

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA - CAMPUS ITAQUI
BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

LEONARDO MARQUES CAIRES

**PRODUTIVIDADE E FLEXIBILIDADE DOS SISTEMAS DE
PRODUÇÃO: PROPOSTA DE UMA META-HEURÍSTICA BUSCA
TABU PARA A FORMAÇÃO DE CÉLULAS DE MANUFATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso

**Itaqui
2015**

LEONARDO MARQUES CAIRES

**PRODUTIVIDADE E FLEXIBILIDADE DOS SISTEMAS DE
PRODUÇÃO: PROPOSTA DE UMA META-HEURÍSTICA BUSCA
TABU PARA A FORMAÇÃO DE CÉLULAS DE MANUFATURA**

Trabalho de Conclusão de curso
Apresentado na Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Me. Cristiano Galafassi

Itaqui

2015

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

C136p Caires, Leonardo Marques

Produtividade e Flexibilidade dos Sistemas de Produção:
Proposta de uma Meta-Heurística Busca Tabu para a Formação de
Células de Manufatura / Leonardo Marques Caires.

32 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E
TECNOLOGIA, 2015.

'Orientação: Cristiano Galafassi'.

1. Engenharia de Produção . 2. Manufatura. 3. Pesquisa
Operacional. 4. Meta-Heurísticas. 5. Busca Tabu. I. Título.

LEONARDO MARQUES CAIRES

**PRODUTIVIDADE E FLEXIBILIDADE DOS SISTEMAS DE
PRODUÇÃO: PROPOSTA DE UMA META-HEURÍSTICA BUSCA
TABU PARA A FORMAÇÃO DE CÉLULAS DE MANUFATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Ciência e Tecnologia na Universidade
Federal do Pampa.

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em: 23 de janeiro de 2014.

Banca examinadora

Prof. Me. Cristiano Galafassi
Unipampa-Campus Itaqui

Prof. Me. Leugim Corteze Romio
Unipampa-Campus Itaqui

Prof. Dr. Rogério Rodrigues de Vargas
Unipampa-Campus Itaqui

AGRADECIMENTOS

Na hora de agradecer é grande a responsabilidade de reconhecer a todos que foram importantes nessa jornada. Primeiramente ao povo do Pampa Gaúcho, que do seu grito fez surgir esta universidade onde eu e tantos outros tivemos a oportunidade de uma formação de qualidade.

Ao meu orientador Cristiano Galafassi, deixo registrado meu reconhecimento pelo apoio, aporte teórico e paciência no desenvolvimento deste trabalho. Valeu mestre!

Aos Professores e Funcionários do Campus Itaqui. Em especial registro a minha gratidão pelos grandes exemplos que levo comigo, alicerces para minha formação humana e profissional. A Janaina Brandão por ter exigido o máximo de mim e mostrado que a melhora está sempre próxima, ao Alexandre Lopes, modelo de conduta íntegra e justa, ao Virnei Moreira pelo profissionalismo e a professora Luciana Ethur pelo exemplo de amor a profissão e as pessoas. Outrossim, ao professor Leomar e ao Paulo Amorim pela dedicação para a construção deste curso e estarem a disposição sempre que precisei.

Aos meus pais, Ildeu e Cida pelo apoio incondicional e por me guiarem pela jornada da vida, nunca medindo esforços para a realização de mais essa etapa.

Aos meus queridos avós, pela sabedoria, carinho e contribuírem na formação do meu caráter. Aos meus irmãos Camila e João Pedro pela alegria.

Meus amigos pelas risadas e companheirismo. Sei que sempre pude contar com vocês.

Agradeço a Deus pelo discernimento, pela companhia nas madrugadas de estudo e fazer-me acreditar que a vida é um ato de superação, sempre. Enfim, obrigado a todos por preencher minha vida com alegria, sabedoria e ensinar que o futuro se escreve agora.

RESUMO

Em um mercado cada vez mais competitivo, a gestão da produção é um fator muito importante para o sucesso de uma indústria. Através dela busca-se organizar o ambiente de produção de maneira a economizar custos e tempo de produção, sem perda de qualidade. A Manufatura Celular surgiu como importante contribuição para indústrias que buscam diferencial competitivo na produção em baixa escala e alto *mix* de produtos (sistema *job-shop*) para atenderem um mercado consumidor cada vez mais exigente e conseguirem sobreviver no atual cenário competitivo. A Manufatura Celular, parte da filosofia da Tecnologia de Grupos, busca agrupar máquinas e partes em células de manufatura independentes através de sua similaridade. Porém, o Problema de Formação de Células de Manufatura é uma tarefa desafiadora, que necessita de técnicas capazes de reconfigurar os sistemas produtivos de forma eficaz e em tempo hábil, minimizando os tempos de processo, o inventário, os custos, o compartilhamento de recurso e que responda de forma rápida as necessidades do mercado. Diante desta complexidade, este trabalho tem como objetivo a geração de um modelo para a Formação de Células de Manufatura, otimização dos processos de produção e a redução das perdas produtivas. Partindo de uma pesquisa bibliográfica para compreensão do assunto, construiu-se um modelo de meta-heurística Busca Tabu que, através de seis estratégias de geração de vizinhanças, busca maximizar a Eficácia de Agrupamentos em conjuntos de máquinas e partes. A arquitetura do modelo é descrita sendo apresentando todas as particularidades do algoritmo. Diversos experimentos que possibilitaram a comparação de estratégias, parâmetros e a constatação de conflitos em relação às variáveis de decisão foram analisados. A primeira etapa do processo de experimentação congregou a partir de diferentes combinações, encontrar a configuração que melhor atenda ao algoritmo. Munido dos parâmetros definidos na Etapa 1, partiu-se para a etapa 2, onde foram realizados os testes em 35 instâncias do problema. Posteriormente, para a validação do modelo, na etapa 3, as soluções encontradas foram comparadas com trabalhos disponíveis na literatura para o Problema de Formação de Células de Manufatura. Os resultados obtidos apresentados são satisfatórios, mas ressalta-se que há muito a ser estudado para a construção de um modelo eficaz para o problema, dado não existir até então, um modelo que supere todos os resultados da literatura e as expectativas do mercado.

PALAVRAS-CHAVE: Manufatura Flexível, clusterização, meta-heurísticas, Busca Tabu.

ABSTRACT

In an increasingly competitive market, production management is a very important factor for the success of an industry. Through it seeks to organize to save the way production environment costs and production time, without loss of quality. The Cellular Manufacturing emerged as an important contribution to industries that seek competitive advantage in low scale production and high product mix (job-shop system) to meet an increasingly demanding market and survive in the current competitive scenario. The Cellular Manufacturing, part of the philosophy of Group Technology, seeks to group machines and parts in independent manufacturing cells through its similarity. However, the Manufacturing Cell Formation Problem is a challenging task that requires techniques to reconfigure production systems effectively and in a timely manner, minimizing lead times, inventory, costs, resource sharing and to respond quickly to market needs. Faced with this complexity, this paper aims to generate a model for Manufacturing Cell Formation, optimization of production processes and reduction of production losses. Starting at a large literature search for understanding of the subject, we built a Tabu Search meta-heuristic model that, through six neighborhoods structures, seeks to maximize Grouping Efficacy in sets of machines and parts. The model architecture is described and presents all the details of the algorithm. Several experiments that enabled the comparison of strategies, parameters, and the finding of conflicts in relation to decision variables were analyzed. The first stage of the experimentation process started from different parameters combinations to find the configuration that best meets the algorithm. Provided with the parameters defined in step 1, we started the step 2, where tests were performed in 35 instances of the problem. Later to validate the model, in step 3, the solutions were compared to studies in the literature for Manufacturing Cell Formation Problem. The results presented are satisfactory, but it is noteworthy, that there is much to be studied for building an effective model for the problem since, so far, there is not a model that overcomes all the results from literature and market expectations.

KEYWORDS: Job Shop system, cluster, metaheuristic, Tabu Search.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
2 REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1 O Problema de Formação de Células de Manufatura	11
2.2 O PFCM como um problema de clusterização.....	13
2.3 Representação matemática do agrupamento de elementos em <i>clusters</i>	14
2.4 Busca Tabu	15
3 MODELO PROPOSTO PARA O PFCM	17
3.1 Informação de Entrada sobre o PFCM	17
3.2 Formato da Solução	17
3.3 Definição do Número de <i>Clusters</i>	17
3.4 Função Objetivo	18
3.5 Estruturas de vizinhança.....	18
3.6 Lista Tabu	19
3.7 Critério de Parada.....	19
3.8 Arquitetura do modelo.....	19
4 TESTES E RESULTADOS COMPUTACIONAIS.....	20
4.1 Processo metodológico e planejamento dos experimentos.....	21
4.2 Definição dos parâmetros	21
4.3 Resultados.....	24
4.4 Comparação com a literatura.....	27
5 CONCLUSÕES	29
6 REFERENCIAS	30

1 INTRODUÇÃO

No atual momento de economia globalizada, onde a competição tem se mostrado extremamente acirrada, as avançadas tecnologias e os novos conceitos de administração e gerenciamento da atividade industrial tem assumido um papel preponderante. A busca pela excelência total no tripé custo-qualidade-flexibilidade abre novas fronteiras no aperfeiçoamento de métodos de produção, desenvolvimento e incorporação de novas tecnologias de processamento, trabalho participativo e facilidade de reconfiguração de sistemas produtivos. Este contexto manifesta-se pelo fato de o mercados de consumidores de bens mostrar um crescimento na variedade e uma diminuição no ciclo de vida dos produtos. Recentemente, muitas organizações de manufatura fracassaram em competir com as rápidas mudanças do mercado, perdendo posição e competitividade. A vida dos produtos tende a ser cada vez menor com o passar do tempo, isto força as organizações de manufatura a reduzirem o ciclo de desenvolvimento de novos produtos, aumentarem a resposividade e a flexibilidade da produção.

A Crise do Petróleo de 1970 representou um marco de transformação do mercado mundial, passando de uma época que a demanda era maior que a oferta, para a situação atual, onde a oferta é maior do que a demanda. Com alta variedade de produtos no mercado, os consumidores tornaram-se mais exigentes em relação à qualidade dos produtos e passaram a ter alternativas de preço mais baixo. Sendo assim, as empresas necessitam produzir com alta qualidade, diversificação e baixo custo. Segundo Shingo (1996), a produção torna-se mais eficiente à medida que atividades desnecessárias, que não agregam valor, consideradas perdas, são reduzidas ou eliminadas do processo. A eliminação destas atividades possibilita uma redução no *lead time* (tempo de ciclo de produção) e um aumento da produtividade. Por outro lado, a flexibilização do sistema produtivo conflita com a necessidade das empresas de diminuir seus custos e das perdas ocasionadas por uma produção em baixa escala.

A Manufatura Celular surgiu como importante contribuição na gestão do conflito entre a produtividade (característica da produção em massa) e a flexibilidade em uma linha de produção (PAPAIOANNOU; WILSON, 2010). De acordo com Rodrigues et al. (2013), o conceito de Células de Manufatura é utilizado a partir do agrupamento de máquinas e partes. As partes são agrupadas em Famílias de Partes (FP) de modo a melhorar a produtividade e eficiência nos sistemas de manufatura. Por outro lado Chung et al. (2011) afirma que esses agrupamentos não são facilmente obtidos e podem demandar aproximações sofisticadas, sendo um problema difícil de ser equacionado.

Diante da complexidade do mercado e a necessidade da redução das perdas, o uso de diferentes técnicas de otimização combinatória vem notoriamente sendo usado como importante ferramenta para a Formação de Células de Manufatura, contribuindo no planejamento e rearranjo dos ciclos produtivos. Muitas dessas técnicas produzem resultados considerados satisfatórios, porém, não há garantia quanto a otimalidade da solução em um tempo computacional aceitável. Yin & Yasuda (2006) afirma que o problema de Formação de Células de Manufatura (PFCM) é uma tarefa de alta complexidade, sendo classificado como NP-Difícil.

Nos últimos anos importantes considerações foram feitas sobre o uso da otimização combinatória para a formação e sequenciamento de células de manufatura (LI; BAKI; ANEJA, 2010; NOURI; HONG, 2013; REZAZADEH; MAHINI; ZAREI, 2011; SAYADI; HAFEZALKOTOB; NAINI, 2013; SHARIFI; CHAUHAN; BHUIYAN, 2014) entretanto, esses autores tornam evidente a necessidade de continuação desses estudos, visto que há muito a contribuir com o problema e seu emprego em diversos setores da sociedade. As áreas de telecomunicações, logística, metal-mecânico, naval, eletrônica, componentes para calçados entre outras, apresentam problemas de Pesquisa Operacional com as características mencionadas. Portanto, são atividades que tem fomentado o desenvolvimento de técnica eficientes que sejam capazes de tratar, de forma adequada, a complexidade dos problemas de otimização atuais.

No entanto, estas áreas, na busca da excelência no mercado através do investimento tecnológico, da utilização eficiente dos recursos, na automação de máquinas/processos e na qualificação de recursos humanos, objetivam o principal ganho estratégico que é o aumento da produtividade. A busca da produtividade conflita com outra característica de excelência do mercado para uma indústria, a flexibilidade do Sistema de Manufatura, ou seja, a capacidade de reprogramar a produção através de um *mix* de diferentes estilos de partes, respeitar as datas de entrega do cliente, o aproveitamento integral das máquinas de produção, a facilidade de processar uma nova parte tão logo que esta esteja com as características do projeto definidas, a redução do trabalho em processo e a facilidade na adaptação do sistema a quaisquer mudanças no mercado, e de oferecerem preços competitivos no mercado (GOMÉS et. al, 2011).

Gerenciar o conflito entre a flexibilidade, característica de um Sistema de Manufatura Flexível, e a produtividade, característica de um sistema de produção em massa, são fatores que motivaram a realização deste trabalho.

A complexidade do assunto torna evidente a necessidade do estudo e do desenvolvimento de técnicas para a minimização das perdas produtivas, no aumento da

flexibilidade das organizações e na automação dos processos produtivos. Sendo o *setup* (período de tempo de parada entre o processamento de dois lotes) um ponto crítico neste contexto, por representar a raiz de diversas outras perdas, sua minimização torna-se essencial na manufatura flexível. A possibilidade da contribuição científico-tecnológica sobre o assunto e a formação intelectual de profissionais capazes de solucionar esse tipo de problema alicerçaram o desenvolvimento deste trabalho. Deste modo, o estudo e desenvolvimento de uma meta-heurística para a resolução dos PFCM e redução dos tempos de *setup*, pode contribuir nas diferentes áreas para o enfretamento dos desperdícios produtivos e na busca de menores preços ou no aumento da sua margem de lucro empresarial. Quanto à contribuição para a diminuição dos preços, existe uma possibilidade ainda mais desafiadora: levar a um novo público consumidor, até então omissos a diversos bens produzidos pela manufatura, a possibilidade do consumo de novos produtos e o aumento da qualidade de vida dessa parcela da população.

Portanto este trabalho teve como objetivo, a partir da análise das diferentes técnicas de Otimização Combinatória, contribuir para o desenvolvimento de um modelo de escalonamento aplicado ao Problema de Formação de Células de Manufatura minimizando o compartilhamento de recursos e a capacidade limitada de máquinas, visando otimizar o tempo total de produção, a minimização do número de trocas de ferramentas e tempos de *setup*. Para execução da proposta o processo metodológico é evidenciado pelo modelo proposto e das etapas do processo de experimentação.

Esse trabalho está estruturado em 4 capítulos subsequentes, no Capítulo 2 é apresentado uma breve revisão da literatura sobre o assunto, o Capítulo 3 apresenta o detalhamento e particularidades do modelo proposto, o Capítulo 4 demonstra a abordagem utilizada e a experimentação realizada. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A gestão da produção é um fator muito importante para o sucesso de uma indústria. Através dela busca-se organizar o ambiente de produção de maneira a economizar custos e tempo de produção, sem perda de qualidade. Indústrias que possuem o foco na pequena variedade e alto volume de produção geralmente organizam o ambiente de produção em linhas de produção, sendo que cada linha é composta de vários tipos de máquinas (recursos de produção) dedicadas exclusivamente à produção de um único produto, tendo em vista o alto volume de produção normalmente requerido (TRINDADE; OCHI, 2006).

Para o caso de indústrias que possuem como foco a grande variedade e volume médio de produção, não há a necessidade de que as máquinas sejam dedicadas à produção de apenas um produto. Desta forma, é necessária a aplicação de uma nova abordagem de organização destes sistemas de produção. Uma abordagem muito usada é a Tecnologia de Grupo (*Group Technology*), que segundo Wu et al. (2009), parte do princípio da similaridade existente entre os tipos de partes em uma linha de produção. Conforme Massote (1995), uma aplicação bastante relevante da chamada tecnologia de grupo é a manufatura celular, onde partes que guardam entre si uma relação de similaridade são agrupadas em células de máquinas e várias metodologias têm sido empregadas para, dentro da manufatura celular, minimizar alguns inconvenientes, como o transporte intercelular e o tempo de *setup*. *Setup*, pode ser definido como o período de tempo de parada entre o processamento de dois lotes. Este período de tempo pode incluir o tempo gasto no descarregamento e carregamento de ferramentas, procedimentos de limpeza, manutenção, controle de qualidade, dentre outros (GÓMEZ, 1996).

De acordo com Rodrigues et al. (2013), o conceito de células de manufatura é utilizado a partir do agrupamento de máquinas e partes. As partes são agrupadas em Famílias de Partes de modo a melhorar a produtividade e eficiência nos sistemas de manufatura. Conforme mencionado por Wu et al (2010), entre os benefícios da adoção da tecnologia de grupo para a formação da manufatura celular, estão a redução no inventário, a menor necessidade de capacidade produtiva, custos em geral, menores *lead times*, rápida resposta para mudanças internas e externas (como alterações no *mix* de produção, nas demandas e falhas de máquinas), entre outros. É importante mencionar, por outro lado, que no uso de células de manufatura, conforme Rodrigues et al. (2013), a tarefa de balanceamento de carga de produção nem sempre é uma tarefa fácil, podendo-se ter máquinas com excesso ou falta de capacidade produtiva.

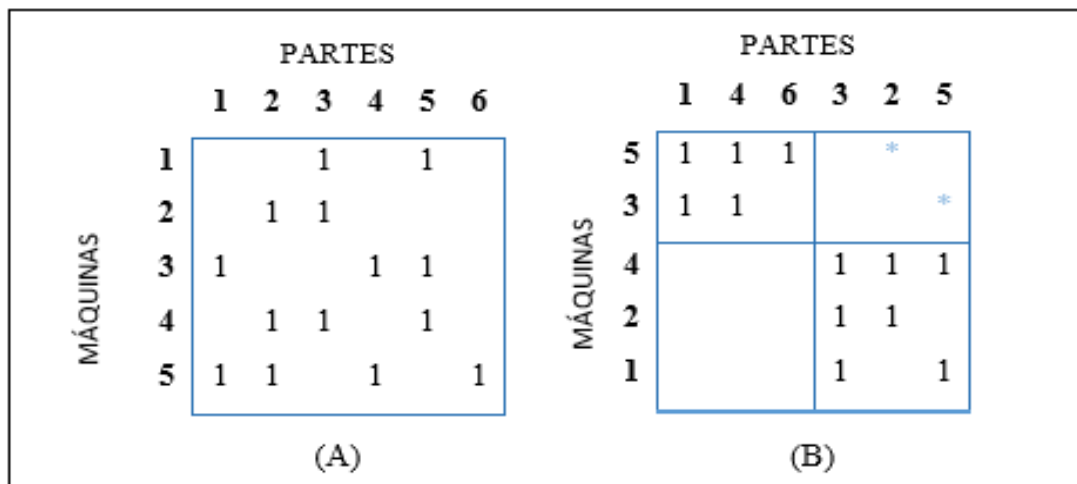
2.1 O Problema de Formação de Células de Manufatura

O Problema de Formação Células de Manufatura (PFCM) é, segundo Wu et al (2009), em termos práticos, a implementação de Tecnologia de Grupo, onde partes que guardam entre si uma relação de similaridade são unidas na forma de famílias em uma planta existente. Por outro lado Chung et al. (2011) afirma que esses agrupamentos não são facilmente obtidos, e podem demandar aproximações sofisticadas.

O Problema de Formação Células Manufatura é facilmente representado na forma de uma matriz incidência A_{ij} (WU et al., 2009). Sendo A uma matriz binária [0-1] assim descrita, as linhas correspondem às máquinas e as colunas às partes (ou vice-versa) e se $a_{ij} = 1$ então a

parte i necessita da máquina j para sua produção. Este é o ponto de partida tanto para o desenvolvimento das várias técnicas voltadas a formação de células. O objetivo dos algoritmos de formação de famílias máquinas-partes é rearranjar as linhas e as colunas da matriz de incidência, de tal maneira que a matriz resultante fique com todos os elementos iguais a 1 agrupados em blocos na diagonal principal, em que cada bloco na matriz rearranjada indique um grupo de partes e o correspondente grupo de máquinas. Dessa forma, as famílias de partes e as células de máquinas podem ser identificadas. A formação de células de manufatura é exemplificado na Figura 1.

Figura 1 -Matriz de Incidência
(A) Antes do agrupamento e **(B)** Após o agrupamento.



Fonte: O Autor

A Figura 1(A) mostra a disposição inicial das máquinas e partes. A Figura 1(B), apresenta duas células de manufatura geradas, a célula 1 com as máquinas 5 e 3 e a Célula 2 com as máquinas 4, 2 e 1 (GÓMEZ; GALAFASSI, 2010). Os elementos fora da diagonal principal (*) representam o número total de processamentos que as partes terão em máquinas de outras células. Gómez et. al (2011) considera esse compartilhamento de recursos como elementos excepcionais, deste modo, quando não se consegue a eliminação total desses elementos, o objetivo do problema é a minimização do compartilhamento de recursos entre as células. Vale ressaltar que a matriz final será diferente, quando se usar diferentes métodos de agrupamento do conjunto máquina-partes.

2.2 O PFCM como um problema de clusterização

A obtenção de células de manufatura de forma otimizada é um trabalho difícil, pois um sistema de manufatura pode ter um elevado número de soluções possíveis, e encontrar a melhor solução dentre elas exige um alto desempenho computacional.

Conforme afirma Peres (2006), a formação de células de manufatura pode ser classificada como um problema de clusterização, onde é possível calcular o número de soluções possíveis através do número de *Stirling* dado pela Equação (1).

$$\sum_{i=1}^c (-1)^{c-i} * \frac{i^n}{[i! * (c-i)!]} \quad (1)$$

Na formação de células de manufatura, pode-se dizer que as partes ou as máquinas são os dados e as células e famílias são os *clusters*. Desta forma o número de maneiras de agrupar n partes ou máquinas em c *clusters* (mutuamente exclusivos e não vazios) é dada pela Equação (1). Porém o problema de formação de células de manufatura precisa agrupar as máquinas em células e as partes em famílias. Cada célula pode ser associada a qualquer família para formação de *clusters* (TRINDADE; OCHI, 2006). Sendo assim o número de possíveis soluções para p partes, m máquinas e c *clusters* é dado pela Equação (2).

$$\left(\sum_{i=1}^c (-1)^{c-i} * \frac{i^p}{[i! * (c-i)!]} \right) * \left(\sum_{i=1}^c (-1)^{c-i} * \frac{i^m}{[i! * (c-i)!]} \right) \quad (2)$$

A Tabela 1 ilustra a explosão no crescimento do número de soluções possíveis em função do número n de partes e m de máquinas, para um número de *clusters* fixado em $p=3$ *clusters*.

Tabela 1- Crescimento exponencial no número de soluções em função do crescimento do número de partes e máquinas para a formação de $p=3$ *clusters*

Nº de máquinas	Nº de partes	Nº de soluções
15	10	2,2159683 x 10 ¹⁰
60	40	1,431603835 x 10 ⁴⁶
100	70	3,583372838 x 10 ⁷⁹

Fonte: Peres (2006). Adaptado.

Observando os dados da Tabela 1, pode-se concluir que o uso exclusivo de métodos exatos torna-se inapropriado a medida que as instâncias PFCM aumentam; direcionando com isso a maior parte das pesquisas para o desenvolvimento de métodos heurísticos e meta-heurísticos para a sua solução aproximada.

2.3 Representação matemática do agrupamento de elementos em *clusters*

Ainda de acordo com Peres (2006) é possível modelar matematicamente a alocação de elementos em *clusters* através do modelo descrito nas Equações (3) a (5). Esta formulação pode ser usada para o agrupamento de partes em *cluster* ou de máquinas em *cluster*, porém não contempla a clusterização de ambas simultaneamente.

Maximizar:

$$\sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^n \sum_{j<i} s_{ij} * x_{ik} * x_{jk} \quad (3)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k=1}^c x_{ik} = 1, i \in 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ik} < u, k \in 1, 2, \dots, c \quad (5)$$

Onde:

$$x_{ik} \in 0, 1$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$k = 1, 2, \dots, c$$

c = número de *clusters* a serem formados

n = número de elementos

u = número máximo de elementos por cluster

s_{ij} = índice de similaridade entre os elementos i e j

$x_{ik} = 1$ se o elemento i pertence ao *cluster* k e 0 caso contrário.

$x_{jk} = 1$ se o elemento j pertence ao *cluster* k e 0 caso contrário.

Para cada par de elementos dentro de um mesmo *cluster*, o resultado da Equação (3) aumenta de acordo com a similaridade entre os dois elementos. Sendo assim, quanto maior a similaridade entre os elementos de um mesmo *cluster* maior será o resultado da equação. As Equação (4) garante que um elemento só pode estar em um *cluster* e a Inequação 5 garante que um *cluster* não contém mais elementos que o permitido.

Na literatura o PFCM é classificado como um Problema de Clusterização Automática, ou seja, um problema de agrupar os elementos de uma base de dados onde o número de *clusters* a serem formados é uma variável do problema. Uma interessante evolução do PFCM é apresentado por Papainnou & Wilson (2010). Em relação as técnicas mais utilizadas destacam-se as meta-heurísticas.

Meta-heurísticas podem ser definidas como sendo um método de solução que orquestra uma interação entre procedimentos de melhoria local e estratégias de alto nível para criar um processo capaz de escapar de ótimos locais e produzir uma busca robusta no espaço de soluções (GENDREAU; POTVIN, 2010). As meta-heurísticas mais encontradas e conseqüentemente as mais aplicadas são: Têmpera Simulada, Busca Tabu, Algoritmos Genéticos e GRASP. Essas meta-heurísticas podem ser aplicadas na resolução de diversos problemas, tais como: caixeiro viajante, carteiro chinês, escalonamento de tarefas, corte e empacotamento, entre outros. Em relação ao PFCM diversas contribuições foram feitas sobre meta-heurística para a solução do problema, em particular: A Busca Tabu (DÍAZ; LUNA; ZETINA, 2013; MULLER, 2006; SUN; AND LIN; AND, 1995), Algoritmos Genéticos (JAMES; BROWN; KEELING, 2007; RESENDE; GONÇALVES, 2004; SHARIFI; CHAUHAN; BHUIYAN, 2014; TRINDADE; OCHI, 2006), Têmpera Simulada (XAMBRE; VILARINHO, 2003) e Algoritmo GRASP (DÍAZ; LUNA; LUNA, 2010; PERES, 2006).

2.4 Busca Tabu

O método meta-heurístico Busca Tabu (BT) foi originalmente proposto por Glover em 1986 para diversos problemas de otimização combinatória e consiste em numa rotina iterativa para explorar o espaço de soluções movendo-se de uma solução para outra que seja seu melhor vizinho tendendo a evitar um mínimo local (GALAFASSI, 2011). Basicamente, a BT possui três princípios fundamentais: (a) uso de uma estrutura de dados (fila) para guardar o histórico da evolução do processo de busca, (b) uso de um mecanismo de controle para fazer um balanceamento entre a aceitação, ou não, de uma nova configuração, com base nas informações registradas na lista tabu referentes às restrições e aspirações desejadas e (c) incorporação de

procedimentos que alternam as estratégias de diversificação e intensificação da busca (MULER, 2006).

Para a utilização do método BT, é fundamental a definição da Função Objetivo (FO). O procedimento começa com uma solução inicial s , viável gerada independentemente e tenta alcançar um ótimo global do problema por movimentos pré-definidos. Sempre que uma solução s é obtida é gerado um subconjunto V^* de $N(s)$ e é realizado o movimento para a melhor solução s^* em V^* . Se $N(s)$ não é muito grande é possível fazer $V^* = N(s)$.

A utilização do critério de melhor movimento na BT é baseado na suposição de que movimentos bem avaliados tem grande probabilidade de conduzir a uma solução ótima. De maneira a evitar ciclos e mínimos locais, não é permitido voltar às soluções que foram visitadas em um número k de movimentos anteriores. Esta estratégia é chamada de Lista Tabu (LT) ou memória de curto prazo.

Segundo Muller (2006) sempre que um movimento de s para s^* é executado, o movimento é introduzido no fim da LT e o movimento mais antigo é removido. No momento em que um movimento que conduz a solução s entra na lista, todos os movimentos que retornam à s ficam proibidos nas próximas k iterações.

Corroborando ao exposto, Gómez (1996) afirma que os mesmos movimentos considerados tabu podem levar a soluções diferentes, deste modo é introduzido um procedimento para cancelar a situação tabu de um movimento quando este leva a uma melhoria. Uma função de critério de aspiração $A(z)$ é definida para cada valor z da FO. Se um movimento para a solução vizinha s^* é um movimento tabu, mas $f(s^*) > A(z = F(s))$, quando trata-se de um problema de maximização, então a situação tabu deste movimento é retirada e s^* é considerada como um membro normal de V^* .

Duas regras podem ser definidas como critério de parada na BT. A primeira é pela definição de um número máximo de iterações que serão realizadas sem se obter uma melhoria na melhor solução obtida (Nbmax). A segunda regra condiciona o critério de parada quando a melhor solução obtida é considerada muito próxima do limite inferior da função para problemas de minimização ou do limite superior para problemas de maximização. O problema é que, geralmente, este limite não é conhecido com suficiente precisão o que dificulta sua utilização (GALAFASSI, 2011).

3 MODELO PROPOSTO PARA O PFCM

Este capítulo descreve o modelo Busca Tabu proposto para a resolução do Problema de Formação de Células de Manufatura. Nos tópicos a seguir são descritas todas as particularidades do algoritmo proposto e a descrição de cada componente de sua arquitetura.

3.1 Informação de Entrada sobre o PFCM

Como entrada, o algoritmo receberá uma matriz binária $M \times P$, onde M representa o número de máquinas e P o número de partes. Nesta matriz um elemento $a_{mp} = 1$ indica que a máquina m realiza uma operação sobre a peça p e um elemento $a_{mp} = 0$ indica o contrário.

3.2 Formato da Solução

Conforme proposto em Peres (2006) a solução do problema é representada por uma associação de máquinas e partes ($m + p$), onde m representa o número de máquinas e p o número de partes do problema. Desta forma, uma solução é representada como: $s = (x_1 \dots x_m | y_1 \dots y_p)$. Esta associação representa um vetor onde as primeiras posições representam as máquinas, as últimas posições representam as partes e o conteúdo (x, y) do vetor identifica em qual *cluster* esta máquina ou peça foi alocada. Considere um problema de 12 máquinas, 15 partes e 4 *clusters*:

$$s1 = (2\ 3\ 2\ 3\ 2\ 3\ 4\ 1\ 3\ 4\ 3\ 1\ | 2\ 4\ 2\ 4\ 1\ 1\ 2\ 2\ 1\ 1\ 3\ 3\ 4\ 4\ 3)$$

Cada x_i indica para qual célula cada máquina é alocada. Por exemplo, em $s1$ $x_1=2$ significa que a máquina M1 é alocada para a célula 2, do mesmo modo, cada y_1 indica para qual família cada parte é alocada. Deste modo a célula 1 é formada pelas máquinas 8 e 12 e partes 5, 6, 9 e 10, a célula 2 pelas máquinas 1, 3, 5 e as partes 1, 3 7 e 8, a célula 3 pelas máquinas 2, 4, 6, 9 e 11 e pelas partes 11, 12 e 15 e por fim a célula 4, composta pelas máquinas 7 e 10 e processa as partes 2, 4, 13 e 14.

3.3 Definição do Número de *Clusters*

Conforme Peres (2006), uma solução válida deve possuir pelo menos dois *clusters*, pois uma solução com apenas um *cluster* consistiria em agrupar todas as máquinas e partes em um

mesmo *cluster*. Sabendo que o número de *clusters* de uma solução possui um limite inferior e um limite superior, para evitar que sejam geradas soluções com *clusters* unitários, ou seja, com apenas uma máquina ou uma peça, o limite superior ideal para o número de *cluster* é igual à metade do número de máquinas, já que o mesmo é sempre menor do que o número de partes. O valor para o limite mínimo de *clusters* usado é igual a 2.

Deste modo neste trabalho, sendo m o número de máquinas e este é sempre menor que o número de partes, é sorteado um número dentro da faixa da faixa $[2, m/2]$ para ser o número de *clusters* para a referida solução. A utilização do limite superior $m/2$ não evita que sejam formadas soluções com *clusters* unitários, mas restringe o espaço de busca, pois soluções com um número de *clusters* maior que este limite possuem *clusters* unitários.

3.4 Função Objetivo

Para a utilização do método BT, é fundamental a definição da Função Objetivo (FO) do problema. A Função Objetivo ou Função de Avaliação que se deseja maximizar é a Eficácia de Agrupamento (EA) utilizada por vários algoritmos apresentados na literatura (PERES, 2006; TRINDADE; OCHI, 2006), e será utilizada neste trabalho para avaliar as soluções geradas pelo algoritmo BT proposto. A Eficácia de Agrupamento, representada por Γ , tem a seguinte definição:

$$\Gamma = \frac{e - e_0}{e + e_v} \quad (6)$$

Onde:

e = o número de operações (1's) na matriz de entrada;

e_v = o número de lacunas nos blocos diagonais (*cluster/células*);

e_0 = número de elementos excepcionais.

A Equação (6) procura maximizar a densidade dentro de cada *cluster* e minimizar o número de elementos excepcionais, conseqüentemente, minimizando a dependência entre os *clusters*. A EA encontra o valor máximo quando o número de elementos excepcionais (e_0) e o número de elementos iguais a zero dentro dos *clusters* (e_v) forem nulos.

3.5 Estruturas de vizinhança

A definição de estrutura de vizinhança é um dos passos mais importantes de uma meta-heurística Busca Tabu, pois ela está intimamente ligada ao espaço de soluções percorridos pelo

algoritmo. A cada iteração de uma BT, as transformações locais que podem ser aplicadas na solução corrente, denotada por s , definem um conjunto de soluções vizinhas no espaço de busca, denotado por $N(s)$ (a vizinhança de s).

No modelo BT proposto são utilizadas seis estruturas de vizinhança. As três primeiras (V1, V2 e V3) realizaram a troca entre partes: V1 que realiza troca entre duas partes, V2 que troca duas máquinas e V3 que realiza a de troca de máquinas e partes. As três últimas estruturas de vizinhanças (V4, V5 e V6) realizam o reposicionamento de máquinas e partes, retirando as partes/máquinas e inserindo em uma nova posição. V4 é responsável por reposicionar partes, V5 máquinas e V6 pelo reposicionamento simultâneo de máquinas e partes.

3.6 Lista Tabu

A Busca Tabu trabalha com estruturas de memória, entre as quais a mais usada é a Lista Tabu. Nessa lista ficam armazenados os últimos movimentos reversos realizados, com a função de evitar que a busca fique presa em pontos de mínimos ou máximos locais, provocados, por exemplo, pela ocorrência de ciclos. Os movimentos armazenados na Lista Tabu ficam proibidos por um determinado número de iterações, onde, geralmente, somente uma pequena e limitada quantidade de informações são gravadas (Gendreau et al, 2003). Para este modelo o tamanho da LT será definida nos testes realizados no Capítulo 4, bem como o tamanho da vizinhanças e o Nbmax.

3.7 Critério de Parada

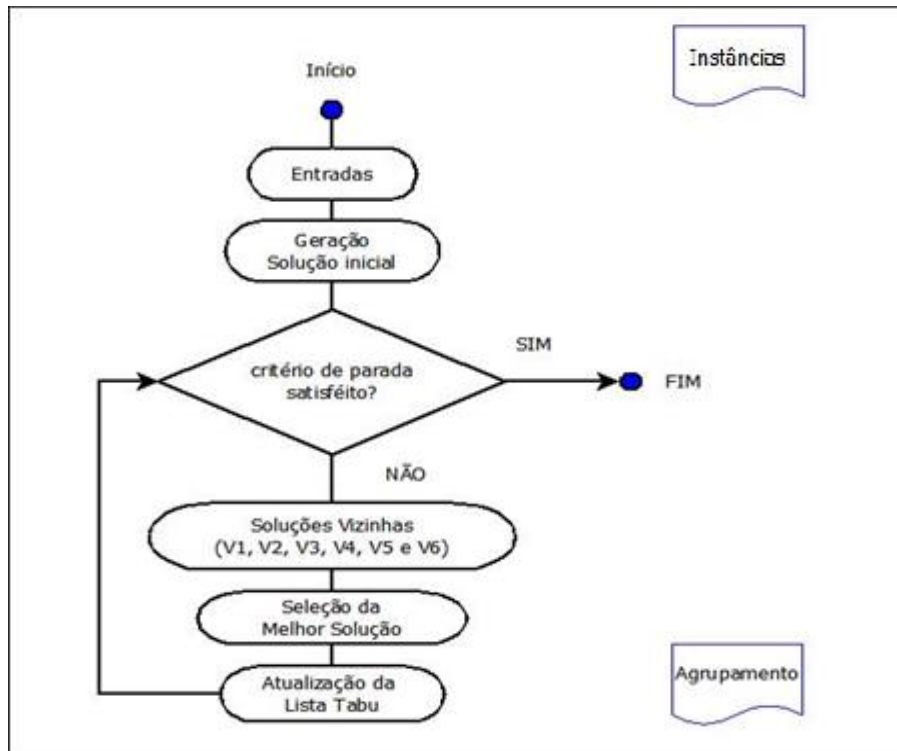
O Critério de Parada a ser utilizado será o Nbmax, ou seja, número máximo de iterações sem que ocorra uma melhora da função objetivo. Esse critério será determinado pelos testes de parâmetros, onde aqueles que obtiverem melhores resultados serão mantidos na validação do modelo.

3.8 Arquitetura do modelo

Tendo em vista o funcionamento original do modelo proposto por Glover e as definições do modelo BT proposto, apresentados nas seções anteriores (3.1 a 3.7), nesta seção será

apresentado o macro processo do algoritmo que detalha cada passo realizado. A Figura 2 apresenta o fluxograma de funcionamento do modelo.

Figura 2- Arquitetura do Modelo BT proposto.



Fonte: O Autor

O algoritmo iniciará carregando as entradas na forma de matrizes *Máquinas* \times *Partes*, individualmente. É gerado uma solução inicial de forma aleatória para a instância, que será avaliada. O Critério de Parada irá verificar o número máximo de iterações sem melhoras na função objetivo. Caso o critério de parada seja satisfeito são apresentados os agrupamentos realizados e o valor da EA. Caso o critério não seja satisfeito, é realizada a geração de soluções vizinhas pelas seis estruturas de vizinhança do modelo (seção 3.5), partindo disso, a melhor solução vizinha é selecionada respeitando a Lista Tabu e o Critério de Aspiração. Por fim, a Lista Tabu e os arquivos de saída são atualizados.

4 TESTES E RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Para avaliar do modelo proposto, foram utilizadas as 35 instâncias utilizadas para o PFCM e disponíveis em James, Brown & Keeling (2007). As próximas seções apresentam os resultados obtidos e os procedimentos experimentais utilizados.

4.1 Processo metodológico e planejamento dos experimentos

Os experimentos para o modelo proposto são realizados de forma gradativa afim de se verificar o desempenho do modelo proposto, para tanto a execução do presente projeto é dividida em três etapas. Essa forma de abordagem fez-se necessária pela complexidade do problema considerado, bem como a possibilidade de calibrar o algoritmo concomitantemente a sua execução.

A primeira etapa do processo de experimentação se deu pela escolha dos parâmetros a serem utilizados na validação do modelo. Para tanto, foi escolhida uma instância para a verificação do melhor conjunto de parâmetros a serem utilizados nos testes subsequentes. A metodologia escolhida baseou-se na combinação entre diferentes tamanhos de Lista Tabu, LT, de estruturas de vizinhança, V, e número máximo de iterações sem melhora na FO, Nbmax. Para realizar essas combinações o Nbmax é fixado enquanto os demais parâmetros são combinados entre si. Complementarmente, o tempo de execução em cada instância é apresentado.

A segunda etapa do processo de experimentação congregou-se pela execução do algoritmo proposto em todas as 35 instâncias da literatura com os parâmetros definidos na etapa anterior. O algoritmo foi executado para cada instância e posteriormente, munido dos resultados, foram calculados a média da Eficácia de Agrupamento e o Desvio Padrão em torno dessa média. Por fim, a etapa três realiza a validação do modelo através das 35 instâncias da literatura e compara os melhores resultados obtidos com outros modelos clássicos para PFCM, também disponíveis na literatura. Em cada uma das etapas os resultados são apresentados em tabelas e gráficos, com o objetivo de facilitar a visualização e interpretação. Os valores da FO, Eficácia do Agrupamento, são apresentados em uma escala 0 a 100 (em termos percentuais), por assim ser utilizados na literatura e por facilitar as interpretações e comparações.

4.2 Definição dos parâmetros

A primeira etapa de experimentos tem o objetivo de estudar a influência dos parâmetros na obtenção de soluções. Analisa-se a combinação de valores distintos para o tamanho da vizinhança, LT e Nbmax. Diferentemente da metodologia utilizada para a definição do número de *clusters* proposta para os testes modelo (seção 3.3), nesta etapa foram utilizados número ideal de *clusters* para a instância definidos por Resende & Gonçalves (2004). Essa escolha aporta para discussões futuras neste trabalho.

Os experimentos foram realizados na instância 10, proposta por Mosier & Taube (1985). Os valores das vizinhanças e Lista Tabu são combinados entre si gerando um total de 36 combinações. Quanto ao critério de parada, fixou-se o Nbmax em 1.000 iterações sem a melhora da Função Objetivo. O algoritmo foi executado 30 vezes para cada combinação.

O Quadro 1 apresenta os resultados obtidos para Nbmax = 1.000, LT variando entre 5, 10, 15, 20, 30 e 40 e o tamanho da vizinhança variando entre 12, 30, 60, 90 e 120 e 150. As colunas mostram a variação do tamanho do tamanho da vizinhança e as linhas mostram a variação da LT. Os resultados exibidos são o valor médio da Eficácia do Agrupamento e o desvio padrão (σ) em torno dessa média, para cada combinação. Além disso, os resultados são analisados com base em quadrantes evidenciados no Quadro 1. Os cinco maiores valores para a média da EA e os cinco menores valores para o Desvio Padrão são realçados, em negrito e sublinhado respectivamente, para facilitar o entendimento.

QUADRO 1-Avaliação de parâmetros para BT com Nbmax = 1.000

Lista Tabu		Vizinhanças					
		12	30	60	90	120	150
5	EA	27,60	30,02	28,45	29,15	28,97	29,32
	σ	3,59	4,10	3,93	2,97	3,17	2,75
10	EA	28,92	30,22	29,26	28,71	29,70	29,80
	σ	3,60	2,90	<u>2,37</u>	2,85	3,40	2,76
15	EA	28,25	28,41	29,27	28,90	30,22	29,32
	σ	3,01	3,16	3,37	<u>1,78</u>	3,28	2,86
20	EA	28,82	28,15	28,80	30,33	29,71	28,58
	σ	2,57	3,51	3,26	3,37	2,38	2,86
30	EA	29,22	28,55	30,39	29,79	29,45	27,80
	σ	<u>2,23</u>	<u>2,04</u>	<u>2,29</u>	2,78	3,72	3,12
40	EA	29,50	30,21	29,35	28,36	29,32	29,54
	σ	2,95	3,45	3,45	3,39	2,75	3,63

Fonte: O Autor

Analisando o Quadro 1, verifica-se que os melhores resultados são encontrados no terceiro quadrante (pela sequência cartesiana), que combina LT maiores (20, 30 e 40) e as vizinhanças 12, 30 e 60, obtendo duas das cinco melhores medias para a EA e três dos melhores desvios. A Lista Tabu tem influência direta neste resultado, pois ela tem a característica de diversificar a busca, guiando a exploração para regiões ainda não exploradas no espaço de soluções. Desse modo, com o aumento desse valor, a Busca Tabu acaba diversificando a busca, impedindo que regiões promissoras sejam melhores exploradas.

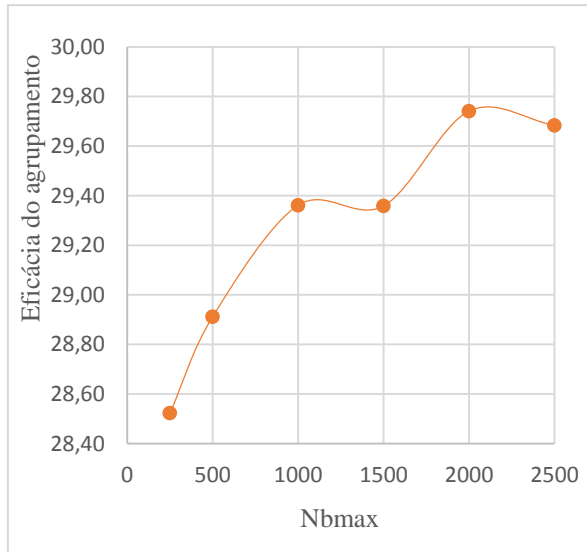
Percebe-se, também, que as melhores soluções concentram-se em vizinhanças de tamanho médio (30, 60 e 90). Uma vizinhança pobre ou grande demais compromete a qualidade das soluções e tempo de execução da BT. Sendo assim a escolha do tamanho da vizinhança é um fator determinante na BT. Esse fato pode ser evidenciado pela análise dos quadrantes 1 e 2, onde as maiores vizinhas obtiveram resultados pouco satisfatórios.

Analisado em específico o terceiro quadrante, que obteve os melhores resultados, percebe-se que a única combinação que obteve concomitantemente uma boa média e bom desvio é a combina LT de 30 posições e vizinhança de 60 unidades, essa combinação obteve a melhor EA (30,39%) sendo assim considerada a melhor alternativa e será utilizada nas próximas etapas do processo de experimentação.

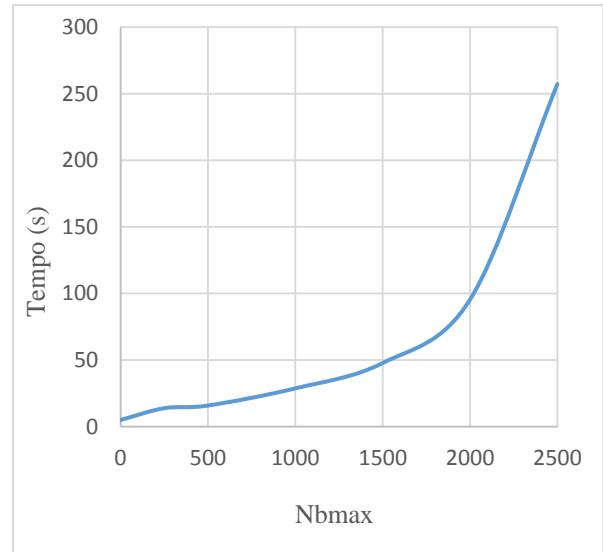
Partindo dos melhores resultados obtidos no experimento anterior, o segundo passo para a definição dos parâmetros compreende a escolha do melhor Nbmax para o modelo. Deste modo, para essa análise foram fixadas vizinhanças de tamanho 60 e LT de 30 posições. Nesse momento, foram analisados diferentes valores para o Nbmax (250, 500, 1.000, 1.500, 2.000 e 2.500). Os resultados são apresentados no Gráfico 1, onde o eixo horizontal apresenta o Nbmax utilizado e o eixo vertical apresenta a média da EA alcançada em cada teste. Também foram analisados os tempos de execução do algoritmo, apresentados no Gráfico 2.

Conforme evidenciado pelo Gráfico 1, os melhores valores para a FO são apresentados para Nbmax 1.000 e 2.000 apresentando EA médios de 29,36% e 29,74%, respectivamente.

Conforme comentado anteriormente, o melhor resultado foi obtido para o teste com Nbmax de 2.000 interações sem melhora da função objetivo, dado que o aumento do Nbmax permite que a busca seja realizada por um período maior de tempo, permitindo que a busca realize uma exploração mais abrangente do espaço de soluções. Em contra partida, os resultados dos testes para a instância utilizando Nbmax de 1.000 obtiveram valores pouco menores e de pouca influência na qualidade das soluções. Porém, o aumento do Nbmax produz um aumento considerável no tempo computacional, fato que também deve ser analisado na escolha deste parâmetro.

GRÁFICO 1- variação do Nbmax

Fonte: O Autor

GRÁFICO 2-Tempo de execução

Fonte: O Autor

Pelo Gráfico 2 é possível observar que o aumento do Nbmax implica no crescimento exponencial do tempo para realizar os agrupamentos. Com Nbmax de 1000 intenções sem melhora da FO o tempo gasto pelo algoritmo foi de 28,72 segundos, com o Nbmax assumindo 2.000 interações o tempo de execução saltou para 95,36 segundos, um aumento mais de 232% no tempo de execução final. Sendo assim, a melhor alternativa de combinação de parâmetros apresentou-se pela configuração de LT de 30 posições, vizinhança de 60 unidades e Nbmax de 1.000 iterações sem melhora da FO, sendo utilizado na etapa seguinte para o teste em todas as 35 matrizes da literatura.

4.3 Resultados

Após a definição dos parâmetros a serem utilizados no modelo (Nbmax 1.000, LT 30 Posições e Vizinhança de 60) o modelo foi executado por 50 vezes nas 35 matrizes da literatura. A maior e a menor solução encontradas para cada instância são apresentadas na Tabela 2, bem como a média da Eficácia de Agrupamento e seu respectivo Desvio Padrão. Para geração das soluções o modelo foi criado e compilado em linguagem C++ em um microcomputador com processador intel core i7 de 1.8 GHz, 8 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 8.

TABELA 2- Resultados computacionais do algoritmo Busca Tabu proposto

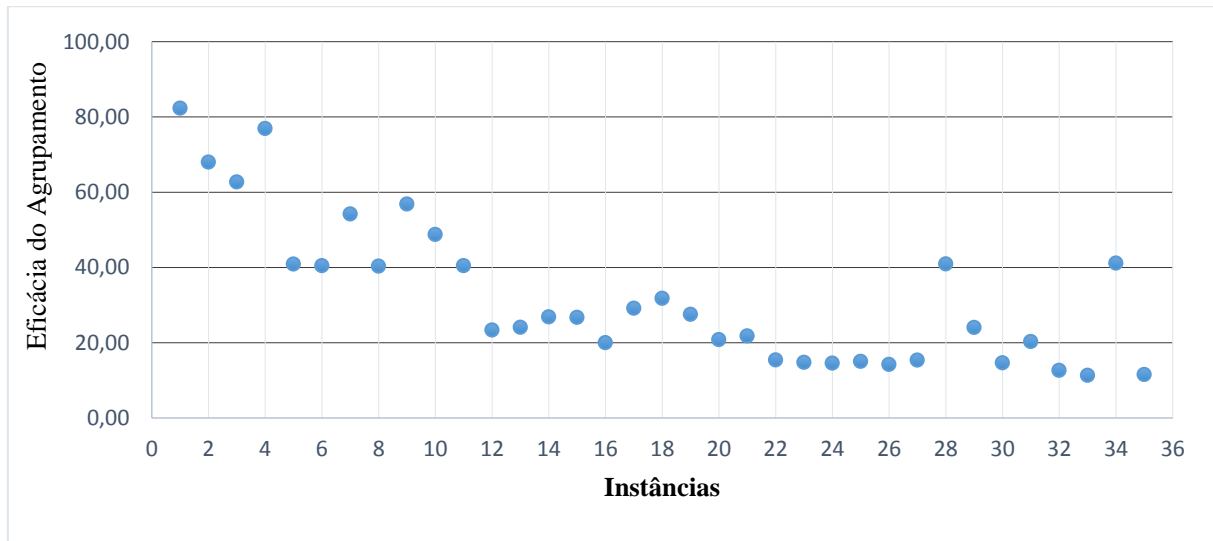
Instância	Fonte	Tamanho	Menor	Maior	Média	Desvio
1	King & Nakornchai (1982)	5 x 7	39,29	82,35	59,74	11,65
2	Waghodecar & Sahu (1984)	5 x 7	50,00	68,00	60,00	4,45
3	Seiffodini (1989)	5 x 18	37,50	62,71	47,89	5,55
4	Kusiak (1992)	6 x 8	47,06	76,92	52,50	5,29
5	Kusiak & Chow (1987)	7 x 11	34,09	40,91	38,40	1,63
6	Boctor (1991)	7 x 11	34,09	40,48	37,32	2,20
7	Seiffodini & Wolfe (1986)	8 x 12	53,70	54,24	53,77	0,18
8	Chandrasekaran & Rajagopalan (1986)	8 x 20	30,39	40,37	35,16	2,48
9	Chandrasekaran & Rajagopalan (1986)	8 x 20	42,28	56,88	48,48	3,55
10	Mosier & Taube (1985a)	10 x 10	26,76	48,78	31,21	4,11
11	Chan & Milner (1982)	10 x 15	30,68	40,48	34,47	2,45
12	Askin & Subramanian (1987)	14 x 24	15,10	23,37	19,77	1,79
13	Stanfel (1895)	14 x 24	18,82	24,08	21,08	1,25
14	McCormick (1972)	16 x 24	20,42	26,89	23,92	1,49
15	Srinivasan (1990)	16 x 30	23,13	26,74	24,89	0,94
16	King (1980)	16 x 43	16,39	20,00	18,85	0,77
17	Carrie (1973)	18 x 24	19,73	29,17	24,80	1,96
18	Mosier & Taube (1985b)	20 x 20	23,48	31,78	27,70	2,16
19	Kumar (1986)	20 x 23	22,70	27,55	25,13	1,06
20	Carrie (1973)	20 x 35	17,49	20,83	19,65	0,76
21	Boe & Cheng (1991)	20 x 35	17,75	21,80	20,08	0,75
22	Chandrasekaran & Rajagopalan (1989)-1	24 x 40	13,21	15,42	13,97	0,47
23	Chandrasekaran & Rajagopalan (1989)-2	24 x 40	13,26	14,78	13,91	0,44
24	Chandrasekaran & Rajagopalan (1989)-3	24 x 40	12,87	14,58	13,78	0,49
25	Chandrasekaran & Rajagopalan (1989)-4	24 x 40	12,22	15,04	13,29	0,53
26	Chandrasekaran & Rajagopalan (1989)-5	24 x 40	12,17	14,24	12,95	0,49
27	Chandrasekaran & Rajagopalan (1989)-6	24 x 40	12,15	15,38	13,40	0,70
28	McCormick (1972)	27 x 27	36,32	40,96	39,25	0,93
29	Carrie (1973)	28 x 46	15,97	24,08	18,95	1,80
30	Kumar & Vannelli (1978)	30 x 41	13,34	14,64	13,97	0,33
31	Stanfel a (1985)	30 x 50	19,79	20,32	20,29	0,13
32	Stanfel b (1985)	30 x 50	11,22	12,67	11,90	0,37
33	King & Nakornchai (1982)	30 x 90	8,53	11,32	9,52	0,84
34	McCormick (1972)	37 x 53	33,95	41,17	38,78	1,72
35	Chandrasekaran & Rajagopalan (1987)	40 x 100	10,07	11,54	10,74	0,31

Fonte: O Autor

Conforme dados da Tabela 2, em relação a melhor solução obtida em cada instância em termos percentuais, dos 35 problemas analisados, uma instância apresentou a Eficácia de

Agrupamento superior a 80%, três instâncias obtiveram a melhor solução entre 60 e 80%, nove apresentaram soluções ótimas ente 40 e 60%, doze destas instâncias os resultados variaram entre 20 e 40% e dez matrizes apresentaram desempenho inferior a 20%. Para melhor analisar os dados citados, o Gráfico 3 mostra a dispersão das instâncias em relação EA média obtida.

GRÁFICO 3 – Dispersão das soluções pela Eficácia do Agrupamento



Fonte: O Autor

Vale destacar que das dez instâncias que apresentaram desempenho inferior a 20%, seis dessas são as instancias de 24 máquinas e 40 partes propostas por Chandrasekaran & Rajagopalan (1989), esses resultados podem estar atrelados as particularidades desses problemas ou por limitações da técnica em percorrer os respectivos espaços de solução.

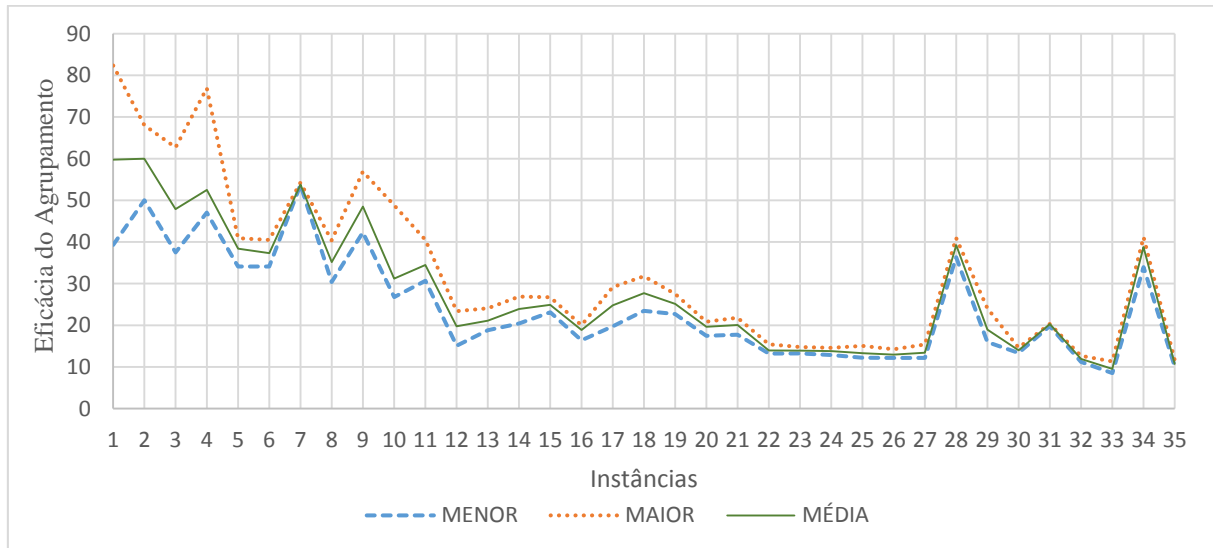
Um fato que merece ser observado é a homogeneidade das soluções encontradas em cada instância, que pela análise dos desvios padrões calculados, apresentam comportamento aparentemente correlacionado ao tamanho das instâncias. Esse fato pode ser observado no Gráfico 4, onde são apresentados a melhor, a pior e a média das soluções para cada instância.

No Gráfico 4 é possível observar que a diferença entre o valor da melhor e pior solução em cada instância tende a ser menor a medida que o tamanho das matrizes aumenta. Enquanto as matrizes menores apresentam maior diferença entre a melhor e a pior solução e desvios padrões mais altos, os resultados para matrizes maiores apresentam-se mais uniformes com menores variações entres os valores da função objetivo e menores desvios padrões entre os agrupamentos.

Pelos resultados apresentados no Gráfico 4, verifica-se que o aumento do número de máquinas e partes do problema proporciona um aumento na complexidade computacional. Em

outras palavras, o aumento do espaço de busca faz com que a BT proposta tenha dificuldades em fugir de ótimos locais, uma vez que não possui políticas de diversificação de busca.

GRÁFICO 4 – Comportamento das soluções por instância



Fonte: O Autor

A utilização de valores maiores para os parâmetros citados pode contribuir na qualidade das soluções obtidas, dado que a política de intensificação da BT exige que a solução seja constantemente guiada para regiões ainda não exploradas. Para que isso ocorra, faz-se necessário que os valores da LT sejam elevados, forçando a busca para outras regiões do espaço de soluções. Desse modo, o aumento do Nbmax permite que a busca seja executada por mais tempo, permitindo uma busca mais consistente do espaço de soluções.

4.4 Comparação com a literatura

Para avaliar o algoritmo BT proposto os resultados foram comparados com os resultados obtidos na literatura sobre o PFCM. Para essa comparação foram utilizadas as mesmas instâncias disponibilizadas e os resultados obtidos através dos métodos Zodiac, proposto por Srinivasan & Narendan (1991); Grafics, proposto por Srinivasan & Narendan (1991); algoritmo de clusterização proposto por Srinivasan em 1991 (Ca); algoritmo genético proposto por Cheng *et al.* em 1998 (Ga).

A Tabela 3 descreve os resultados obtidos pelos algoritmos da literatura e pelo método de BT proposto. Nesta tabela, a primeira coluna identifica as instâncias e as colunas (2 – 5) mostra os valores obtidos pelas melhores soluções de cada algoritmo.

Finalmente a coluna 6 descreve a comparação entre a EA da BT proposta em relação a melhor solução da literatura. Os valores em negrito indicam os melhores resultados obtidos para a determinada instância.

TABELA 3- Comparação do modelo com a literatura

Instância	Zodiac	Grafics	Ca	Ga	BT	Comparação (%)
1	73,68	73,68	-	-	82,35	111,77
2	56,52	60,87	-	68,00(*)	68,00	111,71
3	77,36	-	-	77,36	62,72	81,06
4	76,92	-	-	76,92	76,92	100,00
5	39,13	53,12	-	46,88	40,91	77,02
6	70,37	-	-	70,37	40,48	57,52
7	68,29	68,29	-	-	54,24	79,42
8	58,33	58,13	58,72	58,33	40,37	68,74
9	85,24	85,24	85,24	85,24	56,87	66,72
10	70,59	70,59	70,59	70,59	48,78	69,10
11	92,00	92,00	-	92,00	40,48	43,99
12	64,36	64,36	64,36	-	23,37	36,31
13	65,55	65,55	-	67,44	24,08	35,71
14	32,09	45,52	48,70	-	26,89	55,21
15	67,83	67,83	67,83	-	26,74	39,42
16	53,76	54,39	54,44	53,89	26,89	49,39
17	41,84	48,91	44,20	-	29,17	59,63
18	21,63	38,26	-	37,21	31,78	83,06
19	38,66	49,36	43,01	46,62	27,55	55,81
20	75,14	75,14	75,14	75,28	20,83	27,67
21	51,13	-	-	55,14	21,80	39,54
22	100,00	100,00	100,00	100,00	15,42	15,42
23	85,11	85,11	85,11	85,11	14,78	17,36
24	73,51	73,51	73,51	73,03	14,58	19,84
25	20,42	43,27	51,81	49,37	15,04	29,02
26	18,23	44,51	44,72	44,67	14,23	31,83
27	17,61	41,67	44,17	42,50	15,38	34,83
28	52,14	41,37	51,00	-	40,96	78,56
29	33,01	32,86	40,00	-	24,08	60,20
30	33,46	55,43	55,29	53,80	14,64	26,41
31	46,06	56,32	58,70	56,61	20,32	34,61
32	21,11	47,96	46,30	45,93	12,67	26,42
33	32,73	39,41	40,05	-	11,32	28,27
34	52,21	52,21	-	-	41,17	78,85
35	83,66	83,92	83,92	84,03	11,54	13,73

Fonte: O Autor

Pelos resultados da Tabela 3, podemos notar que a BT proposta conseguiu superar os melhores resultados da literatura em duas instâncias (1 e 2) e obteve solução igual a da literatura em outra instância (4). Cabe ressaltar que a solução encontrada para a instância 2 pelo algoritmo Ga, como relatado em Resende e Gonçalves (2004), contém *clusters* unitários que são considerados inválidos (célula com uma única máquina e/ou família com uma única parte) no modelo proposto. Desta forma a solução obtida torna-se melhor a encontrada pelo Ga, sendo assim superior ao algoritmo Graphics, melhor solução obtida pela literatura, até então, que despreza os *clusters* unitários. O modelo encontrou solução que representa 111,71% do valor obtido com o algoritmo Graphics, um valor satisfatório, dado a alta complexidade do problema e a relativa simplicidade da BT proposta, a qual não se utiliza de critérios de diversificação e intensificação de busca sofisticados.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho tem como objetivo a geração de um modelo para a Formação de Células de Manufatura, otimização dos processos de produção e a redução das perdas produtivas. Os resultados mostram-se satisfatório pela possibilidade de contribuir, através dos conceitos de pesquisa Operacional e Tecnologia da Informação, para o desenvolvimento da manufatura Celular, que apesar das inúmeras vantagens apresentadas pelos princípios do *just in time* do Sistema Toyota de Produção, é uma tarefa complexa, que necessita de técnicas capazes de contribuir na integração entre planejamento, controle e produção fabril.

Sobre o modelo BT propriamente dito, os estudos de parâmetros por diferentes combinações mostrou-se relevante, pela forma de abordagem e de análise em quadrantes utilizada. Porém é importante destacar, que apesar dos parâmetros utilizados apresentaram bons resultados para instância testada (Etapa 1), não há garantias que essa configuração tenha atendido satisfatoriamente todos os problemas, o que necessitaria de uma análise mais abrangente para suas definições e que não foi possível ainda para esse trabalho, podendo inclusive ter influenciado os resultados obtidos.

Em relação a definição do número de *clusters* utilizadas, a BT proposta mostrou-se ainda mais completa que os métodos clássicos para PFCM. A escolha do número de *clusters* a partir do limite superior ($m/2$) utilizada por esse modelo, aumenta as dificuldades do algoritmo em explorar o espaço de soluções e o tempo de execução, frente a simples inserção do número de agrupamento a serem realizados, utilizados pelas outras técnicas. Salienta-se que o aumento do número de máquinas no problema implica no aumento do limite superior para o número de

clusters, ocasionado em uma exigência maior do algoritmo em encontrar boas soluções para problemas maiores. Mesmo assim, os resultados obtidos pela instância 10, que utilizou na fase de definição de parâmetros números de *clusters* pré-definidos, apontam o bom desempenho da BT, encontrando resultados equivalentes tanto pela inserção do número de *clusters* quanto pela utilização do limite superior.

Em termos de comparações com métodos da literatura, a BT proposta foi superada na média pelas técnicas apresentadas. Entretanto, vale aqui ressaltar, que o modelo proposto trata-se de um algoritmo simples, sem políticas complexas de diversificação e intensificação de busca, mas que mesmo assim entre 35 problemas analisados, o modelo conseguiu em duas instâncias resultados que superaram aos obtidos até então para o problema. Além disso, o modelo foi comparado com as melhores soluções de quatro técnicas simultaneamente, mas se analisado separadamente os dados teriam sido ainda mais promissores.

Os resultados obtidos neste trabalho evidenciam o potencial da BT proposta para a solução do PFCM. Sobretudo, este trabalho surge como alicerce para o desenvolvimento de modelos ainda mais eficazes e o aprimoramento da técnica.

Em relação aos trabalhos futuros, pretende-se a partir da meta-heurística proposta, realizar uma análise ainda mais detalhada sobre o comportamento da busca em função dos parâmetros, a utilização de critérios de parada diferentes do número máximo de iterações e mudanças no formato da Lista Tabu. Uma outra contribuição futura que pode surgir é o uso da Busca Tabu na solução de modelos alternativos de formação de células de manufatura onde existem restrições adicionais, tais como turnos de produção, tempos de atraso e estoques, o que torna o modelo mais ainda complexo e realístico.

Por fim, uma possibilidade desafiadora advinda deste trabalho é a hibridização do BT proposto com outras técnicas, como os Algoritmos Genéticos, o GRASP e Têmpera Simulada. Acredita-se, que essas combinações possam tornar o algoritmo mais robusto e competitivo. Podendo, inclusive, ser empregado em outros problemas de Pesquisa Operacional, como o Roteamento de Veículos, leiaute fabril e distribuição de redes elétricas.

6 REFERÊNCIAS

CHUNG, S.H., WU, T.S., CHANG, C.C. An efficient Tabu Search algorithm to the cell formation problem with alternative routings and machine reliability considerations. **Computers e Industrial Engineering**. 60 7–15. 2011.

DÍAZ, J. A.; LUNA, D. E.; ZETINA, C. A. A hybrid algorithm for the manufacturing cell formation problem. **Journal of Heuristics**, v. 19, n. 1, p. 77–96, 19 fev. 2013.

DÍAZ, J. A.; LUNA, D.; LUNA, R. A GRASP heuristic for the manufacturing cell formation problem. **Top**, v. 20, n. 3, p. 679–706, 1 out. 2010.

GALAFASSI, C. **Aplicação de metaheurísticas na abordagem de roteamento de veículos com janelas de tempo**. São Leopoldo: Unisinos, 2011.

GENDREAU, M.; POTVIN, J.-Y. **Handbook of Metaheuristics**. 2^a. ed. [s.l.] Springer, 2010. p. 648

GÓMES, A. T.; GALAFASSI, C.; LINK, I.C.C.; MULLER, F. **A study for manufacturing cell formation Approach considering setup** International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. **Anais...**2011

GÓMEZ, A. T. **Modelo para sequenciamento de partes e ferramentas em um sistema de manufatura flexível com restrições às datas de vencimento e a capacidade do magazine**. Dissertação. São Jose dos Campos: Instituto de Pesquisas Espaciais, 1996.

GÓMEZ, A. T.; GALAFASSI, C. **Análise de métodos para a manufatura considerando a minimização do número de ferramentas** XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Anais...**São Carlos-SP: 2010

JAMES, T. L.; BROWN, E. C.; KEELING, K. B. A hybrid grouping genetic algorithm for the cell formation problem. **Computers & Operations Research**, v. 34, n. 7, p. 2059–2079, jul. 2007.

LI, X.; BAKI, M. F.; ANEJA, Y. P. An ant colony optimization metaheuristic for machine–part cell formation problems. **Computers & Operations Research**, v. 37, n. 12, p. 2071–2081, dez. 2010.

MASSOTE, A. A. Algoritmos de tecnologia de grupo para projetos de células de manufatura. p. 31–44, 1995.

MULLER, G. I. **Utilização da Busca Tabu para a Geração de um Modelo Aplicado ao Job-shop Scheduling Problem Considerando um Sistema de Manufatura Flexível**. [s.l.] UNISINOS, 2006.

NOURI, H.; HONG, T. S. Development of bacteria foraging optimization algorithm for cell formation in cellular manufacturing system considering cell load variations. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 32, n. 1, p. 20–31, jan. 2013.

PAPAIOANNOU, G.; WILSON, J. 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, nov. 2010.

PERES, F. DA S. **Heurísticas GRASP para o Problema de Formação de Células de Manufatura**. Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2006.

RESENDE, M. G. .; GONÇALVES, J. F. An evolutionary algorithm for manufacturing cell formation. **Computers and Industrial Engineering**, n. 47, p. 247–273, 2004.

REZAZADEH, H.; MAHINI, R.; ZAREI, M. Solving a dynamic virtual cell formation problem by linear programming embedded particle swarm optimization algorithm. **Applied Soft Computing**, v. 11, n. 3, p. 3160–3169, abr. 2011.

RODRIGUES, L. C. A.; BALAU, A. P.; WELLER, T. R. Problema de Formação de Células de Manufatura com Roteiros Alternativos e Considerações de Capacidade. In: LOPES, H. S.; RODRIGUES, L. C. DE A.; STEINER, M. T. A. (Eds.). . **Meta-Heurísticas em Pesquisa Operacional**. 1. ed. Curitiba, PR: Omnipax, 2013.

SAYADI, M. K.; HAFEZALKOTOB, A.; NAINI, S. G. J. Firefly-inspired algorithm for discrete optimization problems: An application to manufacturing cell formation. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 32, n. 1, p. 78–84, jan. 2013.

SHARIFI, S.; CHAUHAN, S. S.; BHUIYAN, N. A dynamic programming approach to GA-based heuristic for multi-period CF problems. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 33, n. 3, p. 366–375, jul. 2014.

SHINGO, S. **O sistema Toyota de Produção do ponto de vista da Engenharia de Produção**. 2ª ed ed. Porto Alegre: Artes Médicas, 1996. p. 291

SUN, D.; AND LIN, L.; AND, B. R. Cell formation using tabu search. **Computers Industrial Engineering**, v. 3, n. 28, p. 485–494, 1995.

TRINDADE, Á. R.; OCHI, S. L. Um algoritmo evolutivo híbrido para a formação de células de manufatura em sistemas de produção. **Pesquisa Operacional**, v. 26, n. 2, p. 255–294, 2006.

XAMBRE, A. R.; VILARINHO, P. M. A. Simulated Annealing approach for manufacturing cell formation with multiple identical machines. **European Journal of Operational Research**, v. 151, p. 434–446, 2003.

YIN, Y.; YASUDA, K. Similarity coefficient methods applied to the cell formation problem: A taxonomy and review. **International Journal of Production Economics**, v. 101, n. 2, p. 329–352, jun. 2006.

WU, T. H., CHUNG, S.H., CHANG C.C. Hybrid simulated annealing algorithm with mutation operator to the cell formation problem with alternative process routings, **Expert Systems with Applications**, 36, p. 3652-3661. 2009.

WU, T.H., CHUNG, S.H., CHANG, C.C. A water flow-like algorithm for manufacturing cell formation problems, **European Journal of Operational Research** 205, p. 346–360. 2010.

CHUNG, S.H., WU, T.S., CHANG, C.C. An efficient Tabu Search algorithm to the cell formation problem with alternative routings and machine reliability considerations. **Computers e Industrial Engineering**. 60 7–15. 2011.

DÍAZ, J. A.; LUNA, D. E.; ZETINA, C. A. A hybrid algorithm for the manufacturing cell formation problem. **Journal of Heuristics**, v. 19, n. 1, p. 77–96, 19 fev. 2013.

DÍAZ, J. A.; LUNA, D.; LUNA, R. A GRASP heuristic for the manufacturing cell formation problem. **Top**, v. 20, n. 3, p. 679–706, 1 out. 2010.

GALAFASSI, C. **Aplicação de metaheurísticas na abordagem de roteamento de veículos com janelas de tempo**. Dissertação. São Leopoldo: Unisinos, 2011.

GENDREAU, M.; POTVIN, J.-Y. **Handbook of Metaheuristics**. 2^a. ed. [s.l.] Springer, 2010. p. 648

GÓMES, A. T.; GALAFASSI, C.; LINK, I.C.C.; MULLER, F. **A study for manufacturing cell formation Approach considering setup**. International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. **Anais...**2011.

GÓMEZ, A. T. **Modelo para sequenciamento de partes e ferramentas em um sistema de manufatura flexível com restrições às datas de vencimento e a capacidade do magazine**. Dissertação. São Jose dos Campos: Instituto de Pesquisas Espaciais, 1996.

GÓMEZ, A. T.; GALAFASSI, C. **Análise de métodos para a manufatura considerando a minimização do número de ferramentas**. XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Anais...**São Carlos-SP: 2010.

JAMES, T. L.; BROWN, E. C.; KEELING, K. B. A hybrid grouping genetic algorithm for the cell formation problem. **Computers & Operations Research**, v. 34, n. 7, p. 2059–2079, jul. 2007.

LI, X.; BAKI, M. F.; ANEJA, Y. P. An ant colony optimization metaheuristic for machine–part cell formation problems. **Computers & Operations Research**, v. 37, n. 12, p. 2071–2081, dez. 2010.

MULLER, G. I. **Utilização da Busca Tabu para a Geração de um Modelo Aplicado ao Job-shop Scheduling Problem Considerando um Sistema de Manufatura Flexível**. Dissertação. São Leopoldo: UNISINOS, 2006.

NOURI, H.; HONG, T. S. Development of bacteria foraging optimization algorithm for cell formation in cellular manufacturing system considering cell load variations. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 32, n. 1, p. 20–31, jan. 2013.

PAPAIIOANNOU, G.; WILSON, J. 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, nov. 2010.

PERES, F. DA S. **Heurísticas GRASP para o Problema de Formação de Células de Manufatura**. Dissertação. Nitéroí: Universidade Federal Fluminense, 2006.

RESENDE, M. G. .; GONÇALVES, J. F. An evolutionary algorithm for manufacturing cell formation. **Computers and Industrial Engineering**, n. 47, p. 247–273, 2004.

REZAZADEH, H.; MAHINI, R.; ZAREI, M. Solving a dynamic virtual cell formation problem by linear programming embedded particle swarm optimization algorithm. **Applied Soft Computing**, v. 11, n. 3, p. 3160–3169, abr. 2011.

RODRIGUES, L. C. A.; BALAU, A. P.; WELLER, T. R. Problema de Formação de Células de Manufatura com Roteiros Alternativos e Considerações de Capacidade. In: LOPES, H. S.; RODRIGUES, L. C. DE A.; STEINER, M. T. A. (Eds.). **Meta-Heurísticas em Pesquisa Operacional**. 1. ed. Curitiba, PR: Omnipax, 2013.

SAYADI, M. K.; HAFEZALKOTOB, A.; NAINI, S. G. J. Firefly-inspired algorithm for discrete optimization problems: An application to manufacturing cell formation. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 32, n. 1, p. 78–84, jan. 2013.

SHARIFI, S.; CHAUHAN, S. S.; BHUIYAN, N. A dynamic programming approach to GA-based heuristic for multi-period CF problems. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 33, n. 3, p. 366–375, jul. 2014.

SHINGO, S. **O sistema Toyota de Produção do ponto de vista da Engenharia de Produção**. 2ª ed ed. Porto Alegre: Artes Médicas, 1996. p. 291

SUN, D.; AND LIN, L.; AND, B. R. Cell formation using tabu search. **Computers Industrial Engineering**, v. 3, n. 28, p. 485–494, 1995.

TRINDADE, Á. R.; OCHI, S. L. Um algoritmo evolutivo híbrido para a formação de células de manufatura em sistemas de produção. **Pesquisa Operacional**, v. 26, n. 2, p. 255–294, 2006.

XAMBRE, A. R.; VILARINHO, P. M. A. Simulated Annealing approach for manufacturing cell formation with multiple identical machines. **European Journal of Operational Research**, v. 151, p. 434–446, 2003.

YIN, Y.; YASUDA, K. Similarity coefficient methods applied to the cell formation problem: A taxonomy and review. **International Journal of Production Economics**, v. 101, n. 2, p. 329–352, jun. 2006.

WU, T. H., CHUNG, S.H., CHANG C.C. Hybrid simulated annealing algorithm with mutation operator to the cell formation problem with alternative process routings, **Expert Systems with Applications**, 36, p. 3652-3661. 2009.

WU, T.H., CHUNG, S.H., CHANG, C.C. A water flow-like algorithm for manufacturing cell formation problems, **European Journal of Operational Research** 205, p. 346–360. 2010.