DESENHO DE CÉLULAS DE MANUFATURA MINIMIZANDO OS MOVIMENTOS INTER-CELULARES E CONSIDERANDO A SEQUÊNCIA TECNOLÓGICA DE PRODUÇÃO

Juliano Silva
juliano_ufmg@yahoo.com.br

Ricardo Saraiva de Camargo
rcamargo@dep.ufmg.br

Gilberto de Miranda Júnior
miranda@dep.ufmg.br

Departamento de Engenharia de Produção
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte – MG – Brasil

RESUMO

O mercado tem imposto severas condições para a sobrevivência das empresas em um cenário altamente competitivo, demandando produtos com grande variedade de modelos em tempos cada vez menores. Essa condição exige uma rápida adequação dos meios produtivos às especificações do próximo modelo a ser produzido. Os tradicionais sistemas de produção não são capazes de atender de forma eficiente a esse mercado. Para suprir as necessidades do mercado globalizado, o sistema de manufatura celular tem-se destacado frente aos tradicionais sistemas de produção. Uma nova abordagem de *layout* que vem sendo estudado é o distribuído que basicamente desagrega grandes departamentos e os distribui estrategicamente em todo chão de fábrica. O objetivo deste artigo é propor um modelo que considera os conceitos utilizados na formação de um *layout* distribuído e considerando ainda alguns aspectos importantes para as empresas de manufatura.
Palavra-chave: Layout distribuído, otimização, restrição de capacidade.Área (PO na Indústria)

ABSTRACT

The market has imposed stringent conditions for the survival of businesses in a setting highly competitive, demanding products with a variety of models to time ever minors. This condition requires rapid adaptation of production resources to the specifications of next model to be produced. Traditional production systems are not able to attend effectively to that market. To meet the needs of the globalized market system cellular manufacturing has been remarkable compared to the traditional production systems. A new layout approach that has been studied is the distributed layout which basically breaks down large departments and strategically distributed throughout the factory floor. The aim of this paper is to propose a model that considers the concepts used in the formation of a distributed layout and considering some important aspects for manufacturing companies.
Key-words: Distributed layout, optimization, capacity constraint.Main area (PO Inudstry)

1. Introdução

O ambiente empresarial está submetido a constantes mudanças, principalmente após a crescente globalização dos mercados. Sistemas tradicionais de produção supriram de forma eficiente a um mercado cujos produtos possuíam características diferenciadas e longos ciclos de vida. Para atender de forma eficiente a esse mercado, as empresas de manufatura ou adotavam a linha de montagem *(assembling line)* para produtos com alta demanda ou *job shop* para produtos com baixa.

Na linha de montagem, as máquinas são dispostas no chão-de-fábrica de acordo com a sequência tecnológica dos produtos. Com isso obtém-se alta produtividade usando-se grandes lotes. Porém, a planta não é capaz de atender agilmente a entrada de novos produtos com baixo investimento. Para atendê-los, as máquinas deverão ser re-alocadas para obter uma alta produtividade.

Em sistemas de produção do tipo *job shop* as máquinas são agrupadas de acordo com o tipo de operação sendo capazes de produzir uma grande variedade de produtos em pequenas quantidades. Segundo Askin e Standridge (1993) 95% do tempo é não produtivo, o produto fica a maior parte do tempo parado na fila aguardando o momento para ser processado e somente 5% do tempo restante é ainda dividido entre tempo de preparação da máquina e sua produção propriamente.

Com a globalização dos mercados, as indústrias de manufatura foram desafiadas a melhorar a eficiência e a produtividade de seus processos fabris. A diminuição do ciclo de vida dos produtos juntamente com a tendência de demandas de médio volume têm exigido das empresas uma rápida resposta frente às mudanças de produtos sem a necessidade de grandes investimentos.

Os sitemas tradicionais de produção do tipo *job shop* e linha de montagem não podem responder de forma eficiente a um mercado que exige uma flexibilidade na produção com alta produtividade. Uma alternativa que vem se destacando como sistema no auxílio das empresas é a manufatura celular (MC), cuja metodologia é formar famílias de peças baseado na similaridade do processo produtivo e agrupar máquinas dentro de células. O agrupamento das peças é feito considerando similaridades ou pela forma geométrica e tamanho ou pelo processo produtivo (Groover, 1987).

A MC é um sistema híbrido que possui as vantagens dos dois sistemas tradicionais, *job-shop* (flexibilidade de produção para uma grande variedade de produtos) e linha de montagem (fluxo eficiente e alta taxa de produção). Os principais benefícios observados pelo emprego da MC são: redução dos tempos de preparação de máquina, redução dos estoques em processos (WIP - *work-in-process*), redução dos custos diretos de mão-de-obra, melhoria da qualidade, simplificação dos tempos de movimentação de materiais, racionalização dos espaços utilizados, aumento da utilização dos equipamentos, redução de lotes e um melhor controle sobre o chão-de-fábrica.

A elaboração de um sistema de manufatura celular (SMC) não é uma tarefa simples. Segundo Chen e Heragu (1999) os três passos principais no projeto de uma manufatura celular são: *(i)* formação das células e das famílias, responsável por identificar as famílias de peças de acordo com seus processos; *(ii) layout* das células, responsável pela disposição das células no chão-de-fábrica; *(iii) layout* das máquinas, máquinas são agrupadas dentro das células. Essas etapas, normalmente são realizadas de forma separada e hierárquica.

Porém, há um consenso de que as configurações de *layout* existentes não satisfazem as necessidades das empresas de manufatura e que há uma necessidade de novas gerações de configuração de *layout* que são mais flexíveis, modulares e de fácil reconfiguração, (Benjaafar et al., 2002).

Uma das novas gerações de configuração é o *layout* distribuído que desagrega grandes departamentos e os distribui estrategicamente em todo chão de fábrica. As máquinas do mesmo tipo não são alocadas adjacentemente uma das outras. Os equipamentos ou são alocados em grupos (*layout* parcialmente distribuído) ou são alocados individualmente em todo chão de fábrica, assumindo uma máxima distribuição de *layout*. Com essa configuração, a empresa é capaz de reagir

eficientemente contra futuras flutuações de demandas e produzir produtos com pequenos ciclos de vida sem a necessidade de reconfigurar o *layout*. Isso é possível pois a empresa poderá formar células virtuais, que consiste em formar células temporárias, agrupando determinadas máquinas que irão processar uma específica ordem. Uma vez processada, essa célula poderá deixar de existir disponibilizando aquelas máquinas para outras futuras ordens a serem processadas.

Muitos desafios ainda persistem no desenho de um leiute distribuído. Benjaafar et al. (2002) destaca a necessidade de um modelo integrado que combina duplicação de departamento, atribuição de capacidade com desenho de *layout* e alocação de fluxo.

O presente trabalho responde a esse desafio considerando ainda a sequência tecnológica dos produtos e outros aspectos importantes para empresas de manufatura. Suas definições e formulação são mostrados na seção 3. Na seção 2 é apresentado um exame da literatura. Os resultados computacionais e os comentários finais são mostrados nas seções 4 e 5 respectivamente.

2. Exame da literatura

Desde o início da implantação de sistemas de manufatura celular, vários autores têm desenvolvido e aperfeiçoado métodos que auxiliam na resolução do problema de formação de células. Selim et al. (1998) categorizaram os cinco principais métodos: procedimentos descritivos (identificação de famílias de peças, identificação de grupo de máquinas, família de peças/grupo de máquinas), técnicas de clusterização, particionamento de grafos, programação matemática (linear, programação quadrática inteira, programação por metas e dinâmica) e inteligência artificial. A programação matemática tem sido extensivamente usada para modelar problemas de sistema de manufatura celular, pois permite agregar questões práticas de grande importância ao modelo como demanda das peças, capacidade das máquinas, sequência tecnológica, distância de movimentação entre células, rotas alternativas de produção, entre outros (Kioon et al., 2009).

Alguns autores têm se destacado ao considerar aspectos críticos no desenho da MC. Heragu e Chen (1998) consideraram em seu modelo um limite máximo e mínimo de máquinas dentro das células, custo de não utilização da máquina, rotas alternativas, número máximo de células que deverão ser formadas. O seu modelo também considerou que determinadas máquinas obrigatoriamente deverão ser alocadas na mesma célula e outras não. O custo de movimentação entre células é específico pois cada peça tem o seu dispositivo necessário para a locomoção e não considera a distância a ser percorrida entre células. O modelo inicial é não linear e foi então linearizado acrescentando uma variável e para resolver o problema na otimalidade eles utilizaram a decomposição de Benders.

O modelo proposto por Caux et al. (2000) considera a sequência tecnológica, o tempo padrão de produção, um limite máximo de células, a capacidade de cada máquina e várias rotas alternativas de produção. Para resolver o problema eles utilizaram o algoritmo *simulated annealing* para alocar as máquinas nas células respeitando o limite de máquinas permitidas e o algoritmo *branch-and-bound* garante uma solução ótima na escolha de uma rota para cada peça levando em consideração a capacidade da máquina.

Uddin e Shanker (2002) aloca as peças e as máquinas nas células de forma simultânea, considerando um limite máximo e mínimo de máquinas por célula, a capacidade da máquina e rotas alternativas para cada peça minimizando a movimentação de peças entre células. Uma de suas restrições é não linear e foi linearizada utilizando a regra sugerida por Glover e Woolsey (1973) e o problema foi resolvido utilizando o algoritmo genético.

Já Chen e Cao (2004) consideraram a minimização dos custos de movimentação de peças entre células, custo fixo de *set-up* da célula e da máquina e o custo de estocagem do item. Ainda transformou o problema original de programação inteira-mista em um problema binário e utilizou a busca *tabu* para encontrar a solução do problema reduzido. O modelo mostrou-se eficiente para baixas instâncias, porém torna-se limitado para médio e grandes.

Defersha e Chen (2006) incorporaram vários aspectos a serem considerados no problema de formação de células. Eles consideraram a reconfiguração de células, divisão de lotes, sequência tecnológica, múltiplas máquinas idênticas, capacidade da máquina, custo de operação, terceirização, custo de setup, limite de máquinas nas células e restrições de máquinas adjacentes. O modelo desenvolvido é não linear e foi linearizado através de alguns passos com o objetivo de obter um problema linear inteiro misto.

Nsakanda et al. (2006) consideraram o movimento de peças dentro e entre células, a demanda, a capacidade da máquina, rotas alternativas para cada peça, a sequência tecnológica e a possibilidade de terceirizar a produção. Para resolver o problema, Nsakanda et al. (2006) utilizaram o algoritmo genético com um otimizador local. A saída do modelo resulta na alocação de máquinas nas células, o número de peças que são produzidas utilizando determinada rota ou se a peça será produzida por terceiros e ainda o tamanho de cada célula.

Kioon et al. (2009) apresentaram um dos mais completos modelos considerando vários aspectos importantes como o custo de movimentação dentro e entre células, custo de produção interna, terceirização, custo de estocagem, custo de operação das máquinas, custo de manutenção e re-alocação de máquinas, hora extra, rotas alternativas, sequência tecnológica, divisão de lotes e limite máximo e mínimo de máquinas nas células.

3. Definições e formulação

A formulação usada para desenhar as células virtuais usa as seguintes definições. Sejam os conjuntos P de posições disponíveis no chão de fábrica; M de máquinas e I de produtos. Sejam ainda a demanda w_i de cada produto $i \in I$, o custo de deslocamento d_{pr} no chão de fábrica de qualquer par de posições $p, r \in P (p \neq r)$, C_m a quantidade de cópias disponíveis da máquina $m \in M$, a_m o custo de aquisição de cada cópia da máquina $m \in M$, o custo de instalação h_{mp} de uma dada máquina $m \in M$ em uma posição específica $p \in P$, e a sequência tecnológica das máquinas usadas para cada produto $S_i(j)$ que retorna a máquina $m \in M$ usada pelo produto $i \in I$ na posição $j = 0, \ldots, O_i$ da sequência, onde O_i é o número total de operações do produto $i \in I$ e $j = 0$ representa a operação de retirada de material no almoxarifado. Definem-se ainda duas posições fictícias 0 e n para respresentar o almoxarifado e a doca de expedição de produtos acabados, respectivamente.

O objetivo do modelo é alocar as máquinas às posições do chão de fábrica de forma a minimizar os custos envolvidos. Para tal, definem-se as seguintes variáveis de decisão: a variável $x_{mp} \in \{0, 1\}$ irá assumir o valor igual a 1 quando a máquina $m \in M$ for alocada à posição $p \in P$; 0, caso contrário. A variável $y_{mc} \in \{0, 1\}$ irá assumir o valor igual a 1 se a cópia c da máquina $m \in M$ for adquirida; 0, caso contrário. E a variável $f_{ijpr} \geq 0$ que representa a porcentagem do volume de produção da operação $j = 1, \ldots, O_i$ do produto $i \in I$ deslocado desde a posição $p \in P$ até a posição $r \in P$. A formulação pode ser então dada por:

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j=1}^{O_i} \sum_{p \in P \cup \{0,n\}} \sum_{\substack{r \in P \cup \{n\} \\ r \neq p}} w_i \, d_{pr} \, f_{ijpr} + \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} h_{mp} x_{mp} + \sum_{m \in M} \sum_{c=1}^{C_m} a_m y_{mc} \tag{1}$$

$$\text{s. a:} \sum_{p \in P} f_{i00p} = 1 \qquad \forall\, i \in I \tag{2}$$

$$\sum_{\substack{r \in P \cup \{n\} \\ p \neq r}} f_{ijrp} = \sum_{\substack{r \in (P+1) \\ r \neq p}} f_{i(j+1)pr} \qquad \forall\, i \in I, j = 1, \ldots, (O_i - 1), p \in P \tag{3}$$

$$\sum_{p \in P} f_{iO_i p(P+1)} = 1 \qquad \forall\, i, \tag{4}$$

$$f_{ijpr} \leq x_{t(i,j)p} \qquad \forall\, i, j \in O_i, p \in P, r \in (P+1) : r \neq p \tag{5}$$

$$f_{ijpr} \leq x_{t(i,j+1)r} \qquad \forall\, i, j \in O_{(i-1)}, p, r \in P : r \neq p \tag{6}$$

$$\sum_{m \in M} x_{mp} \leq 1 \qquad \forall\, p, \tag{7}$$

$$\sum_{p \in P} x_{mp} \leq 1 + \sum_{c=1}^{C_m} y_{mc} \qquad \forall\, m, \tag{8}$$

$$y_{m(c+1)} \leq y_{mc} \qquad \forall\, m, c \in C_{m-1} \tag{9}$$

$$x_{mp} \in \{0, 1\} \qquad \forall\, m, p \tag{10}$$

$$y_{mc} \in \{0, 1\} \qquad \forall\, m, c \tag{11}$$

$$f_{ijpr} \geq 0 \qquad \forall\, i, j \in O_i, p, r \in P : r \neq p \tag{12}$$

A função objetivo (1) minimiza o custo de movimentação dos produtos, o custo de aquisição e instalação das máquinas. As restrições (2) informam que a primeira operação de cada produto se inicia a partir do almoxarifado para qualquer uma das posições $p \in P$. As restrições (3) asseguram que a quantidade produzida na operação anterior será a mesma na operação seguinte. As restrições (4) garantem que todo produto será enviado para a doca de expedição n.

As restrições (5) asseguram que a operação $j \in J$ do produto $i \in I$ será processada na posição $p \in P$ somente se a máquina $m \in M$ destinada àquela operação estiver alocada na posição $p \in P$. De forma semelhante, as operações seguintes $j+1 \in J$ serão processadas na posição $r \in P$ com $r \neq p$ somente se a máquina responsável por esta operação estiver instalada na posição $r \in P$, restrições (6).

As restrições (7) asseguram que cada posição $p \in P$ comporta somente uma máquina $m \in M$. As restrições (8) informam o número máximo de cópias disponíveis por máquina. A máquina $m \in M$ somente será duplicada se ela já estiver em uso, restrições (9). As restrições (10) e (11) são de integralidade das variáveis e as restrições (12) são de não negatividade.

3.1. Derivação do modelo

O modelo inicial proposto considera uma capacidade infinita para as máquinas. Porém, essa situação não é comum na realidade. Com o objetivo de adequá-lo, adicionou-se uma restrição limitando a capacidade de cada máquina específica, restrições (13). O modelo então pode ser reescrito da seguinte forma, onde q_m informa a capacidade da máquina $m \in M$.
Eqs. (1) - (12),

$$\sum_{i \in I} \sum_{j=1}^{O_i} \sum_{\substack{r \in P \\ p \neq r}} w_i\, f_{ijpr} \leq q_m \qquad \forall\, m \in M, p \in P \tag{13}$$

4. Resultados Computacionais

Todos os testes foram realizados em um computador *Core 2 Duo* com 2.5 GHz e com 8 GB de memória usando o sistema operacional Linux. Os modelos foram resolvidos através do pacote de otimização *CPLEX* 9.1. Foram utilizadas instâncias próprias, alterando-se a quantidade máquinas disponíveis no intervalo entre 5 a 15 máquinas, o número de posições disponíveis variaram entre 9 a 25 posições e o número de produtos considerados foram de 5 a 15 produtos. A notação utilizada para descrever uma instância do tipo 9 posições, 5 produtos e 5 máquinas é $09s05p05m$. O limite máximo do tempo de processamento determinado foi de 36.000 segundos.

Foram considerados 4 configurações de *layout* (figura 1). O custo de movimentação do produto através do chão de fábrica é específico para cada *layout*.

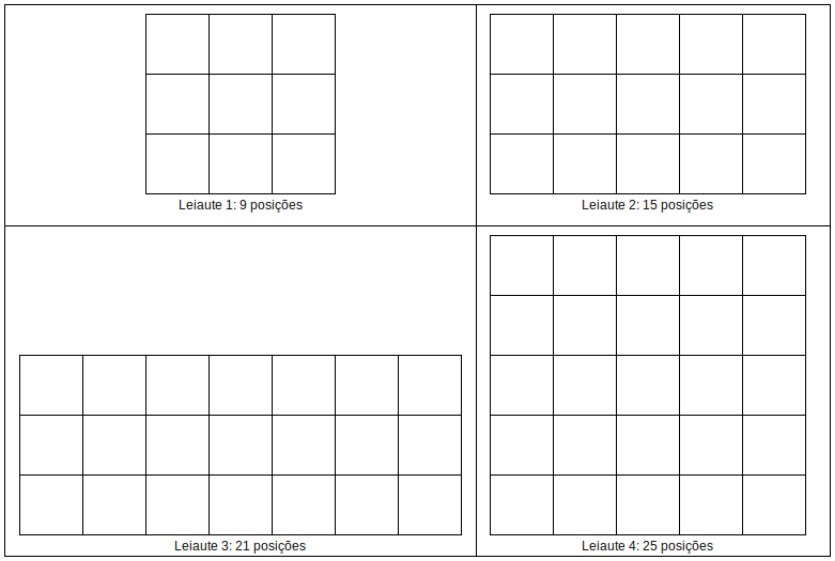

Figura 1: Configurações de *layout* consideradas

Os testes computacionais foram realizados utilizando as variáveis x_{mp} e y_{mc} inteiras e posteriormente relaxadas. Essas variáveis foram relaxadas com o objetivo de verificar os *gaps* da relaxação linear.

A tabela 1 apresenta os resultados computacionais obtidos do modelo sem a restrição de capacidade. Para cada instância, foi gerado a solução do problema inteiro e relaxado.

Tabela 1: Desempenho Computacional

Instância	Solução Relaxação Linear	Solução Inteira	Gap (%)	Tempo (s)	
				Relaxação Linear	Solução Inteira
09s05p05m	774.000,00	773.294,00	0,091	1	1
09s07p05m	1.081.050,00	1.071.000,00	0,930	1	1
15s10p05m	1.354.900,00	1.275.841,07	5,835	1	18
15s15p05m	1.799.120,00	1.665.610,00	7,421	1	70
15s20p10m	3.111.520,00	3.042.586,28	2,215	8	293
21s10p07m	1.703.150,00	1.597.183,21	6,222	4	220
21s15p07m	2.423.130,00	2.227.246,06	8,084	10	1.317
21s20p10m	3.244.160,00	3.210.018,47	1,052	29	936
25s15p10m	10.021.670,00	9.998.750,33	0,229	104	36.000

Verificou-se uma redução significativa no tempo de processamento ao utilizar as variáveis relaxadas.

4.1. Resultado considerando limitação de capacidade

Foi realizado um teste utilizando-se a instância de $15s10p05m$ e o resultado para o produto 5 sem restrição de capacidade é demonstrado na figura 2. O produto foi processado nas máquinas $1, 2, 3$ e 4 nas posições $3, 4, 5$ e 10 respctivamente. Ao considerar as restrições de capacidade das máquinas, o modelo apresentou uma rota alternativa para processar o produto, 92% Rota 1 e 8% Rota 2, (figura 3).

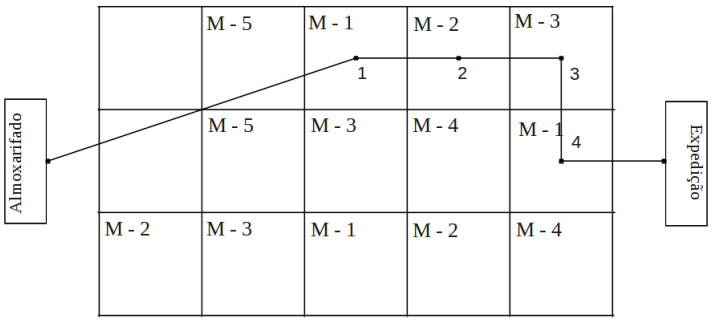

Figura 2: Rota de processamento do produto 5 sem restrição de capacidade

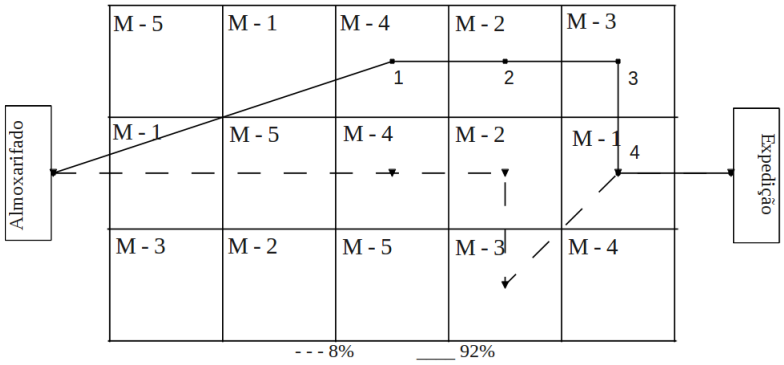

Figura 3: Rota de processamento do produto 5 com restrição de capacidade

Considerando as capacidades das máquinas, verificou-se a necessidade da duplicação de duas máquinas adicionais (Máquina 4 e 5) utilizando a mesma instância, (tabela 2). O tempo de processamento foi significativamente elevado, de 18 para 389 segundos.

Tabela 2: Número de duplicações por máquina

Máquina	Capacidade Ilimitada	Capacidade Limitada
1	2	2
2	2	2
3	2	2
4	1	2
5	1	2
Tempo de processamento (s)	18	389

5. Conclusão

Neste trabalho, foram abordados conceitos de *layout*, em especial o *layout* distribuído. Um modelo de programação linear foi proposto respondendo ao desafio destacado por Benjaafar et al. (2002). A saída do modelo nos informa a quantidade de máquinas que deverão ser duplicadas e onde deverão ser alocadas considerando o custo de instalação e o custo de duplicação. Outros aspectos importantes considerados foram a sequência tecnológica dos produtos e a restrição de capacidade das máquinas.

Ao levar em conta os limites de capacidade das máquinas, o tempo de processamento teve um aumento significativo, (de 18 para 389 segundos). Os autores já estão pesquisando métodos para que o modelo seja capaz de resolver problemas com grandes instâncias considerando as restrições de capacidade.

Referências

Askin, R. e Standridge, C. (1993). Modeling and analysis of manufacturing systems. *John Wiley and Sons*.

Benjaafar, S.; Heragu, S. S. e Irani, S. A. (2002). Next generation factory layouts: Research challenges and recent progress. *Interfaces*, 32(6):58–76.

Caux, C.; Bruniaux, R. e Pierreval, H. (2000). Cell formation with alternative process plans and machine capacity constraints. a new combined approach. *International Journal of Production Economics*, 64:279–284.

Chen, J. e Heragu, S. S. (1999). Stepwise decomposition approaches for large scale cell formation problems. *European Journal of Operational Research*, 113:64–79.

Chen, M. e Cao, D. (2004). Coordinating production planning in cellular manufacturing environment using tabu search. *Computers & Industrial Engineering*, 46(3):571–588.

Defersha, F. e Chen, M. (2006). A comprehensive mathematical model for the design of cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, 103:767–783.

Glover, F. e Woolsey, E. (1973). Further reduction of zero-one polynomial programming problems to zero-one linear programming problems. *Operations Research*, 21:156–161.

Groover, M. (1987). Automation, production systems, and computer integrated manufacturing. *Prentice Hall, Englewood, NJ*.

Heragu, S. S. e Chen, J.-S. (1998). Optimal solution of cellular manufacturing system design: Benders decomposition approach. *European Journal of Operational Research*, 107:175–192.

Kioon, S. A.; Bulgak, A. A. e Bektas, T. (2009). Integrated cellular manufacturing systems design with production planning and dynamic system reconfiguration. *European Journal of Operational Research*, 192:414–428.

Nsakanda, A. L.; Diaby, M. e Price, W. L. (2006). Hybrid genetic approach for solving large-scale capacitated cell formation problems with multiple routings. *European Journal of Operational Research*, 171:1051–1070.

Selim, H. M.; Askin, R. G. e Vakharia, A. J. (1998). Cell formation in group technology: Review, evaluation and directions for future research. *Computers and Industrial Engineering*, 34(1):3–20.

Uddin, M. e Shanker, K. (2002). Grouping of parts and machines in presence of alternative process routes by genetic algorithm. *Int.J. Production Economics*, 76:219–228.