

PROJETO DE CÉLULAS DE MANUFATURA POR MEIO DE BIPARTIÇÕES SUCESSIVAS

José Francisco Ferreira Ribeiro

Universidade de São Paulo – ICMC – SME, São Carlos, SP 13560-970, Brasil
jffr@icmc.usp.br

Resumo. Neste artigo é apresentado um algoritmo de coloração em grafos para o projeto de células de manufatura. O algoritmo proposto computa as dissimilaridades entre produtos e estabelece uma partição dos produtos e das máquinas por meio da construção e coloração de uma árvore de peso máximo em um número de cores igual ao número desejado de células. Este algoritmo permite a resolução eficiente de exemplos de grande porte, apesar do caráter não polinomial do problema estudado. O programa correspondente foi escrito em linguagem Fortran e testado em microcomputador.

Palavras-Chave: Tecnologia de Grupo, Células de Manufatura, Teoria dos Grafos

1. INTRODUÇÃO

Uma das idéias de base da Tecnologia de Grupo (Burbidge, 1975), (Ribeiro e Meguelati, 2002), (Kamrani, 2004), (Hales et al., 2004), (Stansfield e Longenecker, 2006) consiste em decompor o sistema de produção em células de manufatura, ou seja, em subsistemas ou células de manufatura mais fáceis de administrar que o sistema considerado globalmente.

As similaridades de projeto e fabricação existentes entre os produtos reunidos em uma mesma célula de manufatura permitem uma redução do tempo de regulagem das máquinas e a padronização das ferramentas (Ribeiro e Meguelati, 2002). Da mesma forma, a concentração da fabricação em células minimiza o trajeto dos produtos e possibilita uma diminuição dos tempos não-produtivos de fabricação.

Os fundamentos da Tecnologia de Grupo podem, em princípio, ser aplicados a todas as áreas da empresa: fabricação, compras, administração, etc.

O projeto células de manufatura compreende a partição dos produtos a fabricar em famílias e do parque de máquinas disponíveis em grupos ou células. A cada família de produtos corresponde um só grupo ou célula de máquinas e vice-versa.

Trata-se de um problema combinatório para o qual não se dispõe de algoritmo de resolução polinomial (Garey-Johnson, 1979) e a proposição de algoritmos heurísticos para resolvê-lo é um recurso freqüente encontrado na literatura.

Numerosas técnicas têm sido utilizadas nos últimos anos para efetuar a bloco-diagonalização da matriz de incidência [produtos x máquinas], projetar as células de manufatura e implantar a Tecnologia de Grupo nas fábricas. Entre elas podemos citar:

- a) programação matemática: Won (2000), Albadawi et al. (2005), Panchalavarapu e Chankong (2005), Slomp et al. (2005), Rajagopalan e Fonseca, (2005); Adil e Ghosh (2005), Yin et al. (2005), Foulds et al. (2006).
- b) branch and bound: Boulif e Atif (2006).
- c) lógica fuzzy: Chu e Hayya (1991).
- d) algoritmos genéticos: Zhao e Wu (2000), Dimopoulos e Mort (2001), Gonçalves e Resende (2004), Hicks (2004), Solimanpur et al. (2004), Rajagopalan e Fonseca, (2005), Vin et al. (2005), Gonçalves e Tiberti (2006), Jeon e Leep (2006).
- e) redes neurais: Lozano et al. (2001), Guerrero (2002), Solimanpur et al. (2004), Pashkevich e Kazheunikau (2005).
- f) metaheurísticas como busca tabu e simulated annealing: Caux et al. (2000), Baykasoclu (2003), Spiliopoulos e Sofianopoulou (2003), Xambre e Vilarinho (2003), Chen e Cao (2004), Cao e Chen (2005), Ribeiro e Barbosa (2005).
- g) análise de dados: Ribeiro e Pradin (1993), Diallo et al. (2001), Rios (2002), Ribeiro e Meguelati (2002), Ribeiro (2003).
- h) teoria dos grafos: Ribeiro e Azevedo (2005).

Oliveira et al. (1999) apresentam a aplicação da Tecnologia de Grupo em uma fábrica da região de São Carlos, SP, a DMB Implementos Agrícolas.

Um outro estudo sobre a aplicação da Tecnologia de Grupo em 3 indústrias brasileiras é apresentado por Ferreira e Rezende (1995). Os resultados obtidos por 33 empresas brasileiras usuárias da Tecnologia de Grupo são descritos por Arruda e Gonçalves (1994).

Estudos importantes sobre as métricas utilizadas para efetuar o cálculo das dissimilaridades foram realizados e podem ser encontrados em Brenan et al. (2003) e Yin e Yasuda (2006).

2. ALGORITMO

O dado do problema é a matriz de elementos 0/1 [produtos x máquinas] representativa do processo de produção. A partir desta matriz, obtém-se a matriz de dissimilaridades [produtos x produtos], constrói-se o grafo de fabricação, a árvore de peso máximo e aplica-se um algoritmo de coloração para obtenção das famílias em número igual ao número fixo de células. Uma vez

determinadas as famílias, obtém-se os grupos ou células de máquinas, atribuindo-se as máquinas à família onde executarem o maior número de operações. O "algoritmo células de manufatura", abaixo, resume o método proposto.

algoritmo células de manufatura

Dado : matriz [produtos x máquinas]

- 1) computação das dissimilaridades e construção do grafo de fabricação
- 2) obtenção e coloração da árvore de peso máximo
- 3) determinação das famílias de produtos e projeto das células de máquinas

fim algoritmo células de manufatura

3. COMPUTAÇÃO DA DISSIMILARIDADE ENTRE PRODUTOS

O método de computação das dissimilaridades entre produtos adotado leva em conta as diferenças existentes entre roteiros de fabricação. Dados os produtos P_i e P_j definidos pelos vetores 0/1 abaixo:

$$P_i = [a_{i1}, \dots, a_{ik}, \dots, a_{imq}] \quad \text{e} \quad P_j = [a_{j1}, \dots, a_{jk}, \dots, a_{jmq}]$$

onde : $m_q =$ número de máquinas disponíveis.

$$a_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{se o produto } i \text{ sofre uma operação do tipo } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A dissimilaridade entre os produtos P_i e P_j é dada por:

$$d[P_i, P_j] = \sum_{k=1}^{m_q} \varphi[a_{ik}, a_{jk}] \quad \text{onde :} \quad \varphi[a_{ik}, a_{jk}] = \begin{cases} 1 & \text{se } a_{ik} \neq a_{jk} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

4. PROJETO DE CÉLULAS DE MANUFATURA

4.1 Construção do grafo de fabricação

O grafo de dissimilaridades é um grafo $G(N, A)$, onde N é o conjunto dos nós (ou produtos) e A é o conjunto dos arcos. Existe um arco k ligando dois nós i e j se a dissimilaridade entre os produtos i e j for maior ou igual ao valor de dissimilaridade mínima fixada pelo operador.

4.2 Obtenção e coloração de uma árvore de peso máximo

A árvore de peso máximo é construída a partir de $G(N, A)$ através do algoritmo "greedy" (Aho et al., 1983) e sua coloração é efetuada tendo em vista o teorema abaixo. A árvore de peso máximo obtida é ótima, dado que este problema pertence à classe dos matróides (Gondran e Minoux, 1985).

Teorema (Guénoche, 1989): A partição em 2 classes obtida pela bicoloração de uma árvore de peso máximo tem diâmetro mínimo. Obs: O diâmetro da classe é igual à maior dissimilaridade intra-classe.

Demonstração: Seja $P=(C1,C2)$ a partição obtida pela coloração da árvore de peso máximo A . Seja (x,y) uma aresta tal que $d(x,y)=$ maior dissimilaridade intra-classe. Esta aresta não pertence a A pois x e y estão na mesma classe e as arestas da árvore de peso máximo ligam nós de $C1$ a $C2$. Seja $u=\{x=x_1, \dots, x_p=y\}$ o caminho em A entre x e y e $Y=\{x_1, \dots, x_p\}$. Por construção, Y tem número ímpar de nós. A inserção de (x,y) em u forma um ciclo ímpar. Deduz-se que para toda partição de Y existe uma aresta (x_j, x_{j+1}) tal que x_j e x_{j+1} pertencem à mesma classe. Como A é árvore de peso máximo, toda aresta de u tem comprimento $\geq d(x,y)$, em particular $d(x_j, x_{j+1}) \geq d(x,y)$. Deduz-se que toda partição de Y tem diâmetro $\geq d(x,y)$ e, então, que a partição de P tem diâmetro mínimo.

4.3 Determinação das famílias de produtos

O método é iterativo e na 1ª iteração os produtos são particionados em 2 famílias através da bicoloração da árvore de peso máximo. Caso o número desejado de famílias seja igual a 2, o procedimento pára. Senão, inicia-se a 2ª iteração escolhendo-se a família de maior diâmetro: constrói-se, então, uma árvore de peso máximo para esta família, particionando-a em 2 novas famílias. Assim, obtém-se 3 famílias e caso este seja o número desejado de células, fim. Se este não for o caso, o procedimento continua até que o número desejado de células seja obtido.

4.4 Projeto das células de manufatura

As máquinas são atribuídas às famílias de produtos onde executam o maior número de operações de modo a obter-se as células de manufatura. No caso de uma partição perfeita de produtos e máquinas, as células são totalmente independentes umas das outras e cada produto sofre suas operações em sua célula de atribuição. Na prática, pode subsistir um certo número de movimentos inter-células que correspondem às operações executadas em células diferentes da célula de atribuição.

5. EXEMPLO ILUSTRATIVO

O exemplo considerado para ilustrar o procedimento é apresentado na Tabela 1 (Kusiak, 1987): o sistema de produção é composto de 5 produtos e 4 máquinas e deve-se particioná-lo em 2 células.

A Tabela 2 fornece a matriz de dissimilaridades entre os produtos.

As Figuras 1 e 2 mostram, respectivamente, o grafo de fabricação (fixando-se a dissimilaridade mínima = 1) e a árvore de peso máximo com a coloração correspondente.

A Tabela 3 apresenta as famílias de produtos, a Tabela 4 o número de operações realizadas pelas máquinas em cada célula e a Tabela 5 as células de manufatura.

Tabela 1. Matriz [produtos x máquinas]

	máquina 1	máquina 2	máquina 3	máquina 4
produto 1	0	1	0	1
produto 2	1	0	1	0
produto 3	0	1	0	1
produto 4	1	0	1	0
produto 5	1	0	0	0

Tabela 2. Matriz de dissimilaridades [produtos x produtos]

	produto 1	produto 2	produto 3	produto 4	produto 5
produto 1	-				
produto 2	4	-			
produto 3	0	4	-		
produto 4	4	0	4	-	
produto 5	3	1	3	1	-

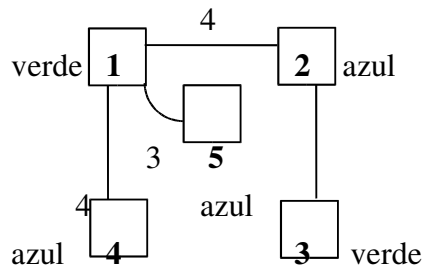
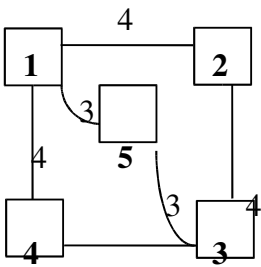


Figura 1. Grafo de Fabricação

Figura 2. Árvore e bicoloração

Tabela 3. Famílias de produtos

família 1 (verde)	produtos 1, 3
família 2 (azul)	produtos 2, 4, 5

Tabela 4. Máquinas e número de operações

máquina	família 1	família 2
1	0	3
2	2	0
3	0	2
4	2	0

Tabela 5. Células de Manufatura

	máquina 2	máquina 4	máquina 1	máquina 3
produto 1	1	1	0	0
produto 3	1	1	0	0
produto 2	0	0	1	1
produto 4	0	0	1	1
produto 5	0	0	1	0

6. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

A aplicação do algoritmo apresentado neste artigo sobre exemplos da literatura forneceu resultados equivalentes ou melhores – como no caso de Meguelati (1988) e Harhalakis et al (1990) – que aqueles apresentados anteriormente, tendo-se como critérios de referência o número de movimentos inter-células (mic) e a dimensão das células obtidas. O tempo de obtenção de uma solução em microcomputador é irrelevante ou da ordem de centésimos de segundos.

O procedimento adotado para a coloração da árvore de peso máximo mostrou-se eficiente nos testes realizados. Outros algoritmos heurísticos de coloração em grafos que descrevem resultados de boa qualidade na literatura são a busca arborescente por ligações e contrações (Ribeiro e Alves, 1994), o algoritmo "greedy" inicializado pelo nó de maior grau (Gondran e Minoux, 1985) e técnicas específicas de particionamento de grafos (Ronconi e Armentano, 1994).

Tabela 6. Resultados e tempos de cálculo

parâmetros	exemplo 1 : Meguelati (1998)	exemplo 2 : Harhalakis et al. (1990)
	2 células, mic = 4	5 células, mic = 15
mic	2	14
mic/ no. de operações	5 %	18 %
dimensão das células	(5 x 6), (4 x 6)	(4 x 5), (5 x 4), (5 x 4), (3 x 3), (3 x 4)
tempo cpu (s)	-	0.01

7. REFERÊNCIAS

- ADIL, G.K., GHOSH, J. B., Forming GT cells incrementally using GRASP. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 26, n. 11, p. 1402-1408, 2005.
- AHO, A., HOPCROFT, J., ULLMAN, J. **Data structures and algorithms**. Addison-Wesley, 1983.
- ALBADAWI, Z., BASHIR, H. A., CHEN, M. A mathematical approach for the formation of manufacturing cells. **Computers & Industrial Engineering**, v. 48, n.1, p. 3-21, 2005.
- ARRUDA, S. P. E., VILA FO., E. G. Levantamento do Estágio Atual de Implementação da TG no Estado de São Paulo, In: XV ENEGEP, 1994, p. 1559-1562.
- BAYKASOCLU, A. Capability-based distributed layout approach for virtual manufacturing cells. **International Journal of Production Research**, v. 41, n.11, p. 2597-2618, 2003.

- BOULIF, M., ATIF, K. A new branch-&-bound-enhanced genetic algorithm for the manufacturing cell formation. **Computers & Operations Research**, v. 33, n. 8, p. 2219-2245, 2006.
- BRENAN, R. W., NORRIE, D. H. Metrics for evaluating distributed manufacturing control systems. **Computers in Industry**, v.51, n. 2, p. 225-235, 2003.
- BURBIDGE, J. L., **The Introduction of Group Technology**. John Wiley, 1975.
- CAO, D., CHEN, M. A robust cell formation approach for varying product demands. **International Journal of Production Research**, v. 43, n.8, p. 1587-1605, 2005.
- CAUX, C., BRUNIAUX, R., PIERREVAL, H. Cell formation with alternative process plans and machine capacity constraints: A new combined approach. **International Journal of Production Economics**, v. 64, n. 1, p. 279-284, 2000.
- CHU, C.H., HAYYA, J.C., A fuzzy clustering approach to manufacturing cell formation, In: International Industrial Engineering Conference, Orlando FL USA, 1991, p. 495-500.
- DIALLO, M., PIERREVAL, H., QUILLIOT, A. Manufacturing cells design with flexible routing capability in presence of unreliable machines. **International Journal of Production Economics**, v. 74, n. 1, p. 175-182, 2001.
- DIMOPOULOS, C., MORT, N. A Hierarchical Clustering Methodology Based on Genetic Programming for the solution of simple Cell-Formation Problems. **International Journal of Production Research**, v. 39, n.1, p. 1-19, 2001.
- FERREIRA, M. S., RESENDE, M. O. Um Exame à Prática do Controle de Produção em Células de Manufatura, In: XV ENEGEP, 1995, p. 1579-1583.
- FOULDS, L. R., FRENCH, A. P., WILSON, J. M., The sustainable cell formation problem: manufacturing cell creation with machine modification costs. **Computers & Operations Research**, v. 33, n.4, p. 1010-1032, 2006.
- GAREY, M.R., JOHNSON, D.S. **Computers and intractability**, Freeman, 1979.
- GONÇALVES, J. F., RESENDE, M. G. C. An evolutionary algorithm for manufacturing cell formation. **Computers & Industrial Engineering**, v. 47, n. 2, pp. 247-273, 2004.
- GONÇALVES FO., E. V., TIBERTI, A. J. A genetic algorithm for the machine cell formation problem, **International Journal of Production Economics**, v.102, n.1, p. 1-21, 2006.
- GONDRAN, M., MINOUX, M. **Graphes et algorithmes**, Eyrolles, 1985.
- GUÉNOCHE, A. Partitions de diamètre minimum, In: IFICS, 1989, p. 252-266.
- GUERRERO, F. Manufacturing cell formation using a new self-organizing neural network. **Computers & Industrial Engineering**, v. 42, n. 2, p. 377-382, 2002.
- HALES, H. L., ANDERSEN, B. J., FILLMORE, W. E. **Work cell design**. McGraw-Hill, 2004.
- HARHALAKIS, G., NAGI, R., PROTH, J. M. An efficient heuristic in manufacturing cell formation for GT applications, **International Journal of Production Research**, v. 28, n. 1, p. 185-198, 1990.
- HICKS, C. A genetic algorithm tool for designing manufacturing facilities in the capital goods industry. **International Journal of Production Economics**, v. 90, n. 2, p. 199-211, 2004.
- HYER, N. L., WEMMERLÖW, U. GT in US Manufacturing Industry. **International Journal of Production Research**, v. 27, n. 8, p. 1287-1304, 1989.

- JEON, G., LEEP, H. R., Forming part families by using genetic algorithm and designing machine cells under demand changes. **Computers & Operations Research**, v. 33, n.1, p. 263-283, 2006.
- KAMRANI, A. K. **Group Technology Fundamentals and Manufacturing Applications**. McGraw-Hill, 2004.
- KUSIAK, A., The generalized Group Technology concept. **International Journal of Production Research**, v. 2, n. 2, p. 561-569, 1987.
- LOZANO, S., CANCA, D., GUERRERO, F., GARCIA, J. M., Machine grouping using sequence-based similarity coefficients and neural networks. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 17, n. 5, p. 399-404, 2001.
- LUIS, C., BLANCO, J., SEBASTIAN, M., Methodology for the design and control of flexible manufacturing cells. **International Journal of Computer Applications in Technology**, v. 24, n. 2, p. 68-74, 2005.
- MEGUELATI, S. Méthodes de classification, Tese de Doutorado INSAT/LAAS, 1988, França.
- OLIVEIRA, M. M. B., GIRALDI, J. M. E., COSTA, A. L., RIBEIRO, J. F. F., Cells – The Case of an Implements Factory for Sugar Cane. In: XV IFORS, Pequim, China, 1999, CD-ROM.
- RAJAGOPALAN, A., FONSECA, D. J. Volume sensitivity analysis for manufacturing cells: A genetic algorithm. **Journal of Advanced Manufacturing Systems**, v. 4, n. 2, p. 167-183, 2005.
- PANCHALAVARAPU, P. R., CHANKONG, V. Design of cellular manufacturing systems with assembly considerations. **Computers & Industrial Engineering**, v. 48, n. 3, p. 449-469, 2005.
- PASHKEVICH, A., KAZHEUNIKAU, M. Neural network approach to trajectory synthesis for robotic manipulators. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 16, n. 2, p. 173-187, 2005.
- RIBEIRO, J.F., ALVES, M.R.P.A. Projeto de células de manufatura por meio de ligações-contracções, In: XV CILAMCE, Belo Horizonte (MG), 1994, p. 1470-1476.
- RIBEIRO, J. F. F., PRADIN, B. A Methodology for Cellular Manufacturing Design, **International Journal of Production Research**, v. 31, n. 1, p. 235-250, 1993.
- RIBEIRO, J. F. F., MEGUELATI, S., Organização de um Sistema de Produção em Células de Fabricação. **Revista Gestão e Produção**, v. 9, n. 1, p. 62-77, 2002.
- RIBEIRO, J. F. F., Selection and assignment of machines: a parallel approach. **Journal of Computing and Information Technology**, 11(4), pp. 263-270, 2003.
- RIBEIRO, J. F. F., BARBOSA, G. Cells Manufacturing by Metaheuristics, In: III COBEF, Joinville, SC, 2005, CDROM.
- RIBEIRO, J. F. F., AZEVEDO, E. M., Um método e um programa de coloração em grafos para o projeto de células de manufatura, In: XXVIII CNMAC, São Paulo, SP, 2005, CD-ROM.
- RIOS, M. C., CAMPBELL, A. A. M., IRANI, S. A. An approach to the design of a manufacturing cell under economic considerations. **International Journal of Production Economics**, v. 78, n. 3, p. 223-237, 2002.
- RONCONI, D.P., ARMENTANO, V.A. Um método heurístico baseado em grafos para a formação de células de manufatura, **Cadernos DEP-UFSCar**, v. 21, p. 24-28, 1993.

- SLOMP, J., CHOWDARY, B. V, SURESH, N. Design of virtual manufacturing cells: a mathematical programming approach. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 21, n. 3, p. 273-288, 2005.
- SOLIMANPUR, M., VRAT, P., SHANKAR, R., A multi-objective genetic algorithm approach to the design of cellular manufacturing systems. **International Journal of Production Research**, v. 42, n. 7, p. 1419-1441, 2004.
- SPILIOPOULOS, K., SOFIANOPOULOU , S. Designing manufacturing cells: a staged approach and a tabu search algorithm. **International Journal of Production Research**, v. 41, n. 11, p. 2531-2546, 2003.
- STANSFIELD, T.C., LONGENECKER, C.O., The effects of goal setting and feedback on manufacturing productivity: A field experiment. **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 55, n.3, p. 346-358, 2006.
- VIN, E., DE LIT, P., DELCHAMBRE, A. A multiple-objective grouping genetic algorithm for the cell formation problem with alternative routings. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 16, n. 2, p. 189-205, 2005.
- WON, Y. Two-phase approach to GT cell formation using efficient p-median formulations. **International Journal of Production Research**, v. 38, n. 7, p. 1601-1613, 2000.
- XAMBRE, A. R., VILARINHO, P. M. A simulated annealing approach for manufacturing cell formation with multiple identical machines. **European Journal of Operational Research**, v. 151, n. 2, p. 434-446, 2003.
- YIN, Y., YASUDA, K., HU, L. Formation of manufacturing cells based on material flows, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 27, n. 2, p. 159-165, 2005.
- ZHAO, C., WU, Z., A Genetic Algorithm for Manufacturing Cell formation with Multiple routes and Multiples Objectives, **International Journal of Production Research**, v. 38, n. 2, p. 385-395, 2000.

MANUFACTURING CELLS DESIGN BY SUCCESSIVE BIPARTITIONING

José Francisco Ferreira Ribeiro

Universidade de São Paulo – ICMC – SME, São Carlos, SP 13560-970, Brasil

jffr@icmc.usp.br

Abstract. *In this paper is presented a graph coloring algorithm for manufacturing cells design. The proposed algorithm computes dissimilarities between parts and obtains a partition of parts and machines by coloring a maximum spanning tree in a number of colors equals to the desired number of cells. This algorithm solves efficiently large-scale problems, in spite of the non-polynomial nature of the studied problem. The corresponding program was written in Fortran and tested in a microcomputer.*

Keywords: *Group Technology, Manufacturing Cells, Graph Theory*