APLICAÇÃO DE MÉTODOS EXATOS E DE METAS-HEURÍSTICAS NA GERAÇÃO DE CÉLULAS DE MANUFATURA CONSIDERANDO A MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE TROCAS DE FERRAMENTAS

Arthur Tórgo Gómez
Universidade do Vale do Rio dos Sinos
Av. Unisinos, 950 - B. Cristo Rei / CEP 93.022-000 - São Leopoldo - RS
breno@unisinos.br

Cristiano Galafassi
Universidade do Vale do Rio dos Sinos
Av. Unisinos, 950 - B. Cristo Rei / CEP 93.022-000 - São Leopoldo - RS
cristianogalafassi@gmail.com

Fernando Gromowski Artmann
Universidade do Vale do Rio dos Sinos
Av. Unisinos, 950 - B. Cristo Rei / CEP 93.022-000 - São Leopoldo - RS
artmannbr@hotmail.com

Maurício Barreto
Universidade do Vale do Rio dos Sinos
Av. Unisinos, 950 - B. Cristo Rei / CEP 93.022-000 - São Leopoldo - RS
tiomau@gmail.com

Luiz Carlos Marques
Universidade do Vale do Rio dos Sinos
Av. Unisinos, 950 - B. Cristo Rei / CEP 93.022-000 - São Leopoldo - RS
lucadimafi@gmail.com

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo do problema de Geração de Células de Manufatura, através de métodos de geração de Famílias de Partes que consideram o compartilhamento de recursos, a minimização do número de troca de ferramentas, os setups e o limite do número de máquinas nas células de manufatura. Devido à complexidade do problema, são utilizados dois métodos exatos para a formação das Famílias de Partes. Para gerar o seqüenciamento das partes minimizando o número de troca de ferramentas utilizou-se a Busca Tabu, a Busca Local Guiada e a Busca por Exaustão. Ao final do trabalho são apresentados experimentos, de modo a avaliar a qualidade das soluções obtidas. Os resultados mostram que as metas-heurísticas geraram soluções de boa qualidade.

PALAVRAS CHAVE. Família de Partes. Células de Manufatura. Metas-heurísticas. Metas-heurísticas (MH).

ABSTRACT

This paper presents a study of the problem of Generation Manufacturing Cell, through methods of Part Families witch consider the sharing of resources, the minimization of the tools change number, setups and the limited number of machines in manufacturing cells. Due to the complexity of the problem are used two exact methods for the formation of Part Families. To generate the sequencing to minimizing the number of switching tools are used Tabu Search,

Guided Local Search and an Exact Method for Exhaustion. At the end, experiments are presented in order to assess the quality of solutions. The results shown that meta-heuristics produced good quality solutions.

KEYWORDS. Part Families. Manufacturing Cells. Metaheuristics. Metaheuristics (MH).

1. Introdução

Nas indústrias do ramo eletroeletrônico, a inovação, cada vez mais se firma como uma estratégia de manutenção e de ganho de novos mercados, transformando o que antes era detalhe em um diferencial competitivo. Nesse contexto, a Tecnologia de Grupo oferece uma contribuição importante na gestão do conflito entre a produtividade e a flexibilidade em uma linha de produção (Papaioannou et al., 2008). A Tecnologia de Grupo é uma filosofia de manufatura onde partes são identificadas e agrupadas, conforme alguma similaridade de projeto ou manufatura. Partes similares são agrupadas em Famílias de Partes (FPs). Groover aponta três formas de identificar esses agrupamentos: inspeção visual, classificação e codificação e análise do fluxo de operação (Groover, 2001). Além disso, outros métodos foram implementados, como a análise do fluxo de produção (Burbidge, 1971) aplicada aos modelos de máquinas-peças, que se baseavam nos atributos de fabricação, ou operações necessárias para a fabricação de uma Família de Partes (King e Nacornchai, 1982) e (Kusiak, 1987). A partir das FPs são obtidas as Células de Manufatura (CM). A CM é o agrupamento de máquinas e pessoas, onde cada célula deve processar, preferencialmente, uma única FP (Groover, 2001). O problema de formação de Células de Manufatura consiste em determinar como as máquinas devem ser agrupadas (Groover, 2001) de modo que as peças com necessidades de processamento similares possam ser completamente manufaturadas em uma mesma célula. Este artigo apresenta um estudo do Problema de Geração de Células de Manufatura, através de métodos de geração de Famílias de Partes, que consideram o compartilhamento de recursos, a minimização do número de troca de ferramentas, os setups e que a quantidade de máquinas é limitada nas células de manufatura. Nesta abordagem são utilizados dois métodos exatos para a formação das Famílias de Partes, o *Rank Order Clustering* (ROC), inicialmente proposto por King, em 1980, (King, 1980) e o Cluster *Identification Algorithm Modified* (Gómez, 1996). O *Cluster Identification Algorithm* foi proposto por Kusiak e Chow em 1988. Em 1996, Gómez (Gómez, 1996), propôs o Cluster *Identification Algorithm Modified* (CIAM), para atender as restrições de quantidade de ferramentas por magazine e número máximo de máquinas por células de manufatura. Para gerar o seqüenciamento das partes utilizou-se um método exato chamado de Busca por Exaustão e as metas-heurísticas Busca Tabu (BT), proposta por Glover, 1977 e a Busca Local Guiada, do inglês *Guided Local Search* (GLS), proposta Voudouris, 1997. Ao final do trabalho são apresentados experimentos de modo a avaliar a qualidade das soluções obtidas. O artigo está organizado como segue. Na seção 2 são apresentados conceitos básicos sobre Células de Manufatura e Família de Partes. Na seção 3 são apresentados conceitos básicos do Problema do Seqüenciamento das Partes e a formulação do *Job Shop Scheduling Problem*. Na seção 4 são apresentados os métodos que serão utilizados para geração das Famílias de Partes e para realizar o seqüenciamento das partes. Na seção 5 é apresentado o modelo desenvolvido, sua formulação e arquitetura. Na seção 6 são apresentados os experimentos e na seção 7 as e considerações finais.

2. O Problema de Formação de Células de Manufatura

As Células de Manufatura podem ser caracterizadas como sendo um agrupamento de duas ou mais máquinas (Mohamed, 1996) que podem processar uma Família de Partes com pouco ou nenhum movimento intercelular (James et al., 2007), provendo benefícios como a redução de custos com movimento de materiais e paradas para *setup*. *Setup* pode ser definido como o período de tempo de parada entre o processamento de dois lotes consecutivos. Este

período de tempo pode incluir os tempos gastos no descarregamento e carregamento de ferramentas, procedimentos de limpeza, manutenção e de controle de qualidade dentre outros (Gómez, 1996). O problema de formação de células de manufatura é considerado NP - Difícil (Spiliopoulos e Sofianopoulou, 1998), (James et al., 2007) e (Spiliopoulos e Sofianopoulou, 2008). Para resolver tal problema foram propostos métodos exatos (Kusiak, 1987) e (Foulds et al., 2006), heurísticas (Mukattash et al., 2002) e (Chan et al., 2002), metas-heurísticas (Bajestani et al., 2009), (Durán et al., 2008) e (Spiliopoulos e Sofianopoulou, 2008), redes neurais (Saidi-Mehrabad e Safaei, 2007) e teorias *fuzzy* (Safaei et al., 2008) e (Papaioannou et al., 2008). O problema de Geração de Células de Manufatura pode ser formulado como um problema de diagonalização de blocos que tem por finalidade agrupar o maior número de partes em uma mesma célula, considerando o tamanho limitado do magazine, onde a matriz A = [a_{ij}] é definida por: a_{ij} = 1, se o j-ésimo componente visita a i-ésima maquina e a_{ij} = 0 (King, 1987). A Figura 1 ilustra a matriz A. A geração das Células de manufatura pode ser feita pela aplicação dos algoritmos acima citados. Para exemplificar se for aplicado o *Cluster Identification Algorithm* na matriz de incidência A é obtida a matriz ilustrada na Figura 2.

PARTES

MÁQUINAS	1	2	3	4	5	6
1			1		1	
2		1	1			
3	1			1	1	
4		1	1		1	
5	1	1		1		1

Figura 1 – Matriz de Incidência

PARTES

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

Figura 2 – Matriz A processada pelo CIA

Na Figura 2, vê-se que foram geradas duas células de Manufatura; CM1, com as máquinas 5 e 3 e a Célula 2 com as máquinas 4, 2 e 1. Os elementos * indicam as partes 2 e 5 necessitam de máquinas da células de Manufatura 1 e 2. Este compartilhamento de recursos pode ser interpretado como elementos excepcionais (King, 1980). Na formulação das Famílias de Partes, os gargalos podem ser representados por uma máquina sendo requerida por duas ou mais Famílias de Partes ou por partes que devem ser processadas em duas ou mais células de manufatura (Ang, 2000) e (Arikan e Güngör, 2005). Apesar de vários métodos serem propostos, como visto acima, a maioria dos autores com exceção de Gómez (Gómez, 1996) não abordam a existência de compartilhamento de recursos, conhecidos como gargalos (*bottleneck*).

3. Problema de Seqüenciamento das Partes

Na minimização do número de trocas de ferramentas, o problema consiste em encontrar a melhor seqüencia para processar os *jobs* de acordo com a disposição e substituição das ferramentas no magazine (Tang e Denardo, 1987). Este problema torna-se complicado, quando o tempo necessário para troca de ferramentas é significante quando comparado aos tempos de processamento das partes ou quando muitos lotes pequenos de diferentes partes devem ser processados em série (Neto, 2004). Dado num conjunto de "n" *jobs* a serem processados em um conjunto de "m" máquinas. Cada *job* é composto de "i" operações que devem ser processadas através de um roteiro; para cada operação é definida uma máquina com tempo de processamento padrão. O objetivo é minimizar o tempo total de produção. Existem algumas restrições para os *jobs* e as máquinas: (i) não existe regra de precedência entre as operações de diferentes *jobs*, (ii) as operações que iniciarem o processo não podem ser interrompidas e uma máquina pode somente processar um *job* por vez e (iii) um *job* pode somente ser processado em uma máquina por vez. Das diversas formulações para o *Job-shop*, é apresentada abaixo a formulação clássica utilizada para o modelo proposto, onde, V = 0, 1, ..., n representa o conjunto de operações; "0" é a primeira operação de todos os *jobs* e "n" será a última operação para todos os *jobs*. O conjunto de

"m" máquinas é representado por "M" e "A" é a representação para o conjunto de pares ordenados das restrições de operações pela precedência das relações de cada *job*. Para cada máquina "*k*", o conjunto de "E_k" descreve todos os pares de operações fornecidos pela máquina "*k*". Para cada operação "i" é processado num tempo "p_i" (fixo) e o processo inicial de "i" é "t_i" (Gómez, 2006). A partir destas definições, o modelo pode ser representado como:

$$MinT_n \tag{1}$$

Sujeito a

$$t_j - t_i \geq p_i \forall (i, j) \in A, \tag{2}$$

$$t_j - t_i \geq ou\ t_j - t_i \geq p_i \forall i, j \in E_k, \forall k \in M, \tag{3}$$

$$t_i \geq 0 \forall \in V \tag{4}$$

A função objetivo (FO) (1) busca minimizar o tempo total de produção. A restrição (2) assegura que a seqüência de processamento das operações para cada *job* corresponda a uma ordem pré-determinada. Já a restrição (3) é a demanda existente, ou seja, somente um *job* em cada máquina num determinado tempo e a restrição (4) representa as restrições de não negatividade. Tang e Denardo (1987) e Bard (1988) foram os primeiros a descrever este problema. Crama, Kolen, Oerlemans e Spieksma (1994) mostraram que este problema é NP - Difícil e que o problema de decidir se existe uma seqüência de partes que requer exatamente um número fixo de “setups” de ferramentas é NP - Completo. Follonier (1994) apresentou duas heurísticas para a solução do problema: uma baseada em um método de inserção e outra utilizando técnicas de Busca Tabu. Tang e Denardo (1987) propuseram a resolução do problema de minimização do número de trocas de ferramentas, considerando como limitada a capacidade do magazine, utilizando a política “*Keep Tool Needed Soonest*” (KTNS). Dada uma seqüência inicial de partes e um conjunto de ferramentas necessárias para processá-las, cujo número é maior que a capacidade do magazine, no instante em que ferramentas devem ser removidas do magazine para dar lugar a outras necessárias ao processamento da próxima parte, devem permanecer no magazine as ferramentas que serão necessárias em um futuro próximo. Conforme Neto (2004), o objetivo principal é a otimização da função objetivo, também chamada de critério de seleção, que pode variar de acordo com as necessidades do sistema de produção. Como exemplo de algumas funções objetivo freqüentemente utilizadas, pode-se citar: a duração total do seqüenciamento (*makespan*); o somatório dos tempos de início das operações; o ciclo de produção médio; o ciclo de produção médio ponderado; o atraso algébrico máximo; o atraso médio; atraso médio ponderado; e, o número de produtos em atraso.

4. Métodos Aplicados

A seguir são apresentados os métodos que serão utilizados para geração das Famílias de Partes e para realizar o seqüenciamento das partes.

4.1 *Rank Order Clustering*

Desenvolvido por King (King, 1980), o algoritmo tem como objetivo calcular o peso de cada linha e cada coluna na Matriz de Incidência e reordenar essa Matriz de Incidência conforme esses valores. Segue o algoritmo abaixo:

Passo 1 - Para cada linha da matriz de incidência A, designar um peso binário e calcular o peso decimal equivalente.

Passo 2 - Rearranjar as linhas da matriz na ordem decrescente de valores dos pesos decimais equivalentes.

Passo 3 - Para cada coluna da matriz obtida no passo 2, designar um peso binário e calcular o peso decimal equivalente.

Passo 4 - Rearranjar as colunas da matriz na ordem decrescente dos valores dos pesos decimais equivalentes.

Passo 5 - Repetir os passos de 1 a 4 ate não haver mais mudanças de posições dos elementos em cada linha ou coluna.

Considerando n = número de peças, m = número de máquinas e uma variável k, os pesos para cada linha i e coluna j são calculados da seguinte forma:

$$\text{Linha i :} \quad \sum_{k=1}^{n} a_{ik}.2^{n-k} \tag{5}$$

$$\text{coluna j :} \quad \sum_{k=1}^{n} a_{ik}.2^{n-k} \tag{6}$$

A equação (5) define o cálculo utilizado para encontrar o peso total de cada linha. A equação (6) designa cálculo utilizado para encontrar o peso total de cada coluna.

4.2 *Cluster Identification Algorithm Modified*

Gómez, em 1996, realizou uma modificação no conceito clássico do CIA, proposto por Kusiak e Chow em 1988. Esta modificação viabiliza a consideração de gargalos, durante a formação dos agrupamentos (Gómez, 1996). Abaixo, segue o algoritmo dada uma matriz incidente partes x ferramentas, considerando a limitação do número de ferramentas no magazine.

Passo 1 - Atualize iteração k = 1.

Passo 2 - Selecione a linha i, da matriz incidente A(k), que possui o menor número de a_{ij} =1 (A(k) representa a matriz na iteração k) e trace uma linha horizontal h_i sobre ela.

Passo 3 - Para cada j, tal que a_{ij} = 1, cruzado pela linha horizontal h_i, trace uma linha vertical v_j.

Passo 4 - Verificar se o número de linhas verticais traçadas supera o limite estipulado do número de ferramentas.

SE superar ENTÃO

Selecionar de maneira crescente em relação ao número de linhas verticais v_j traçadas todas as linhas horizontais h_i traçadas tal que o limite do número de ferramentas seja respeitado (número de linhas verticais traçadas).

Vá ao passo 6.

SE NÃO

Passo 5 - Para cada i, tal que b_{ij} = 1, cruzado pela linha vertical v_j, trace uma linha horizontal h_i.

Passo 6 - Transforme a matriz incidente A(k) em A(k+1) pela remoção das linhas e colunas traçadas nos passos 1 a 3 . As colunas da matriz incidente A(k) onde a_{ij} = 1, devem continuar aparecendo na matriz A(k).

Passo 7 - Se matriz A(k+1) = nula, pare; caso contrário faça k = k+1. Volte ao passo 1.

4.3 Busca por Exaustão

Dados os algoritmos exatos existentes, baseados em técnicas de otimização combinatória e programação inteira para a abordagem de geração de Família de Partes e de seqüenciamento das partes, preferiu-se desenvolver, neste trabalho, um método exato que se baseia em Busca por Exaustão (BE), força bruta, para que servisse de comparação, tanto na qualidade das soluções como no tempo de processamento. Este método desenvolvido, aborda tanto a formação de Famílias de Partes como o seqüenciamento das partes para problemas de

larga escala em um tempo computacional aceitável. O mesmo, tem por finalidade testar todas as possibilidades de seqüenciamento das partes geradas pelo CIAM. Com isso, mostra-se que para problemas de grande porte, os métodos exatos tem seu desempenho prejudicado uma vez que o tempo de processamento aumenta exponencialmente em função do tamanho do problema.

4.4 Busca Local Guiada

Proposta por Christos Voudouris (1997), a GLS é um método de busca por trajetória. Ela se baseia em um método de Busca Local que utiliza penalidades para escapar de mínimos ou máximos locais e platôs. Partindo de uma solução inicial viável, soluções vizinhas são geradas, a partir de movimentos, que nada mais são do que pequenas modificações introduzidas na solução (Voudouris, 1997). Tal meta-heurística foi escolhida devido à qualidade das melhores soluções encontradas aplicada ao CV (Voudouris, 1999). Maiores detalhes sobre a meta-heurística podem ser consultados em (Voudouris, 1997) e (Voudouris, 1999).

4.5 Busca Tabu

Proposta por Glover (1977), a BT é um método de busca por trajetória que se baseia na melhora da solução inicial, através da busca de novas soluções pela geração de vizinhanças. Fazendo uso de uma Lista Tabu de movimentos, a BT pode escapar de mínimos locais e platôs e explorar o espaço de soluções (Barbarosoglu e Ozgur, 1999). Maiores detalhes sobre a meta-heurística podem ser analisados em (Barbarosoglu e Ozgur, 1999) e (Bolduc et al., 2010). Esta meta-heurística foi escolhida devido a ela ser considerada a melhor meta-heurística para Problema de Roteamento de Veículos (Cordeau et al., 2002), (Toth e Vigo, 2003), (Prins, 2004) e (Xu e Kelly, 1996), como uma variação do Caixeiro Viajante (CV). Neste trabalho, a geração de vizinhanças foi realizada, através de movimentos de retirada e inserção em todas as partes; cada movimento de retirada e inserção gera uma nova solução. O tamanho da Lista Tabu utilizado foi de 25 e o critério de parada adotado foi o número máximo de iterações sem melhora da função objetivo, nbmax o com valor 100.

5. Modelagem

O problema de seqüenciamento das partes será aqui abordado, através do *Job Shop Scheduling Problem*. A Função objetivo é definida pela equação 7, abaixo:

$$\text{Min} \quad \varphi = \sum_{i=1}^{k} T_i \text{ , tal que } T_i > 0 \text{ e } Ti \in Z^+ \text{ , } i \in \{1,..,k\} \qquad (7)$$

Onde k representa o número de instantes de parada para a troca de ferramentas. A função objetivo representa o número total de trocas de ferramentas no magazine no processamento de todas as partes. Consideram-se as restrições abaixo listadas:

- Não existe regra de precedência entre as operações de diferentes partes;
- Nenhuma peça foi pré-processada;
- Uma parte pode somente ser processada em uma máquina por vez;
- A capacidade do magazine é respeitada;
- As operações que iniciarem o processo não podem ser interrompidas e uma máquina pode somente processar uma parte por vez;
- Assumimos que cada ferramenta ocupa somente um espaço no magazine e que cada processo necessite de no máximo 4 ferramentas, sendo esse o limite do magazine;
- Uma troca de ferramenta ocorre quando uma ferramenta é removida da máquina e outra é inserida no lugar da mesma.

O objetivo é obter seqüências para o processamento das partes e para o carregamento de ferramentas, de modo que seja minimizado o número de trocas de ferramentas. O *job shop* considerado é formado por uma única máquina versátil. Ou seja, uma única máquina é capaz de processar qualquer parte que lhe seja destinada. Neste aspecto, cabe salientar que no caso de um *job shop*, formado por várias máquinas, são as ferramentas designadas à elas que determinam suas diferenças funcionais. Dado que todas as máquinas possuem a mesma flexibilidade é possível tratar o sistema inteiro como uma única máquina (Gómez, 1996). É considerado que cada parte a ser processada requer um conjunto de ferramentas específico. Além disso, não existirão laços na produção (Müller et al., 2006), ou seja, uma parte que começar a ser processada terá seu processo concluído e não retornará. Cada lote deve estar no magazine antes do início do processamento (Gómez, 1996) e o magazine possui uma capacidade limitada ((Tang e Denardo, 1987) e (Gómez, 1996)), fazendo com que somente um determinado grupo de parte possa ser produzido continuamente. Se não houvesse tal restrição não seria necessária a seleção de partes (Gómez, 1996). Para abordar o problema de Geração de Famílias de Partes foram aplicados e comparados dois métodos exatos, o ROC e o CIAM. Para gerar os seqüenciamentos das partes foram aplicadas duas metas-heurísticas, a Busca Tabu e a *Guided Local Search*, e um algoritmo exato baseado em Busca por Exaustão. A arquitetura do modelo é ilustrada na Figura 3.

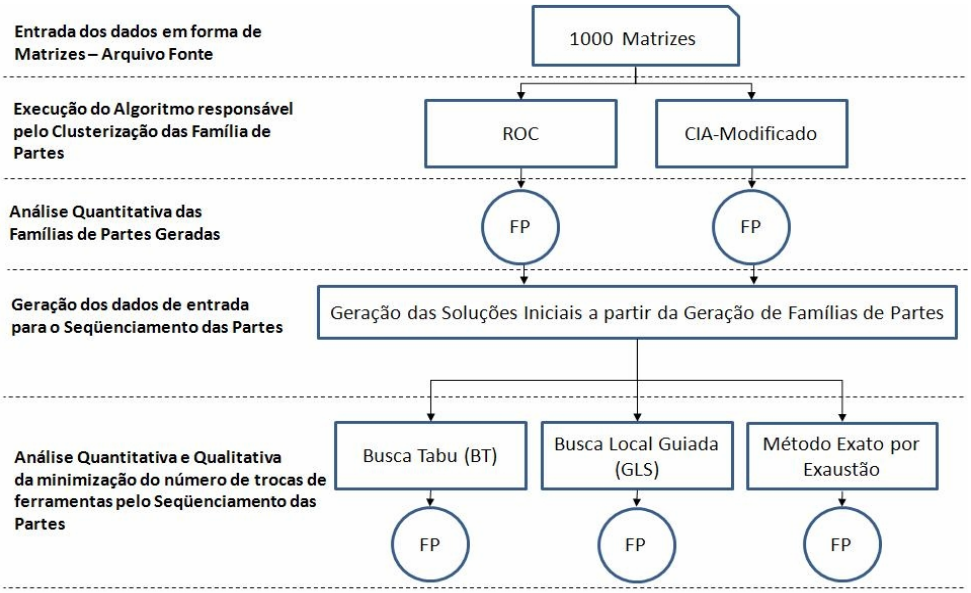

Figura 3. Arquitetura do Modelo

Inicialmente, são geradas 1000 matrizes iniciais (MI) de maneira aleatória, utilizando uma distribuição uniforme. As matrizes MI são do tipo partes x máquinas, tendo 40 linhas e 20 colunas. Em seguida, são executados os algoritmos responsáveis pela geração das FPs. Nas Figuras 4 e 5 são apresentadas duas matrizes exemplificando as técnicas CIAM e ROC, respectivamente aplicadas em uma mesma matriz incidente. As matrizes são do tipo partes x máquinas e possuem 10 linhas e 6 colunas .

	PARTES					
MÁQUINAS	A	C	E	F	B	D
1			1	1		
3	1	1	1			
8	1	1	1			
4	1	1				
2					1	
5					1	1
6			1			1
7			1	1		1
9			1	1		1
10					1	1

Figura 4 – Matriz Processada CIAM

	PARTES					
MÁQUINAS	A	F	C	B	D	E
3	1	1	1			
8	1	1	1			
4	1	1				
5				1	1	
10				1	1	
2				1		
7			1		1	1
9			1		1	1
6			1		1	
1			1			1

Figura 5 – Matriz Processada ROC

Observa-se que as duas técnicas obtém duas FPs. O CIAM obteve a FP1 composta pelas partes {A, C, E, F} com as máquinas {1, 3, 8, 4} e a FP2 composta pelas partes {E, F, B, D} com as máquinas {2, 5, 6, 7, 9, 10}. O ROC obteve a FP1 composta pelas partes {A, F, C} com as máquinas {3, 8, 4} e a FP2 composta pelas partes {C, B, D, E} com as máquinas {5, 10, 2, 7, 9, 6, 1}. Entretanto, o número de trocas de ferramentas entre a FP1 e a FP2 obtidas pela matriz do CIAM é menor do que o número de trocas entre a FP1 e FP2 da matriz do ROC. No CIAM são necessárias duas trocas de ferramentas para se passar do processamento da FP1 para a FP2. No ROC são necessárias 3 trocas de ferramentas. O algoritmo ROC não agrega o conceito de FPs, com isso, seus resultados serão analisados para comparar seu desempenho na formação de FPs em relação ao CIA Modificado.

Após a obtenção das FPs são geradas as soluções iniciais correspondentes. Os algoritmos responsáveis pelo seqüenciamento das partes, o TB, o GLS e o Método Exato por Exaustão processarão 2000 matrizes; 1000 agrupamentos formados por cada técnica. O seqüenciamento das partes, realizado pelas metas-heurísticas, faz alusão ao Problema do Caixeiro Viajante (Tasgetiren et al., 2010). As metas-heurísticas GLS (Voudouris, 1997) e BT (Bolduc et al., 2010) irão trabalhar praticamente do mesmo modo que trabalham no CV, a única diferença é que não será contabilizado o número de trocas de ferramentas do último instante para o primeiro, característica do CV. Por fim, os resultados obtidos são comparados quantitativamente e qualitativamente. Na literatura podem ser encontrados trabalhos que avaliam a eficiência da formação dos agrupamentos, uma relação entre as partes agrupadas e os elementos excepcionais gerados, (James et al., 2007), (Spiliopoulos e Sofianopoulou, 2008) e (Bajestani et al., 2009). Entretanto, estes artigos não abordam os gargalos. Portanto, não são apresentadas análises comparativas com resultados de outros trabalhos. Todos os testes foram aplicados em um computador com dois núcleos de processamento com *clock* de 1,66 em cada núcleo e com 1 GB de memória RAM.

6. Experimentos

Os experimentos foram realizados em duas fases: formação das Famílias de Partes e geração do seqüenciamento das partes. A Tabela 1, mostra a média do número de FPs geradas, através do processamento de cada uma das 2000 matrizes MI, bem como o desvio padrão em relação ao número de FPs encontradas.

Tabela 1 – Formação de Famílias de Partes

Algoritmo	Número Médio de FPs Geradas	Desvio Padrão
ROC	21	3,627
CIAM	15	3,549

Observa-se que o CIAM apresentou melhores resultados, com relação à obtenção do menor número médio de Famílias de Partes geradas. Isto significa, que o CIAM privilegia de maneira mais efetiva, a minimização do número de instantes de parada para a troca de ferramentas e, por conseguinte, a minimização do *setup*. Como informações adicionais, considerando o universo dos experimentos realizados, o CIAM obteve como menor resultado 9 FPs , rodando-se o ROC para esta matriz, obteve-se 18 FPs. Analogamente, o ROC obteve como menor resultado 15 FPs, rodando o CIAM, para esta matriz, obteve-se 10 FPs. O CIAM mostrou-se mais robusto, pois em todas as 1000 matrizes processas, o CIAM gerou menor número de FPs. Os resultados do CIAM são de melhor qualidade quantitativa e qualitativamente. Refletindo um menor número de paradas para *setup*. Na Tabela 2, é analisado o número de trocas de ferramentas que as técnicas ROC e CIAM geraram. A Tabela 2 mostra, através do processamento de cada uma das 2000 matrizes MI, o número médio de trocas de ferramentas, o desvio padrão e o tempo médio de processamento de máquina.

Tabela 2 – Desempenho das Famílias de Partes

	Número Médio de Trocas de Ferramentas	Desvio Padrão	Tempo Médio de Processamento
ROC	58,7	6,859	~= 1s
CIAM	44,4	5,652	~= 1s

O CIAM obteve resultados de melhor qualidade com relação à minimização do número de troca de ferramentas. Como informação adicional, A técnica ROC, considerando o universo dos experimentos, encontrou para o número de trocas de ferramentas o valor de 33 como menor valor e 77 como maior valor. Analogamente, o CIAM obteve como o menor valor de 26 trocas e 63 trocas como maior valor. Após, todas as 1000 matrizes MI terem sido processadas pelo ROC e CIAM, foram obtidas 2000 matrizes, as quais foram submetidas ao seqüenciamento pelas três técnicas: BT, GLS e BE. Na Tabela 3 são apresentadas, para as três técnicas: o valor médio da função objetivo, seu percentual médio de melhoria em relação ao valor da função objetivo da solução inicial, o desvio padrão médio da FO, o tempo médio de processamento e o número de matrizes processadas.

Tabela 3 - Seqüenciamento das Famílias de Partes

	Valor Médio da FO	% Médio de Melhoria	Desvio Padrão Médio	Tempo Médio de Processamento	Número de matrizes processadas
GLS	29,8	41,568%	3,858	~= 31,27s	2000
TB	26,4	49,866%	3,471	~= 25,3s	2000
BE*	24,9	47,351%	2,871	~= 15h 37m	7

A técnica BE* teve seu tempo processamento muito superior ao previsto. O número de matrizes processadas foi de apenas 7, enquanto que as metas-heurísticas processaram todas as matrizes. Observa-se, na Tabela 3, que a BT apresentou soluções de melhor qualidade que a GLS em todos os itens. A tabela 4 mostra a analise do desempenho da BT e da GLS em relação à escala do problema, desde problemas pequenos até larga escala. Neste experimento foram utilizadas somente as 1000 matrizes geradas pelo CIAM como soluções iniciais. A coluna Número de FPs indica o número de Famílias de Partes das matrizes. A coluna número de matrizes apresenta à quantidade de matrizes correspondentes a coluna anterior. Partindo desse ponto, são mostrados o percentual médio de melhora de cada meta-heurística com relação ao valor da função objetivo em comparação com a solução inicial, o desvio padrão médio dos valores da FO e o tempo médio de processamento, medido individualmente para cada uma das matrizes A.

Analisando os dados da Tabela 4, mostrada a seguir, pode-se ver que quando o número de FPs aumenta o tempo de processamento também aumenta. Além disso, pode ser verificado que o percentual de melhora em relação à Solução Inicial melhorou com o aumento das FPs. Na Tabela 4 não foi comparada a técnica BE, pois seu tempo de processamento torna inviável a utilização e comparação de seus resultados. Os resultados da BT são sempre melhores que o da GLS. Na Figura 5, a seguir, é mostrado um gráfico comparativo das metas-heurísticas BT e GLS com relação aos seus comportamentos dado o número total de iterações das metas-heurísticas e os valores correspondentes da função objetivo. Para obtenção deste gráfico foi considerada uma matriz com 22 FPs e com uma Solução Inicial de 63 trocas.

Tabela 4 – Desempenho da BT e GLS considerando o Tamanho das Matrizes

Número de FPs	Número de Matrizes	GLS			BT		
		% Média de Melhora da FO	Desvio Padrão Médio da FO	Tempo de Process. Médio	% Média de Melhora da FO	Desvio Padrão Médio da FO	Tempo de Process. Médio
9	55	33,57%	2,870	~= 22,7s	34,69%	2,609	~= 18,3s
10	98	33,24%	2,886	~= 23,3s	34,64%	2,632	~= 19,7s
11	77	33,98%	2,911	~= 24,3s	35,12%	2,867	~= 20,4s
12	45	32,16%	2,892	~= 25,1s	34,59%	2,379	~= 21,8s
13	51	34,86%	2,955	~= 26,9s	37,24%	2,713	~= 22,6s
14	55	37,68%	3,012	~= 27,5s	38,56%	2,469	~= 23,1s
15	215	37,43%	3,167	~= 28,9s	39,38%	3,015	~= 23,4s
16	29	36,99%	2,782	~= 29,4s	39,25%	2,528	~= 24,9s
17	129	39,77%	3,461	~= 29,84s	41,97%	3,291	~= 25,1s
18	44	39,54%	2,962	~= 30,7s	41,92%	2,699	~= 26,3s
19	81	40,58%	3,542	~= 31,5s	43,68%	3,241	~= 26,9s
20	39	41,62%	2,975	~= 32,8s	47,15%	2,745	~= 27,6s
21	75	43,86%	4,759	~= 33,71s	54,22%	4,511	~= 28,8s
22	7	44,12%	2,839	~= 34,91s	55,69%	2,496	~= 30,2s

Observa-se, na Figura 5, que a BT obteve um resultado de melhor qualidade em relação à GLS convergindo mais rápido para a melhor solução. Os melhores valores das funções objetivos obtidos foram 31 para BT e 33 para a GLS. O tempo total de processamento não foi considerado no gráfico, porém seus tempos ficaram em 29,3 segundo para a BT e 35,3 para a GLS, além disso, a técnica BE não foi aplicada, pois seu tempo de processamento seria muito elevado.

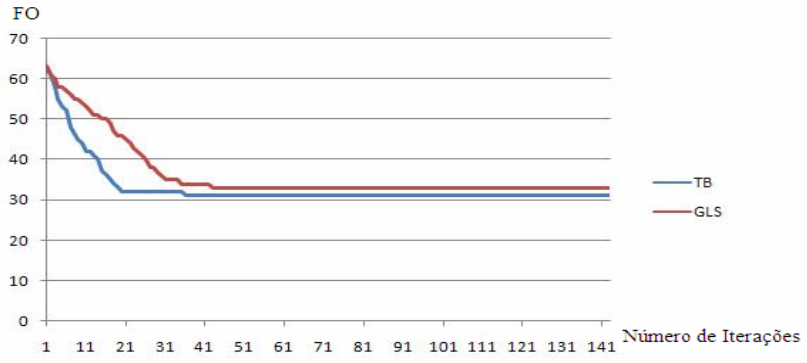

Figura 5 – Desempenho das Metas-heurísticas

7. Considerações Finais

Neste trabalho foi apresentado um estudo do problema de Geração de Células de Manufatura, através de métodos de geração de Famílias de Partes que consideram o compartilhamento de recursos, a minimização do número de troca de ferramentas, os setups e o limite do número de máquinas nas células de manufatura. Para a abordagem do problema de Geração de Células de Manufatura foram utilizados os algoritmos ROC e CIAM. Para gerar o seqüenciamento das partes minimizando o número de troca de ferramentas utilizou-se a Busca Tabu, Busca Local Guiada e a Busca por Exaustão.

Nos experimentos, voltados à análise da geração de Células de Manufatura, observou-se que o ROC não aborda o problema da existência dos gargalos, não gerando células de manufatura que prevêem o compartilhamento de recursos minimizando o número de trocas de ferramentas. Apesar de seu tempo de processamento ser muito baixo, aproximadamente 1 segundo, seus resultados são de menor qualidade se comparados ao CIAM. Devido às diferenças nas técnicas de formação de FPs, pode ser verificado que o CIAM gerou soluções de melhor qualidade quanto à minimização do número de FPs. Nos experimentos, o número médio de Famílias de Partes geradas foi de 21 para o ROC e de 15 para o CIAM. A qualidade do CIAM, em relação ao ROC, fica evidente, também quanto ao número de trocas de ferramentas onde o ROC encontrou uma média de 58,7 trocas enquanto que o CIAM encontrou uma média 44,4 trocas tendo impacto direto no *setup*.

Nos experimentos visando à minimização do número de trocas de ferramentas constatou-se que o desempenho das metas-heurísticas foi superior ao método exato. Foi verificado que todas as três técnicas, TB, GLS e BE, obtiveram resultados que minimizaram significativamente o número de trocas de ferramentas, entre 41% e 49%, contudo, o tempo de processamento muito elevado torna inviável a utilização da BE. A BT mostrou-se mais robusta e eficiente que a GLS. Isto pode ser observado pela qualidade dos resultados obtidos: obteve resultados melhores na minimização do número de troca de ferramentas, com desvios padrões médios da FO e tempos de processamento menores que os obtidos com a GLS.

Por fim, como projetos futuros, outros métodos, como as metas-heurísticas populacionais, Algoritmos Genéticos e Colônia de Formigas, também podem ser aplicados ao seqüenciamento das partes. Bem como, podem ser implementados, outros algoritmos, como de geração de colunas para a geração de Células de Manufatura.

8. Referências

Ang, D. S. (2000). An algorithm for handling exceptional elements in cellular manufacturing systems, *Industrial Management & Data Systems*, 100/6, 251-254.

Arikan, F. e Güngör, Z. (2005). A parametric model for cell formation and exceptional elements' problems with fuzzy parameters, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 16, 103-114.

Bajestani, M. A., Rabbani M., Rahimi-Vahed, A. R. e Khoshkhou, G. B. (2009). A multi-objective scatter search for a dynamic cell formation problem, *Computers and Operations Research*, 36, 777-794.

Barbarosoglu, G. e Ozgur, D. (1999). A tabu search algorithm for the vehicle routing problem, *Computers and Operations Research*, 26, 255-270.

Bolduc, M., Laporte, G., Renaud, J. e Boctor, F.F. (2010). A tabu search heuristic for the split delivery vehicle routing problem with production and demand calendars, *European Journal of Operational Research*, 202, 122-130.

Burbidge, J.L. (1995). The Introduction of Group Technology, Halster Press and John Whiley, New York.

Chan, W. M., Chan, C. Y. e Ip, W. H. (2002). A heuristic algorithm for machine assignment in cellular layout, *Computers and Industrial Engeneering*, 44, 49-73.

Cordeau, J-F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J.-Y. e Semet, F. (2002). A guide to vehicle routing heuristics, *Journal of the Operational Research Society*, 53, 512-522.

Durán, O., Rodriguez, N. e Consalter, L. A. (2008). A PSO-based Clustering Algorithm for Manufacturing Cell Design, *Workshop on Knowledge Discovery and Data Mining*, 72-75.

Foulds, L. R., French, A. P. e Wilson, J.M. (2006). The sustainable cell formation problem: manufacturing cell creation with machine modification costs. *Computers and Operations Research*, 33, 1010-1032.

Gómez, A. T. (1996). Modelo para Seqüenciamento de Partes e Ferramentas em um Sistema de Manufatura Flexível com Restrições às Datas de Vencimento e a Capacidade do Magazine. Ministério da Ciência e Tecnologia, *Dissertação*,Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Groover, M. P. (2001). Automation, Production Systems and Computer-Integrated Manufacturion, Second Edition, Prentice Hall, Inc., New Jersey.

James, T. L., Brown, E. C. e Keeling, K. B. (2007). A hybrid grouping genetic algorithm for the cell formation problem, *Computers and Operations Research*, 34, 2059-2079.

King, J.R. e Nakornchai, V. (1982). Machine-component group formation in group technology: Review and extension, *International Journal of Production Research*, 20(2), 117-133,

Kusiak, A. (1987). The generalized group technology concept, *International Journal of Production Research*, 25, 561–569.

Mohamed, Z. M. (1996). A flexible approach to (re)configure Flexible Manufacturing Cells, *European Journal of Operational Research*, 95, 556 – 576.

Mukattash, A. M., Abil, M. B. e Tahboub, K. K. (2002). Heuristic approaches for part assignment in cell formation, *Computers and Industrial Engineering*, 42, 329-341.

Müller, G. I. e Gómez, A. T. (2006) Utilização da Busca Tabu para a Geração de um Modelo Aplicado ao Job-shop Scheduling Problem Considerando um Sistema de Manufatura Flexível. *Journal of Computer Science*, vol. 6, p. 90-99.

Neto, E. S. M. (2004). Hibridização de Algoritmos Genéticos com Relaxação Lagrangeana Aplicada a Job Shop, *Dissertação*, Universidade Federal da Bahia. Instituto de Matemática, Salvador.

Papaioannou, G. e Wilson, J. M. (2008). Fuzzy extensions to Integer Programming models of cell-formation problems in machine scheduling. *Annals of Operations Research*, 166, 163-182.

Prins, C. (2004). A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem, *Computers & Operations Research*, 31, 1985-2002.

Safaei, N., Saidi-Mehrabad, M., Tavakkoli-Moghaddam, R. e Sassani, F. (2008). A fuzzy programming approach for a cell formation problem with dynamic and uncertain conditions, *Fuzzy Sets and Systems*, 159, 215-236.

Saidi-Mehrabad, M. e Safaei, N. (2007). A new model of dynamic cell formation by a neural approach, *I*nternational Journal of Advanced Manufacturing Technology, 33, 1001-1009.

Spiliopoulos, K. e Sofianopoulou S. (1998). An optimal tree search method for the manufacturing systems cell formation problem, *European Journal of Operacional Research*, 105, 537-551.

Spiliopoulos, K. e Sofianopoulou S. (2008). An efficient ant colony optimization system for the manufacturing cells formation problem, *I*nternational Journal of Advanced Manufacturing Technology, 36, 589-597.

Tang, C. e Denardo, E. (1987). Models arising from a flexible manufacturing machine, Part I: minimization of the number of tool switches, *Operations Research*, 767 - 777.

Tasgetiren, M. F., Suganthan, P.N. e Pan, Q. (2010). An ensemble of discrete differential evolution algorithms for solving the generalized traveling salesman problem, *Applied Mathematics and Computation*, 215, 3356–3368.

Toth, P. eVigo, D. (2003). The granular tabu search and its application to the vehicle-routing problem, *INFORMS Journal on Computing*, 15, 333-346.

Voudouris, C. (1997). Guided local search for combinatorial optimization problems. Department of Computer Science, University of Essex.

Voudouris, C. (1999). Guided Local Search and Its Application to the Traveling Salesman Problem, *European Journal of Operational Research*, 113, 469-499.

Xu, J. e Kelly, J.P. (1996). A Network Flow-Based Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem, *Transportation Science*, 30, 379-393.