

PROJETO DE CÉLULAS DE MANUFATURA

José Francisco Ferreira Ribeiro

Universidade de São Paulo

Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – 13560-970 – São Carlos (SP) Brasil

jffr@icmc.usp.br

Resumo

O conceito de manufatura celular consiste em decompor o sistema de manufatura em subsistemas mais fáceis de gerenciar que o sistema global. As máquinas são agrupadas em células e as peças em famílias. Cada par família-célula constitui uma célula de manufatura. Neste artigo estudamos vários algoritmos e modelos para a obtenção de células de manufatura e propomos uma heurística para resolver o problema. Os resultados obtidos sobre vários exemplos da literatura são equivalentes ou melhores que aqueles existentes.

Palavras-Chaves: Tecnologia de Grupo, Células de Manufatura, Heurísticas

Abstract

The concept of cellular manufacturing is to decompose the manufacturing system into subsystems, which are easier to manage than the global manufacturing system. Machines are grouped into machines cells and parts are grouped into part families. Each family-cell pair constitutes a manufacturing cell. In this paper we study several algorithms and models for cellular manufacturing design and we propose a heuristic to solve the problem. The results obtained with this method on several examples found in the literature are consistently equivalent to or even better than those hitherto proposed.

Keywords: Group Technology, Manufacturing Cells, Heuristics

1. INTRODUÇÃO

O conceito de células de manufatura em Tecnologia de Grupo (Burbidge, 1975), (Kamrani, 2004), (Hales et al., 2004) repousa sobre o agrupamento de peças similares em famílias com o objetivo de fabricá-las em células ou ilhas que reúnem máquinas especialmente selecionadas para este fim. Isto conduz a uma maior automatização, a uma redução do tempo de preparação das máquinas, a uma padronização das ferramentas empregadas e a uma redução dos ciclos de fabricação (Ribeiro e Meguelati, 2002), (Stansfield e Longenecker, 2006).

A implantação da Tecnologia de Grupo no sistema de manufatura pode ainda fornecer as seguintes vantagens: (I) as células de manufatura podem aumentar a produtividade da indústria, diminuindo assim o tempo de fabricação e conseqüentemente o tempo de entrega; (II) trabalhando-se com células de manufatura, deixam de existir o tempo perdido para o transporte das peças às máquinas e a decisão sobre a máquina efetiva para executar uma dada operação, ou seja, há diminuição do trabalho em processo; (III) conhecendo-se a destinação de cada peça, o transporte é facilitado e conseqüentemente pode-se intensificar o trabalho; (IV) executando-se as operações sobre as peças nas máquinas mais adequadas, espera-se diminuir o número de horas de retrabalho e os refugos; (V) as similaridades entre as peças a serem fabricadas em uma mesma célula de manufatura, permitem uma redução do tempo de regulagem das máquinas ("set-up"), a utilização de um mesmo ferramental, uma diminuição do trajeto das peças pela fábrica, etc; (VI) pode-se ainda, reduzir a burocracia e melhorar o relacionamento entre os funcionários

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O problema de organização de uma fábrica em células de manufatura tem sido objeto de numerosos estudos nos últimos anos. Tendo em vista o seu caráter combinatório, a não-existência de algoritmo de resolução polinomial e a dimensão dos problemas a tratar, o número de algoritmos de busca de um ótimo local ou heurísticos propostos para resolvê-lo é considerável.

Entre as técnicas utilizadas para particionar a matriz [peças x máquinas] em blocos podemos citar os seguintes trabalhos:

- 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);
 - Branch and bound: Boulif e Atif (2006);
 - Lógica fuzzy: Chu e Hayya (1991);
 - 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);
 - Redes neurais: Lozano et al. (2001), Guerrero (2002), Solimanpur et al. (2004), Pashkevich e Kazheunikau (2005);
 - 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);
 - Análise de dados: Ribeiro e Pradin (1993), Diallo et al. (2001), Rios (2002), Ribeiro e Meguelati (2002), Ribeiro (2003);
 - 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).

3. HEURÍSTICA

Dados o número de máquinas disponíveis, as peças a serem processadas e os respectivos roteiros de fabricação, constrói-se uma matriz [peças x máquinas] (a_{ij}) ($i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, m$; onde n é o número de peças e m o número de máquinas; $a_{ij} = 1$, se a peça i tem uma operação sobre a máquina j e $a_{ij} = 0$, caso contrário). O objetivo consiste em particionar essa matriz em um número desejado de células ou blocos.

3.1. ETAPA 1 DA HEURÍSTICA

Define-se "máquina-gargalo" como a máquina para a qual a razão entre a soma total do número de operações executadas por esta máquina, e o número médio, inteiro, do total de operações por máquinas, é maior ou igual a 2. Uma "máquina-chave" é uma "máquina-

gargalo" que executa o menor número de operações.

A heurística reúne todas as peças que são processadas pela "máquina chave" em uma família, e se existir mais de uma peça que necessite do trabalho de outras máquinas, separa-se estas máquinas, inserindo-as, juntamente com a "máquina-chave", em outro grupo de máquinas. O processo continua até que todas as peças não necessitem de outras máquinas para serem processadas. Caso exista uma única peça que necessite do trabalho de alguma outra máquina, esta peça é denominada "peça-chave", podendo dar início a uma célula alternativa. Desta forma, uma célula é formada, e um ciclo é encerrado.

Em seguida, todas as máquinas e peças atribuídas à mesma são deletadas, com exceção das "máquinas-gargalo". O processo é reiniciado, escolhendo-se outra "máquina-chave" entre aquelas restantes, e inicia-se o segundo grupo de células. O processo estará terminado quando todas as peças e máquinas tiverem sido atribuídas a alguma célula.

3.2. ETAPA 2 DO HEURÍSTICA

A primeira etapa da heurística utiliza o expediente da duplicação de máquinas nas diferentes células, como meio de eliminar os movimentos inter-células da solução obtida. Este expediente pode exigir a compra de novas máquinas, o que pode ser inaceitável na prática, dado o custo das mesmas, o espaço disponível na fábrica, etc. O procedimento obtém solução sem nenhum movimento inter-células, ou não apresenta solução. Ele utiliza a duplicação de máquinas como única maneira de se evitar os movimentos inter-células.

Para tentar eliminar ou diminuir o número de máquinas duplicadas é, então, ativada a Etapa 2 do algoritmo:

algoritmo etapa 2

- a) análise das células obtidas;
- b) análise das operações realizadas em cada célula;
- c) análise dos movimentos inter-células;
- d) análise das máquinas sujeitas à mudança de células.

fim algoritmo etapa 2

A "análise do número de células obtidas" separa as células com apenas 1 ou 2 peças, com o objetivo de eliminá-las. Esta eliminação é realizada com base nas máquinas que foram duplicadas e que executam poucas operações.

A "análise do número de operações realizadas em cada célula" verifica, para cada célula, o número de operações realizadas dentro desta pelas máquinas duplicadas. Se o problema aceita a duplicação de máquinas, estas são conservadas. Caso contrário, conserva-se as máquinas que executam o maior número de operações.

A "análise do número de movimentos inter-células" verifica a dimensão das células formadas e insere as peças, que ainda não tenham sido atribuídas, na célula que possua o maior número de máquinas necessárias para o processamento das mesmas. Desta forma haverá máquinas que executam operações em outras células. O número de movimentos inter-células é computado e se necessário as máquinas são atribuídas às células onde executam o maior número de operações, até que se elimine algum movimento inter-células.

A "análise das máquinas sujeitas à mudança de células" verifica o número de operações executadas pelas diferentes máquinas em cada uma das células. Caso a diferença entre o número de operações executadas em duas células distintas seja igual a 1, a máquina é transferida de uma célula para outra. Tal decisão implica em alterações nas atribuições realizadas sobre as peças e, por conseguinte, no número de movimentos inter-células. Se as peças em questão apresentarem maior número de operações em outra célula, estas são reatribuídas. O número de movimentos inter-células é computado novamente e, se necessário, as máquinas sofrem um processo de reatribuição.

4. TESTES COMPUTACIONAIS

A Tabela 1 fornece exemplos clássicos da literatura que serviram para testar a heurística proposta codificada em linguagem C. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

Exemplo	Referência
1a, 1b	Qattan, 1990
2	Chen e Irani, 1993
3a, 3b	Ballakur e Steudel, 1987
4	Srinivasan et al. (1990)
5	Ribeiro e Meguelati (2002)
6	Harhalakis et al., 1990
7	Garcia et al., 1985

Tabela 2. Exemplos Testados

Exemplo	Resultado da Literatura			ETAPA 1		ETAPA 2		
	Result	Mov	Duplic	Result	Duplic	Result	Mov	Duplic
1a	3 células	-	6 e 8	3 células	6 e 8	3 células	-	6 e 8
1b	4 células	-	6, 8 e 11	4 células	6, 8 e 11	4 células	-	6, 8 e 11
2	3 células	19	-	2 células	5	3 células	17	-
3a	3 células	-	-	3 células	-	3 células	-	-
3b	2 células	2	-	1 célula	-	2 células	2	-
4	4 células	-	-	4 células	-	4 células	-	-
5	2 células	3	-	1 célula	-	2 células	3	-
6	4 células	11	-	1 célula	-	4 células	11	-
7	3 células	24	3, 8 e 10	1 célula	-	3 células	14	3, 8 e 10

Tabela 3 : Resultados Obtidos

5. CONCLUSÃO

A revisão bibliográfica realizada neste artigo mostra o interesse pelo desenvolvimento de algoritmos para a resolução do problema do projeto de células de manufatura.

Os resultados obtidos com a implementação em linguagem C da heurística proposta em microcomputador mostram que o processamento das duas etapas da heurística pode

produzir bons resultados:

- Exemplo 2 – o mesmo número de células com 2 movimentos inter-células a menos.
- Exemplo 7 – o mesmo número de células com 10 movimentos inter-células a menos.
- Para os exemplos 3a, 3b, 4, 5 e 6 obteve-se soluções equivalentes quanto ao número de células e número de movimentos inter-células sem recorrer ao expediente de duplicação de máquinas.
- Para os exemplos 1a e 1b, obteve-se a mesma solução.

Isso é positivo, pois a duplicação de máquinas exigida no processamento da Etapa 1 pode ser indesejável do ponto de vista prático, tendo em vista o custo das mesmas ou as complicações decorrentes de arranjo físico.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Adil, G.K., Ghosh, J. B., Forming GT cells incrementally using GRASP, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(11-12), pp. 1402-1408, 2005
2. Albadawi, Z., Bashir, H. A., Chen, M., A mathematical approach for the formation of manufacturing cells, *Computers & Industrial Engineering*, 48(1), pp. 3-21, 2005
3. Arruda, S. P. E., Vila Fo., E. G., Levantamento do Estágio Atual de Implementação da TG no Estado de São Paulo, XV ENEGEP, pp. 1559-1562, 1994.
4. Ballakur, A., Steudel, H. J., A within-cell utilization based heuristic for designing cellular manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, 25(5), pp. 639-665, 1987.
5. Baykasoclu, A., Capability-based distributed layout approach for virtual manufacturing cells, *International Journal of Production Research*, 41(11), pp. 2597-2618, 2003
6. Boulif, M., Atif, K., A new branch-&-bound-enhanced genetic algorithm for the manufacturing cell formation problem, *Computers & Operations Research*, 33(8), pp. 2219-2245, 2006
7. Brenan, R. W., Norrie, D. H., Metrics for evaluating distributed manufacturing control systems, *Computers in Industry*, 51(2), pp. 225-235, 2003
8. Burbidge, J.L., *The Introduction of Group Technology*, John Wiley, 1975
9. Cao, D., Chen, M., A robust cell formation approach for varying product demands, *International Journal of Production Research*, 43(8), pp. 1587-1605, 2005
10. 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*, 64, (1-3), pp. 279-284, 2000
11. Chen, C. Y., Irani, S. A., Cluster first-sequence last heuristics for generating block diagonal forms for a machine-part matrix, *International Journal of Production Research*, 31(11), pp. 2623-2647, 1993
12. Chu, C.H., Hayya, J.C, 1991, A fuzzy clustering approach to manufacturing cell formation, *International Industrial Engineering Conference*, Orlando FL USA, pp. 495-500, 1991
13. Diallo, M., Pierreval, H., Quilliot, A., Manufacturing cells design with flexible routing capability in presence of unreliable machines, *International Journal of Production Economics*, 74(1-3), pp. 175-182, 2001
14. 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*, 39(1), pp. 1-19, 2001
15. Ferreira, M. S., Resende, M. O., Um Exame à Prática do Controle de Produção em Células de Manufatura, XV ENEGEP, pp. 1579-1583, 1995.

16. Foulds, L. R., French, A. P., Wilson, J. M., The sustainable cell formation problem: manufacturing cell creation with machine modification costs, *Computers & Operations Research*, 33(4), pp. 1010-1032, 2006
17. Garcia, H., Mutel, B., Proth, J. M., Familles de produits et îlots de fabrication: le cas de machines multiples. - Rapport de Recherche INRIA 469, França, 1985.
18. Gonçalves, J. F., Resende, M. G. C., An evolutionary algorithm for manufacturing cell formation, *Computers & Industrial Engineering*, 47(2-3), November 2004, pp. 247-273, 2004
19. Gonçalves Fo., E. V., Tiberti, A. J., A group genetic algorithm for the machine cell formation problem, *International Journal of Production Economics*, 102(1), pp. 1-21, 2006
20. Guerrero, F., Manufacturing cell formation using a new self-organizing neural network, *Computers & Industrial Engineering*, 42(2-4), pp. 377-382, 2002
21. Hales, H. L., Andersen, B. J., Fillmore, W. E., *Work Cell Design*, McGraw-Hill, 2004
22. Harhalakis, G., Nagi, R., Proth, J. M., An efficient heuristic in manufacturing cell formation for Group Technology applications, *International Journal of Production Research*, 28(7), pp. 1247-1269, 1990
23. Hicks, C., A genetic algorithm tool for designing manufacturing facilities in the capital goods industry, *International Journal of Production Economics*, 90(2), pp. 199-211, 2004
24. Hyer, N. L., Wemmerlöw, U., GT in US Manufacturing Industry, *International Journal of Production Research*, 27(8) pp. 1287-1304, 1989
25. Jeon, G., Leep, H. R., Forming part families by using genetic algorithm and designing machine cells under demand changes, *Computers & Operations Research*, 33(1), pp. 263-283, 2006
26. Kamrani, A. K., *Group Technology Fundamentals and Manufacturing Applications*, McGraw-Hill, 2004.
27. Lozano, S., Canca, D., Guerrero, F., Garcia, J. M., Machine grouping using sequence-based similarity coefficients and neural networks, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 17(5), pp. 399-404, 2001
28. Luis, C., Blanco, J., Sebastian, M., Methodology for the design and control of flexible manufacturing cells, *International Journal of Computer Applications in Technology*, 24(2), pp. 68-74, 2005
29. 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*, XV IFORS, Pequim, China, CD-ROM, 1999
30. Rajagopalan, A., Fonseca, D. J., Volume sensitivity analysis for manufacturing cells: A genetic algorithm approach, *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 4(2), pp. 167-183, 2005
31. Panchalavarapu, P. R., Chankong, V., Design of cellular manufacturing systems with assembly considerations, *Computers & Industrial Engineering*, 48(3), pp. 449-469, 2005
32. Pashkevich, A., Kazheunikau, M., Neural network approach to trajectory synthesis for robotic manipulators, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 16(2), pp. 173-187, 2005
33. Qattan, I., Designing flexible manufacturing cells using a branch-and-bound method, *International Journal of Production Research*, 28(2), pp. 325-336, 1990
34. Ribeiro, J. F. F., Pradin, B., A Methodology for Cellular Manufacturing Design, *International Journal of Production Research*, 31(1), pp. 235-250, 1993
35. Ribeiro, J. F. F., Meguelati, S., Organização de um Sistema de Produção em Células de Fabricação, *Revista Gestão e Produção*, 9, 1, pp. 62-77, 2002
36. Ribeiro, J. F. F., Selection and Assignment of Machines : a Parallel Approach, *Journal of Computing and Information Technology*, 11(4), pp. 263-270, 2003
37. Ribeiro, J. F. F., Barbosa, G., *Cells Manufacturing by Metaheuristics*, III COBEF, Joinville, SC, CD-ROM, 2005

38. Ribeiro, J. F. F., Azevedo, E. M., Um Método e um Programa de Coloração em Grafos para o Projeto de Células de Manufatura, XXVIII CNMAC, São Paulo, SP, CD-ROM, 2005
39. 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*, 78(3), pp. 223-237, 2002
40. Slomp, J., Chowdary, B. V., Suresh, N., Design of virtual manufacturing cells: a mathematical programming approach, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 21(3), pp. 273-288, 2005
41. Solimanpur, M., Vrat, P., Shankar, R., A multi-objective genetic algorithm approach to the design of cellular manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, 42(7), pp. 1419-1441, 2004
42. Spiliopoulos, K., Sofianopoulou, S., Designing manufacturing cells: a staged approach and a tabu search algorithm, *International Journal of Production Research*, 41(11), pp. 2531-2546, pp. 2531-2546, 2003
43. Srinivasan, G. & Naredan, T. T. & Mahavedan, B., An assignment model for the part-families problem in Group Technology, *International Journal of Production Research*, 28(1) pp. 145-152, 1990
44. 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*, 55(3-4), pp. 346-358, 2006
45. 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*, 16(2), pp. 189-205, 2005
46. Won, Y., Two-Phase Approach to GT Cell formation Using Efficient p-Median Formulations, *International Journal of Production Research*, 38(7), pp. 1601-1613, 2000
47. Xambre, A. R., Vilarinho, P. M., A simulated annealing approach for manufacturing cell formation with multiple identical machines, *European Journal of Operational Research*, 151(2), pp. 434-446, 2003.
48. Yin, Y., Yasuda, K., Hu, L., Formation of manufacturing cells based on material flows, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27(1-2), pp. 159-165, 2005
49. Zhao, C., Wu, Z., A Genetic Algorithm for Manufacturing Cell formation with Multiple routes and Multiples Objectives, *International Journal of Production Research*, 38(2), pp. 385-395, 2000