

PSCR-H: PROPOSTA DE UM ALGORITMO HÍBRIDO APLICADO AO PROBLEMA DE FORMAÇÃO DE CÉLULAS DE MANUFATURA

CRISTIANO GALAFASSI, ROGÉRIO R. DE VARGAS

Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA)
Rua Luiz Joaquim de Sá Britto, s/n – Bairro: Promorar – Itaqui – RS – CEP: 97.650-000
cristianogalafassi@gmail.com, <http://rogerio.in>

LEONARDO M. CAIRES

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
Av. Roraima nº 1000 – Bairro Camobi – Santa Maria – CEP: 97.105-900
leomcaires@live.com

ARTHUR TÓRGO GÓMEZ

Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)
Av. Unisinos, 950 – Bairro Cristo Rei – São Leopoldo – CEP: 93.022-000
breno@unisinos.br

RESUMO

Este trabalho propõe um algoritmo híbrido aplicado ao Problema de Formação de Células de Manufatura. O algoritmo híbrido foi desenvolvido baseado na metaheurística Busca Tabu. Foram desenvolvidas quatro estratégias de geração de vizinhanças aplicadas à Busca com o objetivo de explorar o espaço de soluções, através de políticas de diversificação. Com base nas melhores soluções encontradas, foi desenvolvida uma heurística de busca local que aprimora os resultados obtidos. Para validar o modelo proposto, os resultados obtidos foram comparados com três bases de dados previamente classificadas. Os resultados obtidos foram de boa qualidade, chegando às melhores soluções conhecidas em alguns casos.

PALAVRAS CHAVE. Busca Tabu, Metaheurística, Formação de Células de Manufatura.

Otimização Combinatória, Metaheurísticas

ABSTRACT

This paper aims to propose a hybrid metaheuristic applied to the Manufacturing Cell Formation Problem. We built a model based on Tabu Search metaheuristic that through four neighborhoods structures aims to explore the solution space. Based on best solutions found, we developed a heuristic that improves the results. To validate the proposed model, we compared with three databases previously classified obtaining the best known solutions in some cases.

KEYWORDS. Tabu Search, Metaheuristics, Manufacturing Cell Formation.

Combinatorial Optimization, Metaheuristics

1. Introdução

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. 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) afirmam 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 técnicas de otimização combinatória vem sendo usadas 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 obtenção de uma solução ótima em um tempo computacional aceitável, uma vez que o Problema de Formação de Células de manufatura é classificado como NP-Difícil (Reisman *et al.*, 1997).

Nos últimos anos, importantes considerações foram feitas sobre o uso da otimização combinatória para a formação e sequenciamento de células de manufatura (Nouri e Hong, 2013; Sayadi, Hafezalkotob e Naini, 2013; Sharifi, Chauhan, Bhuiyan, 2014; Gómez *et al.* 2014). Entretanto, fica patente 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, dentre outras apresentam problemas de Pesquisa Operacional neste tema.

Nestas áreas, na busca da excelência no mercado, o principal ganho estratégico é o aumento da produtividade. A busca da produtividade conflita com outra característica de excelência do mercado a flexibilidade. Ou seja, 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, além da facilidade na adaptação do sistema a quaisquer mudanças no mercado, oferecendo preços competitivos no mercado (Gómez *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 que buscam a minimização das perdas produtivas, através do aumento da flexibilidade na automação dos processos produtivos. Sendo o *setup* um ponto crítico neste contexto, por representar a raiz de diversas perdas de tempo no processo produtivo. A possibilidade de gerar uma contribuição científico-tecnológica sobre o assunto e a formação intelectual de profissionais capazes de solucionar esse tipo de problema alicerçou o desenvolvimento deste trabalho. Deste modo, o estudo e desenvolvimento de técnicas para a resolução dos PFCM e a redução dos tempos de *setup* contribuem para o enfretamento dos desperdícios produtivos na busca de menores custos e no aumento da margem de lucro das empresas.

Portanto, o objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo metaheurístico híbrido aplicado ao Problema de Formação de Células de Manufatura que busca minimizar o compartilhamento de recursos, visando otimizar o tempo total de produção. Sendo assim, o algoritmo híbrido desenvolvido, baseado na Busca Tabu (BT), tem a função de explorar o espaço de busca, bem como armazenar as cinco melhores soluções (chamadas aqui de Soluções Elite). As características similares das Soluções Elite serão a solução inicial para a heurística denominada *Post Search Clustering Rank Heuristic* (PSCR-H). A heurística PSCR-H considera que determinados agrupamentos não devem ser modificados, uma vez que são comuns em soluções de boa qualidade.

Esse trabalho está estruturando em cinco seções. Na Seção 2 é apresentada uma breve revisão da literatura, na Seção 3 são apresentados o detalhamento e particularidades do modelo proposto, na Seção 4 são apresentados os experimentos realizados e os resultados obtidos. Por fim, na Seção 5, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. Referencial Teórico

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 minimizar custos e o tempo de produção, sem perda de qualidade. Indústrias que possuem o foco na fabricação de uma pequena variedade de produtos com alto volume de produção, geralmente organizam o ambiente de produção em linhas de produção compostas 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.

Para o caso de indústrias que possuem como foco a fabricação de uma grande variedade de produtos com um 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 ou *Group Technology*, que segundo Wu *et al.* (2009), parte do princípio da similaridade existente entre os tipos de partes em uma linha de produção. Uma aplicação bastante relevante da 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 entre o processamento de dois lotes consecutivos. 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 (FP) 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 do inventário, minimização dos custos em geral, menores tempo de atraso, 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), 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 de Células Manufatura é facilmente representado na forma de uma matriz incidência A_{ij} (Wu *et al.*, 2009). Sendo A uma matriz 0-1 assim descrita: as linhas correspondem às partes e as colunas às máquinas (ou vice-versa). Se $a_{ij} = 1$ então a parte i necessita da máquina j para sua produção. Este é o ponto de partida para o desenvolvimento das várias técnicas voltadas à formação de Células de Manufatura. 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 cada bloco, na matriz rearranjada, está representado 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 exemplificada na Figura 1.

		PARTES								PARTES					
		1	2	3	4	5	6			1	4	6	3	2	5
MÁQUINAS	1			1		1		MÁQUINAS	5	1	1	1			*
	2		1	1					3	1	1			*	
	3	1				1	1		4				1	1	1
	4		1	1			1		2				1	1	
	5	1	1			1			1	1				1	

Fonte: O Autor

FIGURA 1 - Matriz de Incidência

A Figura 1(A) mostra a disposição inicial das máquinas e partes. Na Figura 1(B), foram geradas duas Células de Manufatura; a célula 1 com as máquinas 5 e 3 e a Célula 2 com as máquinas 4, 2 e 1. 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) consideram 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.

2.3 Representação Matemática do Agrupamento de Elementos em Clusters

Segundo Peres (2006), podemos modelar matematicamente a alocação de elementos em *clusters*, através do modelo descrito nas Equações 1 a 3. Esta formulação pode ser usada para o agrupamento de partes em *cluster* ou de máquinas em *cluster*, porém não contempla a clusterização de ambas.

Maximizar:

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

Sujeito a:

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

$$\sum_{i=1}^n x_{ik} < u, k \in 1, 2, \dots, c \quad (3)$$

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 1 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 valor da equação. A Equação 2 garante que um elemento só pode estar em um *cluster* e a Inequação 3 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. Em relação às técnicas mais utilizadas destacam-se as metaheurísticas.

Metaheurísticas podem ser definidas como sendo métodos de solução que orquestram 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 e Potvin, 2010). As metaheurísticas mais encontradas e conseqüentemente as mais aplicadas são: Busca Tabu, Algoritmos Genéticos e GRASP. Essas metaheurísticas 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 metaheurística para a solução do problema, em particular: a Busca Tabu (Díaz *et al.*, 2013; Gómez *et al.*, 2014), Algoritmos Genéticos (James *et al.*, 2007; Sharifi *et al.*, 2014), e o Algoritmo GRASP (Peres, 2006; Díaz *et al.*, 2010). Além disso, alguns algoritmos inspirados na natureza também foram desenvolvidos (Sayadi *et al.*, 2013; Nouri e Hong, 2013).

3. Método de Resolução Proposto para o PFCM

Esta seção descreve o modelo proposto. Nas subseções, a seguir, são descritas todas as particularidades do algoritmo proposto e a descrição de cada componente de sua arquitetura.

3.1. Metaheurística Busca Tabu

O algoritmo híbrido recebe como entrada de dados 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.

Conforme proposto em Peres (2006), a solução do problema é representada pela associação de máquinas e partes ($m \times p$), 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 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.

Segundo 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*. 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, sendo m o número de máquinas e tendo valor sempre maior 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 possui *clusters* unitários.

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 , na Equação 4, tem a seguinte definição:

$$\Gamma = \frac{e - e_0}{e + e_v} \quad (4)$$

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 4 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.

A definição de estrutura de vizinhança é um dos passos mais importantes da Busca Tabu, pois ela está intimamente ligada ao espaço de soluções percorrido pelo algoritmo. A cada iteração da 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).

Na Busca Tabu são utilizadas seis estruturas de vizinhança. As três primeiras (V1, V2 e V3) realizam a troca entre partes: V1 que realiza troca entre duas partes quaisquer, V2 realiza a troca de duas máquinas quaisquer e V3 que realiza a de troca de quaisquer 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 por reposicionar máquinas e V6 pelo reposicionamento simultâneo de máquinas e partes.

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 Lista Tabu será definido nos testes realizados na seção 4 (Experimentos), bem como o tamanho da vizinhança e o, número máximo de iterações sem que ocorra uma melhora no valor da função objetivo (Nbmax).

O Critério de Parada a ser utilizado será o Nbmax. Esse critério será determinado pelos testes de parâmetros, onde aqueles que obtiverem melhores resultados serão mantidos na validação do modelo.

3.2. Metaheurística PSCR-H

A metaheurística proposta utiliza um algoritmo baseado na eficácia de agrupamento, que utiliza características similares de soluções de boa qualidade. A metaheurística PSCR-H considera que determinados agrupamentos não devem ser modificados, uma vez que são comuns em soluções de boa qualidade e trabalha com as demais máquinas e partes. Características em

comum podem direcionar a busca para uma região de ótimo local. Por fim, a PSCR-H executa os passos a seguir:

Passo 1. Fixar os agrupamentos extraídos da Lista de Soluções Elite;

Passo 2. Para cada linha, da matriz de incidência que não foi fixada no Passo 1, calcular o fator de influência β da linha i no cluster k conforme Equação 5 e rearranjar a linha para o cluster que minimize o fator de influência. Em caso de empate, optar pelo valor que maximize o número de elementos no cluster.

$$\beta = \min_{i \in [1, M] \ k \in [1, K]} e_{0ik} + e_{vik} \quad (5)$$

Passo 3. Para cada coluna da matriz de incidência, que não foi fixada no Passo 1, calcular o fator de influência β da coluna j no cluster k conforme Equação 6 e rearranjar a coluna para o cluster que minimize o fator de influência.

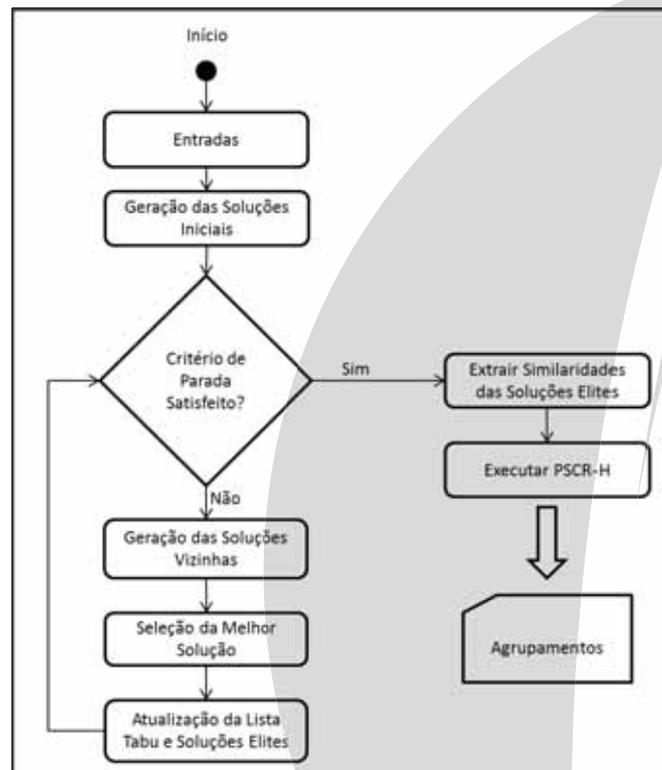
$$\beta = \min_{j \in [1, P] \ k \in [1, K]} e_{0jk} + e_{vjk} \quad (6)$$

Passo 4. Repetir os passos 2 e 3, até não haver mais mudanças de posições dos elementos de cada linha ou coluna.

Assim como na Equação 4 (eficácia de agrupamento), as Equações 5 e 6 buscam minimizar a quantidade de elementos excepcionais e_0 e de lacunas dentro dos clusters e_v , aumentando a eficácia do agrupamento.

3.3. Arquitetura do Modelo

A Figura 2 mostra a arquitetura de funcionamento do modelo.



Fonte: O Autor

Figura 2- Arquitetura do modelo proposto.

O algoritmo inicia carregando as entradas na forma de matrizes Máquinas \times Partes, individualmente. Em seguida, é gerada uma solução inicial, de forma aleatória, para o problema que será avaliado. O Critério de Parada verifica o número máximo de iterações sem melhoras no

valor da 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 vizinhos pela estrutura de vizinhança do modelo (seção 3.5), partindo disso a melhor solução vizinha é selecionada respeitando a Lista Tabu e o Critério de Aspiração. Ao obter a melhor solução dentre as vizinhas, atualiza-se a Lista Tabu e a Lista de Soluções Elite que armazena as cinco melhores soluções obtidas até o momento. Quando o critério de parada é satisfeito, gera-se uma entrada para heurística de refinamento. Com base nas Soluções Elite, extraem-se os relacionamentos que são comuns nas cinco soluções, ou seja, as máquinas e partes que aparecem igualmente agrupadas em todas as soluções elite.

4. Experimentos

Os experimentos foram realizados objetivando obter uma melhor classificação e distribuição dos agrupamentos. Para validar o modelo proposto, testaram-se três matrizes clássicas (M1, M2 e M3) utilizadas por Chandrasekharan and Rajagopalan (1989) de tamanho 40×24 e com 131 relacionamentos, diferenciadas entre si pelas relações de Máquinas \times Partes. A seguir é mostrado um exemplo do método para a matriz M1.

Na primeira fase do método, a Busca Tabu obteve uma Eficácia de Agrupamento de 51.11% utilizando $nbmax = 1000$ e Lista Tabu de tamanho 10. Analisando as cinco Soluções Elite obtidas no processo, verificou-se que 34 Máquinas e 21 Partes aparecem agrupadas e, por conseguinte, apenas 6 Máquinas e 3 Partes apareciam em clusters diferentes nas cinco soluções. Uma vez que as características em comum entre as cinco Soluções Elites foram identificadas, a heurística de refinamento foi executada tendo como entrada as máquinas 1, 14, 22, 24, 27 e 28 e as partes 13, 19 e 22. O procedimento de refinamento é mostrado na Tabela 1 onde a primeira coluna mostra a linha/coluna e as demais colunas mostram o β calculado para cada cluster.

Tabela 1. β calculado para cada cluster.

Linhas e Colunas	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster 6	Cluster 7
m1	7	8	5	5	2	8	4
m14	8	7	4	4	1	7	5
m22	6	7	4	4	1	7	5
m24	7	8	5	5	4	8	2
m27*	5	6	3	1	1	6	6
m28	7	6	1	5	4	8	8
p13	9	8	8	9	9	11	1
p19	12	13	13	14	2	16	10
p22	9	8	8	9	9	11	1

Na Tabela 1, os valores realçados em negrito mostram o cluster que foi selecionado com base no fator β . No caso da máquina 27, dois clusters possuem o mesmo β , de modo que foi selecionado o cluster com menor número de elementos excepcionais. Para a matriz M1, foi necessária apenas uma iteração da heurística de refinamento, obtendo uma Eficácia de Agrupamento de 75,51%. A seguir, são mostrados os resultados para as matrizes M1, M2 e M3.

A Tabela 2 mostra as médias da Eficácia de Agrupamento (EA Média) obtida pela Busca Tabu em 30 repetições, os respectivos desvio padrões e os valores das melhores soluções obtidas (Melhor EA).

Tabela 2. Soluções obtidas pela Busca Tabu.

Matriz	EA Média	Desv. Pad.	Melhor EA
M1	44,16	3,19	53,11
M2	47,11	2,61	51,11
M3	40,27	2,64	45,08

Na Tabela 2, verifica-se que a Busca Tabu obtém soluções de qualidade, contudo, distantes das melhores soluções conhecidas até o momento. Com base na melhor solução obtida através da Busca Tabu, obteve-se o conjunto de Soluções Elite, servindo como parâmetro de entrada para a heurística PSCR-H. A Tabela 3 mostra as soluções geradas pela heurística PSCR-H, o número de iterações necessárias para atingir o critério de parada, o número total de máquinas e partes processadas e os valores das melhores soluções conhecidas atualmente em Díaz (20130).

Tabela 3. Soluções obtidas pela heurística PSCR-H.

Matriz	Solução Refinada	Iterações	Máquinas e Partes Processadas	Melhor Solução Conhecida
M1	75,51	1	9	100,00
M2	70,00	3	20	85,11
M3	73,51	2	11	73,51

Ao aplicar o processo de refinamento obteve-se uma sensível melhora na qualidade das soluções. No caso da Matriz 1, foi necessária apenas uma iteração para que o processo de refinamento atingisse seu critério de parada. Para as matrizes M2 e M3 foram necessárias três e duas iterações, respectivamente.

Como informação adicional, o tempo computacional para os experimentos da Busca Tabu foram de aproximadamente 3 segundos por execução e a heurística de refinamento necessitou de poucos milissegundos, em um computador com processador i7 de quatro núcleos de processamento e 8GB de RAM. Vale ressaltar que a solução refinada para a matriz M3, de acordo com Díaz *et al.* (2013), é a melhor solução conhecida até o presente momento.

5. Conclusões

O presente trabalho apresenta uma heurística de refinamento de soluções, baseada em características similares obtidas de soluções de boa qualidade. Ao inicializar o método com determinadas características das soluções extraídas da Busca Tabu, o objetivo é direcionar a busca para o mais próximo de um ponto de ótimo local. As características similares das soluções foram obtidas, através de um conceito de Soluções Elite, implementado em um algoritmo de Busca Tabu.

A Busca Tabu obteve soluções que apresentam melhoras consideráveis se comparadas com as soluções iniciais, mas que ainda estão relativamente longe das melhores soluções conhecidas. Isso está relacionado, em parte, a escolha dos parâmetros do algoritmo, uma vez que nenhum estudo foi direcionado para o melhoramento das soluções da Busca Tabu.

No que tange a heurística PSCR-H, pode-se verificar que ela apresenta soluções de boa qualidade para os problemas analisados, sendo que para a matriz M3, obteve-se a melhor solução conhecida. Além disso, o procedimento realizou poucas iterações com um tempo computacional extremamente baixo.

Apesar dos resultados promissores, faz-se necessário um estudo mais aprofundado da heurística PSCR-H promovendo a combinação da heurística PSCR-H com métodos de busca populacionais. Ainda assim, uma adequação do método para compor uma estrutura de vizinhança da Busca Tabu poderá gerar análises de parametrização de ambos os métodos.

Referências

- Chandrasekharan, M. P., Rajagopalan, R.** (1989), GROUPABILITY: an analysis of the properties of binary data matrices for group technology. *International Journal of Production Research*, 27, 1035–1052.
- Chung, S.H., Wu, T.S., Chang, C.C.** (2011), An efficient Tabu Search algorithm to the cell formation problem with alternative routings and machine reliability considerations. *Computers e Industrial Engineering*. 60 7–15.

- Díaz, J. A.; Luna, D. E.; Zetina, C. A.** (2013) A hybrid algorithm for the manufacturing cell formation problem. *Journal of Heuristics*, v. 19, n. 1, p. 77–96.
- Díaz, J. A., Luna, D.; Luna, R.** (2010), A GRASP heuristic for the manufacturing cell formation problem. *Top*, v. 20, n. 3, p. 679–706, 1 out. 2010.
- Gómez, A. T., Ferrary, F. R., Santos, J. V. C., Chiwiacowsky, L.** (2014), Cell Formation Problem: An Multithreading Tabu Search for Setup Time Optimization for Limited Machine Magazines - A New Solution for a Classical Problem. *ICINCO*, 332-339.
- Gómez, A. T., Galafassi, C., Link, I. C. C., Muller, F.** (2011) A Study for Manufacturing Cell Formation Approach Considering Setup. *ICINCO*, 43-48.
- Gómez, A. T.** (1996) 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.
- James, T. L., Brown, E. C., Keeling, K. B.** (2007), A hybrid grouping genetic algorithm for the cell formation problem. *Computers & Operations Research*, v. 34, n. 7, p. 2059–2079, jul. 2007.
- Nouri, H., Hong, T. S.** (2013), 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.
- Peres, F. Da S.** (2006), Heurísticas GRASP para o Problema de Formação de Células de Manufatura. *Dissertação*. Niterói: Universidade Federal Fluminense.
- Reisman, A., Kumar, A., Motwani, J., Cheng, C. H.** (1997), Cellular Manufacturing: A statistical review of the literature. *Operations Research*, Vol. 45, 508 – 520.
- Rodrigues, I. C. A.; Balau, A. P.; Weller, T. R.** (2013), Problema de Formação de Células de Manufatura com Roteiros Alternativos e Considerações de Capacidade. Em: Lopes, H. S.; Rodrigues, L. C. De A.; Steiner, M. T. A. (Eds.). *Meta-Heurísticas em Pesquisa Operacional*. 1. ed. Curitiba, PR: Omnipax.
- Sayadi, M. K.; Hafezalkotob, A.; Naini, S. G. J.** (2013), Firefly-inspired algorithm for discrete optimization problems: An application to manufacturing cell formation. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 32, n. 1, p. 78–84.
- Sharifi, S.; Chauhan, S. S.; Bhuiyan, N.** (2014), A dynamic programming approach to GA-based heuristic for multi-period CF problems. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 33, n. 3, p. 366–375.
- Wu, T. H., Chung, S. H., Chang, C. C.** (2010), A water flow-like algorithm for manufacturing cell formation problems. *European Journal of Operational Research*, v. 205, p. 346–360. 2010.