

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



**APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DE GRUPO EM SISTEMAS COM
FLUXO COMPLEXO: SUPERANDO BARREIRAS TECNOLÓGICAS**

GIULIANO PETRINI

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

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

GIULIANO PETRINI

**Aplicação da tecnologia de grupo em sistemas reais com fluxo complexo: Superando
barreiras tecnológicas**

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

Orientador: Prof. Dra. Juliana K. Sagawa

SÃO CARLOS-SP

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Giuliano Petrini, realizada em 28/06/2021.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Juliana Keiko Sagawa (UFSCar)

Prof. Dr. Fábio Molina da Silva (UFSCar)

Prof. Dr. Marcelo Seido Nagano (USP)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

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

À minha família...

AGRADECIMENTOS

Ao Profa. Dra. Juliana Keiko Sagawa pela perseverança e orientação, por acreditar em mim e apoiar os meus caminhos.

Ao Prof. Dr. Marcelo Seido Nagano, ao Prof. Dr. Fábio Molina da Silva e ao Prof. Dr. Roberto Tavares pelas sugestões e observações construtivas realizadas na defesa de qualificação.

Ao Sr. Dr. Joseph Thomas por ser o grande motivador e incentivador da minha jornada neste trabalho.

À Karina, minha amada esposa e companheira, pela presença, compreensão e carinho em todos os momentos.

Aos nossos filhos Isabelle e Thell pela compreensão nos momentos de ausência.

Aos meus pais Antônio Carlos (em memória) e Elisabete, por me ensinar o valor do trabalho e do estudo.

Aos colegas de trabalho Robson Veruti, Felipe Valverde e tantos outros pela colaboração prestada e suporte sempre quando necessário.

Ao meu irmão Rafael e ao meu sogro Antônio Sérgio pela amizade e apoio.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Engenharia de Produção da UFSCar.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

A Deus, por ter iluminado meu caminho, me guiado e suportado durante a trajetória desse sonho.

“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens, mas em ter novos olhos.”

Marcel Proust

Aplicação da tecnologia de grupo em sistemas reais com fluxo complexo: Superando barreiras tecnológicas

RESUMO

Diante de alta variedade e ciclo de vida curto dos produtos, bem como alta flutuação de demanda, a busca por sistemas de produção flexíveis e que, ao mesmo tempo, apresentem os benefícios dos sistemas de produção em massa é imperativa. A tecnologia de grupo e a manufatura celular podem contribuir com essa necessidade. Porém, os métodos de formação de célula desenvolvidos na literatura ainda são abstratos, apresentando soluções para problemas hipotéticos que são difíceis de serem reproduzidos na prática. Os trabalhos práticos são escassos e normalmente com um nível de complexidade e restrições tecnológicas baixos, ou seja, número pequeno de produtos e processos, e máquinas com especificidade funcional. Este trabalho busca desenvolver a PFA (*Production Flow Analysis*) para formação de células em um ambiente real de manufatura. Com a aplicação da etapa de FFA (*Factory Flow Analysis*) da metodologia citada, o fluxo de processo é simplificado, fazendo com que o problema matemático (e prático) de *clusterização* para a formação de célula se torne viável. O trabalho é desenvolvido em um ambiente complexo, com alta diversidade de produtos e processos, e com elevado número de máquinas com flexibilidade funcional e restrições tecnológicas. Este estudo contribui para a literatura de manufatura celular com a discussão dos aspectos de um ambiente de manufatura complexo, e apresentação de propostas de solução às restrições reais, aproximando teoria e prática. Como implicações práticas, esta pesquisa fornece diretrizes para a solução de problemas enfrentados pelos gestores quando da aplicação da tecnologia de grupo/manufatura celular.

Palavras-Chave: Manufatura Celular. *Production Flow Analysis*. *Factory Flow Analysis*.

ABSTRACT

In the view of the need for a high variety and short life cycle of products, as well as high fluctuation in demand, the search for flexible production systems that, at the same time, present the benefits of mass production systems is imperative. Group technology and cellular manufacturing can contribute to this need. However, the cell formation methods developed in the literature are still abstract, presenting solutions to hypothetical problems that are difficult to reproduce in practice. Practical work is scarce and usually with a low level of complexity and technological restrictions, that is, a small number of products and processes, and machines with functional specificity. This work seeks to develop the PFA (Production Flow Analysis) for cell formation in a real manufacturing environment. With the application of the FFA (Factory Flow Analysis), a step of the aforementioned methodology, the process flow is simplified, making the mathematical (and practical) problem of clustering for cell formation feasible. The work is carried out in a complex environment, with a high diversity of products and processes, and with a large number of machines with functional flexibility and technological restrictions. This study contributes to the cellular manufacturing literature by discussing aspects of a complex manufacturing environment, and presenting proposals for solutions to real constraints, bringing theory and practice close together. As practical implications, this research provides guidelines for solving problems faced by managers when applying group technology / cellular manufacturing.

Keywords: *Cellular Manufacturing. Production Flow Analysis. Factory Flow Analysis.*

Este documento já está em formato de artigo científico com 11.788 palavras, já visando a tradução e submissão para publicação em periódico científico.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Framework de métodos de pesquisa	24
Figura 2 - Etapas da pesquisa	25
Figura 3 - Principais componentes do cilindro hidráulico	27
Figura 4 - Fluxograma de produção de camisa	36
Figura 5 - Fluxograma de produção de haste	37
Figura 6 - Fluxograma simplificado de produção de camisa considerando 80% dos produtos	39
Figura 7 - Fluxograma simplificado de produção de haste considerando 80% dos produtos	40
Figura 8 - Estudo de capacidade da célula 1 de camisa	52
Figura 9 - Estudo de capacidade da célula 2 de camisa	52
Figura 10 - Estudo de capacidade da célula 1 de haste	53
Figura 11 - Estudo de capacidade da célula 2 de haste	54
Figura 12 - Fluxograma do processo das células de camisa.....	56
Figura 13 - Fluxograma do processo das células de haste.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do tamanho do problema com base na matriz componente x máquina	18
Tabela 2 - Volumes de cilindros por variações de produtos.....	28
Tabela 3 - Diversificação da fabricação de camisa e haste	30
Tabela 4 - Matriz componente x máquina da camisa após a clusterização	31
Tabela 5 - Matriz componente x máquina da haste após a clusterização	31
Tabela 6 - Roteiros de Processo de Fabricação de Camisa	33
Tabela 7 - Roteiros de Processo de Fabricação de Haste	34
Tabela 8 - Volume de produção (em unidades) para cada PRN.....	35
Tabela 9 - De/Para para a produção de camisas	37
Tabela 10 - De/Para para a produção de hastes	38
Tabela 11 – Roteiros de camisas ordenados de forma decrescente, com relação ao volume por roteiro	41
Tabela 12 - Roteiros de hastes ordenados de forma decrescente, com relação ao volume por roteiro	42
Tabela 13 - Gráfico Home/Away da camisa.....	43
Tabela 14 - Gráfico Home/Away da haste	44
Tabela 15 - Matriz componente x máquina da camisa	46
Tabela 16 - Matriz componente x máquina da haste	47
Tabela 17 - Matriz componente x máquina da camisa após a clusterização	48
Tabela 18 - Matriz componente x máquina da haste após a clusterização	48
Tabela 19 - Matriz componente x máquina (considerando processos de fabricação) da camisa após a clusterização	49
Tabela 20 - Matriz componente x máquina (considerando processos de fabricação) da haste após a clusterização	49
Tabela 21 - Distribuição de máquinas para as células de camisa.....	51
Tabela 22 - Distribuição de máquinas para as células de haste.....	51
Tabela 23 - Célula 1 de camisa – Volumes e produtos.....	55
Tabela 24 - Célula 2 de camisa – Volumes e produtos.....	55
Tabela 25 - Célula 1 de haste – Volumes e produtos	55

Tabela 26 - Célula 2 de haste – Volumes e produtos	56
Tabela 27 - Dados das células relevantes para a programação da produção e tamanho da matriz máquina x componente.....	58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 COMPLEXIDADE NOS SISTEMAS DE FABRICAÇÃO	18
2.2 TECNOLOGIA DE GRUPO E FORMAÇÃO DE CÉLULA	18
2.3 PFA.....	19
2.4 APLICAÇÕES DE FFA NA LITERATURA.....	20
3 MÉTODO	24
4 DESENVOLVIMENTO	27
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	28
4.2 FFA.....	32
4.3 GA	44
5 DISCUSSÃO	58
6 CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES	61
7 REFERÊNCIAS	63
APÊNDICE A – RELAÇÃO NÚMERO DE ROTEIRO X PRN - CAMISA	67
APÊNDICE B – RELAÇÃO NÚMERO DE ROTEIRO X PRN - HASTE	67
APÊNDICE C – MÁQUINA X ROTEIRO – CAMISA	68
APÊNDICE D – MÁQUINA X ROTEIRO – HASTE	69
APÊNDICE E – MÁQUINA X ROTEIRO – CAMISA E HASTE	70
APÊNDICE F – EXEMPLO DO ESTUDO DE CAPACIDADE - TABELA DO CÁLCULO PARA A OPERAÇÃO DE FURAÇÃO DA CÉLULA 1 DE CAMISA	71
APÊNDICE G – ROTEIROS DE CAMISA QUE SE ENQUADRAM NO FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO, APÓS O HOME / AWAY	72
APÊNDICE H – ROTEIROS DE HASTE QUE SE ENQUADRAM NO FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO, APÓS O HOME / AWAY	72

1. INTRODUÇÃO

A diversidade de produtos, o curto ciclo de vida do produto e a intensa pressão para aumentar a produtividade levam à concorrência acirrada entre fabricantes. Para Salehi e Tavakkoli-Moghaddam (2010) e Neufeld, Teucher e Buscher (2019), situações econômicas competitivas exigem um fornecimento mais rápido de produtos, com funcionalidades mais inovadoras. Um sistema de produção capaz é aquele que produz uma ampla variedade de produtos com agilidade para atender à necessidade do cliente, com baixo custo de produção e mantendo o nível de qualidade. Os sistemas de fabricação tradicionais, como *job shops*, não atendem a esse requisito. É necessária uma metodologia de fabricação realista para suprimir os deméritos dos sistemas tradicionais de fabricação na prática (DEEP; SINGH, 2015).

Nos sistemas *job shop*, os produtos são fabricados em diferentes setores, portanto, as tarefas passam 95% do tempo em atividades não produtivas; grande parte do tempo é gasto na fila de espera e os 5% restantes são divididos entre o *set up* e o processamento do lote (ASKIN; STANDRIDGE, 1993; DEEP; SINGH, 2015). Na tentativa de reduzir estas deficiências, o conceito de tecnologia de grupo tem sido amplamente empregado em sistemas de manufatura.

A tecnologia de grupo é definida como uma técnica que seleciona peças semelhantes com base em seus processos de fabricação, atributos ou formas geométricas/*design*, e agrupa-as em famílias de peças para tirar proveito de suas semelhanças (SELIM; ASKIN; VAKHARIA, 1998; PAPAIOANNOU; WILSON, 2010; CHU et al., 2019). É uma das alternativas mais conhecidas e eficientes para o ambiente de fabricação com alta variedade e alto volume de produtos (ADINARAYANAN; UTHAYAKUMAR; PRABHAKARAN, 2018).

A manufatura celular é uma aplicação da tecnologia de grupo na fabricação, sendo uma solução para o tipo de lote eficiente, com baixo tempo de *set up* para produzir variedade de tipos de peças com menor tempo de entrega, qualidade superior e maior utilização da máquina (SUDHAKARAPANDIAN, 2007; KLAUSNITZER; NEUFELD; BUSCHER, 2017).

Muitos trabalhos sobre tecnologia de grupo vêm sendo realizados com o intuito de resolver o problema de formação da célula. Esses trabalhos utilizam algoritmos diversos para buscar o melhor agrupamento / clusterização. Eles buscam as soluções ótimas e com isso contribuem para aumentar a qualidade na formação de célula. Porém, na maioria dos casos, os algoritmos são aplicados a sistemas hipotéticos. É observada uma escassez de trabalhos envolvendo sistemas reais, os quais possuem variáveis que dificilmente são consideradas num sistema hipotético. Na maior parte dos trabalhos de desenvolvimento de algoritmos, a complexidade do sistema sob análise é baixa, desconsiderando-se muitos sistemas reais

complexos, com uma maior quantidade de máquinas e produtos e diferentes restrições tecnológicas. Esses trabalhos possuem grande importância quando o objetivo é entender melhor os métodos de agrupamento (pesquisa axiomática) independentemente de variáveis de um sistema real. Por outro lado, entende-se ser importante complementar esse tipo de pesquisa com pesquisa empírica, propondo-se modelos que representem as nuances da realidade prática.

Observa-se que a PFA (*Production Flow Analysis*), uma das ferramentas clássicas para dar suporte à formação de células (BURBIDGE, 1971), é pouco explorada de forma empírica na literatura, especialmente quando se trata do seu primeiro nível de análise, chamado de FFA (*Factory Flow Analysis*).

Em uma busca realizada na base Scopus por trabalhos que citam o artigo “*Production Flow Analysis*”, de Burbidge (1971), desde 2000 até os dias atuais, foi possível observar que mais de 90% dos artigos são baseados em modelos hipotéticos. De 68 trabalhos, 8 são de revisão de literatura, 3 utilizam como método de pesquisa o estudo de caso, 2 deles são de revisão de literatura com estudo de caso, e os demais apresentam algoritmos computacionais para clusterização aplicados a sistemas hipotéticos, mas não utilizando especificamente o PFA. Entre os trabalhos de estudo de caso, apenas um deles utiliza a PFA como método para aplicação da tecnologia de grupo / manufatura celular. Além disso, dos 26 trabalhos que apresentam a matriz máquina x produto, em apenas 6 deles essa matriz possui uma das dimensões maior do que 20 (ou seja, ao menos 20 máquinas ou ao menos 20 produtos). Dentre os trabalhos que abordam sistemas reais, poucos deles discutem o tamanho da matriz máquina x componente ou questões de complexidade dos sistemas de produção reais que dificultam o agrupamento. O trabalho de Santos e Araújo Júnior (1999) apresenta uma matriz 36 x 58, um tamanho de problema que pode ser classificado como “grande” (ver seção 2.1). Esse é um dos raros trabalhos em que é abordado um sistema real com uma matriz dessa dimensão, porém, seu foco é mais sobre a utilização de um software para aplicação da PFA e não tanto na aplicação da metodologia em si.

Segundo Hameri (2011), a PFA é um método maduro, bem documentado e praticamente comprovado para simplificar sistemas complexos de fluxo de material, especialmente para transformar layouts funcionais e orientados a processos tradicionais em *layouts* orientados a produtos; entretanto, apesar de seu histórico estabelecido, o método não é amplamente utilizado. O corpo de conhecimentos de clusterização tem negligenciado o desafio de lidar com as exceções, isto é, peças que não se encaixam em nenhum grupo de máquinas que processam

a maioria das peças. A clusterização em si não é difícil, mas tratar as exceções é um desafio que requer experiência técnica e administrativa do setor em questão. Burbidge (1996) pede o envolvimento da gerência como o primeiro passo na formação das células de produção e defende que apenas a aplicação de algoritmos oculta o processo vital de aprendizado e a compreensão mais profunda que a gerência deve ter em seu processo de produção antes de melhorá-lo.

Para Burbidge (1996) os métodos matemáticos para encontrar grupos e famílias foram malsucedidos na prática, em parte porque são mais complexos que a PFA, em parte porque ignoraram as etapas preliminares da FFA e em parte porque ignoraram a necessidade de realocação de operações e outras modificações nos roteiros do processo.

Portanto, a literatura recente mostra a existência de um campo para pesquisa em sistemas reais com fluxo complexo, ou seja, sistemas de grandes dimensões e com restrições tecnológicas significativas, com utilização da FFA como ferramenta de suporte para a formação de células.

Este trabalho tem como objetivo modelar e analisar um sistema produtivo complexo, com quantidade significativa de máquinas, peças e restrições tecnológicas, em um ambiente real, utilizando a técnica da PFA, com foco em seus dois níveis mais relevantes (*Factory Flow Analysis* – FFA e *Group Analysis* – GA), para a formação das famílias e células. Com isso, são constatados pontos que não são comumente tratados em trabalhos que envolvem sistemas hipotéticos. Portanto o trabalho busca responder às seguintes questões de pesquisa:

- Qual o grau de dificuldade e quais as soluções para a implementação da manufatura celular, através da PFA, em um ambiente de sistema produtivo complexo, com grande quantidade de máquinas e peças e com de restrições tecnológicas?
- Quanto a utilização da FFA simplifica o processo e facilita a formação de célula, possibilitando soluções viáveis para a clusterização?

Assim, o trabalho contribui para a literatura com a discussão desses aspectos, e apresentação de propostas de solução às restrições reais, aproximando teoria e prática. Além disso, como implicações práticas, esta pesquisa fornece diretrizes para a solução de problemas enfrentados pelos gestores quando da aplicação da manufatura celular.

A modelagem será realizada em uma empresa da cadeia de fornecimento dos setores de máquinas agrícolas e de construção civil. Fornecedores de componentes dessa cadeia, normalmente, possuem sistemas de produção com características de médio a baixo volume e

com alta variedade. Essas indústrias, geralmente, aumentam o seu portfólio de produção de maneira pouco planejada, pois, devido aos volumes não serem altos, novos negócios são desejados mesmo que o novo produto a ser desenvolvido não se enquadre totalmente no processo produtivo de forma eficiente, tornando-se assim um sistema *job shop* com excessos de movimentações, fluxos complexos, excesso de roteiros etc. Portanto, muitas dessas indústrias carecem de um sistema que melhore o fluxo/atravessamento de produtos no chão de fábrica, a eficiência dos processos e, conseqüentemente, sua lucratividade. Essa cadeia possui uma representatividade significativa para economia brasileira, pois, o agronegócio correspondeu a 26,6% do PIB brasileiro em 2020 (CNABRASIL, 2021), sendo produzidas 47.077 unidades de máquinas agrícolas nesse mesmo ano (ANFAVEA, 2021), enquanto a indústria de máquinas e equipamentos para construção produziu 22.573 unidades de máquinas segundo a ABIMAQ (2021). Assim, neste cenário, destaca-se também a contribuição prática e social deste trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A tecnologia de grupo é uma filosofia que explora a proximidade entre os atributos de determinados objetos. A manufatura celular é uma aplicação da tecnologia de grupo na fabricação, que envolve o processamento de peças semelhantes (famílias de peças) em uma célula dedicada de máquinas ou processos de fabricação (SINGH, 1993; RABBANI et al., 2012). Para Lian et al. (2014), Boutsinas (2013) e Sayadi, Hafezalkotob e Naini (2013), a manufatura celular é uma aplicação bem-sucedida da tecnologia de grupo, permitindo que a indústria manufatureira de pequenos e médios lotes obtenha vantagens econômicas semelhantes à produção em massa, como maior qualidade, melhor controle do chão de fábrica, fluxos de material simplificados, requisitos de ferramental reduzidos e maior produtividade, mantendo a alta flexibilidade do sistema tipo *job shop*.

Após a reorganização, as famílias de componentes similares são produzidas dentro dos limites físicos das células que abrigam a maioria ou todos os recursos necessários. Este arranjo focado no produto facilita o fluxo rápido e o processamento eficiente do material e da informação. Além disso, os operadores de célula podem ter treinamento cruzado em várias máquinas, engajar-se na rotação de tarefas e assumir a responsabilidade pelas tarefas que antes pertenciam aos supervisores e à equipe de suporte. Estas incluem atividades como planejamento e programação, controle de qualidade, solução de problemas, pedidos de peças, interface com clientes e fornecedores e manutenção de registros. Esse controle local cria uma plataforma natural para melhoria do desempenho da célula (HYER; WEMMERLOV, 2001; SINGH, 1993).

Existem diferentes métodos para a formação de células. Muitos deles consistem em algoritmos de clusterização aplicáveis, em geral, quando já há uma matriz estruturada relacionando componentes e máquinas específicas que fazem parte do roteiro de fabricação das peças. A PFA é um método que trabalha em níveis hierárquicos de análise e simplificação, para então obter a matriz de componente e máquinas, ou seja, a técnica possui etapas que podem ser aplicadas antes da clusterização, simplificando assim o fluxo antes de obter a matriz de componente x máquina.

2.1 COMPLEXIDADE NOS SISTEMAS DE FABRICAÇÃO

Para Sipper e Bulfin (1997) e Jacobs et al. (2011), a dimensão do problema de programação de produção, para um *job shop*, pode ser calculada pela equação $(n!)^m$ considerando n componentes/produtos e m de máquinas utilizadas para processar os componentes. O resultado dessa equação é o número de combinações diferentes de programações.

Para Santos e Araújo Júnior (1999) o tamanho de um problema em Tecnologia de Grupo pode ser medido através da matriz componente x máquina, conforme tabela 1.

Tabela 1 – Classificação do tamanho do problema com base na matriz componente x máquina.

Tamanho do Problema	Número de Máquinas (m)	Número de Peças (n)
Pequeno	$m < 10$	$n < 30$
Médio	$10 \leq m < 30$	$30 \leq n < 60$
Grande	$m \geq 30$	$n \geq 60$
Muito grande	$m > 60$	$n > 120$

Fonte: Santos e Araújo Júnior (1999).

Segundo Mikell (2011) a complexidade de um sistema de manufatura pode ser determinada pelos parâmetros:

- Complexidade do produto (montado): determinada pelo número de componentes do produto, ou seja, quanto mais peças, mais complexo o sistema.
- Complexidade da peça (fabricada): determinada pelo número de etapas de operações necessárias para a produção de tal peça, ou seja, quanto mais operações, mais complexo o sistema.

2.2 TECNOLOGIA DE GRUPO E FORMAÇÃO DE CÉLULA

Selim, Askin e Vakharia (1998) classificam as técnicas de formação de células em: procedimentos descritivos, análise de clusterização (ferramenta estatística que agrupa objetos ou seus atributos em *clusters*), método dos grafos, inteligência artificial e programação

matemática. A PFA, técnica definida por Burbidge (1971), que de algum modo é uma técnica de formação de células, foi uma das primeiras entre os procedimentos descritivos (SELIM; ASKIN; VAKHARIA, 1998).

Com relação ao problema de clusterização, diferentes meta-heurísticas têm emergido para a formação de células, as quais possuem a capacidade de imitar fenômenos naturais ou biológicos para encontrar a solução 'mais adequada', incorporando a teoria da 'sobrevivência do mais apto'. Os algoritmos genéticos (*genetic algorithm*), que é uma das técnicas que pertence às abordagens evolutivas, tem sido a técnica mais adaptável para os pesquisadores quando combinada com outros algoritmos. Tal técnica predomina como solução em manufatura celular (GHOSN ET AL., 2011).

2.3 PFA

A PFA é uma técnica analítica de formação de famílias de produtos para a manufatura celular criada por Burbidge (1971). Os grupos e famílias são obtidos por meio de uma análise progressiva das informações contidas nos roteiros de processo dos componentes. Existem três níveis sucessivos de análise:

- FFA (*Factory Flow Analysis*): analisa o fluxo de processo da fábrica buscando um layout por produto que seja capaz de processar toda a família de produtos. Essa etapa é essencial para que a Análise de Grupo seja realizada de forma eficiente.

- GA (*Group Analysis*): analisa a divisão do maquinário atribuído a cada setor em grupos e a divisão dos componentes em famílias associadas.

- LA (*Line Analysis*): analisa o fluxo de materiais entre as máquinas dentro dos grupos e o planejamento do melhor layout do maquinário.

A FFA é realizada nas nove etapas principais listadas abaixo:

1. Divisão em setores.
2. Alocação do maquinário aos setores e avaliação da frequência de uso.
3. Determinação do número do roteiro do processo (*Product Routing Number, PRN*) de cada peça.
4. Análise das peças com base no PRN.
5. Desenho do fluxograma básico.
6. Determinação de quais produtos são exceções.

7. Eliminação das exceções.
8. Verificação das cargas das máquinas.
9. Especificação dos sistemas de fluxo intersetorial padrão.

O segundo nível de planejamento na PFA é a GA, e é nessa etapa que ocorre a formação de célula propriamente dita. O objetivo desse nível é dividir os componentes alocados a cada setor em famílias e dividir o maquinário alocado a cada setor em grupos, de modo que cada família seja completamente processada por apenas um grupo.

A GA ocorre em oito etapas principais, conforme abaixo:

1. Renumeração das operações nos roteiros de processos.
2. Classificação dos roteiros em pacotes¹.
3. Desenho da matriz de pacotes de componentes e máquina e definição das famílias e grupos.
4. Verificação da carga e alocação do maquinário.
5. Investigação e eliminação das exceções.
6. Especificação dos grupos e famílias.
7. Desenho da rede final do sistema de fluxo.

2.4 APLICAÇÕES DE FFA NA LITERATURA

A FFA é muito pouco explorada na literatura. Em uma busca realizada na base Scopus utilizando a string “Factory Flow Analysis”, apenas 8 trabalhos foram encontrados. Entre eles, estão dois do próprio Burbidge, que detalham a teoria da PFA. Apesar de a ferramenta ter sido negligenciada em pesquisas recentes, ela é muito útil quando é necessário reduzir a complexidade do fluxo de processos de uma fábrica e a partir disso seguir para a etapa de formação de célula (HAMERI, 2011).

O trabalho (HARHALAKIS; MINIS; NAGI, 1989) utiliza um algoritmo para a FFA denominado ICTMM (Inter Class Traffic Minimization Method), para minimizar o tráfego intercelular de peças. Os resultados dessa simulação são comparados com outros dois métodos de FFA, com base em algoritmos.

¹ Aqui optou-se por manter uma terminologia próxima da utilizada pelo autor, que é *packs*.

No trabalho de Arvidh e Irani (1994), é tratada a necessidade de uma solução integrada de subproblemas para a formação de células. Para os autores, a manufatura celular é uma opção viável em muitos sistemas de fabricação, mas existem vários subproblemas no projeto desse sistema, como formação de grupos de máquinas e família de peças, duplicação de máquinas, layout intracelular e intercelular. A presença de peças e máquinas gargalo torna o problema consideravelmente mais complexo, pois, os subproblemas influenciam outros substancialmente. O artigo apresenta um algoritmo alternativo à PFA para resolver esses subproblemas, gerando um conjunto limitado de soluções alternativas viáveis.

Kamrani, Parsaei e Liles (1995) estudam a PFA com o suporte de uma ferramenta computacional, o STORM. Nesse trabalho os autores levantam que mesmo após quase trinta anos desde o surgimento da PFA na literatura, não há software comercialmente disponível para a metodologia. Portanto, o estudo demonstra uma implementação passo a passo das três primeiras fases da PFA usando algoritmos padrão disponíveis no pacote STORM.

Kesavadas e Ernzer (2003) apresentam o projeto de uma fábrica virtual interativa utilizando-se os métodos de formação de células. A interface virtual de fábrica também permite a reatribuição fácil de máquinas e peças, subcontratação de peças gargalo e reorganização de máquinas no mesmo ambiente de projeto, tornando-a uma útil ferramenta industrial.

Dos Santos e De Araújo (2003) apresentam uma implementação computacional da PFA em uma pequena empresa pertencente ao ramo de produtos manufaturados em alumínio. A matriz componente x máquina original desse trabalho compreende em 58 peças processadas e 36 máquinas. A matriz é tratada pelo algoritmo ROC2 para a formação as células resultando em um coeficiente de eficiência de agrupamento de cerca de 39,4%, um resultado considerado baixo pelos autores, não convergindo para uma solução adequada, devido ao grande número de elementos de exceção existentes. Na busca da melhor solução, foram realizadas algumas modificações relacionadas aos roteiros de processo, à configuração de algumas máquinas e à inclusão, troca e exclusão de máquinas. Após essas alterações, a eficiência de agrupamento de alcançou 98,8%. Os autores concluem que a PFA aprimorou os processos produtivos anteriormente empregados na fábrica. O sistema de layout funcional apresentava deficiências de produtividade e flexibilidade como um todo, que poderiam ser evitadas se os resultados indicados pelo estudo da PFA fossem aplicados. O software desenvolvido mostrou-se uma ferramenta capaz de propor soluções para a reorganização do sistema produtivo de pequenas e

médias indústrias metalúrgicas, por meio da PFA, essencial para o emprego da tecnologia de grupo.

O trabalho supracitado apresenta diferentes modificações que foram necessárias para contornar as restrições tecnológicas, e mostra que, muitas vezes, a solução por algoritmos pode não ser viável. É possível avaliar o quanto a simplificação do processo por meio da FFA, anterior à aplicação de tecnologia de grupo e manufatura celular, é importante para sistemas reais que possuem grandes dimensões e restrições tecnológicas. Caso contrário, o algoritmo usado para clusterização pode não chegar em uma solução viável. Além disso, sem a simplificação a formação de células pode exigir duplicação excessiva de máquinas e pode resultar em alta diversidade de roteiros e informações associados a cada célula, capacidade subutilizada, entre outros. Estes fatores mencionados inviabilizam, em termos pragmáticos, a implantação de fato da solução proposta.

Com o objetivo de aumentar o escopo da revisão, uma nova busca com termos mais abrangentes relacionados à PFA foi realizada, a qual revelou os trabalhos comentados a seguir.

Suziç et al. (2012) apresenta um caso de implementação da estratégia de customização em massa em uma empresa de fabricação de móveis. O objetivo do artigo é mostrar uma aplicação da PFA nesse processo de conversão da produção em massa para a customização em massa. São também apresentados os benefícios da sinergia criada usando a tecnologia de grupo e a PFA.

A complexidade do sistema de produção e restrições tecnológicas não são o foco do trabalho, tanto que o número de máquinas nesse sistema pode ser considerado pequeno (10 máquinas), assim como o número de grupos formados após a simplificação (16 grupos).

Hameri (2011) busca mostrar que a PFA pode ser aplicada não apenas a operações de job shop e montagem, mas também a processos de back-office e serviços, e apresentando três casos reais, sem detalhes da aplicação da ferramenta, e a comparação entre eles. O trabalho não apresenta a aplicação das etapas de FFA e GA. Os casos mostram que a PFA reduz as operações que não agregam valor, introduz fluxo ao reduzir gargalos e diminui a variabilidade do processo, o que contribui para o gerenciamento eficiente das operações, demonstrando ser eficiente nos diferentes sistemas.

O autor conclui que a PFA é um método maduro, bem documentado e praticamente comprovado para simplificar sistemas complexos de fluxo de material, especialmente para transformar *layouts* funcionais e orientados a processos tradicionais em orientados a produtos.

Apesar de seu histórico estabelecido, a técnica não é tão amplamente utilizada. Assim, Hameri (2011) propõe mais pesquisas, aplicações e casos para desenvolvê-la, de forma a demonstrar que a PFA possa ser aplicada a contextos diferentes dos ambientes de *job shop* e montagem.

3. MÉTODO

A pesquisa em Gestão de Operações baseada em modelos pode ser classificada em pesquisa axiomática e pesquisa empírica. Na pesquisa empírica baseada em modelo a principal preocupação do pesquisador é garantir que exista um modelo adequado entre observações e ações na realidade e o modelo feito dessa realidade. Esse tipo de pesquisa também pode ser descritivo e prescritivo. A pesquisa empírica descritiva está interessada principalmente em criar um modelo que descreva adequadamente as relações causais que possam existir na realidade, o que leva à compreensão dos processos em andamento. A pesquisa quantitativa empírica prescritiva está interessada principalmente no desenvolvimento de políticas, estratégias e ações para melhorar a situação atual. Esta área de pesquisa é muito pequena (BERTRAND, FRANSOO; 2016).

Esse trabalho se caracteriza como uma modelagem empírica descritiva, quando baseado na classificação de Meredith et al. (1989) e Morábito e Pureza (2018). A modelagem será feita através da aplicação da técnica de *Production Flow Analysis* (Burbidge, 1971) ao sistema de produção da empresa em questão, com o objetivo de proposição de soluções que possam ser replicadas para a realidade. O modelo também será útil para confirmar teorias definidas na literatura com relação à tecnologia de grupo e manufatura celular e ou para refiná-las.

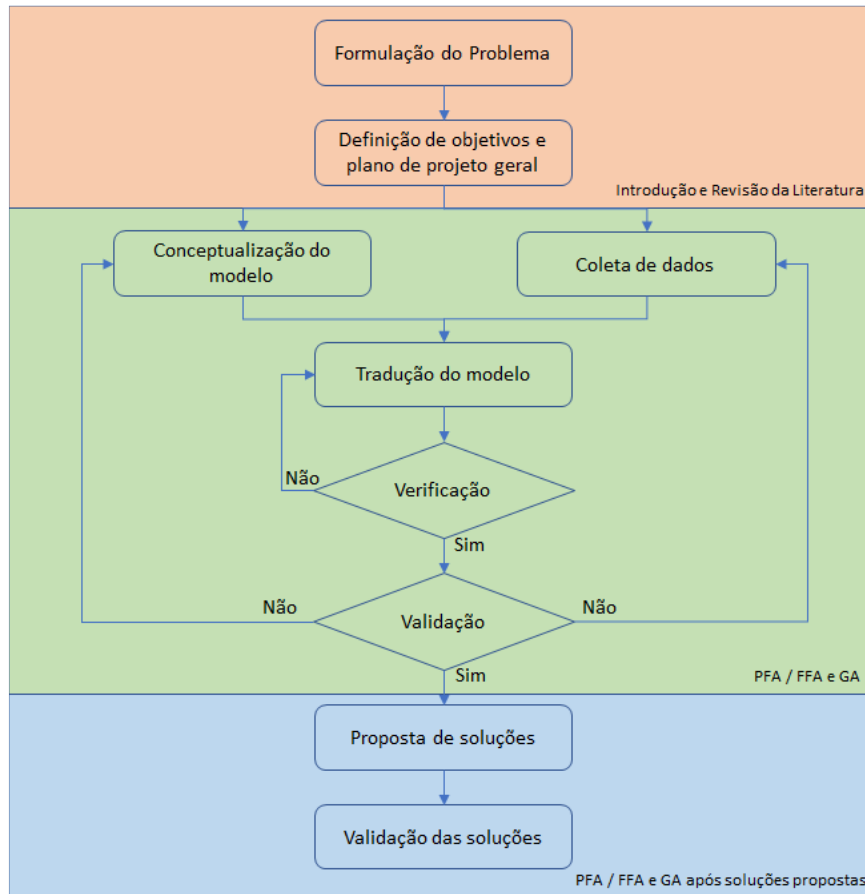
Figura 1 – Framework de métodos de pesquisa.

		NATURAL ← → ARTIFICIAL		
		DIRECT OBSERVATION OF OBJECT REALITY	PEOPLE'S PERCEPTIONS OF OBJECT REALITY	ARTIFICIAL RECONSTRUCTION OF OBJECT REALITY
RATIONAL	AXIOMATIC			<ul style="list-style-type: none"> • REASON/LOGIC/THEOREMS • NORMATIVE MODELING • DESCRIPTIVE MODELING
	LOGICAL POSITIVIST/EMPIRICIST	<ul style="list-style-type: none"> • FIELD STUDIES • FIELD EXPERIMENTS 	<ul style="list-style-type: none"> • STRUCTURED INTERVIEWING • SURVEY RESEARCH 	<ul style="list-style-type: none"> • PROTOTYPING • PHYSICAL MODELING • LABORATORY EXPERIMENTATION • SIMULATION
	INTERPRETIVE	<ul style="list-style-type: none"> • ACTION RESEARCH • CASE STUDIES 	<ul style="list-style-type: none"> • HISTORICAL ANALYSIS • DELPHI • INTENSIVE INTERVIEWING • EXPERT PANELS • FUTURES/SCENARIOS 	<ul style="list-style-type: none"> • CONCEPTUAL MODELING • HERMENEUTICS
	CRITICAL THEORY		<ul style="list-style-type: none"> • INTROSPECTIVE REFLECTION 	
EXISTENTIAL				

Fonte: Meredith et al. (1989).

Os passos da modelagem seguiram as etapas definidas por Banks (1998) em conjunto com as etapas definidas por Taha (2008).

Figura 2 – Etapas da pesquisa.



Fonte: Adaptado de Banks (1998) e Taha (2008).

A coleta de dados, que contemplou os produtos ativos na empresa em questão, roteiros de processos, tipos e quantidades de máquinas, plano de demanda e outros detalhes, foi feita através de relatórios oficiais, observação direta e entrevistas com os gestores das áreas envolvidas, com verificação e validação desses dados por um segundo entrevistado do mesmo setor. As soluções propostas foram validadas pelos gestores de cada setor e pela direção da empresa.

Para levantamento de dados, como demanda de clientes, foram necessárias entrevistas com o gerente responsável pelo departamento de vendas, que é quem detém as informações de previsões de demanda dos clientes, o qual utiliza um sistema ERP para consolidação dos dados. Já com relação aos dados de processos, como roteiros, tipos de produtos, máquinas, entre outros

foram necessárias entrevistas com os gerentes de engenharia de processo e o gerente de PCP, os quais possuem algumas dessas informações no ERP de processo e outras no plano de produção. Algumas visitas para observação das movimentações e fluxo de material durante a fabricação de camisas e hastes também foram realizadas. A triangulação foi feita confrontando-se os dados documentais com as entrevistas feitas com mais de um respondente.

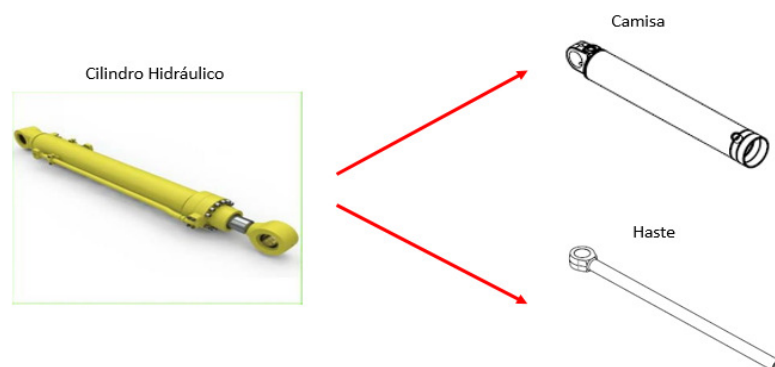
Após a coleta de dados, a aplicação da FFA e GA foi realizada conforme as etapas apresentadas na seção 2. Durante a aplicação, os envolvidos com o problema, na empresa, foram contatados para validar etapas e fornecer informações adicionais necessárias.

4. DESENVOLVIMENTO

Para o desenvolvimento e modelagem da PFA, foi selecionada uma empresa multinacional fabricante de cilindros hidráulicos, a qual é fornecedora das grandes montadoras de equipamentos de construção, agrícolas e de empilhadeiras. A empresa é líder mundial no segmento e possui unidades na Europa, Ásia e Américas. A unidade brasileira é de médio porte e apresenta as seguintes características em seu ambiente de produção:

- Alta variedade de produtos e médio a baixo volume de produção.
- Alta diferenciação de especificações entre os produtos, principalmente relacionadas a peso e dimensão.
- Principais componentes de um cilindro hidráulico (camisa e haste) fabricados internamente. Outros componentes comprados.
- Há basicamente dois grupos de máquinas, um para a fabricação do componente camisa e outro para a fabricação do componente haste. Embora a empresa denomine estes grupos de “células” ou “linhas”, todas as hastes, por exemplo, compartilham das mesmas máquinas, ou seja, não há máquinas dedicadas a famílias de componentes, e o fluxo de fabricação é bastante complexo e não linear, conforme será apresentado. Não se utiliza tecnologia de grupo, há diversos roteiros de fabricação diferentes e há necessidade de alguns componentes saírem de sua “célula” para executar operações em equipamentos fora da “célula”, devido à particularidade de cada cilindro.
- Após a fabricação, há processos comuns de lavagem dos componentes, montagem, teste hidráulico, pintura e embalagem.

Figura 3 – Principais componentes do cilindro hidráulico.



Fonte: Autor (2020).

Os dados utilizados para o trabalho são referentes à demanda prevista, baseada em relatórios dos clientes no período do ano fiscal 2020 (Abr/19 ~ Mar/20). O total de cilindros a serem produzidos nesse período era de 44.962 e esses cilindros estão distribuídos em quantidade de produtos conforme tabela 2:

Tabela 2 – Volumes de cilindros por variações de produtos.

Volume de Prod. Anual (unidades) Previsto Ano Fiscal 2020	Qtde de Produtos
2000 ~ 3000	2
1000 ~ 1999	10
999 ~ 500	8
499 ~ 100	39
99 ~ 10	36
9 ~ 1	2

Fonte: Autor (2020).

Os produtos são agrupados, por seu tipo de fabricação, nas seguintes categorias:

- Cilindros de agricultura (Agri): de menor porte, aplicação menos agressiva com relação à esforço (37 produtos).
- Cilindros de construção (CE): de maior porte, e aplicação de maior esforço (49 produtos).
- Cilindros de empilhadeira (MH): são longos com relação a comprimento, mas de diâmetros menores, e aplicação de pouco esforço (11 produtos).

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Para melhor caracterização e entendimento do problema de fluxo e de programação, foi realizada uma entrevista semiestruturada com o gerente de produção e PCP da empresa. Segundo o respondente, a programação de produção de médio e curto prazo se baseia na previsão de demanda dos clientes que é preparada, revisada e inserida no ERP pela área Comercial da empresa. Com a previsão de demanda disponível, o time de PCP realiza a programação diária de montagem de 30 dias a frente. Do segundo mês ao sexto à frente, é realizado um planejamento por semana. Essa programação é chamada de PMP (programa

mestre de produção) e é revisado semanalmente. Esse programa é inserido no ERP e o sistema processa o MRP, de forma quinzenal, para geração de necessidade de matérias primas.

A programação de fábrica não é realizada através do ERP, mas por planilhas, com base no PMP, conforme descrito a seguir:

- Programação de corte de matéria prima: Como existe um setor dedicado apenas a esse processo, sua programação é realizada separadamente. Com base na planilha que fornece os *leadtimes* de cada produto, um sequenciamento de corte de matéria prima é criado.
- Programação de fabricação de camisa e haste: é realizada com base no processo gargalo, porém, considerando as necessidades do dia seguinte do setor de Montagem e as prioridades dos itens que possuem processamento em fornecedores externos. Esse procedimento é realizado diariamente no início do dia e há uma revisão no meio do período do turno.

Alguns pontos que dificultam o processo de planejamento foram relatados pelo entrevistado:

- Informações de monitoramento de fabricação dos lotes com pouca precisão, uma vez que não há apontamento de peças por operação. O monitoramento depende apenas das informações dos líderes de setor e dos analistas de PCP.
- Programação sujeita a erros, já que dependem exclusivamente de planilhas preparadas pelos analistas de PCP. A existência de múltiplos roteiros, múltiplas máquinas, diferentes clientes e variedade significativa de produtos dificulta consideravelmente esse trabalho.
- Diferentes formas de gerenciamento da demanda diária pelos clientes. Como exemplo, há clientes que trabalham com Kanban e, por falta de disponibilidade de embalagens (dos clientes), as coletas não ocorrem conforme o planejado.

O nível de reprogramação é muito alto, sendo de frequência diária para vários clientes, e isso é motivo de reclamações constantes do setor de logística e dos clientes externos. Entre os causadores de necessidade de reprogramação de entrega, podem ser destacados: erros de planejamento, falta de matéria prima, interferência do cliente, manutenção e problemas de qualidade.

Há 32 roteiros de fabricação distintos para os 194 componentes fabricados, sendo 97 camisas e 97 hastes. Na planta de fabricação desses componentes, há 41 máquinas distintas.

Considerando a classificação apresentada por Santos e Araújo Júnior (1999) na tabela 1 (seção 2.1), o problema de formação de célula para esse sistema de produção (dados na Tabela 3) pode ser considerado “muito grande” para o número de componentes (produtos) e “grande” para o número de máquinas.

Tabela 3 – Diversificação da fabricação de camisa e haste.

Características	Quantidade
Componentes	194
Roteiros	32
Centros de Trabalho	36
Máquinas	41

Fonte: Autor (2020).

Utilizando o cálculo de dimensão do problema de programação de produção mostrado na seção 2.1, haveria $(194!)^6$ combinações de programação, o que demonstra tratar-se de um problema de alta complexidade e dimensão. Mesmo se considerar a programação da produção por número de roteiros, a quantidade de combinações seria de $(32!)^6$, ainda assim muito alta.

Como o problema de programação tem grandes dimensões, a programação via planilha às vezes torna-se inviável. Em muitos casos, a decisão é tomada com base na visão da liderança de fábrica no mesmo momento, com base em máquinas que estão com baixa utilização. Esta visão local e subjetiva pode ser bastante tendenciosa e deletéria para atingir objetivos de desempenho como um atravessamento rápido das ordens no chão de fábrica e diminuição de atrasos. Não há nenhum tipo de otimização da programação da produção, o que não garante uma boa utilização dos recursos nem o atingimento de outros objetivos de desempenho.

O sistema de manufatura estudado ainda apresenta algumas especificidades que adicionam complexidade ao problema como, por exemplo, várias máquinas paralelas para uma dada operação do roteiro de fabricação e também algumas máquinas que são suficientemente flexíveis/universais para executarem mais de uma operação no roteiro. Estas características tecnológicas do problema estudado podem ser observadas na Tabela 6 e 7 da subseção 4.2., e se aplicam aos tornos CNCs (CNC-XX), às máquinas de soldagem manual (MSM-XX), aos

robôs de solda (RSM-XX) e aos centros de usinagem (CUV-XX) mostradas na tabela supracitada.

Na tentativa de avaliar uma possível clusterização desse sistema, a matriz componente x máquina foi desenhada e nela foi aplicado o algoritmo ROC. Ao analisar o resultado, é possível observar muitas ovelhas negras (*black sheeps*), conforme mostrado nas tabelas 4 e 5. Em outras palavras, o problema inicial não apresentou solução viável.

Tabela 4 – Matriz componente x máquina da camisa após a clusterização.

Roteiros de Produção	SRD-01	MSM-01	CUV-03	CNC-24	FRL-01	MSM-06	MSM-10	CNC-23	BSK-01	CNC-36	RSM-03	SRR-06	CNC-33	CNC-35	RSM-02	CUV-05	SRR-07	DET-01	BSK-02	CUV-02	BRV-09	MSM-09	CUH-06
9	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
6	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0
8	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
12	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0

Fonte: Autor (2020).

Tabela 5 – Matriz componente x máquina da haste após a clusterização.

Roteiros de Produção	SRD-01	CNC-31	Fornecedor cromatização	SFW-01	RCC-02	PHD-02	IPT	POL-01	TP-01	CUH-06	CNC-25	CNC-37	MSM-07	CUV-03	CUV-02	Fornecedor cromatização3	CNC-34	RCC-01	Fornecedor máquina por Indúgio 1	CNC-20	CUV-05	Fornecedor Furação Profunda	SRR-06	SRR-07	Fornecedor máquina por Indúgio 2	SFW-02	POL-02	Fornecedor retífica em acabamento 1	Fornecedor retífica em acabamento 2	
19	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
2	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
14	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autor (2020).

Para medir a eficiência da clusterização, Dos Santos e De Araújo (2003) recomendam calcular o coeficiente de eficiência do agrupamento que é dado pela equação

$$Gc = 100 \left(1 - \frac{e_p}{n_z} \right) \%,$$

sendo e_p o número de peças exceções e n_z o número de entradas não nulas nos blocos diagonais da matriz. Utilizando esse cálculo para as matrizes 4 e 5 os valores encontrados são de 77% e 82% para a fabricação de camisa e haste respectivamente.

Alternativamente, a clusterização foi aplicada utilizando as operações de fabricação ao invés de máquinas, nas colunas da matriz. Os resultados dos coeficientes não foram satisfatórios, sendo de 70% e 64,8%, respectivamente para camisa e haste.

Como apresentado, essas duas tentativas de clusterização não obtiveram sucesso devido à complexidade e características singulares desse sistema. Portanto, se faz necessária a simplificação desse sistema de produção para poder viabilizar a formação de células.

4.2 FFA

Seguindo a metodologia de Burbidge (1971), a FFA é desenvolvida para buscar a simplificação do fluxo na fábrica entre os setores, antes de se fazer o agrupamento das peças em famílias e das máquinas em células.

O levantamento dos roteiros de processos dos produtos é apresentado conforme tabelas 6 e 7. As letras em cada coluna indicam a sequência de operações em cada roteiro.

Tabela 6 – Roteiros de Processo de Fabricação de Camisa.

Camisa																		
Máquina	SRD-01 SRR-06 SRR-07	CNC-35 CNC-36 CNC-23 CNC-33	CNC-35 CNC-36	CNC-35 CNC-36 CNC-23 CNC-33	BSK-01 BSK-02 BRV-09	FRL-01 CUV-02 CUV-03 CUV-05	RSM-02 RSM-03	M5M-01 M5M-06 M5M-10	M5M-06 M5M-10	RSM-02	CNC-35	M5M-01 M5M-06 M5M-10 M5M-09	CNC-35 CNC-36 CNC-23 CNC-33	DET-01	FRL-01 CUV-02 CUV-03 CUV-05	M5M-06 M5M-10	M5M-06 M5M-10	CNC-36
Processo / Roteiro	Corte	Usinagem Completa / Final	Faceamento e usinagem do chanfro de solda lado da flange e	Faceamento e usinagem do chanfro do fundo	Skiving	Furação	Solda de Fundo Robô	Solda de Fundo Manual	Solda de Tubulação	Solda de Flange Robô	Matchboring	Solda de Bocal	Torneamento de rosca da camisa	Expansão do tubo	Mandrilhamento	Solda de Flange Manual	Solda do Reforço	Usinagem do externo
Código	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	1	2			3	4	5		6									
2	1		2	6	5		7			3	4							
3	1	2			5	3	6					4						
4	1			2	6	4	8					5	7	3				
5	1			2	5	3		7				4	6					
6	1			2	5	3		7				4	6		8			
7	1			2	3		5						4					
8	1			2		3						4	5					
9	1			2		3		6				4	5		7			
10	1	2				3	4											
11	1			2		3		5				4						
12	1	8	2		5	9		10			4	11				3	7	6

Fonte: Autor (2020).

Tabela 7 – Roteiros de Processo de Fabricação de Haste.

Haste																		
Máquina	SRD-01 / SRR-06 SRR-07	TPI-01	Fornecedor têmpera por indução 1/2	PHD-02	RCC-01 RCC-02	CNC-37 / CNC-34 CNC-31 / CNC-25 CNC-20	CUV-02 / CUV-03 CUV-05	RCC-01 RCC-02	Fornecedor retífica em acabamento 1/2	POL-01 POL-02	Fornecedor cromação 1/2/3	SFW-01 SFW-02	MSM-07	CNC-20 CNC-37	CUV-02 / CUV- 03 CUV-05	POL-02	CNC-20 CNC-34	Fornecedor de furação profunda
Processo / Roteiro	Corte	Têmpera por indução	Têmpera por indução (Externo)	Endreiteame nto	Retífica em Desbaste	Usinagem Final	Fresamento / Furação	Retífica em Acabament o	Retífica em Acabament o (externo)	Pré Polimento	Cromação (externo)	Solda por Fricção do Olhal	Solda Manual do Olhal / Acessórios	Usinagem de remoção do Flash	Madrilhame nto do Olhal	Pós Polimento	Usinagem Desbaste	Furação Profunda (Externo)
Código	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	1	2		3	4	5		6		7	8	9						
2	1		2	3	4	5		6		10	11	7		8	9	12		
3	1		2	3	4	5			9	10	11	6		7	8	12		
4	1					2					5		3		4			
5	1					2												
6	1					2	3				4							
7	1					2						3			4			
8	1					2							3		4			
9	1	2		3	4	5		6		7	8	9			10			
10	1					2						3			4			
11		2				1					4				3			
12	1					2					3							
13	1					2	3											
14	1					3	4	5		6	7						2	
15	1					2							3					
16	1					2						3		4				
17	1	2		3	4	5		6		7	8		9		10			
18	1		2	3	4	5		6		7	8	9	11	10				
19	1				2	3		4			5							
20	1					3	4											2

Fonte: Autor (2020).

A partir dos códigos (letras) para cada operação, obtém-se o *Product Routing Number* PRN para cada roteiro (ex. roteiro 1 da camisa: ABEFGI). O volume de cada PRN pode ser visto na tabela 8:

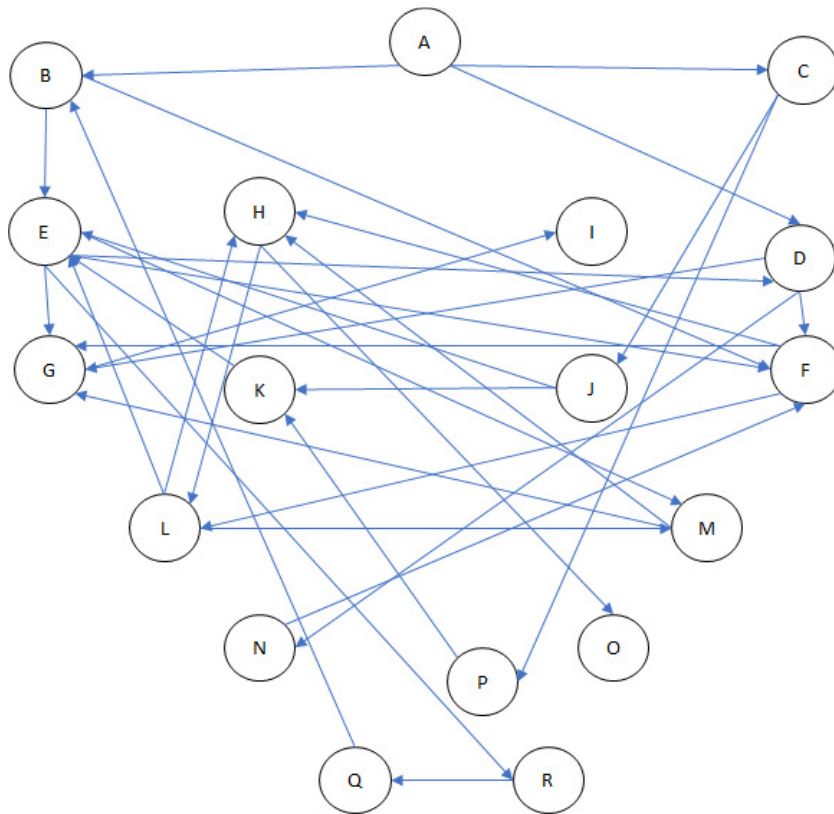
Tabela 8 – Volume de produção (em unidades) para cada PRN.

Roteiro	Camisas		Hastes	
	Qtde	%	Qtde	%
1	11369	27,9%	12403	30,5%
2	1750	4,3%	1017	2,5%
3	1564	3,8%	733	1,8%
4	1751	4,3%	401	1,0%
5	10005	24,6%	6544	16,1%
6	3928	9,7%	3173	7,8%
7	4605	11,3%	996	2,4%
8	1426	3,5%	3039	7,5%
9	2760	6,8%	3000	7,4%
10	600	1,5%	2586	6,4%
11	768	1,9%	1160	2,9%
12	170	0,4%	1168	2,9%
13			1444	3,5%
14			526	1,3%
15			743	1,8%
16			863	2,1%
17			355	0,9%
18			175	0,4%
19			170	0,4%
20			200	0,5%
Total	40696		40696	

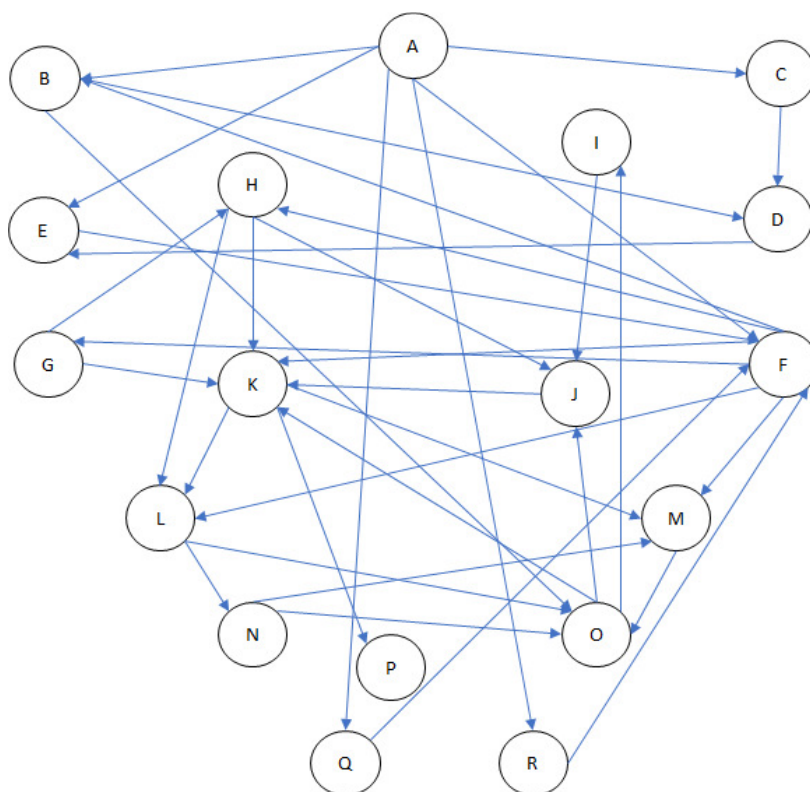
Fonte: Autor (2020).

As figuras 5 e 6 mostram os fluxogramas de produção de camisa e haste, sendo possível verificar um fluxo turbulento e complexo:

Figura 4 – Fluxograma de produção de camisa.



Fonte: Autor (2020).

Figura 5 – Fluxograma de produção de haste.

Fonte: Autor (2020).

O gráfico De/Para apresenta a intensidade ou frequência de transferências entre os processos, para os volumes de produção de camisa e haste, conforme tabela 9 e 10:

Tabela 9 – De/Para para a produção de camisas.

		PARA																	
Processo N°	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	
D E	A	13533	1920	25243															
	B				11369	2334													
	C									1750							170		
	D						18887	1750							1751				
	E				1750		11369	1564						20289					170
	F							11969	170				22202						
	G									11369									
	H												170		12765				
	I																		
	J											1750							
	K					1920													
	L					17248			768					4186					
	M							6356	16693										
	N						1751												
	O																		
	P											170							
	Q		2																
	R																		170

Fonte: Autor (2020).

As relações DE-PARA que ocorrem com frequência alta e média estão marcadas em amarelo e verde, respectivamente. No caso das camisas, por exemplo, a sequência de processos A – D – F – L – E – M – H mostra alta frequência.

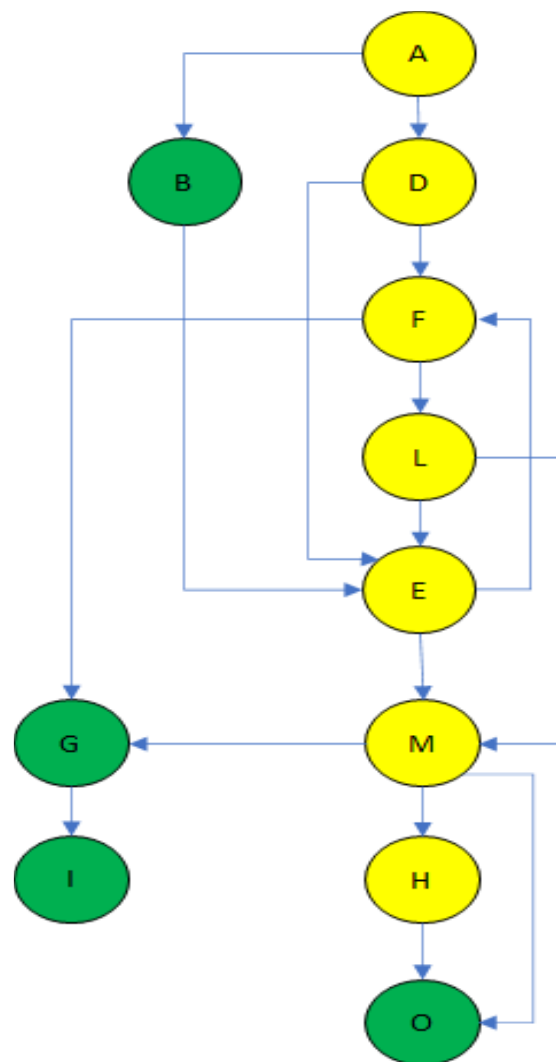
Tabela 10 – De/Para para a produção de hastes.

		PARA																	
	Processo N°	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
	D E	A		15758	1925		170	20957											526
B					15758											1160			
C					1925														
D						17683													
E							17853												
F			1160						5343	17120			1168	5178	4183				
G										526			5173						
H												16459	170	1017					
I												733							
J													18209						
K														15578	355			1750	
L																2788	6582		
M																	3795		
N																175	1750		
O											733	1017							
P																			
Q								526											
R								200											

Fonte: Autor (2020).

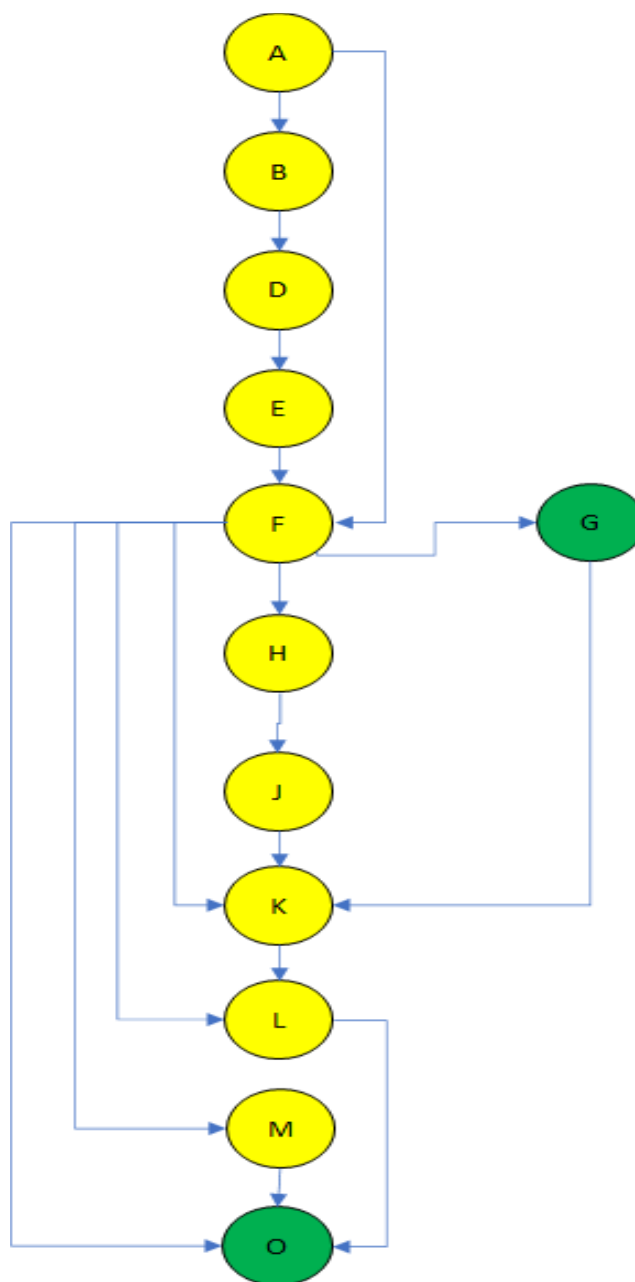
Com o conhecimento das maiores relações DE-PARA entre as operações, os fluxogramas simplificados, considerando os PRNs significativos (aqueles que somados representam 80% dos produtos), são apresentados nas tabelas 11 e 12. Nessa etapa é redesenhado o fluxograma de produção da haste e da camisa, porém, constando apenas os roteiros considerados significativos.

Figura 6 – Fluxograma simplificado de produção de camisa considerando 80% dos produtos.



Fonte: Autor (2020).

Figura 7 – Fluxograma simplificado de produção de haste considerando 80% dos produtos.



Fonte: Autor (2020).

Os roteiros destacados em amarelo nas tabelas 11 e 12 se enquadram no fluxograma simplificado, os outros são considerados exceções. No caso dos roteiros da camisa, o roteiro 1, apesar de ser o roteiro com maior volume, é considerado exceção, pois ele apresenta um retrocesso no fluxo de material.

Tabela 11 – Roteiros de camisas ordenados de forma decrescente, com relação ao volume por roteiro.

Roteiros acrescentados	PRN	% volume acumulado
1	ABEFGI	27,9%
5	ADFLEMH	52,5%
7	ADEMG	63,8%
6	ADFLEMHO	73,5%
9	ADFLMO	80,3%
4	ADNFLEMG	84,6%
2	ACJKEDG	88,9%
3	ABFLEG	92,7%
8	ADFLM	96,2%
11	ADFLH	98,1%
10	ABFG	99,6%
12	ACPKERQBFHL	100,0%

Fonte: Autor (2020).

Tabela 12 – Roteiros de hastes ordenados de forma decrescente, com relação ao volume por roteiro.

Roteiros acrescentados	PRN	% volume acumulado
1	ABDEFHJKL	30,5%
5	AF	46,6%
6	AFGK	54,4%
8	AFMO	61,8%
9	ABDEFHJKLO	69,2%
10	AFLO	75,5%
13	AFG	79,1%
12	AFK	82,0%
11	FBOL	84,8%
2	ACDEFHLNOJKP	87,3%
7	AFLO	89,8%
16	AFLN	91,9%
15	AFM	93,7%
3	ACDEFLNOIJKP	95,5%
14	AQFGHJK	96,8%
4	AFMOK	97,8%
17	ABDEFHJKMO	98,7%
20	ARFG	99,2%
18	ACDEFHJKLNM	99,6%
19	AEFHK	100,0%

Fonte: Autor (2020).

Nas tabelas 13 e 14 são apresentados os gráficos *Home/Away* utilizados para buscar enquadrar os PRNs que estão fora do fluxograma simplificado por meio de ajuste da operação, eliminação ou troca por uma operação que existe no fluxograma simplificado. Essas propostas de mudanças foram extraídas através de sessões de *brainstorming* com o time de Engenharia de Processo da empresa.

Para fabricação de camisas:

- Roteiro 1: Inverter as operações *skiving* e furação, pois não há restrição quanto à essa alteração.
- Roteiro 4: Alterar a matéria prima do tubo para uma com maior espessura, podendo-se assim obter o formato desejado por meio de usinagem, não necessitando da expansão, que além de diversificar o fluxo, é um processo com alto índice de não-conformidades.

- Roteiros 2 e 12: Sem possibilidade de enquadrá-los no fluxograma simplificado. Deve-se avaliar a viabilidade de produção dos itens desses roteiros em uma célula dedicada a eles, em uma análise posterior.

Tabela 13 – Gráfico *Home/Away* da camisa.

Roteiro	PRN	No de Itens	Depto Home	Depto Away	Operação Away	Transf.	PRN Revisado
1	ABEFGI	9	AB e GI	EF	Skiving e Furação	Inverter as operações	ABFEGI
4	ADNFLEMG	4	AD e FLEMG	N	Expansão do tubo	Alteração de matéria prima do tubo, eliminando a operação N	ADFLEMG
2	ACJKEDG	26	A e G	CJKED		Não é possível alterar	
12	ACPKERQBFHL	2	A, F e L	CPKERQ B e HL		Não é possível alterar	

Fonte: Autor (2020).

Para fabricação de hastes:

- Roteiros 2, 3 e 18: Alterar a matéria prima para barra cromada, a qual já contempla as operações de “têmpera por indução” e “cromação”.
- Roteiro 16: Desenvolver a operação “remoção de flash” na própria máquina de solda por fricção, tornando-os apenas uma operação.
- Roteiro 14: Desenvolver a operação “usinagem em desbaste” junto com a operação “usinagem final”, tornando-as uma única operação.
- Roteiro 4: Inverter as operações exceção, sendo possível através da implementação de dispositivos simples.
- Roteiros 11 e 20: Sem possibilidade de enquadrá-los no fluxograma simplificado. Deve-se avaliar a viabilidade de comprá-los já em condição de acabados, sendo eles apenas 3 hastes.

Após o ajuste dos roteiros, o número de roteiros diferentes foi reduzido de 12 para 10 roteiros, no caso de camisas, e de 20 para 16 roteiros, no caso de hastes, diminuindo assim a complexidade do sistema.

Tabela 14 – Gráfico *Home/Away* da haste.

Roteiro	PRN	No de Itens	Depto Home	Depto Away	Operação Away	Transferência	PRN Revisado
11	FBOL	1		FBOL		Não é possível alterar	
2	ACDEFHLNOJKP	14	A, DEFHL	C, NOJKP	Têmpera por indução externa, usinagem remoção de flash, mandrilhamento do olhal, pré polimento, cromação e pós polimento	Alterar matéria prima para barra cromada	AFLO
16	AFLN	2	AFL	N	Usinagem remoção de flash	Desenvolver remoção de flash no processo de Solda por Fricção	AFL
3	ACDEFLNOIJKP	12	A, DEFL	C, NOIJKP	Têmpera por indução externa, usinagem remoção de flash, mandrilhamento do olhal, retífica em acabamento externa, pré polimento, cromação e pós polimento	Alterar matéria prima para barra cromada	AFLO
14	AQFGHJK	3	A e FGHIK	Q	Usinagem em desbaste	Desenvolver programa para usinagem Q e F em mesma operação / máquina	AFGHJK
4	AFMOK	1	AFM	OK	Mandrilhamento do olhal e cromação	Inverter os processos	AFMOK
20	ARFG	2	A e FG	R	Furação Profunda (Externo)	Não é possível alterar	
18	ACDEFHJKLNM	1	A, DEFHIK L e M	C e N	Têmpera por indução externa e usinagem remoção de flash	Alterar matéria prima para barra cromada	AFLM

Fonte: Autor (2020).

O passo “verificação da carga das máquinas” do FFA não foi realizado, pois busca-se a divisão desse sistema em várias células com as máquinas existentes, portanto, a verificação de carga é mais efetiva na etapa da GA, após a divisão dos grupos de máquinas.

4.3 GA

Com os roteiros dos fluxogramas simplificados definidos, a matriz componente x máquina pode ser desenhada, conforme tabelas 15 e 16. Nas posições da matriz em que há 2 vezes o “X”, indica-se que determinada máquina executa dois processos diferentes

do respectivo pacote. A alocação de cada roteiro em certas máquinas foi definida com base na operação, capacidade disponível e dimensão do produto que a máquina comporta, ou seja, foi feita com base em restrições tecnológicas. Conforme já mencionado, as características desse sistema de produção já mencionadas impõem restrições qualitativas ao problema que dificultam a formação de células, pois o problema tradicional de agrupamento considera máquinas com especificidade funcional e não máquinas mais flexíveis.

As matrizes máquina x componente antes da simplificação dos fluxos e desconsiderando as restrições tecnológicas estão apresentadas nos apêndices C, D e E. Ao compará-las com as matrizes obtidas após a simplificação e após a pré-análise das restrições tecnológicas (tabelas 15 e 16), observa-se a redução de complexidade do sistema, tornando viável a aplicação dos algoritmos de clusterização.

Tabela 15 – Matriz componente x máquina da camisa.

Roteiros de Produção (N° Sequencial)	SRD-01	SRR-06	SRR-07	CNC-23	CNC-24	CNC-33	CNC-35	CNC-36	BSK-01	BSK-02	BRV-09	FRL-01	CUV-02	CUV-03	CUV-05	CUH-06	RSM-02	RSM-03	MSM-01	MSM-06	MSM-09	MSM-10	DET-01
1 (1)	X	X				X		X	X			X						X		X		X	
3 (2)			X			X		X		X		X						X				X	
4 (3)		X					X	X	X			X						X	X				X
5 (4)			X				X	X	X			X							X	X			
6 (5)	X			XX		XX			X		X		XX	X	X				XX		X	X	
7 (6)	X						XX		X								X						
8 (7)	X				XX									X					X				
9 (8)	X			X	X								X	X					X	X			
10 (9)	X						X								X		X						
11 (10)	X			X								X								X		X	

Fonte: Autor (2020).

Tabela 16 – Matriz componente x máquina da haste.

Roteiros de Produção (Nº Sequencial)	SRD-01	SRR-06	SRR-07	TPI-01	Sadalla	Inductotherm	PHD-02	RCC-01	RCC-02	CNC-20	CNC-25	CNC-31	CNC-34	CNC-37	CUV-02	CUV-03	CUV-05	POL-01	POL-02	RGT	Usimak	IPT	Policrom	São Judas	SFW-01	SFW-02	MSM-07	CUH-06	Fornecedor Furacão Profunda			
1 (1)	X			X		X	X	X	XX				X	X				X							X							
2 (2)		X	X		X		X		XX	X				XX			X		XX								X					
3 (3)		X	X		X		X		X	X				XX			X		XX	X	X	X				X						
4 (4)	X											X			X									X				X				
5 (5)	X										X	X		X																		
6 (6)	X											X	X			X							X									
8 (7)	X										X	X				X											X					
9 (8)	X			X			X		XX			X						X					X		X				X			
12 (9)	X											X											X									
13 (10)	X												X		X																	
14 (11)		X	X						X	X			XX				X	X						X								
15 (12)	X											X																X				
16 (13)	X									X				X												X						
17 (14)		X	X	X			X		XX					X			X	X					X					X				
18 (15)		X	X		X		X		XX				X	X				X					X				X	X				
19 (16)	X								XX			X											X									

Fonte: Autor (2020).

O algoritmo utilizado para agrupamento foi o ROC (*Rank Order Clustering*). Esse algoritmo bem conhecido considera cada linha como um número escrito em base binária, e ordena as linhas em ordem decrescente de cima para baixo e as colunas em ordem decrescente da esquerda para a direita. O algoritmo continua realizando as ordenações de linha e coluna até que a matriz não seja mais alterada. Como resultado, tem-se a uma estrutura bloco diagonal, caso não haja muitas exceções. Este algoritmo foi escolhido por sua simplicidade. O objetivo aqui não é a otimização de um critério específico, mas sim, gerar uma solução inicial para que as restrições tecnológicas sejam analisadas e tratadas na sequência, permitindo uma solução viável.

A aplicação do algoritmo ROC nas matrizes componente x máquina após FFA não apresenta uma solução viável. A tentativa de formar grupos através dos blocos diagonais na matriz mostra que ainda há muitas ovelhas negras (tabela 17 e 18).

Tabela 17 – Matriz componente x máquina da camisa após a clusterização.

Roteiros de Produção	SRD-01	MSM-06	MSM-10	FRL-01	BSK-01	CNC-33	CNC-36	RSM-03	SRR-06	CNC-23	MSM-01	CUV-03	CUV-02	CNC-24	CUV-05	BRY-09	MSM-09	CNC-35	RSM-02	SRR-07	BSK-02	DEF-01	CUH-06
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
7	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0
5	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
3	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
4	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0

Fonte: Autor (2020).

Tabela 18 – Matriz componente x máquina da haste após a clusterização.

Roteiros de Produção	SRD-01	RCC-02	SFW-01	PHD-02	Fornecedor cromação 1	POL-01	TPH-01	CNC-37	CNC-34	RCC-01	Fornecedor tempo por indústria 1	CNC-31	CUH-06	Fornecedor cromação 2	CNC-20	CNC-25	CUV-03	CUV-02	MSM-07	Fornecedor cromação 3	SRR-06	SRR-07	CUV-05	Fornecedor tempo por indústria 2	SFW-02	POL-02	Fornecedor tempo acabamento 1	Fornecedor refilha em acabamento 2	Fornecedor Finagem Profunda	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
18	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
3	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
14	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autor (2020).

Assim, as matrizes foram definidas com operações dos processos de fabricação no lugar de máquinas (tabelas 19 e 20). A aplicação do algoritmo ROC nessas matrizes apresenta melhor formação de grupos.

Tabela 19 – Matriz componente x máquina (considerando processos de fabricação) da camisa após a clusterização.

Roteiros de Produção	Corte	Furação	Solda de Fundo Robô	Usinagem Completa / Final	Skiving	Solda de Tubulação	Solda de Bocal	Faceamento e usinagem do chanfro do fundo	Torneamento de rosca da camisa	Solda de Fundo Manual	Mandrilhamento
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0
10	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0
6	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1
5	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0
9	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1
8	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0
11	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0
7	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0

Fonte: Autor (2020).

Tabela 20 – Matriz componente x máquina (considerando processos de fabricação) da haste após a clusterização.

Roteiros de Produção	Corte	Usinagem Final	Cromação (externo)	Retífica em Acabamento	Retífica em Desbaste	Pré Polimento	Têmpera por Indução	Endireitamento	Solda por Fricção do Olhal	Mandrilhamento do Olhal	Solda Manual do Olhal / Acessórios	Fresamento / Furação
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
17	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
19	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
14	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1
4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
6	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
12	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
3	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
18	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
16	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
8	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
15	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
13	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autor (2020).

Dois grupos são identificados para a fabricação de camisa e dois grupos para a fabricação de hastes, representados por cores. Para a matriz da camisa, observa-se que quase todos os roteiros possuem os processos de “Corte” e “Furação”, sendo que o processo de “Corte” será tratado como um centro de trabalho que distribui componentes para todas as células e o processo de “Furação” fará parte das células, caso haja número de máquinas suficientes para que isso seja possível. O mesmo também é aplicável para os processos de “Corte” e “Usinagem Final” para a matriz da haste. Na matriz de camisas, observa-se ainda a superposição de 5 operações, ou seja, operações que devem existir em ambas as células. A viabilidade de alocação de máquinas a ambas as células para tais operações será avaliada na próxima etapa.

Os coeficientes de eficiência das clusterizações da camisa e haste são, respectivamente, 97,4% e 87,5%. Antes da aplicação de FFA, esses coeficientes foram 70% e 64,8%, conforme apresentado na seção 4.1.

Nas duas matrizes que apresentam soluções viáveis ainda aparecem algumas ovelhas negras. No caso da camisa, é o pacote 7, que requer a operação “Solda do Fundo Robô”, a qual pode ser endereçada pela adição de um robô na célula ou por meio do desenvolvimento desse processo no modo manual. Para a matriz da haste, as ovelhas negras que devem passar pelas operações “Mandrilhamento do Olhal” e “Fresamento / Furação” podem ser resolvidas pela adição de um centro de usinagem no grupo amarelo, dependendo da disponibilidade dessa máquina. Há uma ovelha negra que requer a operação “Solda Manual Olhal / Acessórios”, a qual pode ser adicionada ao grupo colocando-se um box de solda.

Dessa forma as células são definidas como:

- Célula de camisa 1 – Camisas dos roteiros 1, 3, 4 e 10.
- Célula de camisa 2 – Camisas dos roteiros 5, 6, 7, 8, 9 e 11.
- Célula de haste 1 – Hastes dos roteiros 1, 4, 6, 9, 12, 14, 17 e 19.
- Célula de haste 2 – Hastes dos roteiros 2, 3, 5, 8, 13, 15, 16 e 18.

As tabelas 21 e 22 mostram uma alocação inicial do maquinário existente com base nas restrições dimensionais dos componentes a serem processados em cada grupo.

Tabela 21 – Distribuição de máquinas para as células de camisa.

Torno CNC pequeno	Torno CNC média	Torno CNC grande	Centro de Usinagem	Skiving	Furadeira	Robô de Solda	Box de Solda
CNC-23	CNC-33	CNC-35	CUV-02	BSK-01	FRL-01	RSM-02	MSM-06
CNC-24		CNC-36	CUV-03	BSK-02		RSM-03	MSM-09
							MSM-10

Célula 1 Célula 2

Fonte: Autor (2020).

Tabela 22 – Distribuição de máquinas para as células de haste.

Torno CNC Pequeno	Torno CNC médio	Torno CNC grande	Endreitamento	Centro de usinagem grande	Centro de usinagem	Têmpera por indução	Polimento	Retifica pequena	Retifica grande	Box de Solda	Solda por Fricção	Solda por fricção grande
CNC-20	CNC-31	CNC-37	PHD-02	CUV-05	CUH-06	TPI-01	POL-01	RCC-01	RCC-02	MSM-07	SFW-01	SFW-02
CNC-25	CNC-34						POL-02			MSM-01		

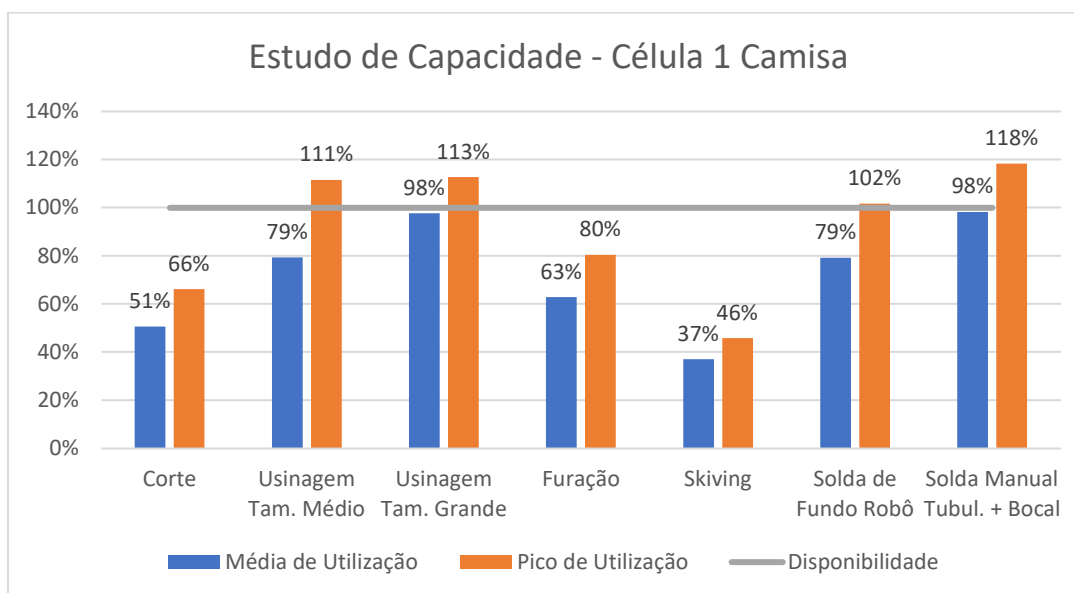
Célula 1 Célula 2

Fonte: Autor (2020).

Para a verificação da viabilidade dessa alocação de maquinário, um estudo de carga foi conduzido, utilizando os seguintes parâmetros:

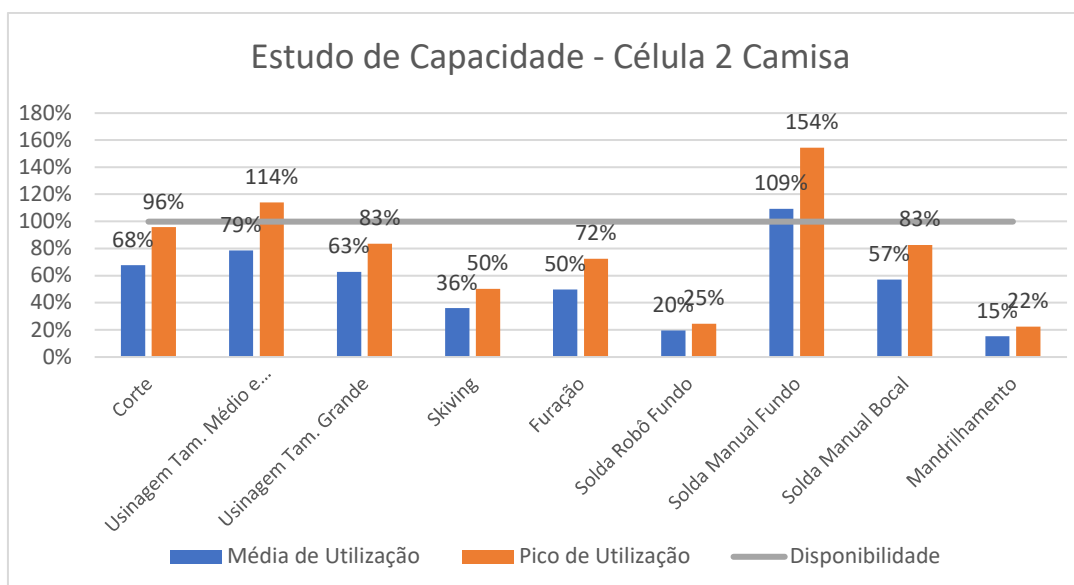
- Demanda do ano fiscal de 2020.
- 1 turno.
- 8,25 de horas por dia.
- Dias por mês conforme calendário do período.
- Indicador de eficiência conforme OEE de 85%.
- Tempo de processamento para cada operação calculado conforme média ponderada de cada grupo de roteiros definidos neste trabalho.
- Tempo e quantidade de *set ups* conforme histórico de cada processo.

Nos resultados a seguir (Fig. 09 a 12), as barras em cor azul representam a utilização média de cada centro de trabalho, no período analisado, e as barras em cor laranja representam o pico de utilização ocorrido em um dado mês dentro do mesmo período. A linha em cor verde mostra a disponibilidade real dos centros, considerando os parâmetros apresentados.

Figura 8 – Estudo de capacidade da célula 1 de camisa.

Fonte: Autor (2020).

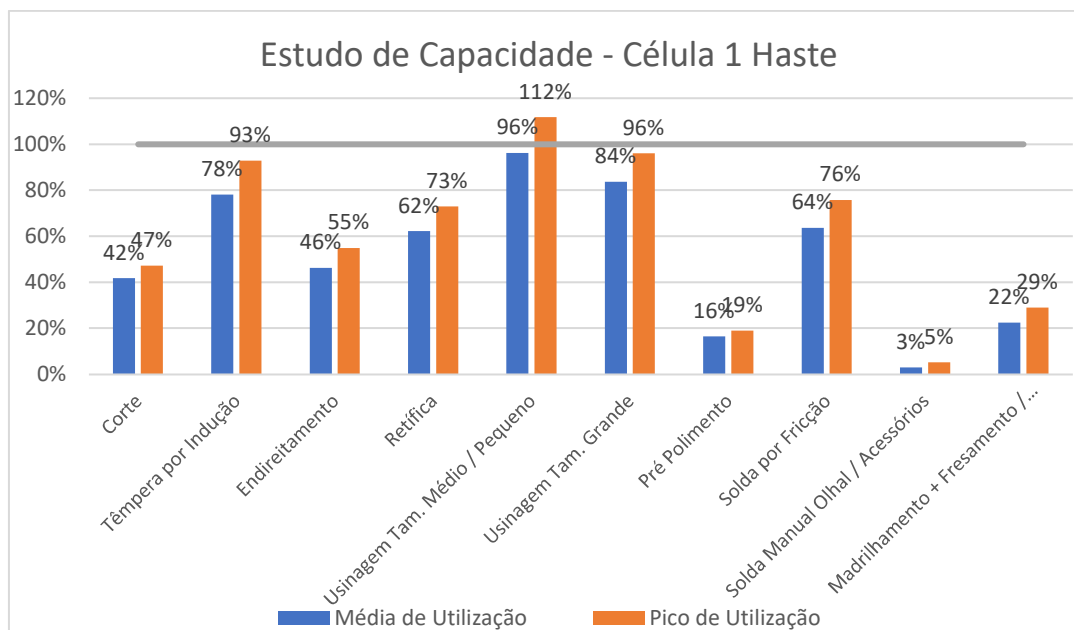
A Fig. 09 mostra que, em média, nenhum centro de trabalho apresenta sobrecarga, porém, há meses com picos de utilização, com sobrecarga temporária. Como, em média, a utilização está abaixo de 100%, esses meses de pico podem ser gerenciados através de antecipação de produção e/ou realização de horas extras.

Figura 9 – Estudo de capacidade da célula 2 de camisa.

Fonte: Autor (2020).

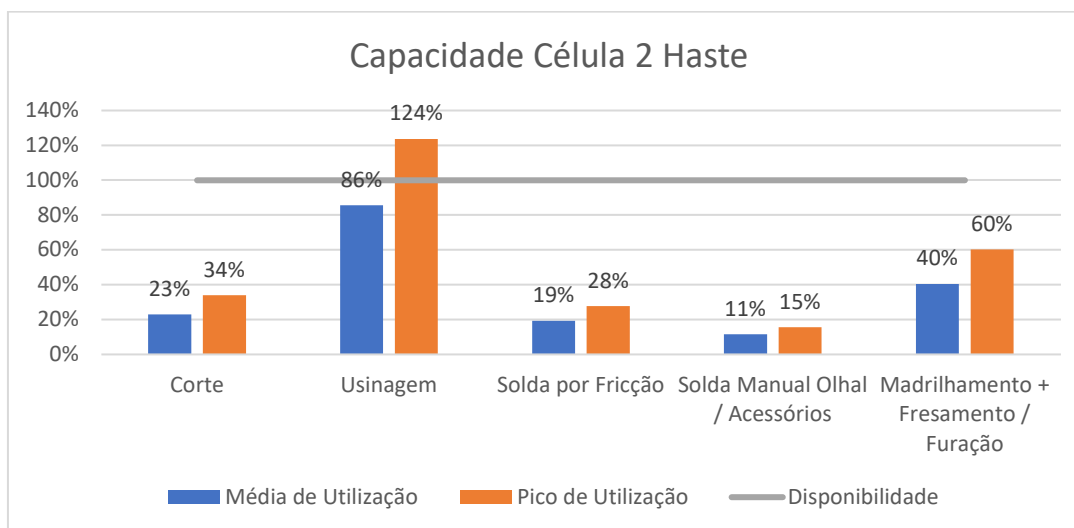
Na célula 2 de camisa, para reduzir a utilização do processo manual de solda (Fig. 10), deve-se desenvolver e validar o processo robotizado para algumas camisas. Essa alteração, identificada por meio da tecnologia de grupo, ainda pode trazer outros benefícios, pois o processo de solda robotizada é mais produtivo e estável com relação à qualidade.

Figura 10 – Estudo de capacidade da célula 1 de haste.



Fonte: Autor (2020).

O ponto a ser observado na célula 1 de haste é a baixa utilização do centro de trabalho “Solda Manual Olhal / Acessórios” (Fig.11). Como é uma operação de solda manual, não haverá equipamentos de grande porte subutilizados e a mão de obra pode ser compartilhada com o centro de trabalho “Solda Manual Olhal / Acessórios” da célula 2 de haste, o qual também está subutilizado (Fig. 12).

Figura 11 – Estudo de capacidade da célula 2 de haste.

Fonte: Autor (2020).

Ao distribuir as máquinas às famílias de componentes, observou-se uma restrição na célula 1 de haste. Nesta célula, são necessárias duas máquinas de usinagem para atender a demanda analisada, porém, uma dessas máquinas deve ser de grande porte para atender um subgrupo de hastes que possuem longos comprimentos. Há apenas 1 torno CNC de grande porte (CNC-37, Tabela 22), o qual foi alocado à célula 2 de haste pois, nela, há também a demanda de usinagem de hastes consideradas grandes.

Para endereçar essa restrição, será necessária a avaliação, por parte da empresa, de uma possível aquisição de um torno CNC de grande porte similar ao já existente que foi definido para a utilização na célula 2. Essa nova máquina atenderia operações em componentes de clientes considerados importantes e sua utilização média seria de 84%, portanto, sua aquisição seria viável.

As tabelas 23, 24, 25 e 26 apresentam a definição final das células, após a análise de carga, com seus respectivos volumes e quantidade de produtos.

Tabela 23 – Célula 1 de camisa – Volumes e produtos.

Roteiro (Pacotes)	Volume (unidades)	% Volume das Duas Células de Camisa	Qtde Produtos	% Produtos das Duas Células de Camisas
1	11369	29,3%	9	13,0%
3	1564	4,0%	1	1,4%
4	1751	4,5%	4	5,8%
10	600	1,5%	4	5,8%
Soma	15284	39,4%	18	26,1%

Fonte: Autor (2020).

Tabela 24 – Célula 2 de camisa – Volumes e produtos.

Roteiro (Pacotes)	Volume (unidades)	% Volume das Duas Células de Camisa	Qtde Produtos	% Produtos das Duas Células de Camisas
5	10005	25,8%	24	34,8%
6	3928	10,1%	12	17,4%
7	4605	11,9%	8	11,6%
8	1426	3,7%	3	4,3%
9	2760	7,1%	3	4,3%
11	768	2,0%	1	1,4%
Soma	23492	60,6%	51	73,9%

Fonte: Autor (2020).

Tabela 25 – Célula 1 de haste – Volumes e produtos.

Roteiro (Pacotes)	Volume (unidades)	% Volume das Duas Células de Haste	Qtde Produtos	% Produtos das Duas Células de Haste
1	12403	31,5%	8	8,5%
4	401	1,0%	1	1,1%
6	3173	8,1%	6	6,4%
9	3000	7,6%	1	1,1%
12	1168	3,0%	5	5,3%
14	526	1,3%	3	3,2%
17	355	0,9%	1	1,1%
19	170	0,4%	2	2,1%
Soma	21196	53,9%	27	28,7%

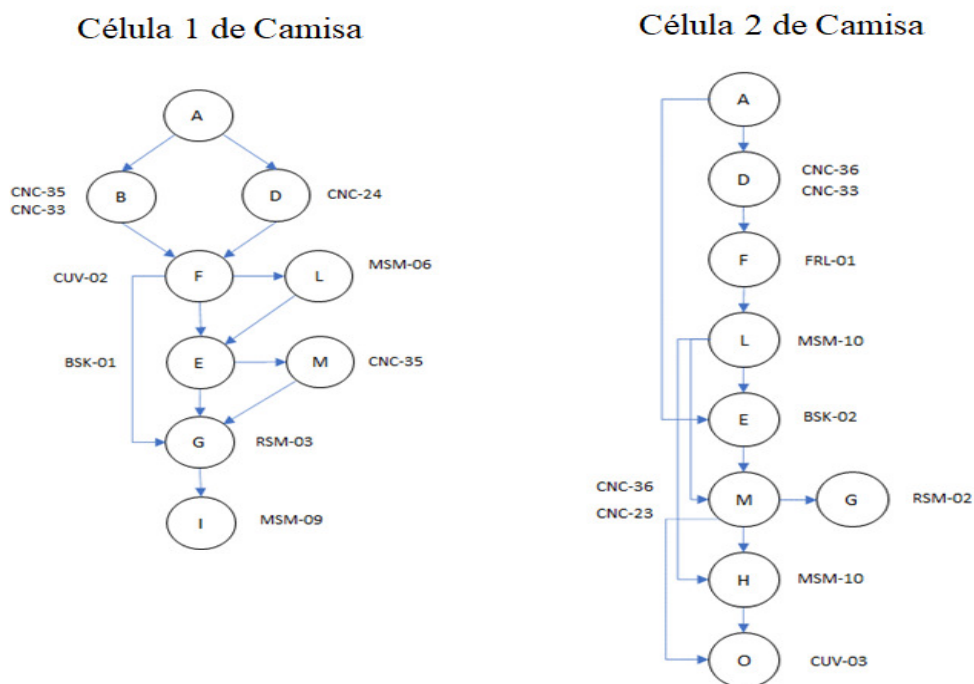
Fonte: Autor (2020).

Tabela 26 – Célula 2 de haste – Volumes e produtos.

Roteiro (Pacotes)	Volume (unidades)	% Volume das Duas Células de Haste	Qtde Produtos	% Produtos das Duas Células de Haste
2	1017	2,6%	14	14,9%
3	4315	11,0%	23	24,5%
5	6544	16,6%	15	16,0%
8	3039	7,7%	4	4,3%
13	1444	3,7%	4	4,3%
15	743	1,9%	4	4,3%
16	863	2,2%	2	2,1%
18	175	0,4%	1	1,1%
Soma	18140	46,1%	67	71,3%

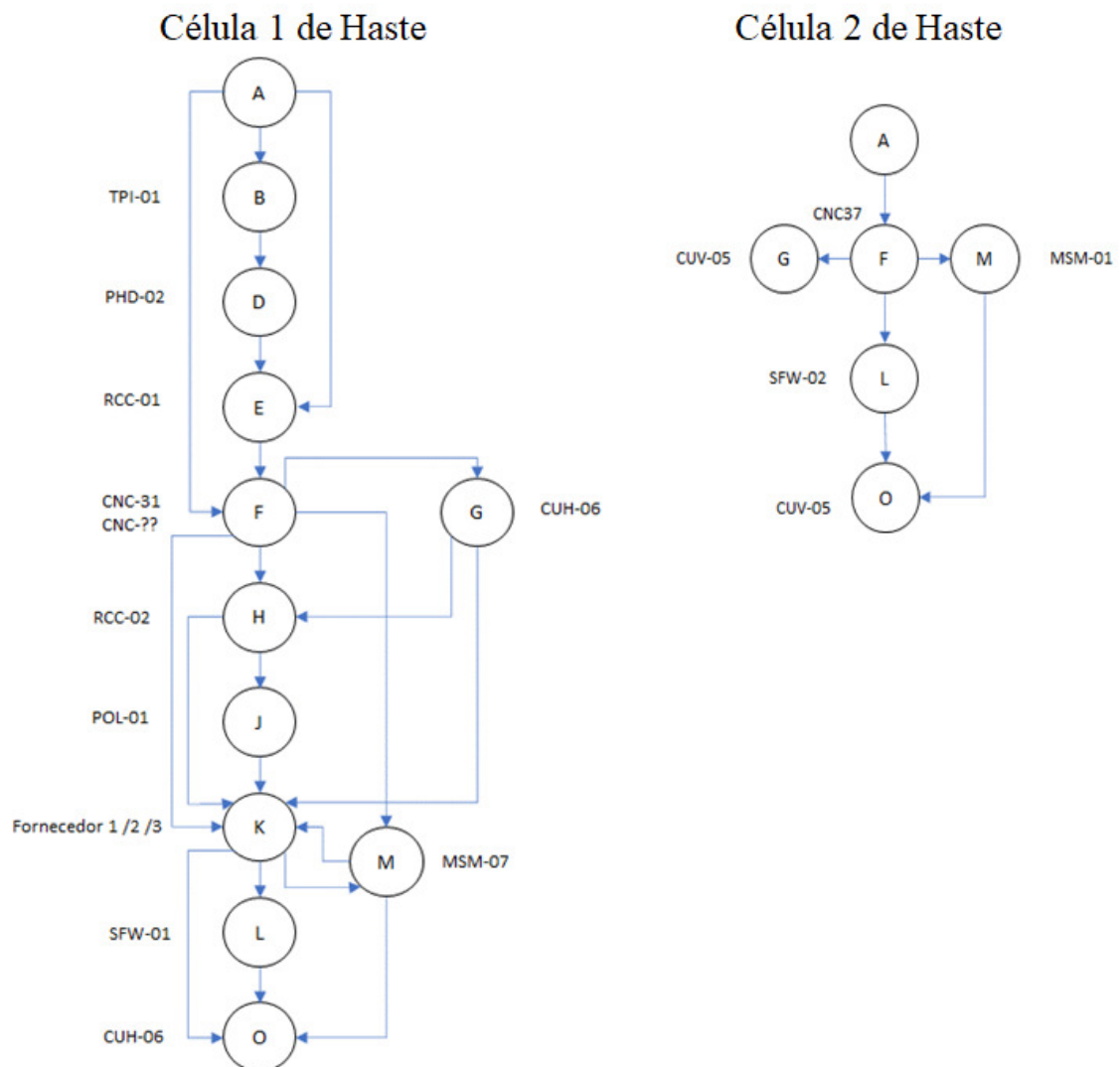
Fonte: Autor (2020).

Nas figuras 13 e 14 são apresentados os fluxogramas finais das células. Observe-se que alguns componentes não passam por todas as estações de trabalho, porém, os fluxos são predominantemente unidirecionais, sem retrocessos.

Figura 12 – Fluxograma do processo das células de camisa.

Fonte: Autor (2020).

Figura 13 – Fluxograma do processo das células de haste.



Fonte: Autor (2020).

5. DISCUSSÃO

A aplicação da PFA (etapas FFA e GA) pode trazer diversos benefícios para sistemas de produção tipo *job shop*, na formação de células. Sem a simplificação dos roteiros e fluxos por meio da FFA, não houve convergência para uma solução viável, pois um número alto de ovelhas negras ocorre (tabelas 4 e 5 na seção 4.1). Os coeficientes de agrupamento para as clusterizações, de 70% e 64,8%, respectivamente confirmam esse fato. Coeficientes de 97,4% e 87,5% foram obtidos após a simplificação do fluxo/roteiros.

Como mostrado na seção 4.3, em sistemas produtivos onde há diversas máquinas paralelas e máquinas com certa flexibilidade funcional, a tentativa de clusterização pela matriz componente x máquina pode não trazer a melhor solução. Nessa tentativa, coeficientes de 78,9% e 78,8% foram obtidos, valores consideravelmente inferiores aos 97,4% e 87,5% encontrados quando a clusterização é feita em função das operações, com posterior alocação das máquinas.

Com a formação das células há uma redução considerável da complexidade de programação no sistema (Tabela 27). O tamanho do problema foi avaliado em termos do número de máquinas (m) e do número de produtos (n) de acordo com a Tabela 1 seção 2.1. Os expoentes indicam o número médio de máquinas por roteiro em cada célula.

Tabela 27 – Dados das células relevantes para a programação da produção e tamanho da matriz máquina x componente.

Características	Célula 1 Camisa	Célula 2 Camisa	Célula 1 Haste	Célula 2 Haste
Produtos (n)	18	51	27	67
Roteiros	4	6	8	8
Centros de Trabalho	8	8	11	6
Máquinas (m)	9	10	11	5
Combinações de programação	$(4!)^6$	$(6!)^6$	$(8!)^6$	$(8!)^3$
Tamanho do problema (m)	pequeno	médio	médio	pequeno
Tamanho do problema (n)	pequeno	médio	pequeno	grande

Fonte: Autor (2020).

Essa redução de tamanho e complexidade do problema contrasta com cenário produtivo inicial, para o qual o tamanho do problema era “muito grande” considerando quantidade de produtos e “grande” considerando a quantidade de máquinas, com combinações de programação da ordem de $(32!)^6$.

Outros benefícios esperados após a implantação da manufatura celular são:

- Flexibilidade: com menos quantidade de produtos por célula, maior a possibilidade de produzir todos os produtos em um período menor.
- Estoque em processo: assim como há melhora na flexibilidade, a possibilidade de produzir todos os produtos em menor período pode gerar menores estoques em processo.
- *Setup*: com menos produtos passando por máquina, é possível reduzir os *setups* mantendo o equipamento com as ferramentas necessárias para aqueles produtos. Além disso, a maior semelhança entre os produtos faz com que o tempo para a troca entre eles seja menor.
- *Leadtime*: menores estoques em processo e menores tempos de *setups* resultarão em menores *leadtimes*.

Todos esses pontos são ganhos consolidados advindos da manufatura celular (SINGH, 1993; DAITA IRANI; KOTAMRAJU, 1999; HYER; WEMMERLOV, 2001; SUDHAKARAPANDIAN, 2007; RAFIEI; GHODSI, 2013; DEEP; SINGH, 2015; KLAUSNITZER; NEUFELD; BUSCHER, 2017).

Conforme já mencionado neste estudo e destacado por Hameri (2011), a PFA não é amplamente utilizada, apesar de seu histórico estabelecido. O corpo de conhecimentos de manufatura celular é muito focado em otimização de algoritmos de clusterização e tem negligenciado o desafio de lidar com problemas de grandes dimensões com particularidades tecnológicas bem como com as exceções, isto é, peças que não se encaixam em nenhum grupo de máquinas que processam a maioria das peças. Para a clusterização em si há diversas opções, mas a obtenção de uma matriz inicial que permita solução viável e tratamento das exceções são desafios que requerem pré-processamento dos dados e experiência técnica e administrativa dos envolvidos. Além disso, o problema tradicional de manufatura celular, na literatura, aborda máquinas com uma dada especificidade funcional. As abordagens devem ser adaptadas para se tratar de máquinas mais flexíveis e multifuncionais, como feito neste trabalho. Portanto, o trabalho aqui apresentado contribuiu para a literatura com um estudo empírico que aborda restrições, exceções e outras dificuldades de um ambiente de sistema de manufatura real, indicando como tratá-los. Bertrand e Fransoo (2016) mencionam que as pesquisas empíricas descritivas na área de modelagem em gestão de operações são bastante reduzidas. A subárea de manufatura celular/tecnologia de grupo segue essa tendência geral, e percebe-

se claramente a predominância de pesquisa axiomática. Portanto, esse estudo também busca apresentar ampliar o corpo de conhecimento em relação à pesquisa empírica (descritiva e prescritiva).

6. CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

A PFA é uma metodologia já estabelecida como um conjunto de etapas que auxiliam na formação de células. Porém, o problema de formação de células é amplamente estudado em sistemas hipotéticos, e os artigos trazem contribuições para melhoria dos algoritmos, porém, dificilmente abordam todas as variáveis de um sistema produtivo real. Os estudos, sejam em sistemas hipotéticos ou reais, na maioria das vezes, abordam apenas a GA ou a clusterização em si, ou seja, a formação de células através da matriz componente x máquina, não considerando a etapa da FFA, como parte da PFA. Esta etapa anterior tem como resultado a simplificação do processo produtivo.

Este trabalho buscou apresentar de forma empírica os resultados da aplicação da FFA previamente à GA. Pode-se afirmar que tal aplicação melhora o processo de formação de célula, ao reduzir a quantidade e a complexidade dos roteiros dos processos produtivos. É possível observar essa melhoria com base nos indicadores de coeficiente de clusterização. Portanto, essa etapa da PFA deve ser recomendada a todos os gestores que buscam implementar a manufatura celular e acadêmicos que estudam a formação de células, pois, muitas vezes, ela é determinante para o sucesso da formação e implantação da célula.

Observou-se também que a matriz componente x máquina, dependendo de como for definida, pode aumentar ou reduzir a possibilidade de uma boa formação de célula. Neste caso, onde há muitas máquinas paralelas e máquinas que executam mais de uma etapa do roteiro de produção, obteve-se um melhor resultado de formação de célula utilizando na matriz as operações do processo produtivo, para posterior alocação das máquinas a cada operação.

Ainda que esse trabalho apresente a modelagem da PFA de uma única empresa, ele pode ser um guia para gestores de empresas do tipo *job shop* apresentando detalhadamente a aplicação das etapas de modelagem e orientando os gestores sobre a transição para a manufatura celular, suas dificuldades e como superá-las.

Como contribuição acadêmica, este trabalho endereça uma lacuna relativa à escassez de pesquisas empíricas relacionadas à aplicação da técnica PFA e da tecnologia de grupo a sistemas reais de produção, de grandes dimensões e com condições tecnológicas específicas. Esta lacuna foi identificada por meio de revisão da literatura, mas também tem sido apontada por outros pesquisadores internacionais relevantes na

área. Neste campo, há certa abundância de trabalhos devotados a melhorias dos algoritmos de clusterização e otimização de critérios específicos (pesquisa axiomática normativa). Este tipo de pesquisa tem certamente seu valor e relevância, entretanto, os casos reais nem sempre se encaixam nas condições ideais requeridas para a aplicação de tais algoritmos. Por outro lado, há uma considerável escassez de pesquisas empíricas descritivas que indicam como se gerar um bom modelo de manufatura celular a partir sistemas de produção reais de tamanho significativo e condições tecnológicas específicas, como máquinas mais flexíveis e multifuncionais. Esta proposta buscou diminuir esta lacuna.

Em resumo, o trabalho confirma que a PFA é uma metodologia poderosa para se aplicar em sistemas produtivos complexos, com grande diversidade de produtos, roteiros, máquinas e volumes, para a obtenção do *layout* celular, trazendo assim uma série de benefícios como os já citados aqui.

Como oportunidade para pesquisas futuras podem se listar os seguintes pontos:

- Aplicação da FFA/GA em ambientes com números ainda maiores de máquinas, processos, roteiros e produtos, confirmando a importância da FFA como etapa de simplificação do sistema produtivo.
- Simulação do funcionamento das células propostas e da programação da produção.
- Aprofundamento desse estudo ou de casos semelhantes considerando células flexíveis e dinâmicas, com algumas máquinas alocadas a uma célula ou outra dependendo da variação de mix e carga da planta, utilizando máquinas-ferramenta reconfiguráveis (RMT - reconfigurable machine tools), células reconfiguráveis.
- Com a adição de dados detalhados de programação a este problema proposto, utilização de diferentes algoritmos de clusterização para otimização de indicadores de desempenho específicos (balanceamento de carga, redução de atraso, redução de tempo de *setup*).

7. REFERÊNCIAS

- ABIMAQ - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS. **Painel mensal**. São Paulo: ABIMAQ, 2021.
- ADINARAYANAN, A.; UTHAYAKUMAR, M.; PRABHAKARAN, G. Machine cell formation using simulated annealing algorithm in cellular manufacturing system. **IJCAET**, v. 10, n. 1/2, p. 111-125, 2018.
- ANFAVEA - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Máquinas agrícolas e rodoviárias - Produção, vendas internas no atacado, exportações em unidades, exportações em valor e emprego**. São Paulo: ANFAVEA, 2021. Disponível em: <https://anfavea.com.br/estatisticas-copiar-3>. Acesso em: 19 jun. 2021.
- ARVINDH, B.; IRANI, S. A. Cell formation: the need for an integrated solution of the subproblems. **THE INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH**, v. 32, n. 5, p. 1197-1218, 1994.
- ASKIN, Ronald G.; STANDRIDGE, Charles R. **Modeling and analysis of manufacturing systems**. John Wiley & Sons Inc, 1993.
- BANKS, Jerry (Ed.). **Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice**. John Wiley & Sons, 1998.
- BERTRAND, J. Will M.; FRANSOO, Jan C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, 2002.
- BERTRAND, J. Will M.; FRANSOO, Jan C. Modelling and simulation. In: **Research methods for operations management**. Routledge, 2016. p. 306-346.
- BOUTSINAS, Basilis. Machine-part cell formation using biclustering. **European journal of operational research**, v. 230, n. 3, p. 563-572, 2013.
- BRANDON, John A.; SCHAFER, H.; HUANG, Guo Q. An approach to production flow analysis using concepts from information theory. In: **1991 First International Conference on Expert Planning Systems**. IET, 1990. p. 124-129.
- BURBIDGE, John L. Production flow analysis. **Production Engineer**, v. 50, n. 4.5, p. 139-152, 1971.
- BURBIDGE, John L. Production flow analysis for planning group technology. **Journal of Operations Management**, v. 10, n. 1, p. 5-27, 1991.
- BURBIDGE, John L. The first step in planning group technology. **International Journal of Production Economics**, v. 43, n. 2-3, p. 261-266, 1996.
- CNABRASIL - CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. PIB do agronegócio tem crescimento recorde de 24,31% em 2020. **Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil**, Brasília, 11 de mar. de 2021. Disponível em: <https://www.cnabrasil.org.br/noticias/pib-do-agronegocio-tem-crescimento-recorde-de-24-31-em-2020>. Acesso em: 19 jun. 2021.

- CHU, Xianghua et al. Worker assignment with learning-forgetting effect in cellular manufacturing system using adaptive memetic differential search algorithm. **Computers & Industrial Engineering**, v. 136, p. 381-396, 2019.
- DAITA, S. T. S.; IRANI, S. A.; KOTAMRAJU, S. **Algorithms for production flow analysis**. **International Journal of Production Research**, v. 37, n. 11, p. 2609-2638, 1999.
- DEEP, Kamal; SINGH, Pardeep K. Design of robust cellular manufacturing system for dynamic part population considering multiple processing routes using genetic algorithm. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 35, p. 155-163, 2015.
- DOS SANTOS, Newton Ribeiro; DE ARAÚJO, Lindolpho Oliveira. Computational system for group technology–PFA case study. **Integrated Manufacturing Systems**, 2003.
- EISENHARDT, Kathleen M. Building theories from case study research. **Academy of management review**, v. 14, n. 4, p. 532-550, 1989.
- FILIPPINI, Roberto. Operations management research: some reflections on evolution, models and empirical studies in OM. **International Journal of Operations & Production Management**, 1997.
- GHOSH, Tamal et al. Meta-heuristics in cellular manufacturing: A state-of-the-art review. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, v. 2, n. 1, p. 87-122, 2011.
- HAMERI, Ari-Pekka. Production flow analysis—Cases from manufacturing and service industry. **International journal of production economics**, v. 129, n. 2, p. 233-241, 2011.
- HARHALAKIS, George; MINIS, Ioannis; NAGI, Rakesh. **Development and Application of a Knowledge Based System for Cellubr Manufacturing**. 1989.
- HYER, Nancy; WEMMERLOV, Urban. **Reorganizing the factory: Competing through cellular manufacturing**. CRC Press, 2001.
- JACOBS, F. Robert et al. **Manufacturing Planning and Control for Supply Chain Management: APICS/CPIM Certification Edition**. McGraw-Hill Education, 2011.
- KAMRANI, A. K.; PARSAEI, H. R.; LILES, D. H. Production flow analysis using STORM. **Planning, Design, and Analysis of Cellular Manufacturing Systems**, v. 24, p. 299, 1995.
- KESAVADAS, T.; ERNZER, M. Design of an interactive virtual factory using cell formation methodologies. **Journal of Advanced Manufacturing Systems**, v. 2, n. 02, p. 229-246, 2003.
- KLAUSNITZER, Armin; NEUFELD, Janis S.; BUSCHER, Udo. Scheduling dynamic job shop manufacturing cells with family setup times: a simulation study. **Logistics Research**, v. 10, n. 4, p. 1-18, 2017.
- LIAN, Jie et al. Formation of independent manufacturing cells with the consideration of multiple identical machines. **International Journal of Production Research**, v. 52, n. 5, p. 1363-1400, 2014.
- MEREDITH, Jack R. et al. Alternative research paradigms in operations. **Journal of operations management**, v. 8, n. 4, p. 297-326, 1989.

- MIKELL, P. **Automação industrial e sistemas de manufatura**. Pearson Brasil, 2011.
- NAIR, G. Jayakrishnan; NARENDRAN, T. T. CASE: A clustering algorithm for cell formation with sequence data. **International journal of production research**, v. 36, n. 1, p. 157-180, 1998.
- NEUFELD, J. S.; TEUCHER, F. F.; BUSCHER, U. Scheduling flowline manufacturing cells with inter-cellular moves: non-permutation schedules and material flows in the cell scheduling problem. **International Journal of Production Research**, p. 1-17, 2019.
- PAPAIOANNOU, Grammatoula; WILSON, John M. The evolution of cell formation problem methodologies based on recent studies (1997–2008): Review and directions for future research. **European journal of operational research**, v. 206, n. 3, p. 509-521, 2010.
- RABBANI, Masoud et al. Solving a bi-objective cell formation problem with stochastic production quantities by a two-phase fuzzy linear programming approach. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 58, n. 5-8, p. 709-722, 2012.
- RAFIEI, H.; GHODSI, R. A bi-objective mathematical model toward dynamic cell formation considering labor utilization. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, n. 4, p. 2308-2316, 2013.
- SALEHI, Mojtaba; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, Reza. A genetic algorithm-based grouping method for a cell formation problem with the efficacy measure. **International Journal of Industrial and Systems Engineering**, v. 6, n. 3, p. 340-359, 2010.
- SAYADI, Mohammad Kazem; HAFEZALKOTOB, Ashkan; NAINI, Seyed Gholamreza Jalali. Firefly-inspired algorithm for discrete optimization problems: an application to manufacturing cell formation. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 32, n. 1, p. 78-84, 2013.
- SANTOS, Newton Ribeiro dos; ARAÚJO JUNIOR, Lindolpho Oliveira de. Sistema de tecnologia de grupo: um estudo de caso através de análise do fluxo da produção. **Production**, v. 9, n. 1, p. 65-82, 1999.
- SELIM, Hassan M.; ASKIN, Ronald G.; VAKHARIA, Asoo J. Cell formation in group technology: review, evaluation and directions for future research. **Computers & Industrial Engineering**, v. 34, n. 1, p. 3-20, 1998.
- SINGH, N. Design of cellular manufacturing systems: an invited review. **European journal of operational research**, v. 69, n. 3, p. 284-291, 1993.
- SIPPER, Daniel; BULFIN, Robert L. Júnior. **Production: Planning, Control and Integration**. New York: McGraw-Hill, 1997.
- SUDHAKARAPANDIAN, R. Application of soft computing techniques for cell formation considering operational time and sequence. 2007. Tese de Doutorado.
- SUZIĆ, Nikola et al. Customizing products through application of group technology: A case study of furniture manufacturing. **Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering**, v. 58, n. 12, p. 724-731, 2012.
- TAHA, Hamdy A. Pesquisa Operacional. 8a edição. 2008.
- UTHAYAKUMAR, M. et al. Arrangement of Machine Cell in Cellular Manufacturing System: A PSO Approach. 2018.

VOSS, Chris. Case research in operations management. In: **Researching operations management**. Routledge, 2010. p. 176-209.

YIN, Robert K. **Case study research and applications: Design and methods**. Sage publications, 2017.

APÊNDICE A – RELAÇÃO NÚMERO DE ROTEIRO X PRN - CAMISA

Roteiro	PRN
2	ACJKEDG
5	ADFLEMH
6	ADFLEMHO
1	ABEFGI
7	ADEMG
4	ADNFLEMG
10	ABFG
8	ADFLM
9	ADFLMO
12	ACPKERQBFHL
3	ABFLEG
11	ADFLH

APÊNDICE B – RELAÇÃO NÚMERO DE ROTEIRO X PRN - HASTE

Roteiro	PRN
5	AF
2	ACDEFHLNOJKP
3	ACDEFLNIOJKP
1	ABDEFHJKL
10	AFLO
6	AFGK
12	AFK
7	AFLO
8	AFMO
13	AFG
15	AFM
14	AQFGHJK
16	AFLN
19	AEFHK
20	ARFG
4	AFMOK
9	ABDEFHJKLO
11	FBOL
17	ABDEFHJKMO
18	ACDEFHJKLNM

APÊNDICE C – MÁQUINA X ROTEIRO – CAMISA

Camisa																							
Roteiro	Máquinas																						
	SRD-01	SRR-06	SRR-07	CNC-23	CNC-24	CNC-33	CNC-35	CNC-36	BSK-01	BSK-02	BRV-09	FRL-01	CUV-02	CUV-03	CUV-05	CUH-06	RSM-02	RSM-03	MSM-01	MSM-06	MSM-09	MSM-10	DET-01
1	X	X	X	X		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X		X	
2	X	X	X	X	X	X	XXX	XX	X	X							XX	X					
3	X	X	X	X		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
4	X	X	X	XX	X	XX	XX	XX	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
5	X	X	X	XX	X	XX	XX	XX	X	X	X	X	X	X	X	X			XX	XX	X	XX	
6	X	X	X	XX	X	XX	XX	XX	X	X	X	XX	XX	XX	XX	XX			XX	XX	X	XX	
7	X	X	X	XX	X	XX	XX	XX	X	X							X	X					
8	X	X	X	XX	X	XX	XX	XX				X	X	X	X	X			X	X	X	X	
9	X	X	X	XX	X	XX	XX	XX				XX	XX	XX	XX	XX			XX	XX	X	XX	
10	X	X	X	X		X	X	X				X	X	X	X	X	X	X					
11	X	X	X	X	X	X	X	X				X	X	X	X	X			XX	XX	X	XX	
12	X	X	X	X		X	XXX	XXX	X	X	X	X	X	X	X	X			XX	XXX	X	XXX	

APÊNDICE F – EXEMPLO DO ESTUDO DE CAPACIDADE - TABELA DO CÁLCULO PARA A OPERAÇÃO DE FURAÇÃO DA
CÉLULA 1 DE CAMISA

		Quantities												
	Roteiro	abr/19	mai/19	jun/19	jul/19	ago/19	set/19	out/19	nov/19	dez/19	jan/20	fev/20	mar/20	Cycle time in Min
	1	1038	982	992	1010	1002	992	877	851	700	975	975	975	4
	3	0	0	10	182	182	182	161	161	140	182	182	182	4
	4	119	122	166	166	170	210	122	74	2	266	218	116	3
	10	0	0	150	0	0	75	0	0	75	60	120	120	3
		Time required in minutes (Qty x Cycle time)												
	Roteiro	abr/19	mai/19	jun/19	jul/19	ago/19	set/19	out/19	nov/19	dez/19	jan/20	fev/20	mar/20	
	1	4152	3928	3968	4040	4008	3968	3508	3404	2800	3900	3900	3900	
	3	0	0	40	728	728	728	644	644	560	728	728	728	
	4	357	366	498	498	510	630	366	222	6	798	654	348	
	10	0	0	450	0	0	225	0	0	225	180	360	360	
Total Cutting Time Reqd. / Month	Min	4509	4294	4956	5266	5246	5551	4518	4270	3591	5606	5642	5336	
No. of Days / Month	No.	21	22	20	23	22	21	23	20	20	21	19	22	
No. of Shift / Day	No.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
No. of Hr / Shift (8,25 Hr)	Min	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	
OEE	%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	
No. of Setup / day	No.	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
Setup time	Min	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
Total setup time	min	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
Effective time /month	Min	7764,75	8134,50	7395,00	8504,25	8134,50	7764,75	8504,25	7395,00	7395,00	7764,75	7025,25	8134,50	
Utilisation	%	58,1%	52,8%	67,0%	61,9%	64,5%	71,5%	53,1%	57,7%	48,6%	72,2%	80,3%	65,6%	

APÊNDICE G – ROTEIROS DE CAMISA QUE SE ENQUADRAM NO
FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO, APÓS O HOME / AWAY

Roteiro	PRN
1	ABFEGI
3	ABFLEG
4	ADFLEMG
5	ADFLEMH
6	ADFLEMHO
7	ADEMG
8	ADFLM
9	ADFLMO
10	ABFG
11	ADFLH

APÊNDICE H – ROTEIROS DE HASTE QUE SE ENQUADRAM NO
FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO, APÓS O HOME / AWAY

Roteiro	PRN
1	ABDEFHJKL
2	AFLO
3	AFLO
4	AFMKO
5	AF
6	AFGK
8	AFMO
9	ABDEFHJKLO
12	AFK
13	AFG
14	AFGHJK
15	AFM
16	AFL
17	ABDEFHJKMO
18	AFLM
19	AEFHK