

2 MÉTODOS DE FORMAÇÃO DE CÉLULAS BASEADO EM ARRANJO MATRICIAL

Esta dissertação trata da pesquisa e análise dos métodos existentes que utilizam arranjo matricial (*array-based clustering*), para obtenção de células de produção em layout celular. Algumas outras denominações são utilizadas para estes procedimentos, como “métodos baseados em matriz” e “matriz de King”. Esta última em referência ao criador do algoritmo *Rank Order Clustering* (ROC) ou Agrupamento por Ordenação, cujo autor é J. R. King.

No trabalho publicado em 1971, Burbidge desenvolveu um sistema para resolver o problema de formação de células chamado de “*Production Flow Analysis*” (PFA), ou Análise do Fluxo de Produção. Chan e Milner (1982) descrevem a PFA como um processo de três estágios, o primeiro, de cunho mais estratégico, analisa a estrutura do fluxo de produção. O segundo estágio trata da formação das células de produção e, por fim, o terceiro define o layout destas células de produção.

Burbidge (1971) *apud* McAuley (1972) define a PFA como um método preocupado apenas com os procedimentos de fabricação, ou seja, não levando em consideração as características do projeto ou a forma dos componentes como um todo. Este sistema foi o principal suporte para a posterior criação dos métodos baseados em matriz (RIBEIRO FILHO, 1998).

Estes métodos, integrantes do Sistema de Manufatura Celular, consistem em otimizar o arranjo de máquinas-peças disponível com um determinado grau de similaridade, de modo a criar famílias de produtos afins, capazes de serem produzidos em conjunto.

Um aspecto importante para a análise dos métodos de formação de células de produção está em como determinar a qualidade do algoritmo. Para isso, alguns autores criaram indicadores de desempenho capazes de parametrizar os resultados gerados pelos algoritmos, e assim medir sua eficácia.

As próximas seções deste Capítulo irão abordar os principais métodos base-

ados em arranjo matricial desenvolvidos para a formação de células de produção, além de descrever os principais indicadores de desempenho para validação dos algoritmos.

Os métodos baseados em matriz que serão apresentados nesta seção são o *Rank Order Clustering*, *Direct Clustering Analysis* e *Cluster Identification Algorithm*, considerados os principais métodos de formação de células de produção.

Para cada método apresentado, serão feitos comentários sobre sua relevância, aplicabilidade e, em seguida, descritas as etapas com exemplos ilustrativos.

2.1 MÉTODO DO AGRUPAMENTO POR ORDENAÇÃO (RANK ORDER CLUSTERING – ROC)

O Método de Agrupamento por Ordenação ou matriz de King é um método com procedimentos simples e regras fáceis de serem aplicadas.

Segundo Chu e Tsai (1990), o método utiliza uma matriz binária inicial, também conhecida como “matriz de incidência”, que ao sofrer alterações para rearranjar linhas e colunas formam uma EBD que determina as células de manufatura.

Para Massote (2006), o ROC mostrou ser uma ferramenta eficiente, segundo equações que medem o desempenho dos métodos baseados em matriz. Como exemplo desses indicadores de desempenho pode-se citar três: percentual dos elementos de exceção (%EE), utilização de máquinas (%MU) e eficiência de agrupamento (%GE), que tem como objetivo, respectivamente, (i) analisar a quantidade de elementos excepcionais que não integraram uma célula, (ii) avaliar a utilização das máquinas em suas células e (iii) medir a eficiência da composição das células geradas.

Para iniciar a explicação das etapas do funcionamento do ROC, considere-mos uma matriz $m \times n$ com elementos a_{ij} binários de zeros e uns, onde:

m = número de máquinas;

n = o número de peças;

$a_{ij} = 1$ quando a peça i for processada na máquina j ;

$a_{ij} = 0$ quando a peça i não for processada na máquina j ;

As equações para o peso binário (BW) de linhas i e colunas j são:

- Peso Binário para a linha $i \Rightarrow BW_i = 2^{n-i}$
- Peso Binário para a coluna $j \Rightarrow BW_j = 2^{m-j}$

E as equações do decimal equivalente para as linhas i e colunas j são:

- Decimal Equivalente para a linha $i \Rightarrow DE_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} \times 2^{m-j}$
- Decimal Equivalente para a coluna $j \Rightarrow DE_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \times 2^{n-i}$

Em seguida serão descritos os passos das operações para obtenção da Estrutura Bloco Diagonal através do ROC.

Passo 1: atribuir um peso binário (BW_j) a cada coluna j da matriz de incidência e, em seguida, determinar o decimal equivalente (DE_i) do valor binário de cada linha i ;

		Máquinas								
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	
Peças	P 1	1		1			1			164
	P 2			1					1	36
	P 3	1		1			1		1	165
	P 4		1		1			1		82
	P 5		1		1	1		1		90
		2 ⁷	2 ⁶	2 ⁵	2 ⁴	2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰	
		Peso Binário								

Figura 2. Exemplo passo 1 do ROC. Fonte: Elaborado pelo autor.

Exemplificando a obtenção do decimal equivalente para a linha 1:

$$2^7 + 2^5 + 2^2 \Rightarrow 128 + 32 + 4 \Rightarrow 164$$

Passo 2: rearranjar as linhas da matriz na ordem decrescente dos valores dos decimais equivalentes, desempatando arbitrariamente;

		Máquinas									
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8		
Peças	P3	1		1			1				
	P1			1					1		
	P5	1		1			1		1		
	P4		1		1			1			
	P2		1		1	1		1			

Figura 3. Exemplo passo 2 do ROC. Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 3: para cada linha i da matriz atribuir um peso binário (BW_i) e calcular o decimal equivalente (DE_j) para cada coluna j ;

		Máquinas									
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8		
Peças	P3	1		1			1			2 ⁴	Peso Binário
	P1			1					1	2 ³	
	P5	1		1			1		1	2 ²	
	P4		1		1			1		2 ¹	
	P2		1		1	1		1		2 ⁰	
		20	3	28	3	1	20	3	12	Decimal Equivalente	

Figura 4. Exemplo passo 3 do ROC. Fonte: Elaborado pelo autor.

Exemplificando a obtenção do decimal equivalente para a coluna 1:

$$2^4 + 2^2 \Rightarrow 16 + 4 \Rightarrow 20$$

Passo 4: rearranjar as colunas da matriz na ordem decrescente dos valores dos decimais equivalentes da esquerda para a direita, desempatar arbitrariamente;

		Máquinas							
		M3	M1	M6	M8	M2	M4	M7	M5
Peças	P3	1	1	1					
	P1	1			1				
	P5	1	1	1	1				
	P4					1	1	1	
	P2					1	1	1	1

Figura 5. Exemplo passo 4 do ROC. Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo5: Repetir os passos de 1 a 4 até não haver mais mudanças de posições dos elementos em cada linha ou coluna e determinar a EBD;

		Máquinas							
		M3	M1	M6	M8	M2	M4	M7	M5
Peças	P3	1	1	1					
	P1	1			1				
	P5	1	1	1	1				
	P4					1	1	1	
	P2					1	1	1	1

Figura 6. Exemplo passo 5 do ROC. Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste exemplo, os dois blocos em destaque formam a EBD e indicam a formação de duas células de produção, gerando a seguinte configuração:

Célula 1: Máquinas M1, M3, M6 e M8. Peças: P1, P3 e P5;

Célula 2: Máquinas M2, M4, M5 e M7. Peças P2 e P4.

2.2 MÉTODO DE ANÁLISE DE AGRUPAMENTO DIRETO (*DIRECT CLUSTERING ANALYSIS- DCA*)

O Método de Análise de Agrupamento Direto (DCA) foi elaborado por Chan e Milner (1982) e funciona, basicamente, rearranjando as linhas em ordem crescente do somatório dos elementos “1”, enquanto que as colunas são realocadas em ordem decrescente da esquerda para a direita, também segundo somatório de elementos “1”.

A seguir será explicado cada estágio de resolução do algoritmo do DCA:

Passo 1: Determinar o somatório do número total de elementos “1” em cada linha e em cada coluna na matriz de processamento;

		Máquinas								
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	
Peças	P 1	1		1			1			3
	P 2			1					1	2
	P 3	1		1			1		1	4
	P 4		1		1			1		3
	P 5		1		1	1		1		4
		2	2	3	2	1	2	2	2	

Figura 7. Exemplo do passo 1 do DCA. Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo2: Rearranjar as linhas na ordem crescente do número total de elementos 1;

		Máquinas								
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	
Peças	P 2			1					1	2
	P 1	1		1			1			3
	P 4		1		1			1		3
	P 3	1		1			1		1	4
	P 5		1		1	1		1		4

Figura 8. Exemplo do passo 2 do DCA. Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 3: Rearranjar as colunas na ordem decrescente do número total de elementos 1;

		Máquinas								
		M3	M1	M2	M4	M6	M7	M8	M5	
Peças	P 2	1						1		
	P 1	1	1			1				
	P 4			1	1		1			
	P 3	1	1			1		1		
	P 5			1	1		1		1	
		3	2	2	2	2	2	2	1	

Figura 9. Exemplo do passo 3 do DCA. Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 4: Observando apenas a primeira coluna da matriz, mover as linhas que apresentem o elemento “1” para a parte superior da matriz. Concluída a movimentação para a primeira coluna, realizar o mesmo procedimento para as demais, sem que a primeira coluna seja alterada posteriormente;

		Máquinas								
		M3	M1	M2	M4	M6	M7	M8	M5	
Peças	P 2	1						1		
	P 1	1	1			1				
	P 3	1	1			1		1		
	P 4			1	1		1			
	P 5			1	1		1		1	

Figura 10. Exemplo do passo 4 do DCA. Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 5: Realizar a mesma lógica para as colunas, movimentando para a esquerda as colunas que apresentam elementos “1”, sempre iniciando pela primeira linha e assim por diante, até que forme uma EBD;

		Máquinas							
		M3	M8	M1	M6	M2	M4	M7	M5
Peças	P 2	1	1						
	P 1	1		1	1				
	P 3	1	1	1	1				
	P 4					1	1	1	
	P 5					1	1	1	1

Figura 11. Exemplo do passo 5 do DCA. Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 6: Caso ainda seja possível repetir os passos 1 a 5, prossiga. Caso contrário as células já estarão formadas, indicadas pela EBD.

		Máquinas							
		M3	M8	M1	M6	M2	M4	M7	M5
Peças	P 2	1	1						
	P 1	1		1	1				
	P 3	1	1	1	1				
	P 4					1	1	1	
	P 5					1	1	1	1

Figura 12. Exemplo do passo 6 do DCA. Fonte: Elaborado pelo autor.

As células geradas estão compostas dessa maneira:

Célula 1: Máquinas M1, M3, M6 e M8. Peças: 1, 2 e 3;

Célula 2: Máquinas M2, M4, M5 e M7. Peças 4 e 5.

2.3 MÉTODO DO ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO DE AGRUPAMENTO (CLUSTER IDENTIFICATION ALGORITHM – CIA)

Método elaborado por Kusiak e Chow (1988), é também conhecido como método de Kusiak. De acordo com os autores, a análise de agrupamento é usada na busca de grupos homogêneos “embaraçados” na matriz.

Segundo Massote (2006), o CIA permite verificar a existência de grupos

mutuamente separáveis na matriz de processamento.

Enquanto o ROC e o DCA apresentam mecanismos similares entre si para rearranjar linhas e colunas para obtenção da Estrutura Bloco Diagonal, o CIA apresenta regras diferentes, as quais consistem em decompor a matriz de processamento em submatrizes, sendo que no final do processo cada submatriz representará um bloco da EBD.

Os passos do método CIA são:

Passo 1: A matriz de processamento $A^{(1)}$ será a iteração $k=1$;

		Máquinas							
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Peças	P 1	1		1			1		
	P 2			1					1
	P 3	1		1			1		1
	P 4		1		1			1	
	P 5		1		1	1		1	

Figura 13. Exemplo do passo 1 do CIA. Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 2: Selecionar uma linha i na matriz de processamento e desenhar uma linha horizontal h_i ;

		Máquinas								
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	
Peças	P 1	1		1			1			h_1
	P 2			1					1	
	P 3	1		1			1		1	
	P 4		1		1			1		
	P 5		1		1	1		1		

Figura 14. Exemplo do passo 2 do CIA. Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 3: Para cada elemento “1” encontrado na linha h_1 desenhar uma linha vertical v_j passando por esse elemento;

		Máquinas							
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Peças	P1	1		1			1		
	P2			1					1
	P3	1		1			1		1
	P4		1		1			1	
	P5		1		1	1		1	
		V ₁		V ₂			V ₃		

Figura 15. Exemplo do passo 3 do CIA. Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 4: Para cada elemento “1” encontrado nas linhas verticais v_j , traçar uma linha horizontal h_i ;

		Máquinas							
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Peças	P1	1		1			1		
	P2			1					1
	P3	1		1			1		1
	P4		1		1			1	
	P5		1		1	1		1	
		V ₁		V ₂			V ₃		

Figura 16. Exemplo do passo 4 do CIA. Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 5: Esgotada a matriz $A^{(1)}$, passa-se para a segunda iteração $k=2$, com os elementos “1” que não foram marcados pela matriz anterior. Portanto, passa-se a ter a seguinte matriz $A^{(2)}$;

		Máquinas			
		M2	M4	M5	M7
Peças	P4	1	1		1
	P5	1	1	1	1

Figura 17. Exemplo do passo 5 do CIA. Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 6: Como no Passo 2, seleccionar uma linha i na matriz de processamento e desenhar uma linha horizontal h_i

		Máquinas			
		M2	M4	M5	M7
Peças	P 4	1	1		1
	P 5	1	1	1	1

Figura 18. Exemplo do passo 6 do CIA. Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 7: Para cada elemento “1” encontrado na linha h_1 desenhar uma linha vertical v_j passando por esse elemento;

		Máquinas			
		M2	M4	M5	M7
Peças	P 4	1	1		1
	P 5	1	1	1	1

Figura 19. Exemplo do passo 7 do CIA. Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 8: Para cada elemento “1” encontrado nas linhas verticais v_i , traçar uma linha horizontal h_i ;

		Máquinas			
		M2	M4	M5	M7
Peças	P 4	1	1		1
	P 5	1	1	1	1

Figura 20. Exemplo do passo 8 do CIA. Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 9: As duas iterações $k=1$ e $k=2$ das matrizes $A^{(1)}$ e $A^{(2)}$ quando reagrupadas, resultam na matriz final, indicando a EBD:

		Máquinas							
		M1	M3	M6	M8	M2	M4	M5	M7
Peças	P 1	1	1	1					
	P 2		1		1				
	P 3	1	1	1	1				
	P 4					1	1		1
	P 5					1	1	1	1

Figura 21. Exemplo do passo 9 do CIA. Fonte: Elaborado pelo autor.

As células e famílias obtidas, portanto, foram:

Célula 1: Máquinas M1, M3, M6 e M8. Peças: 1, 2 e 3;

Célula 2: Máquinas M2, M4, M5 e M7. Peças 4 e 5.

2.4 INDICADORES DE DESEMPENHO

Os indicadores de desempenho citados nesta seção foram utilizados pela maioria dos pesquisadores que desenvolveram algum algoritmo de formação de células baseado em agrupamento a partir de matriz. Estes indicadores servem como um parâmetro para estabelecer comparações e análises de resultados de modo a validar e mensurar a qualidade de seus algoritmos.

Alguns autores como Chu e Tsai (1990) e Albadawi *et al.* (2005) citam que o primeiro indicador para medir a qualidade dos métodos *array-based* foi elaborado por McCormick *et al.* (1972). Este indicador, chamado de medida de eficiência (*measure effectiveness*) foi usado para avaliar o algoritmo *Bond Energy Algorithm* (BEA), que varia um pouco dos métodos baseado em matriz, e é classificado como um método que utiliza energia por vinculação.

Outros indicadores de desempenho que serão descritos nesta seção são (i) percentual de elementos de exceção, (ii) percentual de utilização de máquinas e (iii) eficiência de agrupamento. Tanto Chu e Tsai (1990) quanto Albadawi *et al.* (2005) citam os trabalhos de Chan e Milner (1982) e King (1980) como utilizadores desses parâmetros.

2.4.1 Percentual de elementos de exceção - %EE (*Exceptional Elements*)

Chan e Milner (1982) *apud* Albadawi *et al.* (2005) consideram que a qualidade do agrupamento pode ser mensurada de acordo com o número de máquinas-peças que estão contidas fora da Estrutura Bloco Diagonal.

Para entender melhor o que são estes elementos de exceção, pode-se observar a matriz da Figura 22:

	Máquinas							
	M3	M1	M6	M8	M2	M4	M7	M5
P3	1	1	1					
P1	1			1		1		
P5	1	1	1	1				
P4					1	1	1	
P2		1			1	1	1	1

Figura 22. Exemplo de matriz final com elementos de exceção. Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 22, a matriz possui dois elementos que não estão contidos na EBD, trata-se do elemento “1” na máquina M4 para a peça 1 e o elemento “1” na máquina M1 para a peça 2. Eventualmente estes elementos podem aparecer na matriz e o cálculo deste indicador irá determinar se o percentual destes elementos é aceitável ou não. Portanto, se o percentual for muito alto, a solução da EBD por qualquer que seja o algoritmo poderá estar comprometida.

A equação abaixo indica como é calculado este percentual:

$$\%EE = \frac{\text{número de elementos fora da EBD}}{\text{número total de elementos "1" da matriz}} \times 100$$

Exemplificando para o cálculo da matriz da Figura 22, tem-se:

$$\%EE = \frac{2}{18} \times 100 = 11\%$$

Neste trabalho foi estabelecido um limite de aceitação de até 20% para o percentual de elementos de exceção, visto que um alto índice de fluxo entre células descaracteriza o conceito de manufatura celular. Não foi encontrado um valor padrão adotado por outros autores que utilizam este indicador, como Chu e Tsai (1990) e Massote (2006). Logo, o percentual de 11% é considerado baixo e viabiliza a aceitação da formação das células propostas. Quanto menor o percentual de elementos de exceção melhor será o resultado da EBD formada.

2.4.2 Percentual de utilização de máquinas - %MU (*Machine Utilization*)

Este indicador de desempenho foi desenvolvido por Chandrasekharan e Rajagopalan (1986). Serve para mensurar o percentual de utilização de máquinas para a produção das peças da célula.

O percentual de utilização de máquinas (*machine utilization*) é calculado baseado na quantidade de “vazios” contidos na Estrutura Bloco Diagonal. Cada “vazio” indica que a peça i não utiliza a máquina j .

A equação abaixo a seguir indica como é calculado este percentual:

$$\%MU = \frac{\text{número de elementos "1" dentro da EBD}}{\text{número total de elementos da EBD}}$$

Exemplificando, para o cálculo da matriz da Figura 22, tem-se:

$$\%MU = \frac{16}{20} = 80\%$$

Para este indicador, o elevado percentual de utilização de máquinas significa que as máquinas estão com uma boa margem de capacidade de processamento sendo utilizado nas células, ou seja, não há subutilização. Recomenda-se um percentual igual ou superior a 80% para que seja considerado bom.

2.4.3 Eficiência de agrupamento - %GE (*Grouping Efficiency*)

Segundo Chu e Tsai (1990), o indicador de eficiência de agrupamento mede o resultado agregado dos dois indicadores anteriores, ou seja, leva em consideração tanto o percentual de elementos de exceção quanto o de utilização de máquinas.

O %GE utiliza um peso α para balancear a atribuição do grau de importância para o percentual de elementos de exceção e para a utilização de máquinas.

A equação abaixo indica como é calculado este percentual:

$$\%GE = \alpha \left(\frac{n1}{nT1} \right) + (1 - \alpha) \left(\frac{n2}{nT2} \right)$$

Onde:

α = fator de peso

$n1$ = número de elementos “1” dentro da EBD;

$nT1$ = número total de elementos dentro da EBD;

$n2$ = número de elementos “0” fora da EBD;

$nT2$ = número total de elementos fora da EBD;

Exemplificando, para o cálculo da matriz da Figura 22, considerando $\alpha = 0.5$, têm-se:

$$\%GE = 0,5 \left(\frac{16}{20} \right) + (1 - 0,5) \left(\frac{18}{20} \right) = 85\%$$

Um percentual alto para este indicador, como o apresentado para a matriz da Figura 22, indica que é um resultado considerado satisfatório. Recomenda-se um percentual acima de 70% para este indicador.