

# Um Método e um Programa de Coloração em Grafos para o Projeto de Células de Manufatura

**Edsandra Mara de Azevedo, José Francisco Ferreira Ribeiro**

Depto de Ciências de Computação e Estatística, ICMC, USP,

13560-970, São Carlos, SP

E-mail: edsandra@icmc.usp.br, [jffr@icmc.usp.br](mailto:jffr@icmc.usp.br),

## 1. Introdução

A Tecnologia de Grupo (TG) é uma técnica de produção que permite organizar de maneira ágil e eficiente os sistemas de manufatura dedicados à fabricação sob encomenda e/ou de lotes pequenos e médios. Esta técnica consiste em agrupar peças similares em famílias com o objetivo de fabricá-las em células ou ilhas que reúnem máquinas especialmente selecionadas para este fim. Isto permite maior automatização, redução do tempo de preparação das máquinas (set up), padronização das ferramentas utilizadas e redução dos ciclos de fabricação [26].

Em um sistema de produção organizado em células de manufatura, a administração torna-se mais simples e eficiente, decorrência imediata da decomposição do sistema global de produção em subsistemas de menor dimensão. Há uma redução do tempo gasto em transferências entre os postos de trabalho, do tempo de preparação das máquinas, da quantidade de ferramentas, do tamanho dos lotes e do tempo total de fabricação [19].

No entanto, o projeto das células de manufatura exige a resolução de um problema matemático bastante complexo [16]: Dada a matriz incidência na forma [peças  $\times$  máquinas] ou [peças  $\times$  tipos de máquinas], onde os tipos de máquinas seriam os tornos, fresadoras, etc., e as máquinas seriam um torno ou uma fresadora específicos dentro do parque de máquinas disponível, trata-se de rearranjar as linhas e as colunas desta matriz, de modo a dar-lhe uma estrutura bloco-diagonal. Os elementos concentrados dentro dos blocos diagonais integram as células de fabricação e os que se situam fora dos blocos diagonais são chamados de movimentos inter-células e, na prática, são indesejáveis. Por isto, quando do projeto das células de fabricação procura-se minimizar o número de movimentos inter células, ao mesmo tempo em que se busca igualmente um equilíbrio de cargas de trabalho entre as diferentes células projetadas.

Numerosas técnicas têm sido utilizadas nos últimos anos [28] para efetuar a bloco-diagonalização da matriz de incidência, projetar as células de fabricação e implantar a TG na fábrica. Entre elas podemos citar a programação matemática: [1], [4], [5], [16], [27], [33], [36];

branch and bound: [23], [24]; lógica fuzzy: [8], [37]; algoritmos genéticos: [10], [32], [38]; redes neurais: [17], [18], [21]; metaheurísticas como busca tabu e simulated annealing: [4], [29], [31]; análise estatística de dados: [9], [20], [25], [26]. Uma aplicação [14] da Tecnologia de Grupo na indústria DMB Implementos Agrícolas, Sertãozinho, SP é apresentada em [22]. Um outro estudo sobre a aplicação da Tecnologia de Grupo em 3 indústrias brasileiras é apresentado em [11]. Os resultados alcançados por 33 empresas brasileiras usuárias da Tecnologia de Grupo são descritos em [2].

## 2. Teoria dos Grafos

Alguns conceitos fundamentais da Teoria dos Grafos são necessários para a apresentação do método de obtenção de células de manufatura proposto neste artigo.

Um grafo  $G(V, A)$  é um conjunto finito não vazio  $V$  constituído de elementos denominados vértices ou nós e um conjunto  $A$  que pode ser de pares ordenados ou não ordenados de elementos de  $V$ , denominados arestas ou arcos de  $G$ . Se  $A$  é constituído de pares ordenados, diz-se que  $G$  é um grafo orientado; caso contrário,  $G$  será não orientado. Em nosso método para o projeto de células, o grafo é não orientado.

Cada aresta  $a \in A$  será denotada pelo par de vértices  $a = (i, j)$  que a define. Neste caso, os vértices  $i$  e  $j$  são os extremos da aresta  $a$  e denominados adjacentes. A aresta  $a$  é dita incidente a ambos  $i$  e  $j$ . Duas arestas que possuem um extremo em comum são chamadas de adjacentes. A notação  $|V|$  e  $|A|$  indica o número de elementos de  $V$  e  $A$ , respectivamente. Em grafo  $G(V, A)$ , define-se grau de um vértice  $i \in V$ , como sendo o número de arestas incidentes a  $i$ .

Sejam  $G(V, A)$  e  $G_1(V_1, A_1)$  dois grafos. Se  $V_1 \subseteq V$  e  $A_1 \subseteq A$  dizemos que  $G_1(V_1, A_1)$  é um subgrafo de  $G(V, A)$ . Um nome especial dado aos subgrafos  $G_1(V_1, A_1)$  de um grafo  $G(V, A)$ , a saber, subgrafos induzidos, se  $G_1(V_1, A_1)$  satisfazer a seguinte propriedade: toda aresta  $(i, j)$  de  $G(V, A)$  é aresta de  $G_1(V_1, A_1)$  onde  $i, j \in V_1$ , ou seja, se  $i, j \in V_1$  e a aresta  $(i, j) \in A$  então  $(i, j) \in A_1$ . Um grafo parcial  $G_1(V_1, A_1)$  de um grafo  $G(V, A)$  é um grafo tal que  $A_1 \subseteq A$ .

Diz-se que um grafo  $G(V, A)$  é valorado quando a cada aresta de  $A$  ou vértice de  $V$ , está associado um peso  $\omega(a)$ . O sentido deste peso depende de cada problema específico, podendo corresponder a distância, fluxos, etc. Em um grafo valorado, o comprimento de uma aresta  $a$

$=\{i,j\}$  em um grafo valorado é a imagem de uma função peso  $\omega$  associado à aresta  $a$ .

Dado um índice  $s \geq 0$ , define-se como grafo-threshold.  $G_s(V, A_s)$ , o subgrafo parcial de  $G(V, A)$  tal que  $(x_i, x_j) \in A_s \Leftrightarrow \omega(x_i, x_j) \geq s$ .

Um grafo é completo quando existe uma aresta entre cada par de seus vértices. Utiliza-se a notação  $K_n$  para designar um grafo completo com  $n$  vértices. Diz-se que um subgrafo de  $G(V, A)$  é uma clique se este for completo. Um subgrafo induzido de  $G(V, A)$  é um conjunto independente de vértices ou “stable”, se este for totalmente desconexo, isto é, não existem arestas entre os vértices. O tamanho de uma clique ou de um conjunto independente de vértices é igual ao número de elementos de seu conjunto de vértices.

Um “matching” de um grafo  $G$  é um subconjunto de arestas de  $G$  tal que duas arestas quaisquer pertencentes a este subconjunto não sejam adjacentes.

Seja  $G(V, A)$  um grafo e  $C = \{c_i, i \in N\}$  um conjunto de cores. Uma coloração de  $G(V, A)$  é uma atribuição de alguma cor de  $C$  para cada vértice de  $V$ , de tal modo que a dois vértices adjacentes sejam atribuídas cores diferentes, i.e., uma coloração de  $G$  é uma função  $f: V \rightarrow C$  tal que para cada par de vértices  $v, w \in V$  tem-se  $(v, w) \in A \Rightarrow f(v) \neq f(w)$ .

Uma  $k$ -coloração de  $G$  é uma coloração que utiliza um total de  $k$  cores. Diz-se então que  $G$  é  $k$ -colorível.

Denomina-se número cromático,  $\lambda(G)$ , de um grafo  $G$ , ao menor número de cores  $k$ , para o qual existe uma  $k$ -coloração de  $G$ .

Os conceitos de coloração, clique e conjunto independente de vértices estão naturalmente relacionados: De fato, como são necessárias  $k$  cores para colorir os  $k$  vértices de uma clique de tamanho  $k$ , isto implica que  $\lambda(G)$  é maior ou igual ao tamanho da maior clique de  $G$ . Considere agora uma  $k$ -coloração de  $G(V, A)$ . Sejam  $V_1, V_2, \dots, V_k$  os subconjuntos disjuntos de  $V$  onde os vértices de  $V_1, V_2, \dots, V_k$  são coloridos com as cores  $c_1, c_2, \dots, c_k$ , respectivamente. Então  $\cup V_i = V, i=1, \dots, k$  e cada  $V_i$  é um conjunto independente de vértices. Com isto, o problema de determinar uma coloração de  $G$  pode ser formulado em termos de particionar  $V$  em um número mínimo de conjuntos independentes de vértices (maximais ou não).

### 3. Projeto de Células e Coloração em Grafos

Para construir o grafo  $G(V, A)$ , associado ao sistema de produção, faz-se: 1º)  $V = \{\text{conjunto de peças a fabricar}\}$ , 2º) calcula-se uma distância  $d_{ij}$  entre quaisquer dois pares de peças a fabricar com base no material em que as peças são fabricadas ou

em seus roteiros de fabricação, por exemplo, e existirá uma aresta  $a_{ij}$  ligando dois vértices  $i$  e  $j$  se a distância  $d_{ij}$  for maior ou igual ao valor de uma distância crítica fixada a priori e que pode ser alterada a qualquer instante com o objetivo de aumentar ou diminuir o número arestas do grafo e, por conseguinte, o número de células projetadas.

Dado que 2 nós adjacentes não podem receber a mesma cor, a coloração de  $G$  não colocará em uma mesma célula de manufatura peças cujas distâncias entre si sejam maiores ou iguais a um valor estabelecido de distância crítica. As peças que receberem a mesma cor serão reunidas em uma mesma família de peças, e serão fabricadas por uma mesma célula de máquinas, distribuídas às famílias de produtos, segundo o número de operações que executam em cada família de peças.

#### 4.1 Problema

Os dados do problema estão contidos na matriz formada de elementos 0/1 [peças a fabricar  $\times$  máquinas disponíveis] representativa do processo de produção da indústria. A partir desta matriz, obtém-se a matriz de dissimilaridade [peças  $\times$  peças]. Em seguida constrói-se o grafo de fabricação e aplica-se um algoritmo de coloração para a obtenção das famílias de peças em um número igual ao número fixado de células. Uma vez determinadas as famílias, obtém-se os grupos ou células de máquinas, atribuindo-se cada uma das máquinas à família que necessitar mais do seu trabalho.

#### 4.2 Algoritmo

O algoritmo correspondente ao método proposto é constituído de 4 passos fundamentais:

- Determinação da matriz de cargas de trabalho
  - Computação das dissimilaridades entre as peças
- Enquanto o  $N^\circ$  fixado de células não for obtido fazer:
- Efetuar a coloração do grafo  $G(V, A)$
  - Obter as famílias de peças

Fim Enquanto

- Obtenção dos grupos de máquinas

#### 4.3 Matriz de Carga de Trabalho

A partir dos dados iniciais obtém-se uma matriz [peças  $\times$  máquinas], que fornece o tempo total que cada peça gasta na passagem em cada máquina do seu roteiro. Esta matriz é chamada de matriz de carga de trabalho e seus coeficientes são calculados da seguinte maneira:

$$\bullet \text{ carga}[i,j] = \text{unidade}[i] \times \sum_{k | \text{roteiro}[i,j]=j} \text{duração}[i,k]$$

onde:

- unidade[i] = número de unidades da peça[i] a fabricar.
- duração[i,k] = duração da operação k sobre a peça[i].
- roteiro[i,k] = tipo de máquina utilizada para executar a operação k sobre a peça[i].

#### 4.4 Cálculo das dissimilaridades

O cálculo das dissimilaridades entre peças adotado no método proposto leva em consideração as diferenças existentes entre os roteiros de fabricação das peças. Dadas as peças  $P_i$  e  $P_j$  definidas pelos vetores 0/1 abaixo:

$$P_i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ik}, \dots, a_{im}]$$

$$P_j = [a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jk}, \dots, a_{jm}]$$

onde:

$m$  = é o número de máquinas disponíveis

$$a_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{se a peça } i \text{ sofrer operação na máquina } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Denota-se por  $d[P_i, P_j]$  a dissimilaridade entre as peças  $P_i$  e  $P_j$  e esta é dada por:

$$d[P_i, P_j] = \sum_{k=1}^m \Psi[a_{ik}, a_{jk}]$$

onde:

$$\Psi[a_{ik}, a_{jk}] = \begin{cases} a & \text{se } a_{ik} \neq a_{jk} \\ b & \text{se } a_{ik} = a_{jk} = 0 \\ c & \text{se } a_{ik} = a_{jk} = 1 \end{cases}$$

Nos testes realizados, utilizou-se,  $a = 1$ ,  $b = 0$ ,  $c = -1$

#### 4.5 Obtenção dos grupos de máquinas

Uma vez realizada a coloração do grafo e obtidas as famílias de peças, realiza-se a atribuição das máquinas às famílias projetadas. Esta atribuição é feita segundo o número de operações realizadas pelas máquinas em cada uma das famílias. Uma máquina será sempre atribuída à família onde executar o maior número de operações. O par [família de peças  $\times$  grupo de máquinas] constitui a célula de manufatura.

#### 4. Técnica de Coloração dos Vértices

Seja o problema de particionar um conjunto  $X$  de  $n$  objetos munidos de uma dissimilaridade, em um número  $k$ , fixo, de classes tal que o diâmetro  $d(P)$  entre as classes seja mínimo. Isto corresponde a construir um grafo-threshold de teto mínimo,  $G_s$ , subgrafo parcial de  $G(V, A)$ , que seja  $k$ -colorível.

Para colorir os vértices do grafo, empregou-se

uma técnica baseada em [12]. Este algoritmo enumera todas as partições em um número fixo de classes de diâmetro mínimo. Este se baseia na coloração de um grafo-threshold em  $p$  cores, cada cor definindo uma classe. Utiliza-se várias heurísticas para aproximar o diâmetro e enumera-se as partições de diâmetro mínimo unicamente no passo final.

Um limite superior,  $s$ , para  $d(P)$  é determinado de maneira heurística. Em seguida, enumeram-se, as  $k$ -colorações para  $G_s$ . Enquanto existir ao menos uma  $k$ -coloração possível, decrementa-se o valor de  $s$  e uma nova iteração é processada. Quando o algoritmo pára, o teto obtido é igual ao diâmetro das partições restantes. Para enumerar todas as possíveis partições de  $X$ , em  $k$  classes de diâmetro mínimo, aplica-se este algoritmo constituído de 3 etapas e que tem complexidade  $O(k^{N-k})$ .

Na 1ª etapa, utiliza-se um método heurístico para determinar o teto  $s$ , aproximação superior de  $d(P)$  tal que  $G_s$  seja  $k$ -colorível. O teto  $s$  é determinado por método de subdivisões dicotômicas do intervalo de variação das dissimilaridades e um método seqüencial de coloração, no caso, o algoritmo de saturação ou "Dsatur". Neste algoritmo, a cada iteração, define-se o grau de saturação  $DS_i(x)$  como o número de cores já utilizadas pelos vizinhos de  $x$ . O procedimento consiste em: a) colorir o vértice de maior grau com a cor 1; b) nas etapas seguintes, pegar o vértice livre de  $DS$  máximo e colorir-lo com a cor de menor índice possível.

Na 2ª etapa, uma vez fixado o teto  $s$ , enumera-se todas as colorações de  $G_s$  em  $k$  cores. Com o auxílio do "Dsatur", obtém-se uma clique se possível máxima, de  $G_s$ , onde cada nó representa uma classe. Em seguida, colore-se os outros vértices, segundo a ordem de saturação, de todas as maneiras possíveis. Se um vértice é adjacente a vértices coloridos, estas cores não poderão ser utilizadas para colorir-lo. Obtém-se, assim, todas as partições em  $k$  classes de diâmetro inferior a  $s$ .

Na 3ª etapa, considera-se as arestas na ordem não-crescente dos valores de dissimilaridades, a partir de  $s$ . Uma aresta pode ser inserida no grafo enquanto existir uma partição compatível, isto é, se a aresta liga nós de classes diferentes. Cada aresta inserida elimina, assim, algumas partições obtidas anteriormente. A primeira aresta que não puder ser inserida, uma vez que se o for não restariam mais partições compatíveis, tem valor igual ao maior valor de dissimilaridade inter-classes. As partições restantes são de diâmetro mínimo, para um número fixo de classes.

#### 5. Resultados Computacionais

O programa correspondente ao método apresentado acima foi escrito em linguagem C e está implantado em um micro-computador: PRO-C (Programa para o Projeto de Células por Coloração). Os resultados obtidos sobre exemplos da literatura são equivalentes ou melhores do

que aqueles propostos até o presente momento, em termos do número de movimentos inter-células (mic) e da dimensão das células projetadas.

A Tabela 1 resume 15 testes realizados sobre exemplos clássicos extraídos da literatura. Os exemplos estão indicados pelo número de referência da literatura fornecido na Tabela 2. Os resultados obtidos provocaram diminuição do número de movimentos inter-células para os três primeiros exemplos da Tabela 1, ao mesmo tempo em que as dimensões das células continuaram as mesmas ou praticamente as mesmas da melhor solução até então conhecida. O tempo computacional exigido para resolução de todos os problemas tratados esteve sempre abaixo de 1 minuto. As medidas de tempo foram feitas em um Pentium 200 MHz com 64 Kbytes.

Ex	Solução	mi c	Dimensão das Células
1	1	4	4x6,5x6
	PRO-C	2	4x6,5x6
2	2	24	5x4,10x6,15x6
	PRO-C	16	5x3,10x6,15x7
3	2	15	6x5,4x4,4x5, 3x3,3x3
	PRO-C	14	5x4,4x3,4x5, 3x4, 4x4
4	2	1	7x7,6x5,4x5,3x3
	PRO-C	1	7x7,6x5,4x5,3x3
5	3	0	2x5,3x3,2x6,3x6
	PRO-C	0	2x5,3x3,2x6,3x6
6	4	0	16x8,7x4,20x8
	PRO-C	0	16x8,7x4,20x8
7	4	1	-
	PRO-C	1	13x5,7x4,23x10
8	5	6	-
	PRO-C	6	12x9,10x8,19x13
9	5	3	-
	PRO-C	3	25x19,16x11
10	2	0	6x4,9x5,5x3
	PRO-C	0	6x4,9x5,5x3
11	7	0	4x5,3x5,3x5
	PRO-C	0	4x5,3x5,3x5
12	1	1	4x3,3x4
	PRO-C	1	3x3,4x4
13	8	0	2x2,3x2
	PRO-C	0	2x2,3x2
14	9	2	3x2,4x3
	PRO-C	2	3x2,4x3
15	10	2	3x2,4x3
	PRO-C	2	3x2,4x3

Tabela 1: Testes Realizados

Nº	Referência	
1	Meguelati, 1998	[20]
2	Harhalakis et al, 1990	[13]
3	Srinivasan et al, 1990	[30]
4	Burbidge, 1975	[6]
5	Kumar e Vanelli, 1987	[15]
6	Wei e & Kern, 1989	[35]
7	Chan & Milner, 1981	[7]
8	Kusiak, 1987	[16]
9	Ballakur e Steudel, 1987	[3]
10	Waghodekar e Sahu, 1984	[34]

Tabela 2: Exemplos da Literatura

## 6. Conclusão

Um método de coloração em grafos para auxiliar o projeto de células de manufatura foi apresentado neste artigo. O método baseia-se em um procedimento que computa as dissimilaridades entre as peças e a coloração de um grafo-threshold, com o objetivo de reunir as peças em famílias e as máquinas em subconjuntos, de tal modo que a cada família de peças corresponde um único subconjunto de tipos de máquinas e vice versa. A solução obtida procura minimizar o número de movimentos inter-células.

Os exemplos tratados mostram a eficiência do método, tanto na qualidade das soluções obtidas (reduziu-se o número de movimentos inter-células em 3 exemplos extraídos da literatura), quanto em tempo computacional (alguns segundos de cálculo para todos os exemplos testados) ou em ocupação do espaço da memória da máquina, o que o torna, portanto, acessível a um grande número de indústrias, principalmente aquelas de porte pequeno e médio.

## Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com auxílio do CNPq.

## Referências

- [1] Adil, G. K., Rajanani, D., Strong, D., Assignment Allocation and Simulated Annealing Algorithms for Cell formation, *IIE transactions*, 29 (1997), 53-67.
- [2] Arruda, S. P. E., Vila Fo., E. G., "Levantamento do Estágio Atual de Implementação da TG e CM no Estado de São Paulo", XV ENEGEP, pp. 1559-1562, 1994.
- [3] Ballakur, A., Steudel, H.J., 1987, A Within Cell Based Heuristic for Designing Cellular Manufacturing Systems, *Int J Prod Res*, 5 (1987), 639-665.

- [4] Boctor, F. F., A Linear Formulation of the Machine-Part Cell Formation Problem, *Int J Prod Res*, 29 (1991), 343-356.
- [5] Boctor, F. F., The Minimum Cost – Machine-Part Cell Formation, *Int J Prod Res*, 34 (1996), 1045-1063.
- [6] Burbidge, J.L., "The Introduction of Group Technology", John Wiley, 1975
- [7] Chan, H.M., Milner, D.A., Direct cluster for group formation in cellular manufacture, *J Manuf Syst*, 1, pp. 235-242, 1981.
- [8] Chu, C.H., Hayya, J.C, "A fuzzy clustering approach to manufacturing cell formation for GT", IIEC, Orlando FL USA, pp. 495-500, 1991.
- [9] Deutsch, S. J., Freeman, S. F., Helander, M., "Manufacturing Cell Formation Using an Improved p-Median Model", *Computers and Industrial Engineering*, 34, 135-146, 1998.
- [10] Dimopoulos, C., Mort, N., A Hierarchical Clustering Methodology Based on Genetic Programming for Solution of Cell-Formation Problems, *Int J Prod Res*, 39 (2001), 1-19.
- [11] Ferreira, M. S., Resende, M. O., "Um Exame à Prática do Controle de Produção em Células de Manufatura", XV ENEGEP, pp. 1579-1583, 1995.
- [12] Guénoche, A., "Énumération des Partitions de Diamètre Minimum", *Discrete Mathematics*, 111, pp. 227-287, 1993.
- [13] Harhalakis, G., Nagi, R., Proth, J.M., An efficient heuristic in manufacturing cell formation for Group Technology applications, *Int J Prod Res*, 28 (1990), pp. 185-198.
- [14] Hyer, N. L., Wemmerlów, U., 1989, GT in US Manufacturing Industry, *Int J Prod Res*, 27, 8 (1989), 1287-1304.
- [15] Kumar, K.R., Vanelli, A., Strategic subcontracting for efficient manufacturing, *Int J Prod Res*, 25 (1987), 1715-1728.
- [16] Kusiak, A., The generalized Group Technology concept, *Int J Prod Res*, 25 (1987), 561-569.
- [17] Kusiak, A., Chung, Y., 1991, GT/ART: using neural networks to form machine cells, *Manufacturing Review*, 4 (1991), 293-301.
- [18] Lee, H, Malave, C.O., Ramachandran, S., Neural network-based design of cellular manufacturing systems, *J Intel Manuf*, 3 (1992), pp. 325-332.
- [19] Mahmoodi, F., Dooley, K.J., Starr, P. J., 1990, An investigation of dynamic group scheduling heuristics in a job shop manufacturing cell, *Int J Prod Res*, 9 (1990), 1695-1711.
- [20] Meguelati, S., "Méthodes de Classification pour la Constitution d'Îlots de Fabrication", Rapport LAAS 98175, França, 1998.
- [21] Moon, Y.B., Chi, S.C., Generalized part family formation using neural network techniques, *J Manuf Syst*, 11 (1992), 149-159.
- [22] Oliveira, M. M. B., Giralaldi, J. M. E., Costa, A. L., Ribeiro, J. F. F., "Cells – The Case of an Implements Factory for Sugar Cane", XV IFORS, Pequim, China, CD-ROM, 1999.
- [23] Qattan-al, I., Designing flexible manufacturing cells using a branch and bound method, *Int J Prod Res*, 28 (1990), 325-336.
- [24] Ramabhata, V., Nagi, R., An Integrated Formulation of Cell Formation, *Operations Research*, 77 (1998), 79-95.
- [25] Ribeiro, J. F. F., Pradin, B., A Methodology for Cellular Manufacturing Design, *Int J Prod Res*, 31,1 (1993), 235-250.
- [26] Ribeiro, J. F. F., Meguelati, S., Organização de um Sistema de Produção em Células de Fabricação, *Revista Gestão e Produção*, in portuguese, 9, 1 (2002), 62-77.
- [27] Shafer, S.M., Kern, G.M., A mathematical programming approach for dealing with exceptional elements in cellular manufacturing, *Int J Prod Res*, 30 (1992), 1029-1036.
- [28] Singh, N., Design of cellular manufacturing systems: an invited review, *European J OR*, 69 (1993), 284-291.
- [29] Sofianopoulou, S., Manufacturing Cell Design with Alternative Process Plans and/or Replicate Machines, *Int J Prod Res*, 37 (1999), 707-720.
- [30] Srinivasan, G., Narendan, T.T., Mahavedan, B., An assignment model for the part-families problem in Group Technology, *Int J Prod Res*, 28 (1990), 145-152.
- [31] Venugopal, V., Narendran, T.T., Cell formation in manufacturing systems through simulated annealing: an experimental evaluation", *European J OR*, 63 (1992), 409-422.
- [32] Venugopal, V., Narendran, T.T., A genetic algorithm approach to the machine-component grouping problem with multiple objectives, *Computers and Industrial Engineering*, 22 (1992), 469-480.
- [33] Viswanathan, S., Configuring TG Manufacturing Systems: A Quadratic Integer Programming formulation and a Simple Interchange Heuristic, *Int J Prod Res*, 33, 2 (1995), 361-376.
- [34] Waghodekar P.H., Sahu, S., Machine-component cell formation in Group Technology: MACE, *Int J Prod Res*, 6 (1984), 937-948.
- [35] Wei, J.C., Kern, G.M., Commonality analysis: a linear cell clustering algorithm for Group Technology, *Int J Prod Res*, 12 (1989), 2053-2062.
- [36] Won, Y., Two-Phase Approach to GT Cell formation Using Efficient p-median Formulations", *Int J Prod Res*, 38, 7 (2000), 1601-1613.

- [37]Xu, H., Wang, H.P., Part family formation for Group Technology applications based on fuzzy mathematics, *Int J Prod Res*, 27 (1989), 1637-1651.
- [38]Zhao, C., Wu, Z., A Genetic Algorithm for Manufacturing Cell formation with Multiple routes and Multiples Objectives, *Int J Prod Res*, 38, 2 (2000), 385-395.