrado no gráfico 1, sendo os anos de 2012 e 2015, seguidos de 2019, aqueles com maior quantidade de artigos publicados.

Gráfico 1: Publicação ao longo dos anos



Fonte: Elaborado pelo autor

Ambientes complexos, voláteis e incertos são desafios críticos a serem enfrentados pelos sistemas de manufatura, onde exige-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, o projeto é complexo e tem alto custo de implantação. Já o Sistema de Manufatura Reconfigurável (RMS), traz um modelo emergente no ambiente de fabricação, adaptando o sistema às 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).

Um CMS 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, um CMS 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 podemos encontrar com mais frequência os problemas relacionados à 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; EROL, 2015), onde temos poucas pesquisas publicadas sobre a reconfiguração da célula de fabricação existente (EGUIA *et al.*, 2017).

Para a reconfiguração permanente do sistema, os fatores de curto prazo devem ser observados com cautela, já que aqueles de médio ou longo prazo pode ter efeitos mais duradouros. (YILMAZ; EROL, 2015).

Vários métodos de solução foram propostos para a configuração de um novo sistema, como algoritmos heurísticos, meta-heurísticas e algoritmos de otimização. Entretanto, os estudos ignoram a reconfiguração com a utilização de variáveis de decisão relacionados ao sistema para direcionar esta reconfiguração, como a de propor metodologias que respondem a mudanças na demanda de produtos existentes e de novos produtos (YILMAZ; EROL, 2015). Apesar de estudos terem proposto métodos de células com carregamento utilizando roteiros das peças, geralmente não as relacionam com problemas de carregamento dessas células de manufatura (EGUIA *et al.*, 2017).

Em geral, os estudos de reconfiguração existentes na literatura se concentram na demanda e nos tipos de produtos, sem considerar a entrada de novos produtos. Eles não consideram vários fatores de reconfiguração, como as variações na demanda, variações nos tipos de produtos, variedade dos produtos, roteamentos existentes e tempos de operação e configuração, simultaneamente. Além disso, a maioria dos estudos não aborda sobre o monitoramento do desempenho do sistema e qual o momento adequado para reconfigurar o sistema com base nesta medição (YILMAZ; EROL, 2015).

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 inteira mista, 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 períodos 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.

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) Software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.2/OPL
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 MAS (Multi-start Simulated Annealing) - recozimento. Software MATLAB R2009b.
Baykasoğlu; Topaloğlu; Şenyüzlüler (2018)	Minimização do custo total para a formação de célula (Duplicação de máquina e duplicação de trabalhadores). Incorpora máquinas, processamento de peças e flexibilidade do trabalhador juntos.	Modelagem axiomática. Programação de restrição (CP); Programação Inteira (IP). Software IBM ILOG Software IBM CPLEX Optimization Studio V12.6.1

Bortolini <i>et al</i> (2021)	<p>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.</p> <p>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.</p>	<p>Modelagem matemática axiomática com programação linear.</p> <p>O modelo é codificado em linguagem AMPL e processado adotando o solver Gurobi Optimizer v.4.0.1.0</p>
Eguia <i>et al</i> (2017)	<p>O objetivo da pesquisa de Eguia <i>et al.</i> (2017) é desenvolver um modelo para formação de células e efetuar o seu plano de carregamento em determinados períodos utilizando-se de um modelo secundário, visando o balanceamento da carga.</p> <p>O faz buscando a minimização do transporte intracelular total e custos de fabricação, bem como equilibrar a utilização das máquinas e células de manufatura.</p>	<p>Modelagem axiomática.</p> <p>Para a formação das células ele utiliza da programação linear inteira mista e no carregamento a programação linear inteira mista com o objetivo de conseguir um melhor balanceamento da produção.</p>
Guo <i>et al</i> (2021)	<p>Proposta de um sistema de manufatura celular flexível baseado em Digital Twin, que é um novo método para otimização de linhas de produção tradicionais.</p>	<p>Modelagem baseada em Digital Twin.</p> <p>Software Plant Simulation 3D</p>
Manupati <i>et al</i> (2013)	<p>Este artigo examina e compara o desempenho da abordagem de simulação baseada em SVM com as competências de regras de programação em dois ambientes operacionais diferentes, que se caracterizam pela incerteza da demanda.</p> <p>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</p>	<p>Modelagem axiomática e simulação em linguagem Visual Basic 6.5</p>

Naderi; Azab (2015)	FO: Minimização dos tempos de processamento. Comparação dos resultados encontrados a partir dos cinco algoritmos metaheurísticos desenvolvidos.	Modelagem axiomática. Modelo de programação linear inteira mista para pequenas instâncias. Software CPLEX 12 Cinco Metaheurísticas são desenvolvidas para estâncias maiores: Software Borland C++, Genetic algorithm (GA), simulated annealing (SA), iterated greedy algorithm (IGA), iterated local search (ILS) and artificial immune algorithm (AIA).
Rabbani <i>et al</i> (2014)	Propor um modelo para resolução do problema de formação de células. Algoritmo Competitivo Imperialista (ICA) é desenvolvido, cujo 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). Software GAMS 22.1\ DICOPT. MATLAB 7.0
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 <i>et al</i> (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. CPLEX 11.0. Programado em C

Fonte: Elaborado pelo autor

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.
Baykasoglu; Topaloglu; 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

Com relação aos artigos mais relevantes, foram destacados dois deles com similaridade maior ao cenário e necessidades levantadas neste trabalho, os de Eguia *et al.* (2017) e Yilmaz e Erol (2015), servindo como base para o desenvolvimento deste estudo, possibilitando a adaptação de parte das ideias e modelos desenvolvidos por esses autores.

Eguia *et al.* (2017) ressalta uma desvantagem na utilização da modelagem com a programação linear para resolução, uma vez que busca a solução ideal e acaba exigindo um

tempo excessivo de processamento para problemas maiores, com mais informações, tornando o uso impraticável. Resoluções deste tipo, para problemas maiores, ele recomenda a solução meta-heurística, que busca uma boa solução em um tempo reduzido de processamento. Cita, ainda, que os estudos consideram as capacidades das máquinas como restrições, porém as características de distribuição do carregamento são pouco exploradas.

Os artigos (Eguia *et al.*, 2017; Yilmaz e Erol, 2015) são desenvolvidos utilizando a programação linear buscando a solução ótima com pouca variedade de produtos, o que viabiliza a resolução, e com maior foco em custos, não atribuindo restrições relacionadas com atendimento a prazos ou tempo de atravessamento.

Os modelos não consideram a carga para fabricação e a capacidade do sistema para a determinação da reconfiguração de células, sendo utilizado parâmetros relacionados a custos de rotas alternativas para definir como ocorrerá a configuração no artigo do Yilmaz e Erol (2015) e no de Eguia *et al.* (2017) a reconfiguração ocorre para balancear a taxa de utilização das células produtivas.

Os períodos abordados envolvem o médio e longo prazo como os ideais para reconfiguração definitiva da célula, sendo que alguns problemas necessitam de flexibilização a curto e médio prazo de modo temporário, em que as células se reconfigurem ao longo do tempo atendendo as variações do volume da demanda e do tipo de peças demandada.

Os sistemas de fabricação não são identificados nos artigos, o que poderia trazer problemas mais específicos a serem resolvidos, e as informações são tabeladas ao longo do trabalho, demonstrando os dados a serem analisados e processados com apoio do software LINGO em ambos os artigos, sem demonstrar suas fontes.

Para conclusão e validação, os artigos mostram uma matriz com o cenário em um espaço de tempo e os resultados dos modelos são comparados com os resultados obtidos sem a sua aplicação, em estado atual. Yilmaz e Erol (2015) demonstra um comparativo do custo total das rotas executadas (fluxo) pelo processo em estado atual e com a utilização do modelo desenvolvido, resultando em redução dos custos com a aplicação da ferramenta. Ilustra, ainda, um gráfico com simulações dos custos em função da variação da demanda das peças a serem fabricadas, possibilitando um conhecimento prévio de alguns possíveis cenários.

Eguia *et al.* (2017) executa o modelo conforme o cenário proposto e mostra os resultados referente ao balanceamento do carregamento das máquinas e células, utilização das ferramentas e módulos flexíveis auxiliares, sem ultrapassar o valor máximo de carregamento. Finalmente, faz uma comparação do tempo de processamento do modelo em diferentes tipos de abordagens com relação ao tipo de rotas definidas. A validação do modelo e comparação

com diferentes resultados é identificado como oportunidade para pesquisas futuras, pois no artigo é ilustrado um pequeno cenário e utiliza-se de solução ótima para a pesquisa, que pode ser comparado a resultados de outras abordagens a serem desenvolvidas.

Ao longo de suas pesquisas, 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) com 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).

3 PROPOSTA DE MODELO PARA FORMAÇÃO DE CÉLULAS E MELHORIA NO PROCESSO DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

3.1 MÉTODO DE PESQUISA E FONTES DE DADOS

A modelagem/simulação se mostrou como um método adequado para a resolução do problema de pesquisa, onde as informações obtidas pelo sistema são trabalhadas de maneira lógica para a resolução do problema, por meio de um modelo abstrato baseado na realidade.

O estudo é baseado nas informações e no cenário de uma única empresa devido às suas características e, principalmente, devido ao acesso à empresa e suas informações. O objeto de estudo é o processo de planejamento e programação da produção, onde se caracterizou o problema de pesquisa. Visto o caráter prático da pesquisa, ela pode ser classificada como modelagem empírica.

O modelo proposto deve propiciar um resultado que melhore o fluxo de produção por meio da formação das células de manufatura e proporcionar um planejamento mais assertivo da utilização da capacidade de médio prazo melhorando o atendimento aos clientes, especialmente em relação ao atendimento dos prazos de entrega.

Por se tratar de um ambiente complexo no qual a produção opera sob pedido, *Make To Order* conforme classificação de Burbidge (1981), o modelo proposto incorpora na função objetivo dois objetivos de forma hierárquica. O objetivo primário trata do atendimento aos pedidos em carteira e o objetivo secundário está relacionado a formação das células de manufatura. O atendimento dos pedidos em carteira é alcançado por meio da minimização das quantidades de produtos faltantes para o atendimento dos pedidos. Em relação ao objetivo secundário, a formação das células de manufatura, este segmento da função objetivo pode ser subdividido em dois subobjetivos, que é a minimização do número de operações de um trabalho que é realizado em máquinas que não estão alocadas nas células do produto e, o outro subobjetivo, é a minimização da ocorrência de fluxos e máquina que estão alocados na mesma célula, mas que o fluxo não utiliza a máquina. Conforme a variação da demanda ao longo do tempo, as células poderão ser reconfiguradas para a obtenção da menor falta de produto e melhor atendimento ao cliente.

Dentro do modelo atual, com *job shop*, arranjo físico funcional, alta variedade de produto e mudanças constantes do *mix* de produtos, é difícil gerar uma programação da capacidade avaliando uma possível sobrecarga dos equipamentos ou subutilização. Dentro

deste cenário, cada roteiro tem máquinas diferentes a serem utilizadas, que apresentam diferentes capacidades de produção, para a fabricação do mesmo produto e estes possuem roteiros diferentes que podem passar por máquinas alternativas, gerando possibilidades distintas de fluxos. Então, escolher o roteiro do produto em função do mix de peças e do volume de produtos, de modo a atender as necessidades do cliente, é uma atividade muito complexa. Como a modelagem sugere a formação das células como proposta de solução, a pesquisa gera um modelo empírico normativo.

As informações de entrada do modelo, como os roteiros dos produtos fabricados e possíveis alternativas para estes roteiros, foram coletadas no sistema integrado de gestão da empresa. Além disso, foram coletadas na base de dados do PPCP (Planejamento, Programação e Controle da Produção) as informações sobre a capacidade das máquinas, prazos e datas de entrega dos pedidos emitidos. Os tempos de fabricação são extraídos do sistema integrado e da base de dados da Engenharia de Manufatura.

As características reais do sistema de produção analisado foram utilizadas para desenvolvimento do modelo, e dados reais serão utilizados como parâmetros.

3.2 ESTUDO DE CASO E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Nesta seção, apresenta-se a situação atual da empresa de usinagem “G”, seu sistema de produção e, por fim, os desafios encontrados frente às metas de atendimento, os quais exigem alta flexibilidade para fabricação de uma demanda variável com *mix* de produtos variados. É descrita também a sistemática de monitoramento e acompanhamento das entregas que devem ser efetuadas.

A empresa de usinagem “G” é uma prestadora de serviços de usinagem de peças metálicas e não metálicas e montagem mecânica, dando ênfase à usinagem e montagem de peças primárias do setor aeroespacial. Foi fundada em 1985, no município de Santo André/SP, em uma área de 20m² sendo, a princípio, administrada por três sócios.

No ano 2000, a diretoria adotou uma nova estratégia, mudar para o vale do Paraíba, instalando-se em uma área de 600m² no município de São José dos Campos.

Com o aumento da demanda, a empresa viu a necessidade de procurar um local maior para a ampliação de seus negócios e, no ano de 2004, a empresa se instalou no município de Jambuí/SP, na região de São José dos Campos/SP.

Frente a novos desafios colocados pelo cliente, uma nova unidade foi inaugurada em Botucatu/SP no ano de 2004, passando a ser instalada em prédio próprio no ano de 2010.

Hoje a empresa possui um quadro de colaboradores com aproximadamente 290 pessoas nas duas plantas instaladas, sendo 70 delas atuando na filial em Botucatu/SP.

A empresa é certificada nas normas AS9100:D e ISO 9001:2015, buscando sempre a excelência em qualidade de serviços. Visando a busca pela melhoria contínua, a empresa incorpora em seu cotidiano as práticas de programas como 5S's e ferramentas Lean para busca da excelência dos processos.

A política seguida é a de garantir a satisfação do cliente, assegurar que as atividades estejam em conformidade com o Sistema de Gestão Integrado da qualidade, aumentar os resultados e garantir a capacidade financeira, desenvolver pessoas para promover um ambiente de trabalho competente e eficiente, prevenir acidentes de trabalho e impactos negativos ao meio ambiente e atender os requisitos, normas, legislações e Objetivos da Qualidade em busca da melhoria contínua da eficácia do sistema. Sua missão é fornecer soluções competitivas e sustentáveis, criando relacionamento de confiança com seus clientes. Sua visão é ser reconhecida pelo modelo de gestão e alcançar a sustentabilidade econômico-financeira.

A planta estudada é a de Botucatu, situada no interior do estado de São Paulo, que vem crescendo de maneira significativa nos últimos anos, frequentemente, sendo reconhecida pelo seu cliente e demonstrando que tem conquistado sua confiança, uma grande montadora de aeronaves.

Além da quantidade de máquinas, a empresa investiu em novas tecnologias, tornando-se diferenciada na região, com aquisição de centros de usinagem com cinco eixos. Desta forma, seu *mix* de produtos pôde ser ampliado com essa tecnologia relativamente nova para a época de aquisição, e inédita na região de Botucatu.

A organização do trabalho na empresa de usinagem baseia-se no modelo Taylorista com um organograma verticalizado; a empresa é dividida por setores, onde cada um cumpre determinadas funções específicas e pré-determinadas, e há certa divisão entre aqueles que executam o trabalho e os que planejam e pensam sobre o trabalho.

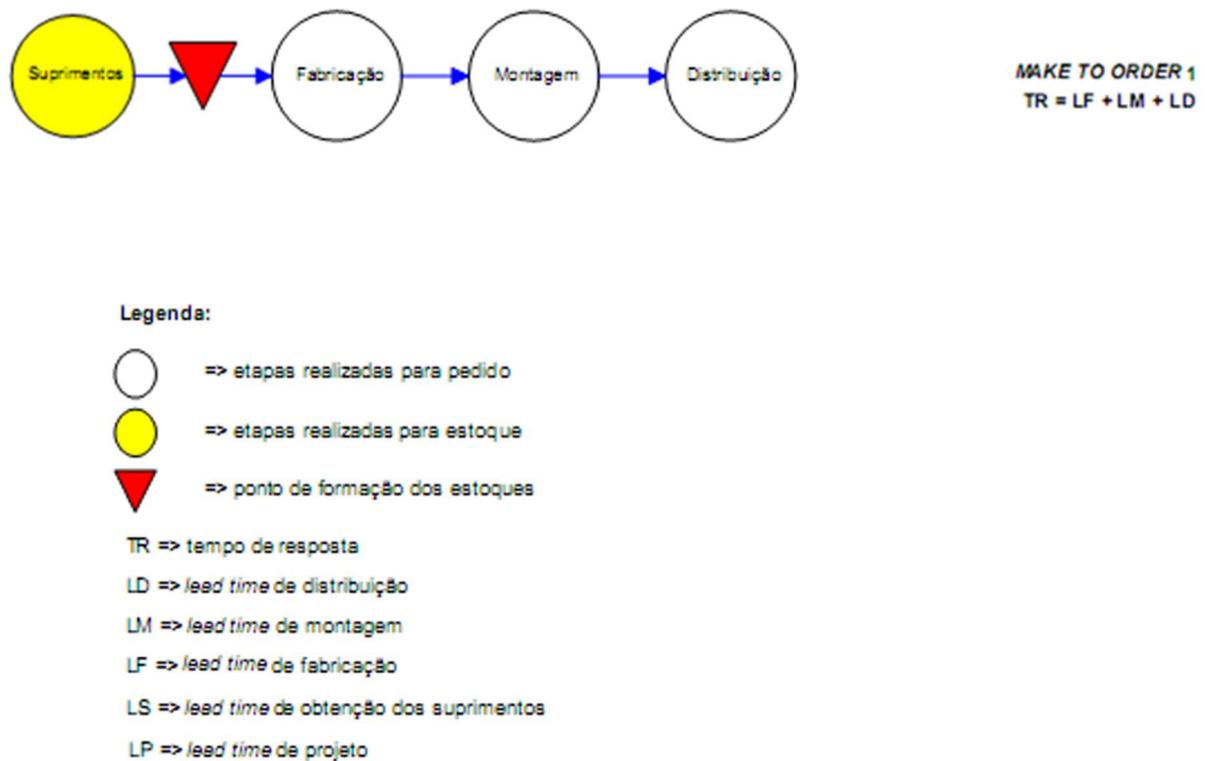
O objeto de estudo é o planejamento e programação da produção (Setor PPCP) voltada para o setor produtivo (usinagem de peças). Os centros de usinagens CNC e tornos CNC estão dispostos em um arranjo físico funcional e o fluxo de materiais é do tipo *job shop*.

O processo produtivo inicia-se apenas com a emissão de uma Ordem de Compra pelo cliente, informando a necessidade do cliente em termos de produto e quantidade. A resposta à

demanda do cliente é classificada como *Make To Order 1*, conforme Figura 2. Não há estoques de matéria-prima, uma vez que a Ordem de Compra é enviada pelo cliente junto com sua matéria-prima necessária para a produção do item, com quantidade de peças determinadas, e com toda informação para usinagem conforme projeto elaborado pelo cliente.

Após o cliente enviar a Ordem de Compra com o material, é dado a entrada na empresa e gerado uma Ordem de Serviço de fabricação para cada Ordem de Compra do cliente, conforme suas informações de tipo de produto e quantidade de peças a serem fabricadas. Elas entram em produção conforme a necessidade do cliente, mediante a acordo de prazos de entrega ou considerando-se seu *Lead Time*, que é pré-definido para cada tipo de peça (PN – *Part Number*), formando as filas de produção.

Figura 2: A forma de resposta à demanda na empresa estudada.



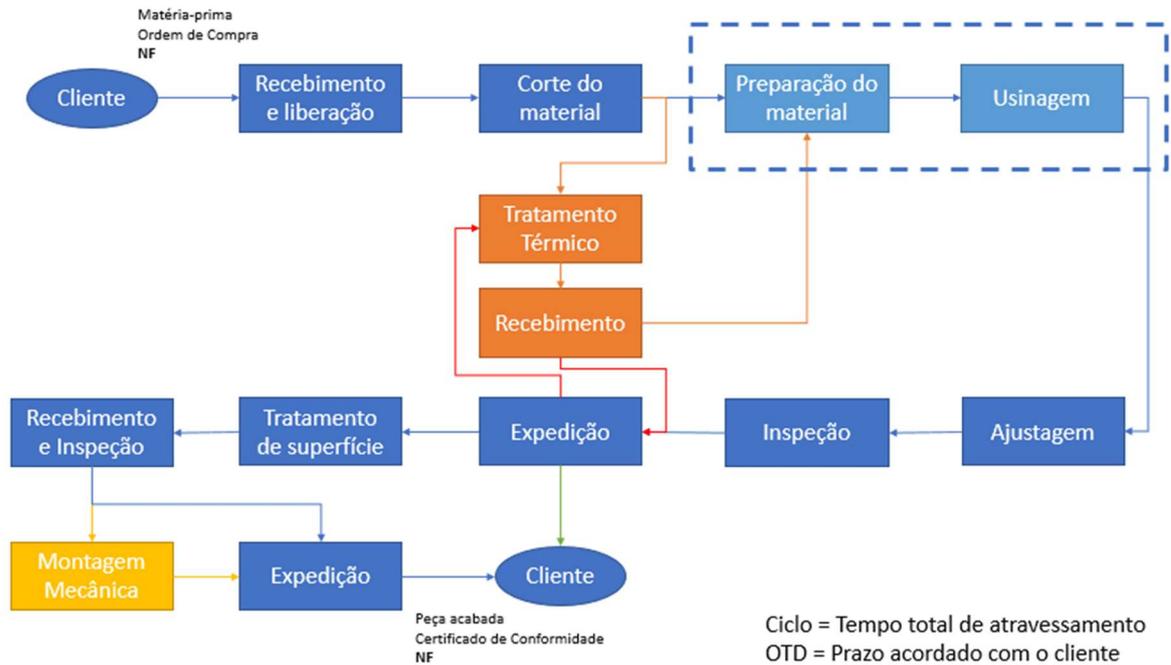
Fonte: GODINHO FILHO (2004).

A resposta à demanda de uma peça fabricada de modo seriado pode ser representada pela Figura 2 e descrita da seguinte maneira: a empresa recebe o material bruto do cliente para que seja usinado (desbaste e acabamento) e para que seja executado o tratamento de superfície especificado no projeto e o material da peça.

Para as peças de alumínio, que são maioria do volume fabricado, é executada a usinagem, a ajustagem, um teste não destrutivo para verificação da conformidade da estrutura do material, um banho para proteção do metal e pintura conforme a região de montagem, para a maioria dos casos, representado na Figura 3 pela rota em azul. Para peças de aço, ocorre a usinagem, tratamento térmico (rota em laranja), ensaio não destrutivo para avaliar a estrutura do material e pintura de superfície, que pode variar conforme o tipo de aço e aplicação, podendo ser aplicado cádmio, zinco, passivação e/ou pintura. Quanto ao momento do tratamento térmico nas peças de aço, estes podem variar conforme o tipo do aço ou da estratégia de usinagem, sendo possível a realização antes da usinagem, após o desbaste ou, até mesmo, após o acabamento das peças. Em algumas ocasiões, cerca de 30% das peças, possuem pequenas montagens mecânicas (fluxo em amarelo), que são executadas após a finalização do tratamento de superfície. Após todo o processo, a peça acabada é inspecionada, embalada e entregue ao cliente com a emissão da Nota Fiscal.

Os fluxos de fabricação podem variar conforme o produto a ser fabricado, através da estratégia de usinagem adotada pela Engenharia de Manufatura, desenvolvendo os processos de manufatura distintos para cada caso. As peças podem seguir roteiros alternativos dependendo do tipo de tecnologia, potência ou tamanho de máquina.

Os centros de usinagem possuem grande versatilidade, podendo realizar desde tarefas grosseiras como o desbaste de material até acabamentos e confecção de geometrias precisas, roscas, furos de precisão milesimal e cópia de perfil de superfície através de comandos numéricos programados, dispensando o uso de máquinas dedicadas à operação específica, como rosqueadeiras ou mandriladoras, para todas as peças fabricadas na empresa. As máquinas possuem diferentes tecnologias, sendo seis centros de usinagem com 5 eixos, dez centros de usinagem com 3 eixos e um centro de torneamento CNC, com variação relacionada a potência e tamanho, sendo que os centros de usinagem partem de 560mm de curso chegando a 3000mm e o torno CNC possui curso de 530mm de comprimento e 190mm de raio.

Figura 3: Fluxo produtivo da empresa

Fonte: Elaborado pelo autor

É importante ressaltar as informações sobre o OTD (*on time delivery*), que representa o prazo de entrega do produto acordado com o cliente, e o ciclo, que reflete o tempo total de atravessamento da ordem de serviço, sendo contabilizado a partir do recebimento da NF de envio do cliente até a data de emissão da NF finalizando o produto encomendado, o qual é expedido para finalização da ordem de compra emitida pelo cliente.

O segmento do fluxo em destaque com a caixa tracejada é a etapa que estará em foco, abordando-se o fluxo de produção e a análise da capacidade das máquinas em médio prazo, com a formação das células de manufatura conforme a demanda ao longo do tempo. Busca-se flexibilidade e um fluxo mais contínuo das ordens de serviço, de modo a minimizar a quantidade de Ordens de Serviços atrasadas.

A empresa opera com uma variedade de, aproximadamente, 1800 tipos de peças, o *lead time* cadastrado para o lote de produção varia de 45 dias a 60 dias conforme a complexidade do produto, e a produção mensal é de aproximadamente 7000 peças distribuídas em torno de 600 pedidos.

O *mix* de produção é altamente volátil, ocorrendo variações em curtos e médios períodos de tempo, ora deixando máquinas ociosas, ora causando filas e gargalos nos equipamentos, dificultando o fluxo de fabricação e o cumprimento das entregas prometidas.

A variação nas demandas e no *mix* de produtos, para satisfazer a necessidade do cliente, implicam um planejamento assertivo e de alta flexibilidade nos recursos produtivos, de modo que o fluxo de materiais seja o mais contínuo possível.

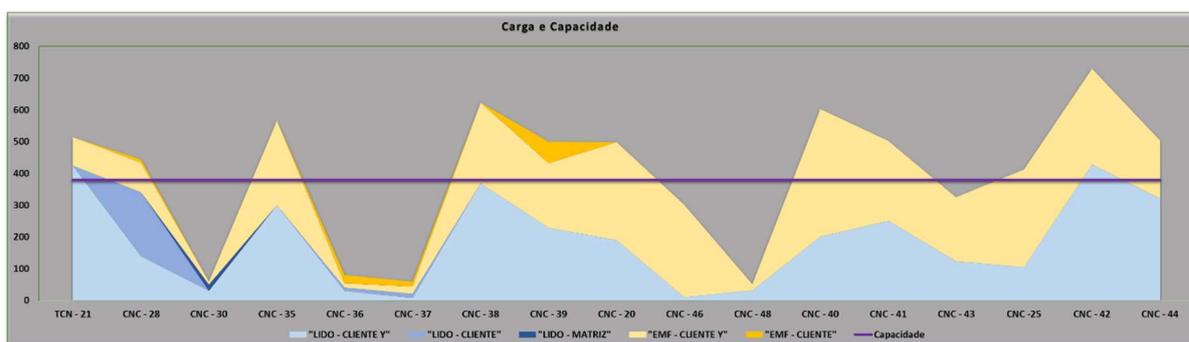
O levantamento de problemas e a busca de alternativas para contorná-las são de vital importância para a melhoria contínua da empresa, que pretende ser mais competitiva em seu mercado e estar preparada para atender às necessidades de seus clientes em um curto tempo, com qualidade e um custo reduzido.

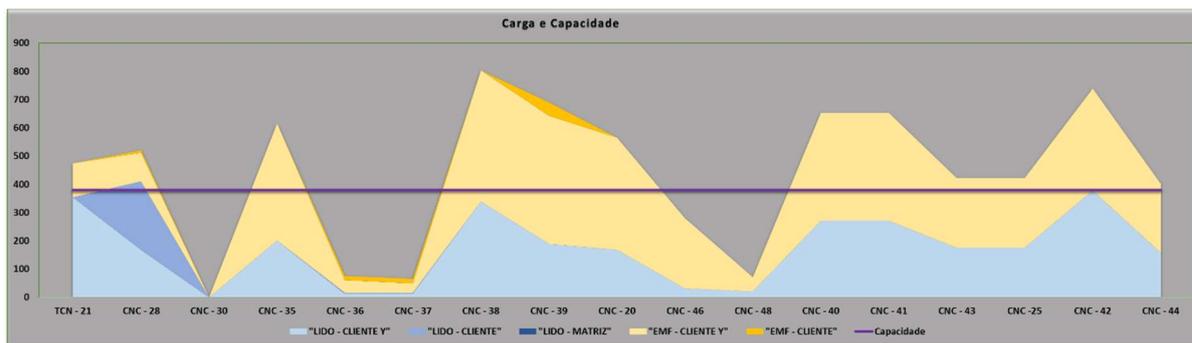
Além das variações no planejamento de sua demanda, o cliente trabalha com priorizações de ordens de serviço para atendimento de emergências na linha, priorizações produtivas para montagem e para cobertura de estoques, além de monitorar o cumprimento do tempo de atravessamento das ordens de compras emitidas.

Atualmente, a visão de carga e capacidade utilizada pela empresa (Figura 4) é formada utilizando as informações de planejamento referentes à emissão de pedidos dos 3 principais clientes, denominados: CLIENTE Y, CLIENTE e MATRIZ. Verifica-se a carga a ser processada dos pedidos que possuem materiais disponíveis para produção na empresa de usinagem em azul no gráfico (LIDO-CLIENTE Y, LIDO-CLIENTE e LIDO-MATRIZ) e, em amarelo, aqueles pedidos que estão planejados para serem emitidos (EMF-CLIENTE Y e EMF-CLIENTE) e não possuem materiais disponíveis para fabricação, considerando o tempo unitário para fabricação dos produtos com relação a demanda. Para o cliente MATRIZ não há visão de carga sem que o material esteja disponibilizado. Esta informação é comparada com o tempo de capacidade disponível de cada máquina para o período pela linha em roxo.

Apesar de estar formatado como gráfico de área, passando a impressão de continuidade ou relação, as máquinas são avaliadas de forma independente. Esta visão de carga e capacidade é fundamental para o planejamento, programação, monitoramento e controle dos trabalhos do chão de fábrica para que os prazos de entrega sejam atendidos.

Figura 4: Visões de carga e capacidade mensal





Fonte: Empresa estudada

Para a programação da produção, liberação das ordens de produção e sequenciamento, são consideradas as Ordens de Serviços geradas e disponíveis para fabricação, as quais são alocadas às máquinas de acordo com o tempo de processamento estimado em cada etapa do processo, o prazo de entrega e o tempo decorrido desde a data de entrada da ordem na empresa.

3.3 MODELO EXISTENTE NA LITERATURA PARA FORMAÇÃO DE CÉLULAS E ATRIBUIÇÃO DE ROTEIROS

Ao longo da pesquisa, foram encontrados vários modelos para formação de células, porém, o modelo de Eguia *et al.* (2017) destaca-se pela similaridade com o problema desenvolvido neste trabalho. Os autores supracitados dividiram o modelo em duas partes, sendo a primeira utilizada para a formação das células com o agrupamento das máquinas e a segunda, realiza o carregamento das células que determina o *mix* de roteiros e a alocação de ferramentas e módulos. A primeira parte é utilizada como uma das bases para o desenvolvimento do modelo proposto neste trabalho, realizando-se as devidas alterações necessárias para a resolução do problema estudado. Assim, essa parte será apresentada a seguir, de forma idêntica ao formulado pelos autores.

Índices e dados de entrada:

- Tipos de peças: i, \dots, N ;
- Roteiros de processos de cada tipo de peças: $r = 1, \dots, PP_i$ (PP_i é o número de roteiros de processos de cada tipo de peça i);
- Máquinas CNC: $k = 1, \dots, M$;
- Células: $c = 1, \dots, C$ (C corresponde ao número máximo de células a ser formada);

- Matriz binária de incidência de máquina em um dado roteiro de processo, a_{kir} : $a_{kir} = 1$ se a máquina tipo k é requerida para alguma operação do roteiro de processo r da peça tipo i ; caso contrário, o valor é 0;
- Parâmetro para atribuição de peso que mede a importância entre elementos vazios e excepcionais: q ($0 \leq q \leq 1$; ver variáveis de decisão H e E a seguir).

Variáveis de decisão para a formação de células:

- $X_{kc} = 1$ se a máquina tipo k for alocada à célula c ;
- $Y_{irc} = 1$ se o roteiro de processo r da peça tipo i é alocado à célula c ;
- $E_{kirc} = 1$ se o roteiro de processo r para a peça tipo i requer uma máquina tipo k fora da célula c à qual esse plano de processo é atribuído (i.e. definição de elemento excepcional, que requer movimento intercelular);
- $H_{kirc} = 1$ se o roteiro de processo r para a peça tipo i não requer uma máquina tipo k dentro da célula c a qual esse plano de processo é atribuído (i.e. definição de vazio intracelular).

O problema de formação de células que identifica simultaneamente os grupos de máquinas e a família de roteiros de processos pode ser formulado conforme o modelo de Programação Linear Inteira Mista a seguir:

$$\text{Minimizar } q \cdot \sum_c \sum_k \sum_{r=1}^{r=P} \sum_i H_{kirc} + (1 - q) \cdot \sum_c \sum_k \sum_{r=1}^{PPi} \sum_i E_{kirc} \quad (1)$$

$$\sum_c Y_{irc} = 1 \quad \forall i, \forall r \quad (2)$$

$$\sum_c X_{kc} = 1 \quad \forall k \quad (3)$$

$$\sum_i PPi \cdot X_{kc} - \sum_{r=1}^{r=PPi} \sum_i a_{kir} Y_{irc} + \sum_{r=1}^{r=PPi} \sum_i a_{kir} E_{kirc} \geq 0 \quad \forall k, \forall c \quad (4)$$

$$\sum_i P P_i \cdot (1 - X_{kc}) - \sum_{r=1}^{r=PP_i} \sum_i (1 - a_{kir}) Y_{irc} + \sum_{r=1}^{r=PP_i} \sum_i (1 - a_{kir}) H_{kirc} \geq 0 \quad \forall k, \forall c \quad (5)$$

$$\sum_i P P_i \cdot \sum_k X_{kc} \geq \sum_{r=1}^{r=PP_i} \sum_i Y_{irc} \quad \forall c \quad (6)$$

$$M \cdot \sum_{r=1}^{r=PP} \sum_i Y_{irc} \geq \sum_k X_{kc} \quad \forall c \quad (7)$$

A função objetivo (1) consiste em uma soma ponderada que minimiza os vazios intracelulares e movimentos intercelulares, relação máquina/fluxo que estão alocados na mesma célula, mas o fluxo não utiliza a máquina, e movimentos intercelulares (operações que são feitas em máquinas externas as células). A restrição (2) garante que cada roteiro de processo seja atribuído a uma célula. A restrição (3) garante que cada máquina seja alocada a uma célula. A restrição (4) garante o registro das conexões intercélulas, ou seja, da situação em que um fluxo ir , que é o fluxo de processo de um determinado roteiro r do produto i , precisa usar uma máquina k que está alocada em outra célula c . Esta restrição é ativada quando a máquina k não está alocada à célula c e será desativada quando a máquina k está alocada na célula c ($X_{kc} = 1$). Caso a máquina k não esteja alocada à célula c (i.e., $X_{kc} = 0$), verifica-se se o fluxo ir está alocado à célula c (Y_{irc}) e utiliza a máquina (a_{kir}); em caso afirmativo, atribui-se o valor 1 à variável E_{kirc} , ou seja, atribui-se esse roteiro a outra célula. Nesta inequação, o termo $\sum_i R \cdot X_{kc}$ representa um valor de um número grande suficiente para implementar a restrição disjuntiva.

Destaca-se aqui que, no modelo de Eguia *et al.* (2017), a variável E_{kirc} , que indica movimentação intercélulas, dado que os autores utilizam uma somatória pode ser associada a outro fluxo ir qualquer. Em outras palavras, o modelo pode alocar o valor 1 a variável E_{kirc} que não tenha os índices ir coincidentes com a variável Y_{irc} . Nesta situação, o resultado do modelo fica comprometido porque as informações dessa variável E_{kirc} são utilizadas como parâmetro de entrada para o segundo modelo do Eguia *et al.* (2017). Como exemplo, supondo que $c = 1, k = 1$ e que a máquina k não pertence à célula c (ou seja, $X_{ck} = 0$), ou seja, tem-se que a restrição (4) está ativa. Nesse exemplo, pode-se obter uma expressão como $-a_{111} \cdot Y_{111} - a_{121} \cdot Y_{211} + a_{111} \cdot E_{1111} + a_{121} \cdot E_{1211} \geq 0$, e caso seja atribuído $Y_{111} = 1$, qualquer uma das variáveis (E_{1111} e E_{1211}) poderá assumir o valor de 1 para que seja atendida a restrição da inequação

(≥ 0). Com isso, não haverá a correspondência das variáveis com relação ao mesmo fluxo ir na célula c (Y_{111} e E_{1111} , por exemplo), comprometendo a entrada de parâmetros na segunda parte do modelo de Eguia *et al.* (2017).

A restrição (5) calcula uma penalidade (ou seja, computa um vazio intracelular) para cada fluxo ir que está alocado a uma célula c (i.e. $Y_{irc} = 1$) e que não utiliza a máquina k pertencente à célula c (i.e. a_{kir}). Nesse caso, a variável H_{kir} tem que assumir o valor 1, ou seja, computa-se um vazio intracelular quando o roteiro do produto ir está alocado na célula c e a máquina k , também alocada na célula c , não é utilizada no roteiro de produção ir . As inequações desta restrição são desativadas quando a máquina k não está alocada à célula c ($X_{ck} = 0$).

As restrições (6) e (7) estão presentes no modelo de Eguia *et al.* (2017) para garantir que, se a máquina k é alocada à célula c , então ao menos um plano de processo deve ser alocado a esta célula, e vice-versa.

Este modelo de Programação Linear Inteira Mista apresentado é o utilizado por Eguia *et al.* (2017) para resolver o problema de formação de células, ou seja, alocação simultânea de máquinas e de roteiros às células, considerando-se roteamento alternativo.

3.4 PROPOSTA DE MODELO

O modelo proposto para a formação de células e alocação de roteiros de produtos visando a minimização de faltas e otimização do uso de capacidade é apresentado a seguir.

Conjuntos:

- Tipos de peças: $i = 1, 2, \dots, I$
- Roteiros de processo de cada tipo de peça: $r = 1, 2, \dots, R_i$ (R_i é o número de roteiros de processos de cada tipo de peças i);
- Máquinas CNC: $k = 1, 2, \dots, K$
- Células de Manufatura: $c = 1, \dots, C$ (C corresponde ao número máximo de células a ser formada);
- Matriz binária de incidência de máquina em um dado roteiro de processo, com elementos a_{kir} : $a_{kir} = 1$ se a máquina tipo k é requerida para alguma operação do roteiro de processo r da peça i , 0 para o contrário;

Parâmetros:

- f_i : Quantidade de produto i demandado;
- C_k : Capacidade de produção da máquina k , em horas;
- p_{ik} : Tempo de processamento de uma operação do produto i para a máquina k , em horas;

Variáveis binárias:

- X_{kc} : determina se a máquina k estará alocada à célula c ($X_{kc} = 1$);
- Y_{irc} : determina se o roteiro r do produto i estará alocado à célula c ($Y_{irc} = 1$);
- H_{kirc} : será igual a 1 se o roteiro de processo r para a peça tipo i não requer uma máquina tipo k dentro da célula c a qual esse plano de processo é atribuído (denota um vazio intracelular);
- E_{kirc} : será igual a 1 se o plano de processo r para a peça tipo i requer uma máquina tipo k fora da célula c a qual esse plano de processo é atribuído (denota movimentação entre as células);

Variáveis inteiras:

- QP_{ik} : Variável que registra a quantidade possível a ser fabricada do produto intermediário i (veja a explicação sobre produto intermediário na restrição 13) na máquina k , calculada em função do atendimento da demanda;
- BL_{ik} : Variável que registra o *Backlog* de um produto intermediário do produto i , resultante de uma determinada operação na máquina k ;
- EP_i : Indica a produção efetiva do produto i , ou seja, a quantidade de produtos i que serão fabricados;
- BB_i : Variável que recebe a maior falta (*backlog*) do produto i , considerando os *backlogs* de produtos intermediários i , BL_{ik} , ou seja, os *backlogs* em cada operação de fabricação do produto i . Essa variável receberá o maior valor de BL_{ik} , o qual não é possível fabricar por restrição de capacidade de máquina;

Variáveis contínuas:

- LO_{ik} : Variável auxiliar utilizada para contabilizar a carga gerada pela fabricação do produto intermediário i na máquina k .

A formação de células é realizada por meio da definição e agrupamento das máquinas em que os produtos serão processados conforme os roteiros definidos e alocados às células, simultaneamente. Parte do modelo proposto é obtido aplicando-se as Equações (3-7) do modelo de Eguia *et al.* (2017). A restrição (11) foi inspirada na equação (2) do modelo citado, com adaptações, e as Equações (8) e (9) foram propostas neste trabalho para ajuste do modelo supracitado. Assim, o modelo base é apresentado nas Equações (3-7). As Equações (11-16) são propostas para se estender o modelo existente na literatura para a resolução do problema levantado na pesquisa. Todas as equações são descritas a seguir.

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^I BB_i + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^{R_i} \sum_{c=1}^C H_{kirc} + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^{R_i} \sum_{c=1}^C E_{kirc} \quad (10)$$

$$\sum_{r=1}^{R_i} \sum_{c=1}^C Y_{irc} = 1 \quad \forall i \quad (11)$$

$$\sum_{c=1}^C X_{kc} = 1 \quad \forall k \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^I R \cdot X_{kc} - \sum_{r=1}^{R_i} \sum_{i=1}^I a_{kir} Y_{irc} + \sum_{r=1}^{R_i} \sum_{i=1}^I a_{kir} E_{kirc} \geq 0 \quad \forall k, \forall c \quad (4)$$

$$Y_{irc} \geq E_{kirc} \quad \forall ir; \forall c; \forall k \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^I R \cdot (1 - X_{kc}) - \sum_{r=1}^{R_i} \sum_{i=1}^I (1 - a_{kir}) Y_{irc} + \sum_{r=1}^{R_i} \sum_{i=1}^I (1 - a_{kir}) H_{kirc} \geq 0 \quad \forall k, \forall c \quad (5)$$

$$Y_{irc} \geq H_{kirc} \quad \forall ir; \forall c; \forall k \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^I R \cdot \sum_{k=1}^K X_{kc} \geq \sum_{r=1}^{R_i} \sum_{i=1}^I Y_{irc} \quad \forall c \quad (6)$$

$$K \cdot \sum_{r=1}^{R_i} \sum_{i=1}^I Y_{irc} \geq \sum_{k=1}^K X_{kc} \quad \forall c \quad (7)$$

$$K \cdot (1 - Y_{irc} \cdot a_{kir}) + QP_{ik} + BL_{ik} - f_i \geq 0 \quad \forall i, r, k, c \quad (12)$$

$$BB_i \geq BL_{ik} \quad \forall i, \forall k \quad (13)$$

$$EP_i + BB_i = f_i \quad \forall i \quad (14)$$

$$f_i \cdot p_{ik} \cdot (Y_{irc} \cdot a_{kir} - 1) + p_{ik} \cdot EP_i \leq LO_{ik} \quad \forall i, k, c \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^I LO_{ik} \leq C_k \quad \forall k \quad (16)$$

A Função Objetivo da modelagem (10) busca a minimização da maior falta do produto i (BB_i), buscando não haver falta de atendimento à demanda (importante quesito de desempenho frente ao cliente e, por isso, esse indicador foi definido como critério de otimização primário do modelo), assim como a minimização dos vazios intracelulares, ou seja, da não utilização da máquina k pelo fluxo ir (H_{kirc}) e, finalmente, a minimização da movimentação intercelular do produto i (E_{kirc}). A minimização da falta é definida como o objetivo primário da Função Objetivo devido ao peso que ela tem a equação, determinando a formação das células como objetivos secundários.

A restrição (11) foi inspirada na equação (2) de Eguia *et al.* (2017), com adaptações em relação aos roteiros alternativos. Na abordagem de Eguia *et al.* (2017), a restrição (2) garante que cada roteiro r de processo seja atribuído a uma célula c . A escolha de qual roteiro será utilizado para fabricar a peça i é feita pelos autores em uma outra etapa subsequente. Na restrição (11), já é escolhido um roteiro (dentre as alternativas existentes) e alocado à célula c , visando-se a otimização dos objetivos.

Para ajustar o modelo elaborado por Eguia *et al.* (2017), sugere-se a adição da restrição (8). Esta restrição garante que, quando o fluxo ir não for alocado à célula c , ($Y_{irc} = 0$) o valor alocado à movimentação intercélulas do mesmo fluxo ir (E_{kirc}) será igual a zero. Com isso, quando o fluxo ir for alocado à célula c ($Y_{irc} = 1$), o valor alocado ao mesmo fluxo

ir intercélulas (E_{kirc}) será igual a 1, possibilitando a rastreabilidade do fluxo ir entre as variáveis.

A restrição (9) adicionada ao modelo exerce uma função semelhante à restrição (8). Sem ela, o modelo fica comprometido por não associar o fluxo ir alocado à célula c (i.e. $Y_{irc} = 1$) e que não utiliza a máquina k pertencente à célula c (i.e. a_{kir}), com o mesmo fluxo ir na variável H_{kirc} .

A restrição (12) estabelece a relação entre a produção e o *backlog* do produto intermediário i , na máquina k , visando atender a demanda do produto i . Essa restrição está relacionada à restrição de capacidade da máquina k , a qual é considerada na restrição (16). O primeiro termo da restrição (12) estabelece que ela é ativada quando um determinado roteiro r alocado a uma célula c utiliza a máquina k para fabricação do produto i . A quantidade QP_{ik} se refere a um produto intermediário, ou seja, um produto em processo, resultante de uma etapa de fabricação do produto i na máquina k . De forma semelhante, o *backlog* BL_{ik} também se refere à falta desse produto em processo.

Na restrição (13), consideram-se todas as faltas (*backlogs*) de produtos intermediários i nas etapas de fabricação, e atribui-se à variável BB_i o maior valor entre essas faltas. A produção efetiva dos produtos intermediários i em todas as máquinas será feita em função da demanda de i e em função desse maior *backlog*, conforme expresso na restrição (14). Isto é feito pois deve-se definir a quantidade efetivamente produzida de acordo com a etapa mais restritiva de fabricação, ou seja, é inútil produzir mais produtos intermediários em uma dada etapa se a etapa gargalo só consegue processar uma quantidade menor de produtos intermediários.

Na restrição (15) calcula-se a carga gerada pela fabricação de cada produto intermediário i na máquina k , e atribui-se essa carga à variável LO_{ik} . Essa restrição é ativada quando um determinado roteiro r alocado a uma célula c utiliza a máquina k para fabricação do produto i , conforme estabelecido pelo primeiro termo da inequação.

Por fim, a restrição (16) estabelece que a carga total da máquina k deve respeitar o limite de capacidade da máquina.

O modelo proposto endereça lacunas apontadas na revisão de literatura e traz diferenciais em relação aos modelos existentes. Como diferenciais, destaca-se: a utilização de variáveis e parâmetros do ambiente real; a inclusão da capacidade de máquina inserido no modelo; a otimização da formação de células considerando-se o carregamento, ou seja, considerando as restrições de capacidade no mesmo modelo, e não em outro modelo a ser resolvido em etapa subsequente; a identificação da falta de produtos intermediários na

fabricação; a integração três objetivos na mesma etapa/no mesmo modelo, ou seja, a minimização do não atendimento a demanda, da movimentação intercelular e da ociosidade das máquinas alocadas às células.

4 IMPLEMENTAÇÃO E INTERFACE DE PÓS-PROCESSAMENTO

4.1 IMPLEMENTAÇÃO

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. O modelo foi rodado em um computador 2.7 GHz Intel® Core (TM) i5-11400H CPU com 40GB de memória RAM. Com a execução do modelo, são gerados arquivos de relatórios com os valores atribuídos às variáveis e com registros da resolução.

Os dados do caso real modelado geram um problema de grandes dimensões, com 413 produtos, 17 máquinas, 645 roteiros e possibilidade de formação de até 9 células de manufatura, por ser considerado uma quantidade adequada para gestão do fluxo da fábrica. Para a execução do modelo, são geradas 255.576 variáveis binárias, 7.434 variáveis inteiras e 21.476 variáveis contínuas. Para exemplificar, para as variáveis de decisão de X_{kc} , que atribui as máquinas às células, há 153 valores possíveis e para a variável Y_{irc} , que atribui os roteiros às células, há 5.805 valores. Diante dessas dimensões, é complexo encontrar soluções factíveis utilizando-se métodos exatos de solução. Assim, foram geradas diferentes versões do modelo utilizando estratégias de relaxamento e redução da quantidade de variáveis, com objetivo de obter o melhor resultado em termos de minimização da falta e, dado a menor falta, o melhor *layout* celular. Tais variações do modelo são apresentadas na subseção 4.3. Além disso, heurísticas do tipo *relax and fix* foram desenvolvidas como estratégias de solução, conforme apresentado na seção 4.4.

4.2 INTERFACE DE PÓS-PROCESSAMENTO

O modelo resulta em 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 facilita 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 (ou seja, cada vez que se roda o modelo com dados diferentes de demanda pode-se visualizar o cenário resultante).

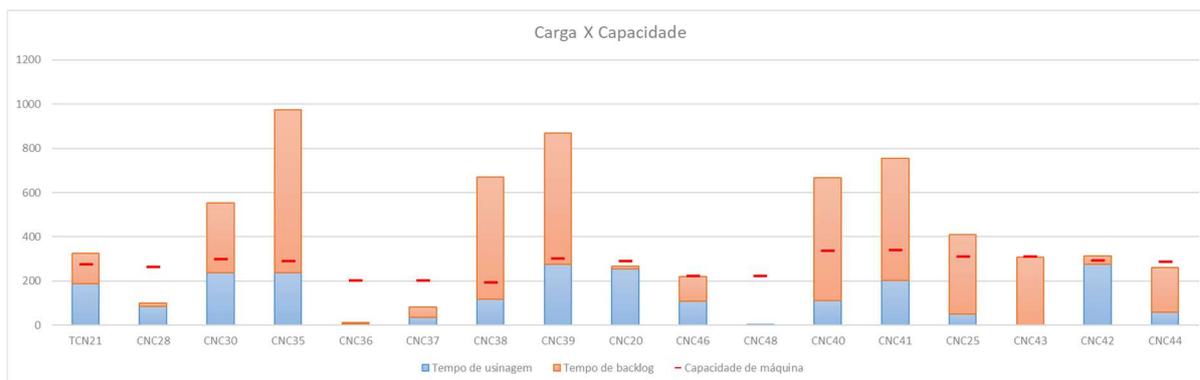
Para a identificação das células formadas, a interface possui gestão visual por cores. Cada célula é identificada por determinada cor, e as máquinas são posicionadas em *layout* similar ao encontrado no ambiente fabril, conforme demonstrado na Figura 5, o que facilita a identificação dos grupos de máquinas, a visualização da movimentação dos materiais e das famílias de produtos para aquele que executa a atividade de análise dos fluxos e da capacidade produtiva. A interface, ainda, apresenta informações sobre o número da célula, número da máquina, a quantidade de vezes em que houve uma movimentação intercelular do produto e a quantidade de vezes que um produto foi alocado à célula, mas uma determinada máquina da célula não foi utilizada em seu processamento (ou seja, a quantidade de vazios intracelulares). O conjunto formado pelo modelo e pela interface de pós-processamento constitui-se um produto tecnológico que será fornecido à empresa.

Figura 5: Interface com a formação de células de manufatura

CÉLULA	7		6		3		6		2	
										
Não utilização	1		1		0		0		0	
Operação EST	0		0		0		0		1	
CÉLULA	4			3			9			
										
Não utilização	0			0			0			
Operação EST	2			0			0			
CÉLULA	1		5		4					
										
Não utilização	0		0		0					
Operação EST	0		0		0					
CÉLULA	1		1		3		3		6	
										
Não utilização	0		1		1		1		0	
Operação EST	0		0		0		0		0	
CÉLULA	7									
										
Não utilização	0									
Operação EST	0									

Fonte: Elaborado pelo autor

Foi desenvolvida outra interface que demonstra, em modo gráfico, conforme Figura 6, a capacidade das máquinas, tempos de fabricação dos produtos nas máquinas de acordo com a produção efetiva determinada na resolução do modelo e a soma do tempo de fabricação dos produtos que ficaram no *backlog*, ou seja, daqueles cuja fabricação não é possível por se atingir a capacidade das máquinas. Conforme explicado na modelagem, esse *backlog* é determinado considerando-se cada etapa de fabricação, para que o produto não seja processado e fique inacabado devido à falta de capacidade de máquina em determinada operação posterior.

Figura 6: Gráfico com relação de carga e capacidade

Fonte: Elaborado pelo autor

Com a interface, a validação do modelo e de sua implementação ocorreu de maneira sólida, mitigando falhas na interpretação dos resultados devido ao tamanho da instância, além de possibilitar a interpretação das informações com maior rapidez, clareza e facilidade.

4.3 VARIAÇÕES DO MODELO E TESTES COM INSTÂNCIAS GERADAS ALEATORIAMENTE

Conforme dito na seção 4.1, foram geradas 4 diferentes versões do modelo utilizando estratégias de relaxamento e redução da quantidade de variáveis, para possibilitar sua solução.

A versão 1 (V1) é a implementação do modelo proposto em seu formato original, sem modificações. Na segunda proposta (V2), não são utilizadas variáveis inteiras. As variáveis referentes à quantidade de produção por máquina (QP_{ik}) e falta do produto (BB_i) são variáveis inteiras na V1 e foram declaradas como variáveis contínuas com o objetivo de facilitar a resolução computacional na V2. As variáveis binárias permanecem declaradas da mesma forma. Os valores relaxados não impactam a visão de carga e capacidade nesta fase do planejamento, onde se pretende ter uma visão a médio prazo da ocupação das máquinas.

A terceira versão (V3) tem a estratégia da versão V1 como base, mas as variáveis binárias H_{kirc} e E_{kirc} foram simplificadas para reduzir a complexidade computacional do modelo, adotando-se H_{kc} e E_{kc} como variáveis contínuas, para registrar os vazios intracelulares e movimentação intercelular. Os índices ir , que foram removidos na proposta, relacionam o roteiro de processo a uma dada peça que não requer a utilização de uma máquina dentro da célula ou que requer uma máquina fora da célula. Sem esses índices, as variáveis continuam registrando esses movimentos intercelulares e os vazios intracelulares,

porém, sem registrar esta relação roteiro-peça, ou seja, a matriz é formada pelo registro que contabiliza as vezes em que a máquina de uma determinada célula não foi usada por algum roteiro alocado na célula ou que a máquina da célula está sendo usada por um roteiro de outra célula, o que não prejudica o resultado do modelo para a análise da capacidade de médio prazo e para a formação das células. Outra consequência desta simplificação é a eliminação das restrições (8) e (9), que registram essas relações no modelo original, resultando nas modificações:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^I BB_i + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^{R_i} \sum_{c=1}^C H_{kirc} + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^{R_i} \sum_{c=1}^C E_{kirc} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^I R \cdot X_{kc} - \sum_{r=1}^{R_i} \sum_{i=1}^I a_{kir} Y_{irc} + \sum_{r=1}^{R_i} \sum_{i=1}^I a_{kir} E_{kirc} \geq 0 \quad \forall k, \forall c \quad (4)$$

$$\cancel{Y_{ire} \geq E_{kirc}} \quad \forall ir; \forall c; \forall k \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^I R \cdot (1 - X_{kc}) - \sum_{r=1}^{R_i} \sum_{i=1}^I (1 - a_{kir}) Y_{irc} + \sum_{r=1}^{R_i} \sum_{i=1}^I (1 - a_{kir}) H_{kirc} \geq 0 \quad \forall k, \forall c \quad (5)$$

$$\cancel{Y_{ire} \geq H_{kirc}} \quad \forall ir; \forall c; \forall k \quad (9)$$

A estratégia V4 considera as variáveis inteiras como reais, para relaxar o modelo, e contempla a simplificação e relaxação das variáveis H_{kirc} e E_{kirc} , ou seja, nesta versão, utiliza-se das estratégias V2 e V3 combinadas.

Para o teste das estratégias V1, V2, V3 e V4 do modelo proposto, primeiramente, foram geradas 10 instâncias aleatórias com quantidade de PNs (tipos de peças), de Máquinas, de Roteiros por peça, Número de Máquinas no Roteiro e Números de Células definidos conforme as configurações 1, 2 e 3 da Tabela 2. Os valores são baseados na sequência de Fibonacci para que as diferenças provenientes dos resultados sejam evidenciadas e para avaliar as possíveis tendências nos resultados dos testes.

Para gerar os tempos de processamento das peças nas instâncias aleatórias, foi utilizada uma distribuição normal de média 0,35 hora e desvio padrão de 0,15 hora. A

capacidade de máquina disponível foi gerada com uma distribuição normal de média de 273 horas e desvio padrão de 46 horas, e a demanda, com uma distribuição normal com a média variando conforme o tamanho da instância, e desvio padrão de 10% da média.

Os modelos foram executados por um tempo limite de 1 hora.

Tabela 2: Configurações para teste

Configuração 1	Tamanho			Configuração 2	Tamanho			Configuração 3	Tamanho		
	P	M	G		P	M	G		P	M	G
le de PNs	21	21	21	Quantidade de PNs	34	34	34	Quantidade de PNs	55	55	55
Quantidade de Máquinas	5	8	13	Quantidade de Máquinas	5	8	13	Quantidade de Máquinas	5	8	13
Quantidade de Roteiros por PN	2	3	5	Quantidade de Roteiros por PN	2	3	5	Quantidade de Roteiros por PN	2	3	5
Numero de Máquinas no Roteir	2	3	5	Numero de Máquinas no Roteir	2	3	5	Numero de Máquinas no Roteir	2	3	5
Número de Células	2	3	5	Número de Células	2	3	5	Número de Células	2	3	5

Fonte: Elaborado pelo autor

Dez testes foram feitos para cada configuração de um dado tamanho. Os resultados são apresentados na Tabela 3, que contém os valores médios da Função Objetivo (FO), da somatória das faltas do produto (ΣBB), da somatória das movimentações intercelulares (ΣE) e da somatória dos vazios intracelulares (ΣH). Além dos valores médios resultantes da execução das instâncias, os valores médios da somatória das movimentações intercelulares e dos vazios intracelulares foram somados ($\Sigma E + \Sigma H$), para avaliar a qualidade da célula formada. Nas três últimas colunas são apresentados os *status* de solução, demonstrando quantas instâncias foram resolvidas dentro do tempo estabelecido (Solução Encontrada) e quantas não foram resolvidas dentro do tempo proposto de execução (Excede Tempo), fornecendo o resultado encontrado pelo modelo quando o tempo excedeu.

Tabela 3: Resultado dos testes

Configuração 1 - Tamanho P							
	Média da FO	Média das Faltas (Valor médio de ΣBB)	Valor médio de ΣE	Valor médio de ΣH	Valores médios de ($\Sigma E + \Sigma H$)	Solução Encontrada	Excede Tempo
152 - V1	769,4	741	6,9	21,5	28,4	10	0
153 - V2	768	741,9	2,7	25,7	28,4	10	0

154 - V3	769,4	741	3,9	24,5	28,4	10	0
155 - V4	768	742,4	3,9	24,5	28,4	10	0

Configuração 1 - Tamanho M

	Média da FO	Média das Faltas (Valor médio de ΣBB)	Valor médio de ΣE	Valor médio de ΣH	Valores médios de ($\Sigma E + \Sigma H$)	Solução Encontrada	Excede Tempo
144 - V1	1340,2	1316	10,9	13,3	24,2	1	9
145 - V2	1338,6	1317,3	11,2	13,8	25	1	9
146 - V3	1346,5	1316,1	13,9	16,5	30,4	1	9
147 - V4	1344,6	1317,8	12,1	18,7	30,8	2	8

Configuração 1 - Tamanho G

	Média da FO	Média das Faltas (Valor médio de ΣBB)	Valor médio de ΣE	Valor médio de ΣH	Valores médios de ($\Sigma E + \Sigma H$)	Solução Encontrada	Excede Tempo
148 - V1	3865,2	3838,8	10,6	15,8	26,4	0	10
149 - V2	3860,1	3837	11,6	16,2	27,8	0	10
150 - V3	3876,6	3840,4	18,3	17,9	36,2	0	10
151 - V4	3871,4	3837,7	21	18	39	0	10

Configuração 2 - Tamanho P

	Média da FO	Média das Faltas (Valor médio de ΣBB)	Valor médio de ΣE	Valor médio de ΣH	Valores médios de ($\Sigma E + \Sigma H$)	Solução Encontrada	Excede Tempo
160 - V1	579	530,7	5,3	43	48,3	10	0
161 - V2	578	533	5,2	43,1	48,3	10	0
162 - V3	579	530,7	5,3	43	48,3	10	0
163 - V4	578	533,1	5,3	43	48,3	10	0

Configuração 2 - Tamanho M							
	Média da FO	Média das Faltas (Valor médio de ΣBB)	Valor médio de ΣE	Valor médio de ΣH	Valores médios de ($\Sigma E + \Sigma H$)	Solução Encontrada	Excede Tempo
129 - V1	1402,3	1361,3	19,4	21,6	41	0	10
128 - V2	1401,4	1364,7	19,4	21,9	41,3	0	10
127 - V3	1416,6	1361,3	27	28,3	55,3	0	10
126 - V4	1415,9	1364,9	26	29,8	55,8	0	10

Configuração 2 - Tamanho G							
	Média da FO	Média das Faltas (Valor médio de ΣBB)	Valor médio de ΣE	Valor médio de ΣH	Valores médios de ($\Sigma E + \Sigma H$)	Solução Encontrada	Excede Tempo
130 - V1	2748,7	2714,8	14,5	19,4	33,9	0	10
131 - V2	2744,9	2716,9	14,6	19,6	34,2	0	10
132 - V3	2775,1	2717,9	33,7	23,5	57,2	0	10
133 - V4	2764,5	2712,6	32,6	25,7	58,3	0	10

Configuração 3 - Tamanho P							
	Média da FO	Média das Faltas (Valor médio de ΣBB)	Valor médio de ΣE	Valor médio de ΣH	Valores médios de ($\Sigma E + \Sigma H$)	Solução Encontrada	Excede Tempo
156 - V1	594,8	515	17,8	62,1	79,9	10	0
157 - V2	593,9	517,3	12,7	67,2	79,9	10	0
158 - V3	594,8	515	12,7	67,2	79,9	10	0
159 - V4	593,9	517,3	14,9	65	79,9	10	0

Configuração 3 - Tamanho M							
-----------------------------------	--	--	--	--	--	--	--

	Média da FO	Média das Faltas (Valor médio de ΣBB)	Valor médio de ΣE	Valor médio de ΣH	Valores médios de ($\Sigma E + \Sigma H$)	Solução Encontrada	Excede Tempo
140 - V1	1044	977,2	31,1	35,9	67	0	10
141 - V2	1040	980,4	31,7	34,4	66,1	0	10
142 - V3	1068,2	976,5	49,6	42,1	91,7	0	10
143 - V4	1066,4	981,7	44,9	48,1	93	0	10

Configuração 3 - Tamanho G							
	Média da FO	Média das Faltas (Valor médio de ΣBB)	Valor médio de ΣE	Valor médio de ΣH	Valores médios de ($\Sigma E + \Sigma H$)	Solução Encontrada	Excede Tempo
139 - V1	3666,1	3612,2	23,8	30,1	53,9	0	10
138 - V2	3652	3605,3	24,8	30	54,8	0	10
137 - V3	3713	3611,1	65,7	36,2	101,9	0	10
136 - V4	3700,6	3604	61,9	42,6	104,5	0	10

Fonte: Elaborado pelo autor

Os melhores valores referentes à minimização dos resultados estão destacados em verde. É possível observar que a estratégia V2 gerou os melhores resultado da função objetivo, considerando-se conjuntamente menor valor de falta de produto e melhor *layout*, com menor movimentação entre células e vazios intracelulares.

As estratégias V1 e V3 resultaram em menores valores de falta média de produtos para as instâncias geradas, entretanto, as diferenças nos valores da função objetivo e nos valores de falta para as diferentes estratégias são pequenas, demonstrando que os modelos são equivalentes em termos de exigência computacional e desempenho. Apesar da menor falta, o *layout* é penalizado com maiores movimentações de produtos entre as células e vazios intracelulares com a estratégia V3.

Esperava-se que a estratégia V4 gerasse a melhor solução, por utilizar um modelo mais simplificado e flexível, porém, os resultados não comprovaram esta expectativa porque

os valores de falta são equivalentes, mas o custo gerencial de *layout* se mostrou maior do que para as demais estratégias, assim como ocorreu com a estratégia V3.

Pelos testes, é possível identificar que à medida que as quantidades de variáveis aumentam, os modelos passam a exceder o tempo limite de execução que foi determinado. Observa-se que as execuções chegam ao resultado final ou já próximo ao final em até 15 minutos, naqueles testes em que tempo ou memória são excedidos.

Diante da complexidade do problema, devido ao seu tamanho, uma outra alternativa para a resolução seria a adoção da heurística *relax and fix*. Para viabilizar a adoção dessa estratégia, foi necessário identificar o parâmetro de entrada que proporciona maior impacto na dificuldade de resolução computacional. Nos testes realizados anteriormente, vários parâmetros eram alterados ao mesmo tempo, dificultando a identificação daquele que possui maior influência na resolução do modelo.

Com isso, foram realizados testes alterando-se parâmetros individuais de configuração em 50 instâncias geradas aleatoriamente, com tempo limite de 15 minutos de execução do *solver*. Sempre que um dos parâmetros é alterado, os outros permanecem em um valor padrão para o experimento, ou seja, quando a quantidade de produtos é alterada de 21 para 55, a quantidade de máquinas, quantidade de roteiros por tipos de produtos, número de máquinas no roteiro e número de células permanecem em um valor de referência, conforme demonstrado na Tabela 4.

Os resultados da execução dos modelos utilizando as estratégias V1, V2, V3 e V4 estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 4: Tabela com variação dos parâmetros de entrada de dados para cada estratégia (V1, V2, V3 e V4)

	Configuração				
	1	2	3	4	5
Quantidade de tipos de peças	55	21	21	21	21
Quantidade de Máquinas	5	13	5	5	5
Quantidade de Roteiros por tipos de peças	2	2	5	2	2
Número de Máquinas no Roteiro	2	2	2	5	2
Número de Células	2	2	2	2	5

Instâncias	50	50	50	50	50
-------------------	----	----	----	----	----

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 5: Resultados da comparação entre as estratégias adotadas com variação em parâmetros individuais das configurações

Teste	Média da FO	Média das Faltas (Valor médio de ΣBB)	Valor médio de ΣE	Valor médio de ΣH	Valores médios de ($\Sigma E + \Sigma H$)	Solução Encontrada	Exced e Tempo	Tempo Médio de Execução	GAP Médio
V1-1	49096,4	49028,7	18,44	52,38	70,82	18	32	636,54	0,03%
V1-2	18653,6	18608,0	21,38	24,82	46,2	50	0	1,56	0,01%
V1-3	18537,1	18516,1	7,32	14,16	21,48	17	33	688,74	0,07%
V1-4	18777,4	18753	9,26	15,6	24,86	50	0	1,14	0,01%
V1-5	18760,7	18758,1	2,62	0,04	2,66	0	50	905,52	0,30%
V2-1	49093,9	49025,8	16,24	54,6	70,84	16	34	696,34	0,04%
V2-2	18648,9	18608,1	21,36	24,82	46,18	50	0	1,32	0,01%
V2-3	18534,7	18515,7	7,76	13,82	21,58	18	32	648,5	0,07%
V2-4	18775,4	18753,0	9,56	15,28	24,84	50	0	1,16	0,01%
V2-5	18758,3	18758,3	2,58	0,08	2,66	0	50	905,84	0,32%
V3-1	49096,8	49027,0	52,02	18,84	70,86	24	26	574,44	0,02%
V3-2	18653,6	18608,0	21,36	24,84	46,2	50	0	0,96	0,01%
V3-3	18537,1	18516,1	8,8	12,66	21,46	21	29	661,02	0,06%
V3-4	18777,4	18752,9	9,5	15,36	24,86	50	0	0,94	0,01%
V3-5	18763,4	18758,1	5,18	0,16	5,34	0	50	907,68	0,25%
V4-1	49093,9	49026	17,04	53,8	70,84	14	36	700,64	0,03%
V4-2	18648,9	18608,0	21,36	24,82	46,18	50	0	0,86	0,01%
V4-3	18534,6	18515,7	13,32	8,12	21,44	22	28	612,42	0,06%
V4-4	18775,4	18752,9	9,48	15,36	24,84	50	0	0,82	0,01%
V4-5	18761,2	18758,2	5,42	0,12	5,54	0	50	908,06	0,27%

Fonte: Elaborado pelo autor

Foi possível identificar, em todas as estratégias utilizadas, que há um aumento de complexidade para resolução computacional do problema quando se aumenta a quantidade máxima de células. O tempo máximo permitido é atingido para todas as 50 instâncias sem que

a solução ótima seja encontrada, conforme demonstrado na coluna excede tempo da Tabela 5. Além disso, o GAP é maior do que para os demais casos.

Quando se aumenta a quantidade de PNs (configuração 1) e a quantidade de roteiros por peça (configuração 3), é possível identificar que há um aumento significativo na complexidade do problema e menos da metade das instâncias são resolvidas dentro do tempo adotado para o teste. Esses aumentos, no entanto, não são tão impactantes quanto o aumento no número máximo de células.

Variações nos demais parâmetros de entrada, na quantidade de máquinas e na quantidade de máquinas no roteiro refletem em menor impacto no esforço de solução.

4.4 HEURÍSTICA RELAX AND FIX

As soluções dos modelos V1, V2, V3 e V4 considerando os dados reais não se mostraram satisfatórias com relação ao tempo de execução, devido ao tamanho do problema real. Com isso, não se pôde avaliar a qualidade da solução obtida devido ao *gap* entre a solução ótima e a solução dual. Isso indicou a necessidade do desenvolvimento de métodos de solução baseados na heurística *relax and fix*, para avaliar se o resultado obtido pelo modelo estava próximo ou distante de um valor ótimo e se é possível melhorar a solução encontrada.

Ferreira, Morabito e Rangel (2008) mencionam que a característica fundamental do *relax and fix* é a solução de submodelos menores que o modelo original a cada iteração. Segundo Ferreira (2007), nessa heurística, o conjunto das variáveis inteiras é particionado em P conjuntos disjuntos Q_i , $i = 1, \dots, P$, de diferentes importâncias. O número P de conjuntos determina o número de iterações da heurística. Em uma iteração n , as variáveis do conjunto Q_n são definidas como inteiras e as variáveis dos demais conjuntos são relaxadas. O problema resultante (subproblema) é então resolvido. Se o subproblema é infactível, o processo pára. Caso contrário, se o subproblema for factível, apenas as variáveis do conjunto Q_n , ou parte delas, são fixadas em seu valor corrente, e o processo se repete para os outros conjuntos. Dependendo do subproblema, pode-se ter várias opções de partições do conjunto de variáveis inteiras, tais como: particionar o conjunto de variáveis de acordo com períodos, itens, estágios. No caso de modelos que consideram vários itens, períodos, máquinas e estágios, as variáveis binárias são indexadas por itens, períodos, máquinas e estágios. Estes conjuntos e a combinação entre eles são opções na definição das partições a serem usadas na heurística *relax and fix*. O critério para a fixação das variáveis também é flexível. Um algoritmo geral para a heurística *relax and fix* é:

Algoritmo *Relax and Fix*

Inicialização: Defina uma partição Q_1, \dots, Q_P para o conjunto de variáveis inteiras, e o critério para fixação das variáveis.

Para $i = 1, \dots, P$:

Passo 1: Faça as variáveis de Q_i inteiras, relaxe as demais, e resolva o subproblema associado.

Passo 2: Se o problema for infactível, pare.

Se o problema for factível, verifique quais variáveis satisfazem o critério para fixação, e fixe seus valores.

Nesta estratégia, o critério de seleção das variáveis a serem fixadas tem influência na dificuldade de solução das partes dos modelos. No passo 2 é importante observar que há fatores que podem levar o subproblema à infactibilidade, mas, dependendo do fator, pode-se inserir mais um passo no algoritmo para tentar modificar este *status* da solução. Federgruen et al (2004) destacam que, na heurística *relax and fix*, não há fixação de variáveis contínuas, o que dá o máximo de flexibilidade na obtenção de soluções factíveis.

Neste trabalho, além do relaxamento de algumas variáveis e fixação de outras, as estratégias foram desenvolvidas de modo considerar, inicialmente, uma menor quantidade de dados, o que diminui a dimensão do problema. No caso considerado, diminuiu-se a quantidade de produtos/pedidos para fabricação, como será descrito a seguir.

Como os resultados das estratégias V1, V2, V3 e V4 com as instâncias geradas aleatoriamente demonstraram ser relativamente equivalentes, foi inicialmente utilizada a estratégia V1 (ou seja, o modelo original) para o desenvolvimento da heurística *relax and fix*. A primeira estratégia desenvolvida para essa heurística será doravante denominada RF_V1.1.

A estratégia RF_V1.1 busca resolução do modelo utilizando 20% dos tipos de produtos que apresentam as maiores demandas para definição das células, entendendo que esses produtos representam a maior parte do problema, como descreve o princípio de Pareto (Regra 80/20). Os passos da heurística são apresentados a seguir:

1. Ordenar a lista de tipos de produtos por maior demanda;
2. Selecionar 20% dos produtos da lista ordenada, como dados de entrada ao modelo; utilizar os demais parâmetros reais do problema (máquinas, roteiros, etc.);
3. Destacar os 5 primeiros produtos da lista ordenada;

4. Atribuir variáveis inteiras e binárias para os 5 produtos destacados e variáveis contínuas para os demais produtos;
5. Resolver o modelo e fixar a solução do primeiro produto destacado, alocando seu roteiro à célula;
6. Rolar a janela de captura dos produtos com maior demanda, ou seja, considerar os 5 próximos produtos com solução não fixada;
7. Repetir os passos 4 a 6 até que os 20% dos tipos de produtos estejam alocados às células, ou seja, tiverem suas soluções fixadas;
8. Alocar as máquinas às células considerando sua utilização nos roteiros já atribuídos às células (soluções já fixadas);
9. Alocar os demais produtos (ou seja, os 80% restantes) às células fixadas conforme os roteiros desses produtos, seguindo a mesma lógica de alocação dos primeiros, porém já com as células constituídas.

Posteriormente, foi desenvolvida a estratégia RF_V1.2 na busca de melhores resultados para a formação das células. Essa estratégia é similar à RF_V1.1, porém, aloca-se as máquinas ao mesmo tempo em que os produtos são alocados às células definidas, conforme os passos a seguir:

1. Ordenar a lista do tipo de produtos por maior demanda;
2. Selecionar 20% dos produtos da lista ordenada, como dados de entrada ao modelo; utilizar os demais parâmetros reais do problema (máquinas, roteiros, etc.);
3. Destacar os 5 primeiros produtos da lista ordenada;
4. Atribuir variáveis inteiras e binárias para os 5 produtos destacados e variáveis contínuas para os demais produtos;
5. Resolver o modelo e fixar a solução do primeiro produto destacado, alocando seu roteiro à célula e, ao mesmo tempo, alocar a máquina utilizada pelo roteiro à célula;
6. Rolar a janela de captura dos produtos com maior demanda, ou seja, considerar os 5 próximos produtos com solução não fixada;
7. Repetir os passos 4 a 6 até que os 20% dos tipos de produtos estejam alocados às células, ou seja, tiverem suas soluções fixadas;
8. Alocar as máquinas às células considerando sua utilização nos roteiros já atribuídos às células (soluções já fixadas);

9. Alocar os demais produtos (ou seja, os 80% restantes) às células fixadas conforme os roteiros desses produtos, seguindo a mesma lógica de alocação dos primeiros, porém já com as células constituídas.

A mesma lógica foi aplicada com modelo V2: as variáveis inteiras foram definidas como variáveis contínuas (as binárias não sofreram alteração) e foram executados os passos do *relax and fix*, dando origem a RF_V2.1 e RF_V2.2. Foram realizados testes com as heurísticas *relax and fix* da mesma forma que com os modelos V1, V2, V3 e V4, utilizando-se os dados reais coletados na empresa em estudo durante o tempo de 1 hora no total, onde foi destinado 70% do tempo total para a alocação dos 20% de produtos com maior demanda nas células, 28% do tempo na alocação das máquinas nas células e o restante na alocação dos produtos que restaram nas células cujos produtos de maior demanda e as máquinas se encontram fixadas. Os resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados gerados pelas estratégias utilizando-se valores reais, coletados na empresa

	FO	Faltas (Valor médio de ΣBB)	Valor de ΣE	Valor de ΣH	Valores de ($\Sigma E +$ ΣH)	Solução Encontra da	Excede Tempo
V1	4162	3936	79	147	226	0	1
V2	4020	3827	119	77	196	0	1
V3	4277	3826	160	291	451	0	1
V4	4204	3827	344	36	380	0	1
RF_V1.1	4393	3826	195	368	563	1	0
RF_V1.2	4112	3826	81	205	286	1	0
RF_V2.1	4181	3836	194	458	652	1	0
RF_V2.2	4178	3828	116	238	354	1	0

Fonte: Elaborado pelo autor

As heurísticas não resultaram em melhores valores da Função Objetivo, evidenciando que os modelos geram bons resultados apesar do *gap* elevado. Isso pode ser evidenciado

também quando se utiliza apenas um critério de decisão, considerando apenas a minimização da falta e desconsiderando os objetivos relacionados a qualidade na formação das células.

Os resultados obtidos com todas as estratégias são muito próximos quando se compara os valores médios do somatório de faltas de produtos, exceto pelo valor pouco acima dos demais para as estratégias V1 (modelo original) e RF_V2.1. Entretanto, quando se observam os valores relacionados à qualidade na formação das células, o modelo V2 se mostrou melhor, com valor relativamente menor para a soma de vazios intracelulares e movimentos intercelulares ($\Sigma E + \Sigma H$) quando comparado com os demais. Este resultado é diferente do que se esperava, considerando o relaxamento do modelo V2 e a maior flexibilidade das demais estratégias elaboradas. Mesmo que a solução ótima não tenha sido encontrada com a estratégia V2, a solução obtida supera as soluções obtidas com os outros modelos e com as heurísticas.

Portanto, o modelo V2 gerou melhor resultado que os demais, em especial pela melhor qualidade na formação das células, gerando menor quantidade de produtos que transitam entre as células e de roteiros de produtos alocados a uma célula sem utilizar alguma de suas máquinas. A melhor formação das células resulta em menor custo de gestão, com fluxos mais organizados e simples.

4.5 ANÁLISE GERENCIAL DA MELHOR SOLUÇÃO OBTIDA

Pelos valores apresentados na Tabela 6 da seção 4.4, os modelos retornaram resultados similares com relação a minimização da falta dos produtos, entretanto, o modelo V2 demonstrou maior qualidade na formação das células.

Com a solução gerada após a execução dos modelos é possível trabalhar com os dados de saída dentro da interface de pós processamento para facilitar a análise gerencial dos resultados.

A Figura 7 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 7: 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

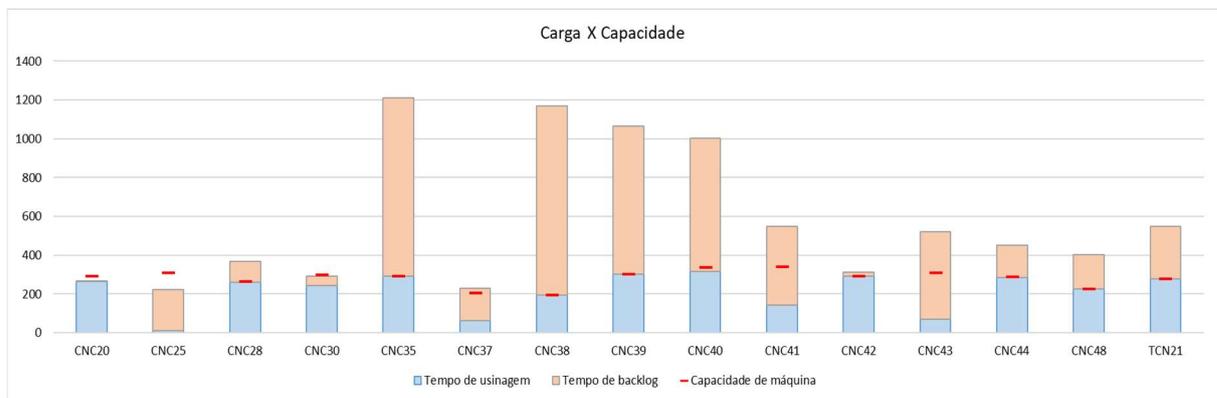
Foram formadas duas células com mais de uma máquina e sete células com uma máquina em cada célula, que poderiam ser tratados na prática como um centro de serviços para as demais células/máquinas.

As células foram formadas de modo coerente baseando-se nos fluxos planejados dos materiais, conforme os roteiros de cada produto. Como exemplo, pode-se observar a alocação das máquinas CNC20 e CNC42, que possuem fluxo intenso de materiais entre elas, à mesma célula. Diversos roteiros possuem uma operação de usinagem no CNC20 e outra operação de acabamento de maior complexidade no CNC42. Outro caso a ser exemplificado é a relação entre o CNC48 e CNC44, que foram alocados à mesma célula por haver maior intensidade de fluxo entre eles.

Muitos roteiros de produtos possuem fluxo que passa pela máquina CNC38 e tem como fluxo alternativo a máquina CNC30. O modelo alocou a máquina CNC38 de forma isolada na célula 2, como um centro de trabalho que fornece para as demais máquinas distribuídas nas outras células. Esta máquina recebe produtos que possuem fluxo para quase todas as outras máquinas, abrangendo todas as células formadas. Esta formação é difícil de ser identificada na prática, o que demonstra o benefício da utilização de uma abordagem com solução baseada em modelos de otimização.

Ainda, a solução do modelo V2 resultou na alocação das ordens de produção e das cargas nas máquinas respeitando a capacidade das máquinas, conforme a Figura 8.

Figura 8: 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.

Nota-se que o modelo selecionou roteiros alternativos de modo a utilizar ao máximo a capacidade das máquinas similares e evitar ociosidade em uma delas com sobrecarga em outra que poderia substituí-la, como pode-se observar o carregamento do CNC28 e do CNC30.

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.

As máquinas subutilizadas, como o CNC25, CNC37, CNC41 e CNC43, poderiam ser utilizadas de forma alternativa fabricação de produtos que passam por máquinas gargalo. Como exemplo deste movimento, essas máquinas possuem capacidade tecnológica para

produzir peças que passam pela máquina CNC35 ou CNC38 com mínima adaptação de processos.

As máquinas TCN21, CNC28, CNC35, CNC38, CNC39, CNC40, CNC42, CNC44 e CNC48 estão sendo utilizadas em sua capacidade total para a fabricação dos produtos, ou seja, são gargalos produtivos. Observa-se, ainda, que as máquinas CNC35, CNC38, CNC39 e CNC40 tem grande quantidade de horas de *backlog*.

Conclui-se que, em primeiro momento, não será possível atender a demanda do cliente, e que a produção possui máquinas que estão com alta utilização e tempo elevado de *backlog*, confirmando que ações deverão ser tomadas para mitigar o impacto ao cliente.

Através de uma matriz DE PARA (Figura 9) é possível demonstrar a carga alocada (tempo de produção efetiva gerado pelo modelo) que transitará de uma máquina para outra.

Nas células amarelas da diagonal consta a quantidade de horas referentes às ordens de produção que se iniciam naquelas máquinas, vindas de outros setores da empresa, como o corte ou o recebimento. A Figura 10 representa uma matriz DE PARA com as informações referentes a horas de *backlog*, ou seja, do que falta produzir para atender a demanda.

Figura 9: Matriz DE PARA - quantidade horas utilizadas para fabricação efetiva

CÉLULAS	MÁQUINAS	1	2	3	4	5	6	7	7	8	8	8	8	8	8	9
		CNC37	CNC38	CNC43	CNC28	CNC39	CNC40	CNC20	CNC42	TCN21	CNC30	CNC48	CNC41	CNC25	CNC44	CNC35
1	CNC37	61,7	0	6,5	0	0	0	13,9	0	0	0	0	0	0	0	0
2	CNC38	0	193,1	3,7	35,5	150,2	286,3	32,7	129,5	0	2,8	0	97,2	0	0	0
3	CNC43	0	0	31,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	CNC28	0	0	17,3	206,4	0	0	0	0	60,6	0	0	31,7	0	0	0
5	CNC39	0	0	0	0	150,6	16,4	0	0	5,0	0	0	12,8	0	0	0
6	CNC40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	CNC20	0	0	0	0	0	0	217,2	159,5	0	0	0	0	0	0	0
7	CNC42	0	0	0	0	0	0	0	3,1	0	0	0	0	0	0	0
8	TCN21	0	0	0	20,2	1,8	14,1	0	0	210,0	138,7	0	0	0	0	96,8
8	CNC30	0	0	12,3	0	0	0	0	0	0	101,8	0	0	0	0	0
8	CNC48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	224,1	0	0	285,4	0
8	CNC41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	CNC25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,7	0	0	0
8	CNC44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	CNC35	0	0	0	0	0	0	0	0	2,1	0	0	0	0	0	193,7
Produção efetiva (h)		61,7	193,1	71,3	262,1	302,6	316,8	263,8	292,1	277,7	243,3	224,1	141,7	10,7	285,4	290,5
Capacidade (h)		203,4	193,1	310,0	264,8	302,6	337,7	291,4	292,7	277,7	299,2	224,1	339,5	310,0	287,3	290,9
Capacidade ociosa (h)		141,7	0,0	238,7	2,7	0,0	20,9	27,6	0,6	0,0	55,9	0,0	197,8	299,3	1,9	0,4

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 10: Matriz DE PARA - quantidade horas de *backlog*

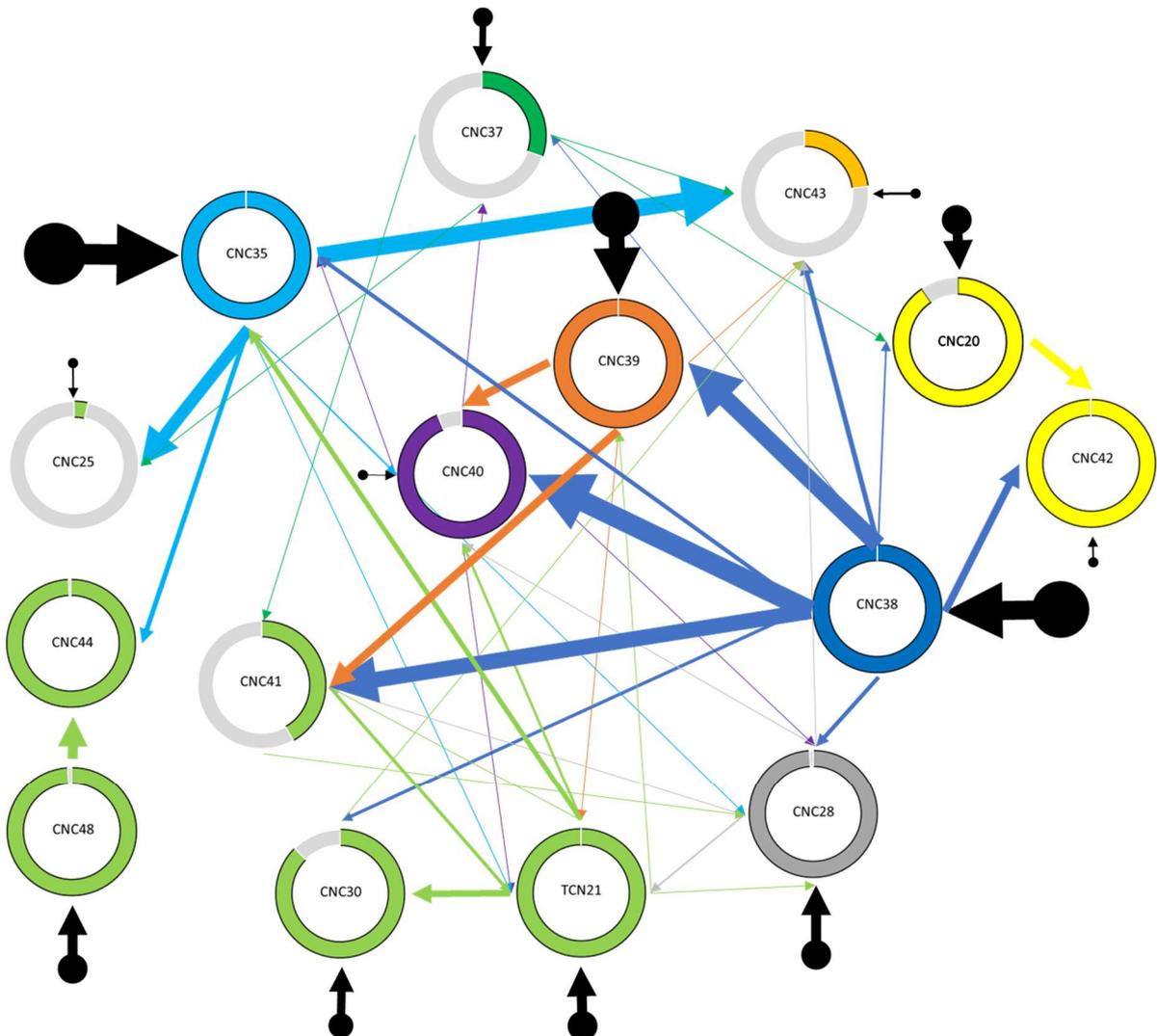
CÉLULAS		1	2	3	4	5	6	7	7	8	8	8	8	8	8	9
	MÁQUINAS	CNC37	CNC38	CNC43	CNC28	CNC39	CNC40	CNC20	CNC42	TCN21	CNC30	CNC48	CNC41	CNC25	CNC44	CNC35
1	CNC37	159,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	56,3	5,8	0	0
2	CNC38	6,6	968,0	94,7	53,9	525,4	569,0	3,3	13,7	0	42,1	0	237,2	0	0,0	132,2
3	CNC43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	CNC28	0	0	20,6	0	0	41,4	0	0	14,2	0	0	0	0	0	5,6
5	CNC39	0	0	18,1	0	237,8	5,5	0	0	0	0	0	90,5	0	0	0
6	CNC40	1,5	0	0	12,8	0	0	0	0	4,8	0	0	0	0	0	8,1
7	CNC20	0	0	0	0	0	0	0	8,3	0	0	0	0	0	0	0
7	CNC42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	TCN21	0	0	0	3,4	0	42,7	0	0	119,9	6,0	0	0	0	0	31,1
8	CNC30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	CNC48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	350,3	0	0	0	333,4	0
8	CNC41	0	0	0	32,9	0	0	0	0	131,4	0	0	16,8	0	0	0
8	CNC25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	CNC44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	CNC35	0	0	315,1	2,4	0	25,8	0	0	0	0	0	205,8	0	743,7	0
<i>Backlog</i> (h)		167,7	968,0	448,4	105,3	763,2	684,4	3,3	22,0	270,3	48,1	350,3	400,8	211,6	333,4	920,6

Fonte: Elaborado pelo autor

Para melhorar a visualização desta relação e do fluxo entre as máquinas (em termos de carga horária transferida de uma máquina para a outra), foi desenvolvida uma rede de grafos (Figura 11). 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, vindo de outros setores da empresa, como o corte ou recebimento, por exemplo, e são quantificadas nas células amarelas da Matriz DE PARA.

Figura 11: Demonstração dos fluxos dos roteiros (carga de tempo – utilização de máquina)



Fonte: Elaborado pelo autor

As máquinas que formaram centros de serviços possuem fluxo mais distribuído, encaminhando a outras máquinas, diferentemente das máquinas que formaram células onde os fluxos são mais concentrados em máquinas específicas, com exceção do TCN21 na célula 8, que possui maior movimentação intercelular se comparado às outras máquinas das células, similar às máquinas que formaram centros de serviços.

Baseando-se nas setas pretas soltas da rede de fluxo da Figura 11, nota-se que os fluxos de entrada ocorrem principalmente nas máquinas CNC20, CNC28, CNC35, CNC38, CNC39, CNC48 e TCN21.

Com as informações das matrizes e com a visualização gerada com a rede de grafos, observa-se que as principais entradas de pedidos ocorrem nas máquinas gargalos CNC38, CNC39 e CNC35. Tais máquinas distribuem a maior quantidade materiais em alumínio para o

processamento em outras máquinas, pois executam operações de fases iniciais da usinagem, como desbastes ou operações de esquadreamento e furação dos materiais para fixação das placas nos ferramentais de usinagem, constituindo-se importantes centros de trabalho. Segundo a solução do modelo, cada uma dessas máquinas foi colocada em uma célula unitária, ou seja, tais máquinas devem ser consideradas centros de serviço que abastecem outras células. O CNC35, entretanto, além das operações de desbaste em materiais de aço inoxidável, executa usinagem completa neste material, com operações de desbaste e acabamento. Há um fluxo de uma quantidade menor de produtos, mas com carga horária alta para fabricação das peças. O *backlog* relacionado a outras máquinas provavelmente é decorrente do *backlog* que foi gerado por estas máquinas, ou seja, a entrada do processo produtivo é o gargalo mais crítico do sistema. Isso também pode ser visto nas matrizes DE PARA das Figuras 9 e 10, em que os maiores valores de carga e backlog estão nas diagonais, e não nas demais células.

O CNC40 é uma máquina que recebe vários produtos de outras máquinas, principalmente do CNC38 e CNC39, para operação de acabamento em usinagem com 5 eixos. A condição do CNC40, por se tratar de um centro de usinagem de 5 eixos, implica uma maior restrição nas alternativas para este fluxo, pois necessita-se de uma máquina de mesma tecnologia para o processamento no mesmo tempo de usinagem, como CNC25, CNC41 e CNC43. Estas últimas estão subutilizadas e, portanto, são recursos que podem ser utilizados com adição de rotas alternativas para os pedidos.

Outra opção seria a alteração do processo de usinagem de alguns produtos que passam pelo CNC40 para fabricação em máquina com 3 eixos, acarretando o aumento das fases de usinagem, que resultará em aumento do tempo de ciclo da peça em máquina, com maior tempo de preparação de máquina e de troca de posicionamento da peça na máquina devido à alteração das fases de usinagem.

A visualização do cenário gerado possibilita ajustes no fluxo dos produtos para melhorar o atendimento a demanda do cliente, atuando nas máquinas de entrada do sistema, identificadas como gargalo pelas análises, através da 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.

Além das ações citadas, será necessário um trabalho focado na otimização dos processos, com redução do tempo de usinagem e aumento da capacidade das máquinas gargalo através da redução dos tempos desperdiçados em *setups* internos. Contudo, é fundamental uma análise mais profunda com relação a investimentos sobre a aquisição de

equipamentos similares para aumento de capacidade, em especial da máquina CNC35 que possui características específicas para usinagem de aços, com melhor desempenho para o material em relação às outras da fábrica, e do CNC40, que é utilizado para acabamento de peças com usinagens em 5 eixos.

O CNC25, seguido do CNC43 são as máquinas que possuem a menor razão entre o tempo usado para fabricação efetiva e sua capacidade. Isto se dá porque ambas recebem fluxo intenso de produtos que utilizam o CNC35, que é um gargalo de entrada do processo. Nele, há a passagem de um *mix* pequeno de produtos e que consomem alta carga horária para fabricação.

O CNC28 ficou isolado na célula 4 e possui uma quantidade importante de fluxo de entrada e pouca interação com outras máquinas, pois os produtos alocados a ele geralmente são finalizados em uma única operação.

Na célula 8, é possível observar maior interação entre as máquinas TCN21, CNC30 e CNC41, entretanto, há pouco relacionamento com as máquinas CNC44, CNC48 e CNC-25. Há forte relação entre o CNC44 e CNC48, porém, não há vínculos com as outras máquinas da célula 8.

A formação das células pode resultar em poucos fluxos entre algumas máquinas porque o modelo busca a minimização da função objetivo, considerando a falta de produto. A não utilização de uma dada máquina da célula por um dado roteiro também é penalizada, mas isto é balanceado com os outros objetivos.

O CNC20 e CNC42 formaram a célula 7, e há alto fluxo de produtos entre eles, tanto em relação à quantidade de produtos quanto à carga, e essa interação quase que independente de outras máquinas resulta em uma produção efetiva proporcionalmente maior do que nas demais células produtivas.

Com as informações do grafo de fluxos, pode-se fazer ajustes finos nas células, como trocar a máquina CNC25 de célula, por não possuir fluxo com as demais na célula 8, colocando-a na mesma célula do CNC35, devido ao seu fluxo. Poderia ser avaliada a possibilidade de deixar o TCN21 como centro de serviços, devido à variedade de fluxos que passa por ele.

Com as análises apresentadas e com um recorte das matrizes que relacionam o tempo a ser utilizado para fabricação de cada produto nas máquinas e os tempos de *backlog* dos produtos (Figura 12 e 13), é possível realizar 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.

Com isso, é possível ajustar a produção para que algum produto fabricado tenha suas horas trocadas por algum produto que não tenha sido alocado pelo modelo, assim diversificando o mix de produtos a ser entregue ao cliente.

Figura 12: Matriz de tempo (h) entre produtos com fabricação efetiva e máquinas utilizadas

Produto	Roteiro	Demanda	TCN21	CNC28	CNC30	CNC35	CNC37	CNC38	CNC39	CNC20	CNC48	CNC40	CNC41	CNC25	CNC43	CNC42	CNC44	Prod_efetiva
2	1	9	0,639	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
4	1	1	0	0	0	0	0,066	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
118	2	16	0	0	0	0	0	0,07	0,103	0	0	0	0,173	0	0	0	0	1
119	1	12	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	24,996	0	12
120	1	8	0	0	0	0	0	0	0	9,4664	0	0	0	0	0	17,2	0	8
129	1	7	0	0	0	0	0	0	0	6,881	0	0	0	0	0	0	0	7
130	1	6	0	0	0	0	0	0,3	0	5,898	0	0	0	0	0	0	0	6
132	1	16	0	0	0	0	0	1,0672	0	0	0	9,6	0	0	0	0	0	16
133	1	16	0	0	0	0	0	1,0672	0	0	0	9,328	0	0	0	0	0	16
148	2	17	0	0	0	0	0	1,139	0	0	0	0	25,5	0	0	0	0	17
164	1	17	0	0	0	0	0	0,5661	0	0	0	7,922	0	0	0	0	0	17
166	1	17	0	0	0	0	0	1,411	0	0	0	0	0	0	0	22,1	0	17

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 13: Matriz de tempo (h) entre *backlog* de produtos e máquinas

Produto	Roteiro	Demanda	TCN21	CNC28	CNC30	CNC35	CNC37	CNC38	CNC39	CNC20	CNC48	CNC40	CNC41	CNC25	CNC43	CNC42	CNC44	Backlog
3	2	20	0	0	0	0	0	3,266	0	0	0	0	12,66	0	0	0	0	20
11	1	24	0	0	0	0	0	1,9992	11,832	0	0	0	0	0	0	0	0	24
12	1	15	0	0	0	0	0	0	17,37	0	0	0	0	0	0	0	0	15
13	1	15	0	0	0	0	0	5,85	3,15	0	0	29,565	0	0	0	0	0	15
25	1	70	0	0	0	0	0	11,97	10,5	0	0	0	0	0	0	0	0	70
30	2	5	0	0	0	0	0	0	0	0	3,5	0	0	0	0	0	10,65	5
61	1	22	0	0	0	0	0	2,5652	0	0	0	1,672	0	0	0	0	0	22
62	1	23	0	0	0	0	0	2,6818	0	0	0	1,748	0	0	0	0	0	23
81	1	10	0	0	0	0	0	1,993	0	0	0	0	0	10,18	0	0	0	10
92	1	43	0	0	0	0	0	8,557	12,212	0	0	0	0	0	0	0	0	43
93	1	20	0	0	0	0	0	1,1	13,78	0	0	0	0	0	0	0	0	20
94	1	23	0	0	0	0	0	3,91	6,647	0	0	0	0	0	0	0	0	23

Fonte: Elaborado pelo autor

Como exemplo de ajuste, seria possível deixar de fabricar 3 unidades do produto 148 encontrado na matriz de produção efetiva (Figura 12), ou 1 unidade dos produtos 132, 133 e 166 para liberar horas de máquina no CNC38 e possibilitar a fabricação efetiva do produto 3, encontrado na matriz com backlog (Figura 13), pois o CNC41 apresenta ociosidade, conforme visto nas demais análises. Ou ainda, pode-se liberar menor quantidade de horas, deixando de fabricar 2 unidades do produto 166, e fabricar parcialmente a demanda do produto 3, pois o cliente pode necessitar de menor quantidade do que a especificada na demanda, no curto prazo.

A visualização da formação de células e da relação 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 das máquinas serem agrupadas frequentemente nas mesmas células pelas reconfigurações ocorridas 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 parte dela;
10. Comunicar ao cliente sobre o risco ou possibilidade de não atendimento e negociar novos prazos ou volumes de entrega.

Figura 14: Identificação visual das máquinas e documentos físicos



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 14 há um exemplo de como poderiam ser identificadas as máquinas e os documentos físicos de modo a auxiliar na administração do fluxo por meio da gestão visual dos produtos no chão de fábrica. Uma máquina está identificada na cor verde e outra em laranja para representar as respectivas células, formadas com base no modelo. Nos documentos físicos, que acompanham os materiais em produção (parte inferior da figura), a cor do adesivo colocado representaria a célula em que o produto deve ser processado. Caso se tenha um fluxo que utilize uma máquina de outra célula, cores diferentes apareceriam em seu documento de produção indicando o fluxo intercelular daquela Ordem de Serviço, facilitando o gerenciamento do material na produção e contribuindo para a gestão visual das entradas e saídas das células. Com a identificação do fluxo do material, fisicamente no documento, será possível uma gestão mais fácil e ágil na produção (por ser visual). Poderão ser definidos

locais de entrada e saída de materiais para cada célula, o que facilita a identificação de materiais em fluxos incorretos e melhora o gerenciamento da produção. Caso alguma entrada estiver com pouco material, a célula necessitará de prioridade no abastecimento ou caso haja acúmulo de material na entrada de alguma célula, será necessário avaliar e executar alguma ação para normalização da produção.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi proposto um modelo de programação inteira mista para a formação de células de manufatura temporárias e alocação de ordens de fabricação em uma empresa de usinagem de produtos do setor aeroespacial, considerando a demanda do cliente final e o uso otimizado da capacidade no médio prazo. O modelo foi desenvolvido de forma a minimizar as faltas, a movimentação intercélulas e os vazios intracelulares (i.e., a não-utilização da máquina pelo roteiro alocado à célula), gerando resultados relacionados à carga e à capacidade que auxiliam no processo de tomada de decisão da fábrica.

Quatro estratégias diferentes de resolução do modelo (denominadas V1 a V4) foram geradas, uma delas correspondente ao próprio modelo original e outras três utilizando relaxamento das variáveis inteiras e simplificação de variáveis. Estas estratégias foram testadas em instâncias de diferentes tamanhos geradas aleatoriamente, para comparação dos resultados, com o objetivo de se identificar a estratégia mais eficiente para resolver o problema real, que é de grandes dimensões. Quando aplicada às instâncias aleatórias, a estratégia V2 gerou os melhores resultados da função objetivo, entretanto, as diferenças entre os resultados foram pequenas, podendo-se considerar as estratégias equivalentes. Além da aplicação dessas quatro estratégias para a solução do problema real, de grandes dimensões, foram também desenvolvidas duas estratégias baseadas na heurística *relax and fix*.

A característica fundamental dessa heurística é dividir o problema em pequenas partes que representem o problema total. O *relax and fix* foi aplicado aos modelos utilizados nas estratégias V1 e V2, resultados quais apresentaram as melhores soluções para o problema real. Para a aplicação da heurística, foram realizados testes para identificar quais variáveis impactavam mais significativamente a resolução do modelo, sendo aquela que trata a quantidade de células a de maior relevância. Os resultados obtidos com todas as estratégias (V1 a V4 e 2 estratégias *relax and fix*) são muito próximos quando se compara os valores médios do somatório de faltas de produtos, entretanto, o modelo V2 executou a formação de

células com maior qualidade, com menos movimentação intercelular e menos vazios intracelulares.

Com a solução gerada após a execução dos modelos é possível trabalhar os dados de saída dentro da interface de pós processamento, que foi desenvolvida para facilitar a análise gerencial dos resultados. Com ela, foi possível identificar condições que são difíceis de perceber no chão de fábrica, como a utilização da máquina CNC38 como centro de trabalho e o CNC30 como alternativa para fluxos dentro da célula, assim como comprovar situações que eram percebidas no dia a dia de maneira subjetiva, como o intenso relacionamento entre a máquina CNC20 e a CNC42. Conhecendo melhor o fluxo, os produtos podem ser melhor gerenciados na fábrica com aplicação de ferramentas de gestão visual, como cores de identificação das células nas documentações de produção e nos locais de entrada e saída de máquinas e células. A análise da solução permitiu identificar máquinas que estão subutilizadas, e máquinas gargalo, como o TCN21, CNC28, CNC35, CNC38, CNC39, CNC40, CNC42, CNC44 e CNC48. A partir disso, os gestores podem pensar em melhorias de processo, fluxos alternativos para realocação de carga, extensão de turno e/ou horas extras e, em último caso, investimento para aquisição de equipamentos similares.

O trabalho traz contribuições para a literatura e para a prática, demonstrando os benefícios da aproximação do meio acadêmico ao ambiente empresarial. Ferramentas e métodos da manufatura celular, manufatura flexível e clusterização podem ser um diferencial competitivo na indústria aeroespacial, o que é pouco explorado em trabalhos científicos, tornando a empresa resiliente frente às oscilações do mercado. No presente trabalho foi desenvolvido um modelo aplicado a problemas reais, considerando dados empíricos de manufatura para os tempos de processamento, mix de produtos, demanda e capacidade de máquina (considerando informações sobre paradas planejadas e não planejadas), tempos de *setup* de máquina, tempos de troca de peças, limpeza, regulagens, dentre outros. Nos artigos existentes na literatura, nota-se uma escassez de pesquisas empíricas com modelos de programação matemática em que são utilizados dados reais para problemas similares aos abordados nesta pesquisa, justificando a importância deste trabalho na área.

O modelo encontrado na literatura, para a formação de células flexíveis, trabalha o problema em duas etapas, com a formação das células e o carregamento de ordens às células, em etapa subsequente. No modelo desenvolvido, a formação de células e o carregamento das ordens ocorrem simultaneamente. Assim, outro diferencial é a utilização de um único modelo para a formação das células e para o carregamento das ordens células em uma única etapa de execução, o que facilita a sua aplicação pelo usuário na prática.

Além da contribuição na literatura, o trabalho traz um produto tecnológico que possibilita melhor visualização da solução resultante do modelo matemático de otimização, para auxiliar na tomada de decisão. Atualmente, depende-se das informações e correlações baseadas em experiências adquiridas pela prática empresarial ao longo do tempo.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se considerar usar uma abordagem multiobjetivo com relação à falta e a qualidade da formação das células. Pode-se também determinar que algum produto não deva faltar. Outra oportunidade é adicionar-se a contribuição financeira de cada produto para o resultado da empresa. Considerar o incremento da receita e os custos de fabricação envolvidos possibilitaria a busca da menor falta relacionada ao melhor resultado financeiro possível. Ainda, a demanda poderia ser dividida em lotes de fabricação para carregamento das máquinas, o que possibilitaria gerar filas e simular cenários com o tempo de troca de peça para cada produto e com o tempo de *setup* específico para cada lote e para cada tipo de trabalho. Temos a oportunidade de estudar outras abordagens para resolver o modelo de forma mais eficiente. Finalmente, alterar o modelo para colaborar indicadores de *Fill Rate*, *On Due Date* ou *On Time Delivery*, *On Time In Full* e *Order Cycle Time*.

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.
- EDERGRUEN A., MEISSNER J. e TZUR M., Progressive interval heuristics for multi-item capacitated lot sizing problems, **Operations Research**, 2004.
- 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.
- FERREIRA, D.; MORABITO, R.; RANGEL, S. Um modelo de otimização inteira mista e heurísticas *relax and fix* para a programação da produção de fábricas de refrigerantes de pequeno porte. **Produção**, v. 18, n. 1, p. 076-088, 2008.
- FERREIRA, D.: Abordagens para o problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes da produção de bebidas. **Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos**. São Carlos – SP, 2007
- 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.