



ORGANIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO EM CÉLULAS DE FABRICAÇÃO

José Francisco Ferreira Ribeiro

USP – Universidade de São Paulo
Av. Dr. Carlos Botelho, 1465 – Caixa Postal 668 – 13560-970
São Carlos – SP

Smaïne Meguelati

LAAS – Laboratoire d'Architecture et d'Analyse des Systèmes
7, Avenue du Colonel Roche – 31077
Toulouse – França

Resumo

A bloco-diagonalização da matriz de incidência peças-máquinas para efetuar o projeto de células de fabricação é uma etapa importante para a implementação da Tecnologia de Grupo. Este artigo propõe um método de bloco-diagonalização baseado em classificação cruzada de peças e tipos de máquinas com progressiva atribuição dos tipos de máquinas às famílias de peças. Exemplos que permitem teste e comparação do método proposto com outros métodos existentes são apresentados. Os resultados obtidos de exemplos extraídos da literatura são equivalentes ou melhores do que aqueles disponíveis, em termos do número de movimentos intercélulas e das dimensões das células projetadas.

Palavras-chave: tecnologia de grupo, células de fabricação, métodos de classificação.

1. Introdução

O aumento de produtividade no setor industrial tem sido objeto de preocupação para os responsáveis pela produção, em razão de um contexto industrial caracterizado por uma concorrência cada vez mais forte. Os métodos

baseados no conceito de Tecnologia de Grupo (BURBIDGE, 1975) constituem uma resposta eficiente para o setor metal-mecânico destinado à produção em lotes pequenos e médios. Este conceito repousa sobre o agrupamento de peças similares em famílias com o objetivo de fabricá-las em células ou ilhas que reúnem máquinas

Tabela 1 – Estrutura bloco-diagonal

	M1	M4	M7	M2	M8	M3	M5	M6
P2	2	5	4					
P5	3	1			3			
P3				4	5			
P6				6	3			
P1						2	7	3
P4		3				5	4	1

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.

Um sistema de produção é composto de um grande número de etapas que, individual ou coletivamente, interferem na produtividade de todo o sistema. A etapa de fabricação tem uma importância particular: com efeito, 5% do tempo destinado à execução de uma peça é ocupado em operações de máquina e os 95% restantes são gastos em movimentação e filas de espera. Destes 95%, apenas 30% são reservados à usinagem propriamente dita, uma vez que a preparação das máquinas e outras tarefas consomem a maior parte do tempo (DOUMEINGTS, 1984).

Em um sistema de produção organizado em células de fabricação, 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 (MAHMOODI *et al.*, 1990).

O projeto das células de fabricação, entretanto, exige a resolução de um problema matemático bastante complexo (KUSIAK, 1987). Dada a matriz de incidência na forma [peças x máquinas] ou [peças x tipos de máquinas], em que 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, é necessário rearranjar as linhas e as colunas desta matriz, de modo a dar-lhe uma estrutura bloco-diagonal. A Tabela 1 mostra uma matriz de incidência [peças x máquinas] depois da bloco-diagonalização. Nesta tabela, os valores dos elementos representam o tempo gasto na operação executada sobre a peça *i* na máquina *j*. Os elementos concentrados dentro dos blocos diagonais integram as células de fabricação. Os elementos que se situam fora dos blocos diagonais são chamados de movimentos intercélulas e, na prática, são indesejáveis. Por isto, no momento de projetar as células de fabricação, procura-se minimizar o número de movimentos intercélulas, 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 (SINGH, 1993) para efetuar a bloco-diagonalização da matriz de incidência, projetar as células de fabricação e implantar a Tecnologia de Grupo na fábrica. Entre elas, podemos citar a programação matemática: SHAFER *et al.* (1992), *branch and bound*: QATTANI (1990), *lógica fuzzy*: XU & WANG (1989) e CHU & HAYYA (1991), algoritmos genéticos: VENUGOPAL & NARENDRAN (1992), redes neurais: KUSIAK & CHUNG (1991), LEE & MALAVE (1992), MOON & CHI (1992), e metaheurísticas como *busca tabu* e *simulated annealing*: VENUGOPAL & NARENDRAN (1992).

Neste artigo, é proposto um método baseado na técnica de classificação cruzada (DIDAY, 1982) para auxiliar a formação das famílias de peças e dos grupos de máquinas que constituem as células de fabricação. O programa correspondente ao algoritmo desenvolvido foi escrito em linguagem C e está instalado em microcomputador. Os resultados obtidos mostram a eficiência do método e encorajam a continuidade da pesquisa nesta direção.

2. Definições e Notações

Considera-se sistema de produção aquele que é capaz de fabricar n peças diferentes com o auxílio de um parque de máquinas composto de m tipos de máquinas diferentes, cada um dos tipos reunindo máquinas similares que se diferenciam somente em termos de desempenho.

O conjunto das k_j máquinas que compõem o tipo j é dado por $\{M_j^1, \dots, M_j^{k_j}\}$.

A relação de velocidade de fabricação entre a máquina de referência deste conjunto e as outras máquinas disponíveis é designada por ω_j^k ($\omega_j^k \geq 1$).

Para cada peça i , é conhecida a quantidade μ_i para fabricar durante um período de trabalho suficientemente longo τ e o roteiro de fabricação G_i , que fornece a lista ordenada das $q(i)$ operações necessárias para a conclusão da peça.

Para cada operação k , G_i estabelece o tipo de máquina j empregado e a duração da operação $\theta(i, k)$, i.e., o tempo necessário para concluir a operação na máquina de referência dentro do tipo.

Faz-se uso de uma taxa mínima de produtividade x_j^k para cada máquina M_j^k , exprimindo a porcentagem do período de trabalho durante o qual a máquina deve ser utilizada para ser considerada rentável.

A produção é realizada em lotes, i.e., todas as peças que compõem um lote devem sofrer a operação em uma certa máquina antes de serem transferidas para a máquina seguinte. Procura-se uma organização das peças em famílias e das máquinas em células, de modo que:

- 1) o número de famílias e de células sejam iguais a p , fixado previamente;
- 2) uma e uma única família de peças corresponda a cada ilha e vice-versa; e
- 3) a organização obtida maximize um critério relativo ao tempo de trabalho sobre o conjunto de peças em sua ilha de atribuição.

3. Tabela de Dados

Os dados brutos coletados na fábrica são reunidos em uma tabela constituída pelo conjunto dos n roteiros de fabricação. Esta tabela é composta de n linhas cujo comprimento varia em função do número de operações que formam os roteiros.

O tratamento computacional desta tabela apresenta algumas dificuldades. Isto conduziu a operar uma transformação desta tabela que a tornasse mais adequada às análises posteriores.

Então, uma Tabela T é construída, composta de n linhas (peças) e de m colunas (tipos de máquinas), cujo termo geral $T(i, j)$ depende de um coeficiente $\alpha = 0/1$.

Quando $\alpha = 1$, $T(i, j) =$ soma da duração das operações relativas ao tipo de máquina j presente no roteiro da peça i ; senão, $T(i, j) =$ número de utilizações deste tipo de máquina, ou seja: $T(i, j) = \sum \{\theta(i, k)^\alpha \mid \text{tipo de máquina utilizada} = j\}$, $k = 1$ a $q(i)$.

O caso para o qual $\alpha = 0$ é o mais interessante, uma vez que, entre os objetivos do projeto das células, a minimização do número de movimentos intercélulas é, sem dúvida, o mais importante. O gerenciamento da transferência de uma peça de uma ilha para outra é tarefa complexa e inconveniente.

- *Exemplo:* Seja a peça i e o seu roteiro de fabricação fornecidos na Tabela 2.

O tipo de máquina 2 aparece duas vezes no roteiro. Assim, o $T(i, 2) = 28$ quando $\alpha = 1$, e $T(i, 2) = 2$ quando $\alpha = 0$.

Tabela 2 – Produto e roteiro

Operações	1	2	3	4	5
Roteiro	4	2	1	7	2
Durações	10	8	12	15	20

4. Princípio Geral do Método

O método utiliza um procedimento iterativo de classificação cruzada de famílias de peças às quais estão associadas famílias de tipos de máquinas, sem estarem estabelecidos o número e a natureza das máquinas necessárias à fabricação das peças. As células de máquinas correspondentes serão constituídas a seguir através de uma atribuição que leva em conta as relações de velocidade das máquinas e as taxas de rendimento.

Procura-se, em uma primeira fase, uma partição de peças X e um recobrimento de tipos de máquinas Y (um recobrimento é uma partição de um conjunto em subconjuntos não disjuntos): $X = \{X_1, X_2, \dots, X_p\}$ e $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_p\}$, de tal modo que à família X_r corresponde o subconjunto Y_r . A partição obtida deve maximizar o seguinte critério: $C = \sum \{\mu_i T(i, j)\}$, $(i, j) \in [X_r, Y_r]$, $r = 1$ a p .

Um mesmo tipo de máquina pode estar associado a diferentes famílias quando existe mais de uma máquina disponível dentro do tipo. A presença de um tipo de máquina no subconjunto Y_r significa que será atribuída uma ou várias máquinas deste tipo à família de peças X_r correspondente.

Para um valor de p fixado, a solução obtida corresponde à repartição em famílias de peças que maximiza, segundo o valor de α escolhido, o volume de trabalho ou o número de operações em relação aos tipos de máquinas associadas a estas famílias.

Em seguida, busca-se, a partir dos resultados precedentes, uma partição das máquinas: $A = \{A_1, A_2, \dots, A_p\}$ de tal modo que à ilha A_r corresponde a família de peças X_r . Nesta fase, utiliza-se como critério a maximização da utilização das máquinas.

4.1 Descrição do Procedimento

O procedimento é composto das seguintes etapas:

- 1^a) Obtenção de uma partição inicial das peças $X^{(0)}$;
- 2^a) Classificação cruzada para gerar o par (X, Y) ; e
- 3^a) Projeto das células de fabricação (obtenção de A).

4.1.1 Partição Inicial das Peças

Esta etapa tem por objetivo a inicialização da classificação cruzada por uma partição conveniente do conjunto de peças. O algoritmo escolhido para gerar a partição é o algoritmo das “nuvens dinâmicas” (DIDAY, 1982). As peças são reunidas segundo um critério relativo aos seus roteiros de fabricação. A medida da similaridade entre duas peças é feita pela comparação entre as linhas da Tabela T , aplicando-se a distância “ROC” (KING & NAKORNCHAI, 1982).

A partição inicial $X^{(0)}$ é obtida pelo seguinte procedimento: 1) uma peça é escolhida aleatoriamente e calcula-se a sua densidade, ou seja, o número de peças cuja distância em relação à peça escolhida seja inferior ou igual a um raio R fixado; 2) escolhe-se outra peça aleatoriamente, entre aquelas cuja distância da primeira peça escolhida seja superior a um raio D fixado ($D > R$) e calcula-se a sua densidade. Este procedimento prossegue até o esgotamento das peças. As peças escolhidas são classificadas em ordem decrescente de suas densidades e retêm-se as p primeiras peças para inicialização do método das “nuvens dinâmicas”.

4.1.2 Classificação Cruzada

O objetivo desta classificação é a obtenção de uma partição das peças X e dos subconjuntos de tipos de máquinas Y . Seja $X^{(0)}$ a partição de peças obtidas na etapa de inicialização. O algoritmo consiste em determinar de maneira iterativa a seqüência:

$$\begin{array}{ccccccc} X^{(0)} & \rightarrow & Y^{(1)} & \rightarrow & X^{(1)} & \rightarrow & Y^{(2)} & \rightarrow & \dots \\ & & & & \rightarrow & X^{(k)} & \rightarrow & Y^{(k+1)} & \end{array}$$

A cada iteração k são construídos sucessivamente um recobrimento $Y^{(k)}$ de tipos de máquinas e uma partição $X^{(k)}$ de peças. As partições de peças $X^{(k)}$ levam em conta todas as peças para qualquer k , enquanto que os tipos de máquinas vão sendo introduzidos progressivamente ao longo do processo iterativo.

Esta atribuição progressiva é feita em função de dois parâmetros escolhidos pelo usuário no início do procedimento: 1) $N_j^{(1)}$ = número de atribuições a efetuar para o tipo de máquina j no início do processo de classificação. Este número deve ser superior ou igual a 1, para todos os tipos de máquina considerados; 2) Nat = número de atribuições suplementares a efetuar ao longo de cada iteração. A atribuição de um tipo de máquina para a constituição de $Y^{(k)}$ significa que uma ou várias máquinas dentro do tipo em questão pertencerão ao grupo.

- *Constituição de um recobrimento $Y^{(k)}$ de tipos de máquinas*

Os tipos de máquinas são atribuídos às famílias $X^{(k-1)}$ segundo o seguinte procedimento: Primeiro, determinam-se as famílias de peças suscetíveis de receber um tipo de máquina j : são aquelas para as quais a demanda relativa deste tipo de máquina é superior a um valor fixado previamente pelo usuário. Este valor, chamado de carga de admissão na ilha (CI), assegura uma carga de trabalho mínima às máquinas atribuídas a estas famílias de peças. A determinação de CI_j será explicada posterior-

mente. O número N_j de famílias de peças que podem receber um tipo de máquina j é limitado pelo número total de máquinas k_j disponíveis. Portanto, $N_j \leq k_j$.

O procedimento consiste, então, em obter os Nat pares [famílias de peças x tipos de máquinas] que se traduzem pelas demandas mais elevadas (em carga de trabalho ou em número de operações, segundo o valor de α) e que satisfazem a condição sobre CI. A cada uma das famílias obtidas é, então, atribuído um ou mais tipos de máquinas correspondentes. Em caso de igualdade de demanda, escolhe-se a família para a qual a quantidade de trabalho já atribuída seja menor. Quando as Nat atribuições, se elas existem, tiverem sido efetuadas, tem-se p subconjuntos de tipos de máquinas: $Y^{(k)} = \{Y_1^{(k)}, \dots, Y_p^{(k)}\}$.

- *Constituição de uma partição $X^{(k)}$ de famílias de peças*

Uma nova partição $X^{(k)}$ é obtida pela reatribuição das peças aos subconjuntos de tipos de máquinas, segundo o seguinte procedimento: as peças são examinadas segundo uma ordem qualquer. Procura-se o subconjunto para o qual o tratamento da peça i se traduz por uma carga máxima. Atribui-se, então, a peça i a este subconjunto. Esta classificação cruzada tem prosseguimento até a obtenção de um valor constante do critério C . A atribuição progressiva dos tipos de máquinas adotada justifica-se pelo fato de que as constituições de $X^{(k)}$ e de $Y^{(k)}$ estarem estreitamente relacionadas. Uma atribuição total dos tipos de máquinas a cada iteração tende frequentemente a aumentar o número de máquinas atribuídas às células e pode levar a uma dispersão das peças, enquanto que uma atribuição progressiva ($Nat = 1$, por exemplo) permite a minimização deste número pela análise a cada iteração da nova repartição de peças pelas células, assegurando, assim, um melhor reagrupamento de peças. Um aumento no valor de Nat serve para acelerar o processo de convergência do algoritmo.

5. Escolha das Máquinas

Os tipos de máquinas são examinados em uma ordem qualquer. As máquinas correspondentes ao tipo j são escolhidas pelo seguinte procedimento: sejam r_1, r_2, \dots, r_{Nj} as famílias de peças que foram atribuídas a um tipo de máquina j , e $a_{r_1}, a_{r_2}, \dots, a_{r_{Nj}}$ as cargas induzidas pelas peças pertencentes a estas famílias relativamente ao tipo j . Tem-se: $a_{r_1} = \sum\{\mu_i \cdot T(i, j)\}$, $i \in X_{r_1}, 1 = 1$ a Nj , com $\alpha = 1$. Com o objetivo de considerar as cargas das $(p-Nj)$ famílias que não receberam atribuição do tipo de máquina j , faz-se uma repartição, de maneira proporcional, das tarefas (tarefa $_j$) a executar sobre as peças pertencentes a estas famílias dentro das famílias que receberam uma atribuição. As novas cargas podem, então, ser calculadas da seguinte forma: $a'_{r_1} = a_{r_1} + (tarefa_j - \sum a_{r_1}) \cdot a_{r_1} / \sum a_{r_1}$, com $tarefa_j = \sum\{\mu_i \cdot T(i, j)\}$, $i = 1$ a n , com $\alpha = 1$.

O procedimento para a escolha das máquinas e de sua repartição às células consiste em explorar todas as possibilidades oferecidas pelo conjunto $\{M_j^1, \dots, M_j^{kj}\}$ de máquinas disponíveis e em decidir pelo grupo de máquinas e pela repartição que levam a uma taxa de utilização mais elevada.

Seja $G = \{g_1, g_2, \dots, g_{Nj}\}$ um grupo de Nj combinações de máquinas tal que $C(G) \geq tarefa_j$, onde $C(j) =$ capacidade total do grupo de máquinas.

Define-se a capacidade de uma máquina como a carga máxima de trabalho que esta máquina pode realizar ao longo do período de trabalho τ . As durações das operações são fornecidas em relação às máquinas de referência dentro do tipo e , assim, a capacidade de uma máquina será igual à sua relação de velocidade multiplicada pelo período τ .

Escolhe-se o grupo $G^* = \{g_1^*, g_2^*, \dots, g_{Nj}^*\}$ que possui a taxa de utilização mais elevada, ou seja, para o qual $\sum\{|C(g_i^*) - a'_{ri}|\} = \text{MIN} \sum\{|C(g_i) - a'_{ri}|\}$, $i = 1$ a Nj .

5.1 Repartição das Tarefas

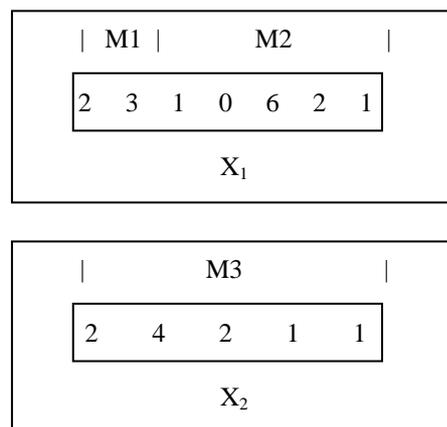
Esta fase tem por objetivo assegurar uma melhor utilização das máquinas atribuídas às diferentes células, em termos de rendimento e

equilíbrio da carga das máquinas. O tratamento do tipo de máquina j é feito da seguinte maneira: seja X_{r_1} uma das famílias ainda não tratadas e $g_{r_1}^*$ a combinação de máquinas atribuída a esta família. Repartem-se, então, as tarefas sobre as peças i ($i \in X_{r_1}$) de modo a respeitar as taxas de rendimento de todas as máquinas da combinação. Quando todas as famílias que receberam a atribuição do tipo de máquina j tiverem sido tratadas, atribui-se o restante das tarefas ($i \notin X_{r_1}$) sobre as máquinas de maneira proporcional, com o objetivo de um bom equilíbrio de carga de trabalho.

No caso em que a combinação g_i^* não seja suficiente para tratar todas as operações sobre as peças da família r_1 ($C(g_{r_1}^*) - a_{r_1} < 0$), algumas operações terão que ser executadas em outras células.

- *Exemplo*

Sejam 2 famílias de peças X_1 e X_2 que receberam a atribuição de um mesmo tipo de máquina, dispondo-se dentro do tipo de 3 máquinas efetivas M1, M2 e M3:



Tem-se: $a_1 = 15$ e $a_2 = 10$. Obtêm-se as novas cargas: $a'_1 = a_1 + 5.15/25 = 18$ e $a'_2 = a_2 + 5.10/25 = 12$. Como existem 3 máquinas (supondo-as idênticas e com capacidade igual a 10), então, 2 máquinas (M1 e M2) serão atribuídas à primeira família e uma terceira (M3) à segunda família, tal como está indicado acima.

5.2 Carga de Admissão

A carga de admissão de um tipo de máquina em uma família de peças é calculada de duas diferentes maneiras:

- *Regra 1*

O valor de CI_j é igual para todos os tipos de máquinas disponíveis, $\alpha = 0/1$, e calculado a partir de um parâmetro δ ($\delta \in [0, 1]$) fornecido pelo usuário. Este parâmetro permite determinar, segundo o valor de α escolhido, a carga ou o número mínimo de operações fixado para a atribuição de um tipo de máquina a uma família de peças. A expressão seguinte fornece a carga de admissão: $CI_j = \delta \cdot \text{MAX} \{ \sum \{ \mu_i \cdot T(i, j) \}, j = 1 \text{ a } m, i = 1 \text{ a } n \}$. Esta carga corresponde, então, a uma fração da carga de trabalho total (ou do número total de operações) em relação ao tipo de máquina mais solicitado. A solução obtida dependerá do valor escolhido para δ . Esta escolha é efetuada em função da experiência do usuário e da disponibilidade dos meios. A família X_r recebe o tipo de máquina j quando a carga relativa a este tipo é superior ou igual à carga de admissão, ou seja: $\sum \{ \mu_i \cdot T(i, j) \} \geq CI_j, i \in X_r$.

- *Regra 2*

Esta regra leva em conta as taxas de rendimento x_j^k das máquinas, fixadas pelo usuário, segundo sua preferência e conveniência. Assim, $CI_j = \text{MIN} \{ x_j^k \cdot \tau \}, k = 1 \text{ a } kj$. Para um tipo de máquina j , CI_j é igual ao valor mínimo de rendimento das máquinas. Este valor assegura uma carga de trabalho mínima às máquinas escolhidas, na medida em que um tipo de máquina j é atribuído a uma família de peças somente se a carga de trabalho relativa a este tipo de máquina satisfizer a seguinte condição: $\sum \{ \mu_i \cdot T(i, j) \} \geq CI_j, i \in X_r$.

6. Algoritmo

Em função das regras escolhidas, o algoritmo pode ser esquematizado da seguinte forma:

a) *inicialização:*

$N_j^1 = 1$ para $j = 1 \text{ a } m$;
cálculo dos CI_j ;

b) *obtenção dos subconjuntos de tipos:*

na iteração k tem-se a partição de peças $X^{(k)} = \{ X_1^{(k)}, \dots, X_p^{(k)} \}$;

- *cálculo das cargas das famílias*

para $j = 1 \text{ a } m$ fazer

para $r = 1 \text{ a } p$ fazer

$$C(r, j) = \sum \{ \mu_i \cdot T(i, j) \}, i \in X_r^{(k)}$$

fim para

fim para

- *atribuições iniciais às $N_j^{(k)}$ famílias*

para $j = 1 \text{ a } m$ fazer

para $l = 1 \text{ a } N_j^{(k)}$ fazer

$c_{\text{max}} = 0$;

para $r = 1 \text{ a } p$ fazer

se $C(r, j) > c_{\text{max}}$ então

$r_{\text{max}} = r$; $c_{\text{max}} = C(r, j)$;

fim se

fim para

$$Y_{r_{\text{max}}}^{(k+1)} = Y_{r_{\text{max}}}^{(k+1)} + j$$

$$C(r_{\text{max}}, j) = 0$$

$$N_j^{(k+1)} = N_j^{(k+1)} + 1$$

fim para

fim para

- *atribuições às Nat famílias*

para $l = 1 \text{ a } Nat$ fazer

$c_{\text{max}} = 0$; $r_{\text{max}} = 0$;

para $j = 1 \text{ a } m$ fazer

para $r = 1 \text{ a } p$ fazer

se $C(r, j) > c_{\text{max}}$ e

$C(r, j) > CI_j$ e $N_j^{(k+1)} < kj$ então

$r_{\text{max}} = r$; $j_{\text{max}} = j$;

$c_{\text{max}} = C(r, j)$;

fim se

fim para

fim para

se $r_{\text{max}} \neq 0$ então

$$Y_{r_{\text{max}}}^{(k+1)} = Y_{r_{\text{max}}}^{(k+1)} + j_{\text{max}}$$

$$C(r_{\text{max}}, j_{\text{max}}) = 0$$

$$N_{j_{\text{max}}}^{(k+1)} = N_{j_{\text{max}}}^{(k+1)} + 1$$

senão ir para c ;

fim se

fim para

c) *constituição das famílias de peças*

para $i = 1$ a n fazer

$c_{\max} = 0$;

para $r = 1$ a p fazer

$C(i, r) = \sum \{\mu_i \cdot T(i, j)\}, j \in Y_r^{(k+1)}$

se $C(i, r) > c_{\max}$ então

$c_{\max} = C(i, r); r_{\max} = r$

fim se

fim para

$X_{r_{\max}}^{(k+1)} = i$

fim para

d) *teste de convergência*

calcular:

$C^{(k)} = \sum \sum \{\mu_i \cdot T(i, j)\}, r = 1$ a p ,

$(i, j) \in [X_r^{(k)}, Y_r^{(k)}]$

se $C^{(k)} > C^{(k-1)}$ então ir para b;

senão FIM

7. Convergência do Algoritmo

O critério a maximizar escreve-se da seguinte forma: $C(X, Y) = \sum \sum \{\mu_i \cdot T(i, j)\}, r = 1$ a p , $(i, j) \in [X_r^{(k)}, Y_r^{(k)}]$. O algoritmo converge se:

$$1) C(X^{(k)}, Y^{(k+1)}) \geq C(X^{(k)}, Y^{(k)})$$

$$2) C(X^{(k+1)}, Y^{(k+1)}) \geq C(X^{(k)}, Y^{(k+1)})$$

Seja o par $(X^{(k)}, Y^{(k)})$ e $r_1^{(k)}, \dots, r_{N_j}^{(k)}$ os índices das famílias de peças que contribuem no critério $C(X^{(k)}, Y^{(k)})$. Na etapa $k+1$, em uma primeira fase, para cada tipo de máquina j , efetua-se o mesmo número $N_j^{(k)}$ (obtido na etapa k) de atribuições às famílias que possuem as cargas de trabalho $C(r, j)$ mais elevadas. Se os índices destas famílias são os mesmos que $r_1^{(k)}, \dots, r_{N_j}^{(k)}$, então a contribuição do tipo de máquina j no critério não se altera ou aumenta. Em uma segunda fase, efetuam-se as N_j atribuições. Portanto, $C(X^{(k)}, Y^{(k+1)}) \geq C(X^{(k)}, Y^{(k)})$.

Seja o par $(X^{(k)}, Y^{(k+1)})$ e $C(i, r)$ a contribuição da peça i no critério $C(X^{(k)}, Y^{(k+1)})$. Para obter $X^{(k+1)}$ a partir de $Y^{(k+1)}$, a peça i é atribuída ao subconjunto de operações de índice r^* , tal que $C(i, r^*) = \text{MAX} \{C(i, r)\}, r = 1$ a p . Portanto, $C(X^{(k+1)}, Y^{(k+1)}) \geq C(X^{(k)}, Y^{(k+1)})$. A seqüência

$C(X^{(k)}, Y^{(k)})$ é crescente e limitada pelo termo $\sum \{\mu_i \cdot T(i, j)\}, i = 1$ a $m, j = 1$ a n .

Vale observar que a imposição, no início de cada iteração, a N_j do valor obtido na iteração anterior, é condição suficiente de convergência, mas não necessária.

8. Balanceamento da Carga nas Células

O algoritmo de classificação cruzada não consegue, em alguns casos, projetar o número desejado de células. Observa-se, com efeito que, no fim do processo iterativo, algumas células podem constituir um conjunto vazio ou com carga de trabalho muito baixa. Para evitar esses problemas, um novo critério C' , que depende de um coeficiente $h \in [0, 1]$ foi introduzido no método. O valor de h , fornecido pelo usuário, tem por objetivo aumentar a carga de trabalho no interior das células ($h \uparrow$) ou a quantidade de zeros no exterior da Tabela de dados T bloco-diagonalizada ($h \downarrow$). C' é dado pela seguinte expressão:

$$C' = \sum \{h \mu_i T(i, j), i \in X_r, j \in Y_r, r = 1 \text{ a } p\} + \sum \{(1-h) \mu_i (T^*(i, j) - T(i, j)), i \notin X_r, j \notin Y_r, r = 1 \text{ a } p\}, \text{ onde: } T^*(i, j) = \text{MAX} \{T(i, j)\}, i = 1 \text{ a } n, j = 1 \text{ a } m.$$

C' pode ser reescrito da seguinte forma:

$$C' = \sum \{h \mu_i T(i, j), i \in X_r, j \in Y_r, r = 1 \text{ a } p\} - \sum \{(1-h) \mu_i (T^*(i, j) - T(i, j)), i \in X_r, j \in Y_r, r = 1 \text{ a } p\} + K, \text{ onde } K = (1-h) \sum \{\mu_i (T^*(i, j) - \mu_i T(i, j)), i = 1 \text{ a } n, j = 1 \text{ a } m\} \text{ e tem valor constante.}$$

Tem-se, ainda:

$$C'' = \sum \{\mu_i T(i, j), i \in X_r, j \in Y_r, r = 1 \text{ a } p\} - (1-h) \sum \{\mu_i T^*(i, j), i \in X_r, j \in Y_r, r = 1 \text{ a } p\} + K$$

A maximização do critério C' pode ser, então, transformada na maximização do critério $C'' = C' - K$, ou seja:

$$C'' = \sum \{[\mu_i T(i, j), i \in X_r, j \in Y_r, r = 1 \text{ a } p] - (1-h) \mu_i T^*(i, j)\}$$

Neste caso, observa-se o seguinte: 1) quando $h = 1$, obtém-se o critério C ; 2) C'' pode ter valor negativo, devido à supressão da constante K ; 3) a expressão é simples e exige um volume de cálculo menor que para o critério C' , que leva em consideração a totalidade dos termos $T(i, j)$. De modo que, os termos $C(r, j)$ e $C(i, r)$ presentes no algoritmo serão substituídos pelas expressões abaixo, conservando-se a condição $C(r, j) \geq CI_j$:

$$C''(r, j) = \sum \{\mu_i T(i, j) - (1-h) \mu_i T^*(i, j), i \in X_r\}$$

$$C''(i, r) = \sum \{\mu_i T(i, j) - (1-h) \mu_i T^*(i, j), j \in Y_r\}$$

Portanto:

$$\sum \{\mu_i T(i, j), i \in X_r\} / \sum \{\mu_i T^*(i, j), i \in X_r\} \geq 1 - h$$

$$\sum \{\mu_i T(i, j), j \in Y_r\} / \sum \{\mu_i T^*(i, j), j \in Y_r\} \geq 1 - h$$

Isto significa que, para que uma peça possa ser atribuída a um subconjunto de tipos de máquinas, é preciso que a razão entre a carga produzida por esta peça neste subconjunto e a carga máxima possível seja maior ou igual a $(1 - h)$; o mesmo sendo válido para um tipo de máquina e uma família de peças. Tem-se, então, a impressão de que um valor menor para h levaria a cargas de trabalho mais elevadas. O exemplo abaixo, entretanto, mostra que o valor ideal de h deve estar próximo de 1.

- *Exemplo:* Seja uma repartição de tarefas a executar sobre uma peça i levando-se em conta os tipos de máquinas Y_1 e Y_2 .

	Y1							Y2			
1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0

Para $h = 1$, tem-se: $C''(i, 1) = 4$ e $C''(i, 2) = 3$. A peça i seria, então, atribuída à ilha 1. Para $h = 0,5$, tem-se: $C''(i, 1) = 4 - 0,5 * 7 = 0,5$ e $C''(i, 2) = 3 - 0,5 * 4 = 1$. A peça i seria, então, atribuída à ilha 2. A diminuição do valor de h tem o efeito de modificar a atribuição da peça i , da ilha 1 para a ilha 2, traduzindo, assim, um balanceamento de carga nas células, graças à transferência de certas peças (ou tipos de máquinas) para células (ou famílias de peças) menos sobrecarregadas, favorecendo as atribui-

ções para as quais tem-se um número elevado de zeros no exterior dos blocos diagonais da Tabela T. Todavia, isto também leva a um número mais elevado de movimentos intercélulas, o que não é interessante sob nenhum aspecto. Então, fixa-se h próximo de 1.

9. Escolha da Solução

O método oferece várias soluções para o mesmo problema em função do caráter aleatório da partição inicial, da escolha do valor de δ , da escolha do número de células. Para se efetuar a escolha de uma solução, utiliza-se um coeficiente Q para medir a qualidade das partições obtidas. A expressão de Q é a seguinte: $Q(\alpha) = \sum \{T(i, j), i \in X_r, j \in Y_r, r = 1 \text{ a } n\} / \sum \{T(i, j), i = 1 \text{ a } n, j = 1 \text{ a } m\}$ e depende do valor de α . Para $\alpha = 0$, por exemplo, Q é igual ao número de operações executadas dentro das células sobre o número total de operações. O valor de Q varia entre 0 e 1. Quanto maior o valor de Q , melhor é a solução.

10. Exemplo Ilustrativo

Seja um sistema de produção responsável pela fabricação de 9 peças diferentes, dispondo-se para tanto de 7 tipos de máquinas.

As quantidades de peças a fabricar em cada lote são fixadas iguais a 1 ($\mu_i = 1$) e o período de trabalho (τ) igual a 10.

Os parâmetros a serem fixados pelo usuário para a utilização do método de classificação cruzada proposto são os seguintes: 1) critério de convergência: C'' ; 2) cálculo da carga de admissão CI : Regra 1; 3) $\delta = 0,2$; 4) $Nat = 1$; 5) $h = 1$. Na resolução, $VC =$ valor do critério.

A Tabela 3 fornece os roteiros de fabricação das peças (seqüências ordenadas de tipos de máquinas utilizadas para executar as operações sobre as peças). A Tabela 4 fornece as durações das operações em relação às máquinas de referência dentro de cada tipo. As características do parque de máquinas-ferramenta disponíveis são fornecidas na Tabela 5. Nesta tabela, tem-se

Tabela 3 – Roteiros de fabricação

	Tipos de máquinas utilizadas					
P1	1	2	4	5	7	4
P2	1	2	3	1	4	5
P3	1	3	4	5	4	
P4	2	4	5	6		
P5	2	3	5	6	7	5
P6	1	2	3	5	7	
P7	3	6	7	6		
P8	2	3	4			
P9	1	2	3	5	7	3

Tabela 4 – Tempo de máquina

	Duração das operações					
P1	1	2	1	3	1	1
P2	1	3	2	1	1	2
P3	3	1	2	1	2	
P4	1	2	3	3		
P5	1	4	1	2	3	2
P6	2	2	3	1	3	
P7	1	1	3	1		
P8	4	1	2			
P9	2	2	3	2	1	2

Tabela 5 – Tipos e máquinas

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
M1	1	1	1	1	1	1	1
M2	1	1,2	1	1	1	1	1

Tabela 6 – Tabela T

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
P1	1	2	0	2	3	0	1
P2	2	3	2	1	2	0	0
P3	3	0	1	4	1	0	1
P4	0	1	0	2	2	3	0
P5	0	1	4	0	2	2	3
P6	2	2	3	0	1	0	3
P7	0	0	1	0	0	2	3
P8	0	4	1	2	0	0	0
P9	2	2	3	0	2	0	1

os tipos de máquinas e as relações de velocidade. Uma máquina com relação de velocidade igual a 1,2 é 20% mais rápida que uma máquina com relação de velocidade igual a 1: este é o caso

do tipo de máquina T2. A tabela inicial de dados é calculada, e o resultado é apresentado na Tabela 6. Deseja-se organizar o sistema de produção em 2 células de fabricação.

- *Inicialização* (escolha aleatória)

$$X_1^0 = \{P1, P2, P3, P4\}$$

$$X_2^0 = \{P5, P6, P7, P8, P9\}$$

- *1ª iteração* (atribuições iniciais: negrito; atribuições suplementares: sublinhado)

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
X_1^0	6	<u>6</u>	3	9	8	3	1
X_2^0	4	9	12	2	5	4	10

$$Y_1^0 = \{T1, T2, T4, T5\}$$

$$Y_2^0 = \{T2, T3, T6, T7\}$$

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Y_1^0	8	8	8	6	3	5	6	6	6
Y_2^0	3	5	1	4	10	8	6	5	8

$$X_1^1 = \{P1, P2, P3, P4, P8\}$$

$$X_2^1 = \{P5, P6, P7, P9\} \quad VC = 68$$

- *2ª iteração*

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
X_1^1	6	10	4	11	9	3	1
X_2^1	4	5	13	0	<u>5</u>	4	10

$$Y_1^1 = \{T1, T2, T4, T5\}$$

$$Y_2^1 = \{T2, T3, T5, T6, T7\}$$

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Y_1^1	8	8	8	6	3	5	0	6	6
Y_2^1	6	7	2	7	12	9	6	5	10

$$X_1^2 = \{P1, P2, P3, P8\}$$

$$X_2^2 = \{P4, P5, P6, P7, P9\} \quad VC = 73$$

- *3ª iteração*

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
X_1^2	6	9	<u>4</u>	9	6	0	1
X_2^2	4	6	13	2	8	7	10

$$Y_1^2 = \{T1, T2, T3, T4, T5\}$$

$$Y_2^2 = \{T2, T3, T5, T6, T7\}$$

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Y_1^2	8	10	9	6	7	8	1	7	11
Y_2^2	6	7	2	7	12	9	6	5	10

$$X_1^3 = \{P1, P2, P3, P8, P9\}$$

$$X_2^3 = \{P4, P5, P6, P7\} \quad VC = 79$$

- *4ª iteração*

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
X_1^3	8	11	9	9	8	0	2
X_2^3	2	4	8	2	6	7	9

$$Y_1^3 = \{T1, T2, T3, T4, T5\}$$

$$Y_2^3 = \{T2, T3, T5, T6, T7\}$$

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Y_1^3	8	10	9	6	7	8	1	7	11
Y_2^3	6	7	2	7	12	9	6	5	10

$$X_1^4 = \{P1, P2, P3, P8, P9\}$$

$$X_2^4 = \{P4, P5, P6, P7\} \quad VC = 79$$

- critério pára de aumentar: FIM.

A Tabela 7 apresenta a configuração final das células de fabricação depois da repartição das operações entre as máquinas, levando-se em conta as capacidades das máquinas. Os tipos de máquinas 1 e 6 utilizam uma única máquina entre as duas máquinas disponíveis dentro dos tipos. A solução obtida tem 4 movimentos intercélulas e células de dimensões [5 peças x 6 máquinas] e [4 peças x 6 máquinas]. Nesta tabela, a primeira linha fornece os números efetivos recebidos pelas máquinas após o projeto das células de fabricação; a segunda linha, os tipos de máquinas; e a terceira linha, os números iniciais das máquinas dentro de cada tipo. As durações das operações relativas à máquina 3 (a segunda máquina do tipo 2) levam em consideração a relação de velocidade da máquina: desta forma, os valores 2, 3, 3 e 2 que constam da 2ª coluna, na realidade são iguais a 1,7; 2,5; 2,5 e 1,7.

A Tabela 8 apresenta as células de fabricação obtidas quando a solução inicial é a seguinte: $X_1^0 = \{P1, P2, P3, P8, P9\}$ e $X_2^0 = \{P4, P5, P6, P7\}$. Esta solução tem 2 movimentos intercélulas e células de fabricação com as mesmas dimensões da solução precedente e é, portanto, de melhor qualidade.

A Tabela 9 apresenta as células de fabricação, quando a capacidade das máquinas é fixada igual a ∞ . Esta solução não apresenta movimentos intercélulas e as dimensões das células continuam as mesmas.

Tabela 7 – Células de fabricação (I=4)

	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	
	1	3	5	6	7	9	2	4	8	0	1	2	
	1	2	3	4	4	5	2	3	5	6	7	7	
	1	2	2	1	2	1	1	1	2	1	1	2	
1	1	2		2		3						1	
2	2	3	2		1	2							
3	3		1	4		1							
8		3	1		2								
9	2	2	5			1						1	
4	2						1		2	3			
5							1	4	2	2	3		
6	2							2	3	1		3	
7								1		2		3	

Tabela 8 – Células de fabricação (I=2)

	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	
	1	2	4	6	8	1	3	5	7	9	0	2	
	1	2	3	4	5	7	2	3	4	5	6	7	
	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	2	
1	1	2		2	3	1							
2	2	3	2	1	2								
3	3		1	4	1								
5		1	4		3	3						2	
6	2	2	3		1	3							
4							1		2	3	3		
7								1			2	3	
8							4	1	2				
9	2							2	5		2		1

Tabela 9 – Células de fabricação (I=0)

	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1
	3	5	7	9	0	1	1	2	4	6	8	2
	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	7
	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2
4	1		2	3	3							
5	1	4		3	2	3						
7		1			2	3						
8	4	1	2									
1							1	2		2	3	1
2							2	3	2	1	2	
3							3		1	4	1	
6							2	2	3		1	3
9							2	2	5		2	1

11. Resultados Experimentais

A Tabela 10 resume 15 testes realizados sobre exemplos clássicos extraídos da literatura.

A notação adotada é a seguinte: E = número da referência da literatura (ver Tabela 11); S = referência da literatura onde o melhor resultado foi encontrado ou \rightarrow (solução obtida pelo método proposto neste artigo); P x T = número de peças e de tipos de máquinas; P x M = número de peças e de máquinas efetivas selecionadas para executar as operações; I = número de movimentos intercélulas; D = dimensão das células.

Os resultados obtidos provocaram diminuição do número de movimentos intercélulas para os três primeiros exemplos da Tabela 10, ao mesmo tempo em que as dimensões das células continuaram as mesmas ou praticamente as mesmas da melhor solução até então conhecida. Para os outros exemplos, obtiveram-se sempre resultados iguais ou equivalentes.

O tempo computacional exigido para a resolução de todos os problemas tratados esteve sempre abaixo de 10 segundos. As medidas de tempo foram feitas em um Pentium 200 MHz com 64 Kbytes, utilizando-se o sistema operacional Linux K2.0.0 e o compilador C gcc com opção `-O3`. A utilização da memória de máquina é extremamente baixa.

Os parâmetros utilizados no método proposto neste artigo (δ , h, etc.), nos testes realizados, foram sempre os mesmos e iguais aos valores que constam do exemplo ilustrativo da seção 10.

12. Reclassificação

O projeto de uma nova peça exige uma análise para sua classificação em uma das células existentes. A partir do roteiro de fabricação da nova peça e da composição das células em termos de tipos de máquinas, calcula-se o valor de $C''(i, r)$ e escolhe-se a ilha para a qual $C''(i, r)$ tem valor máximo.

A supressão e o projeto de novas peças tornam necessário, no entanto, um questionamento da organização das células. Isso deve ser feito quando o usuário constatar que um número cada vez maior de operações está sendo executado

fora das células de atribuição, i.e., uma baixa sensível do coeficiente Q. Pode-se adotar o seguinte procedimento: quando Q se torna inferior a um valor fixado a priori, um novo projeto de células deve ser implementado.

13. Conclusão

Um método de bloco-diagonalização de matrizes implementado para auxiliar o projeto de células de fabricação foi apresentado e discutido neste artigo. O método baseia-se em um procedimento iterativo que reúne alternativamente as peças em famílias e os tipos de 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 maximiza um critério sobre as durações das operações ou sobre o número de operações. O algoritmo realiza uma atribuição progressiva de tipos de máquinas às células de fabricação em função de um certo número de parâmetros de livre escolha do usuário do programa, o que lhe confere uma maior flexibilidade. A atribuição das operações às máquinas escolhidas dentro de cada tipo, bem como a escolha das máquinas que efetivamente serão responsáveis pela fabricação são feitas no final do processo de classificação.

O método proposto permite o projeto de células de fabricação bastante próximas da realidade industrial, além de poder ser utilizado como ferramenta para detectar as necessidades de novas máquinas, na medida em que leva em consideração a duração das operações, a capacidade das máquinas e uma taxa de rendimento (ou produtividade) para elas.

Os exemplos tratados mostram a eficiência do método, tanto na qualidade das soluções obtidas (reduziu-se o número de movimentos intercélulas em 3 casos 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 (pode-se dizer, negligenciável), o que o torna, portanto, acessível a um grande número de indústrias, principalmente aquelas de pequeno e médio porte.

Tabela 10 – Testes e resultados obtidos

E	S	P	P x T	P x M	I	D
1	1 →	2	9x7	9x12 9x12	4 2	4x6,5x6 4x6,5x6
2	2 →	3	30x12	30x16 30x16	24 16	5x4,10x6,15x6 5x3,10x6,15x7
2	2 →	5	20x20	20x20 20x20	15 14	6x5,4x4,4x5, 3x3,3x3 5x4,4x3,4x5, 3x4, 4x4
2	2 →	4	20x20	20x20 20x20	1 1	7x7,6x5,4x5,3x3 7x7,6x5,4x5,3x3
3	3 →	4	10x20	10x20	0 0	2x5,3x3,2x6,3x6 2x5,3x3,2x6,3x6
4	1 →	3	43x16	43x20 43x20	0 0	16x8,7x4,20x8 16x8,7x4,20x8
4	1 →	3	43x16	43x19 43x19	1 1	- 13x5,7x4,23x10
5	5 →	3	41x30	41x30 41x30	6 6	- 12x9,10x8,19x13
5	6 →	2	41x30	41x30 41x30	3 3	- 25x19,16x11
2	2 →	3	20x12	20x12 20x12	0 0	6x4,9x5,5x3 6x4,9x5,5x3
7	7 →	3	10x15	10x15 10x15	0 0	4x5,3x5,3x5 4x5,3x5,3x5
1	1 →	2	7x5	7x7 7x7	1 1	4x3,3x4 3x3,4x4
8	8 →	2	5x4	5x4 5x4	0 0	2x2,3x2 2x2,3x2
9	9 →	2	7x5	7x5 7x5	2 2	3x2,4x3 3x2,4x3
10	10 →	2	7x5	7x5 7x5	2 2	3x2,4x3 3x2,4x3

Tabela 11 – Exemplos da literatura

Nº	Referência
1	MEGUELATI, 1998
2	HARHALAKIS <i>et al.</i>, 1990
3	SRINIVASAN <i>et al.</i>, 1990
4	BURBIDGE, 1975
5	KUMAR & VANELLI, 1987
6	WEI & KERN, 1989
7	CHAN & MILNER, 1981
8	KUSIAK, 1987
9	BALLAKUR & STEUDEL, 1987
10	WAGHORN & SAHAY, 1994

Referências Bibliográficas

- BALLAKUR, A.; STEUDEL, H.J. A within cell based heuristic for designing cellular manufacturing systems. **International Journal of Production Research**, v.5, p.639-665, 1987.
- BURBIDGE, J.L. **The Introduction of Group Technology**. John Wiley, 1975.
- CHAN, H.M.; MILNER, D.A. Direct cluster algorithm for group formation in cellular manufacture. **Journal of Manufacturing Systems**, v.1, p.235-242, 1981.
- CHU, C.H.; HAYYA, J.C. A fuzzy clustering approach to manufacturing cell formation. **International Industrial Engineering Conference**, Orlando-FL, USA, p.495-500, 1991.
- DIDAY, E. **Optimisation en Classification Automatique**. INRIA, 1982.
- DOUMEINGTS, G. **La Production Assistée par Ordinateur**. Bulletin de Recherche en Informatique et Automatique, 1984.
- HARHALAKIS, G.; NAGI, R.; PROTH, J.M. An efficient heuristic in manufacturing cell formation for Group Technology applications. **International Journal of Production Research**, v.28, p.185-198, 1990.
- KING, J.R.; NAKORNCHAI, V. Machine-component group formation in Group Technology. **International Journal of Production Research**, v.20, p.117-133, 1982.
- KUMAR, K.R.; VANELLI, A. Strategic subcontracting for efficient disaggregated manufacturing. **International Journal of Production Research**, v.25, p.1715-1728, 1987.
- KUSIAK, A. The generalized Group Technology concept. **International Journal of Production Research**, v.25, p.561-569, 1987.
- KUSIAK, A.; CHUNG, Y. GT/ART: using neural networks to form machine cells. **Manufacturing Review**, v.4, p.293-301, 1991.
- LEE, H.; MALAVE, C.O.; RAMACHANDRAN, S. Neural network-based design of cellular manufacturing systems, **Journal of Intelligent Manufacturing**, v.3, p.325-332, 1992.
- MAHMOODI, F.; DOOLEY, K.J.; STARR, P.J. An investigation of dynamic group scheduling heuristics in a job shop manufacturing cell, **International Journal of Production Research**, v.9, p.1695-1711, 1990.
- MEGUELATI, S. **Méthodes de Classification pour la Constitution d'Ilots de Fabrication**. Rapport LAAS 98175, França, 1998.
- MOON, Y.B.; CHI, S.C. Generalized part family formation using neural network techniques. **Journal of Manufacturing Systems**, v.11, p.149-159, 1992.
- QATTANI-al, I. Designing flexible manufacturing cells using a branch and bound method. **International Journal of Production Research**, v.28, p.325-336, 1990.
- SHAFER, S.M.; KERN, G.M. A mathematical programming approach for dealing with exceptional elements in cellular manufacturing. **International Journal of Production Research**, v.30, p.1029-1036, 1992.
- SINGH, N. Design of cellular manufacturing systems: an invited review. **European Journal of Operational Research**, v.69, p.284-291, 1993.
- SRINIVASAN, G.; NARENDAN, T.T.; MAHAVEDAN, B. An assignment model for the part-families problem in Group Technology. **International Journal of Production Research**, v.28, p.145-152, 1990.
- VENUGOPAL, V.; NARENDRAN, T.T. Cell formation in manufacturing systems through simulated annealing: an experimental evaluation. **European Journal of Operational Research**, v.63, p.409-422, 1992.
- VENUGOPAL, V.; NARENDRAN, T.T. A genetic algorithm approach to the machine-component grouping problem with multiple objectives. **Computers and Industrial Engineering**, v.22, p.469-480, 1992.
- WAGHODEKAR, P.H.; SAHU, S. Machine-component cell formation in Group Technology: MACE. **International Journal of Production Research**, v.6, p.937-948, 1984.
- WEI, J.C.; KERN, G.M. Commonality analysis: a linear cell clustering algorithm for Group Technology. **International Journal of Production Research**, v.12, p.2053-2062, 1989.
- XU, H.; WANG, H.P. Part family formation for Group Technology applications based on fuzzy mathematics. **International Journal of Production Research**, v.27, p.1637-1651, 1989.

THE ORGANIZATION OF A PRODUCTION SYSTEM IN MANUFACTURING CELLS

Abstract

Block-diagonalization of the part-machine incidence matrix for designing manufacturing cells is an important step in the implementation of Group Technology. The present work proposes a method for block-diagonalization based on cross-classification of parts and types of machines with progressive assignation of types of machines to families of parts. Examples, which allow us to test and compare the proposed method with other available methods, are presented. The results obtained of several problems found in the literature are consistently equivalent to or even better than hitherto proposed, in terms of number of intercell movements and dimensions of cells.

Key words: *group technology, manufacturing cells, classification methods.*