

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE CÉLULAS DE MANUFATURA

Nelson Carvalho Maestrelli

Universidade Metodista de Piracicaba, Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção,
Rodovia S.Bárbara-Iracemapolis, Km1, CEP 13450-000
Santa Bárbara Doeste SP, Brasil

Antonio Batocchio

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica
Departamento de Fabricação, CP. 6122, CEP 13083-970
Campinas SP, Brasil

Resumo. *A manufatura celular tem sido utilizada com intensidade crescente na indústria brasileira, a partir da segunda metade da década de 80. Considerada como um dos primeiros passos para a modernização das empresas rumo ao estágio de “manufatura classe mundial” ou “lean production”, a utilização de células de manufatura é particularmente aplicada à fabricação em lotes, para redução de tempos improdutivo. O projeto de células de manufatura apresenta algumas etapas críticas, cujos resultados têm influência direta sobre o seu desempenho. Estas etapas são : a identificação dos agrupamentos que definirão as peças e máquinas e suas relações de similaridade; a escolha e o dimensionamento dos equipamentos, e o estudo das condições de balanceamento de cada célula. Este trabalho apresenta uma proposta de projeto para células de manufatura baseada nos princípios de “cluster analysis” e formulação matricial, composta de dois conjuntos de indicadores, para avaliação de seu desempenho. Estes conjuntos são aplicados para avaliar a solução adotada para o projeto original das células e monitorar o seu funcionamento e grau de utilização ao longo do tempo. O trabalho inclui estudo de caso, realizado em empresa fabricante de autopeças da região de Campinas SP, que utiliza manufatura celular em seu ambiente produtivo.*

Palavras-chave: *Manufatura celular, Tecnologia de Grupo, Análise de Agrupamentos*

1. INTRODUÇÃO

A avaliação do desempenho de células de manufatura tem sido estudada por vários pesquisadores. Entretanto, estes trabalhos sempre consideram diferentes aspectos para medir o desempenho de células.

A maior parte das publicações existentes efetua comparações entre o desempenho de sistemas celulares de produção e os arranjos físicos funcionais ou por processo (Burbidge, 1992); (Kusiak, 1990); (Jha, 1991), salientando neste caso, as significativas melhorias obtidas nas células relativas principalmente às condições de fluxo de peças e redução de tempos de processamento. Comparativamente, poucas publicações apresentam propostas que avaliam o desempenho das células em relação às suas condições de projeto. Detecta-se uma carência de ferramentas de análise que permitam verificar o quanto as condições cotidianas de uso das células se aproximam das condições ideais de projeto.

Este trabalho apresenta uma proposta de avaliação de desempenho de células de manufatura que se baseia em análise de agrupamentos e formulação matricial. Tal proposta utiliza indicadores que comparam as condições de projeto das células às condições de uso.

No ítem seguinte é apresentada uma revisão bibliográfica sobre este tema e o modelo de avaliação proposto é apresentado.

2. CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM MANUFATURA CELULAR

O trabalho de (Aurrecochea et al., 1994) propõe que a análise de desempenho seja orientada para as células em função das prioridades definidas pela manufatura: qualidade, custo, flexibilidade e prazos de entrega. Desse modo, propostas de melhorias devem estar relacionadas com estas prioridades, com o objetivo de priorizar programas.

A tabela 1 seguinte apresenta as principais variáveis a serem consideradas na avaliação dos sistemas celulares e que devem ser relacionadas às prioridades da manufatura.

Tabela 1 . Características dos Sistemas celulares considerados na avaliação do desempenho (Aurrecochea et al., 1994)

<i>Aspecto de Funcionamento</i>	<i>Fatores Considerados</i>
Projeto e Instalação das Células	famílias de peças grupos de máquinas tipos de máquinas (processos) tipo e número de agrupamentos roteiro e arranjo físico ferramental fluxo intercelular e sistemas de transporte
Dinâmica de Funcionamento	tempos de processamento tempos de preparação tempos de saída inventário em processo utilização de máquinas
Organização do Trabalho	estrutura dos grupos relacionamento com chefia nível de coordenação e autonomia inspeção / manutenção
Planejamento e Controle de Produção	níveis de estoque coleta de dados e tamanhos de lote sistemas computacionais de apoio

O trabalho de (Gupta, 1993) relaciona o nível de desempenho da célula à sua flexibilidade em relação ao número de roteiros de fabricação alternativos que o projeto do sistema permite. Não considera outros aspectos além deste, o que dificulta sua aplicação.

O trabalho de (Aurrecochea et al., 1994) apresenta uma proposta de avaliação construída sobre as atividades realizadas em 15 empresas americanas usuárias de manufatura celular. Esta proposta analisa as medidas utilizadas por estas empresas e estrutura um modelo de avaliação que considera : flexibilidade, produtividade, qualidade, lucro, benefícios pessoais e manutenção.

A seleção sobre quais indicadores e medidas devem ser usados em cada caso varia em função do aspecto a ser priorizado. A tabela 2 apresenta o modelo geral usado nesta proposta.

Tabela 2. Indicadores e medidas de desempenho para sistemas celulares (Aurrecoechea et al., 1994)

<i>Indicador de desempenho</i>	<i>Medidas utilizadas</i>
Produtividade	Absenteísmo, Tempo de Ciclo, Tempo de Processamento, Tempo de Transporte
Flexibilidade	Tamanho de lote, Tempo de preparação, tamanho de lote de produção e lote de transferência
Qualidade	Retorno do cliente, Tempo de inspeção, Refugo e Retrabalho
Lucro	Custos diretos, indiretos, administrativos e giro de inventário
Benefícios pessoais	Absenteísmo, Sugestões de melhorias, Moral da equipe
Manutenção	Paradas de máquinas, manutenção preventiva e corretiva

As medidas utilizadas nos modelos apresentados permitem avaliar o estágio de funcionamento das células, mas a inexistência de valores limite dificulta a comparação entre os estágios de funcionamento das células e as condições de projeto para as quais elas foram dimensionadas.

A proposta apresentada neste trabalho, detalhada no item seguinte, procura considerar tanto os aspectos citados nestes modelos, como avaliar comparativamente as células em relação às suas condições de projeto.

3. PROPOSTA DE SISTEMA DE AVALIAÇÃO BASEADA EM ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS

O sistema de avaliação proposto neste trabalho tem por objetivo principal comparar as condições de uso das células à situação ideal para a qual elas são projetadas. Para isso, são utilizados dois conjuntos de medidas, denominados medidas de caracterização e medidas de eficiência de agrupamentos.

Como este conjunto de medidas baseia-se na modelagem de projeto de células de produção usando formulação matricial, é necessário especificar como as células são representadas neste modelo.

3.1. Representação de Células de Manufatura utilizando formulação matricial

A representação de uma determinada célula é feita utilizando matrizes de incidência peças (componentes) x máquinas . A regra para representação do registro de operações (processamento de peças em máquinas) é dada pela definição dos elementos da matriz de incidência MI. Considerando a_{ij} o elemento da matriz de incidência MI , ele pode assumir os seguintes valores :

- 0, quando a peça i não sofre operação na máquina j
- 1, quando a peça i sofre operação na máquina j

A figura seguinte (figura 1) apresenta um exemplo de matriz de incidência composta por dois agrupamentos, que definem as peças e máquinas componentes de duas células de manufatura.

		MÁQUINAS						
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
PEÇAS	P1	1	1	1	1	0	0	0
	P2	0	1	1	1	0	0	0
	P3	1	1	1	1	0	0	0
	P4	1	0	1	1	0	0	0
	P5	0	0	0	0	1	1	1
	P6	0	0	0	0	0	1	1
	P7	0	0	0	0	1	0	1
	P8	0	0	0	0	1	1	1
	P9	0	0	0	0	1	1	1

Figura 1- Matriz de incidência para células de manufatura

No exemplo, a célula formada pelas máquinas M1, M2, M3 e M4 processa a família de peças formada pelas peças P1, P2, P3 e P4. A célula formada pelas máquinas M5, M6 e M7 processa as peças P5, P6, P7, P8 e P9.

Com base na representação de células utilizando-se matrizes de incidência, o sistema de avaliação proposto neste trabalho se estrutura.

3.2. Conjunto de Medidas para Caracterização das Células

Para caracterizar o projeto de células é necessário considerar o número de elementos do sistema produtivo, representado pelas dimensões da matriz de incidência (MI). Para uma MI de dimensões $M \times N$, o número de peças será dado por M e o número de máquinas será determinado por N .

A densidade da matriz caracteriza o número de elementos existentes, diferentes de zero. Para efeito de agrupamento em células, o valor da densidade é um parâmetro importante de avaliação: quanto maior o número de elementos, maior a densidade e portanto, mais difícil se torna a tarefa de agrupar os elementos (que representam as peças e máquinas do sistema produtivo) e formar as células.

O número de agrupamentos deve ser proporcional às dimensões da MI que representa o sistema produtivo. Agrupamentos com número excessivo de peças e máquinas, bem como grupos com número de elementos desproporcionais levam a soluções de arranjo físico para as células que não proporcionam condições adequadas de fluxo.

Assim, caracterizar o projeto de células a partir destas informações é fundamental para verificar sua viabilidade.

A tabela 3 seguinte apresenta o conjunto de medidas de caracterização utilizados no sistema de avaliação proposto neste trabalho, bem como as condições consideradas ideais para o projeto de células em relação aos parâmetros usados: dimensões $M \times N$, número de agrupamentos P e densidade da matriz de incidência ρ .

Tabela 3 : Medidas de Caracterização para o Projeto de Células

<i>Conjunto de Medidas de Caracterização</i>	<i>Condições Ideais de Projeto</i>
Dimensões da MI (M x N)	Quanto maior o número de elementos da MI, maior a dificuldade em encontrar os agrupamentos que originam as células. Como valor orientativo, estima-se que uma relação M / N (número de peças / número de máquinas) entre 5 e 10, deve proporcionar facilidade na identificação de agrupamentos.
Número de Agrupamentos P	Deve haver proporcionalidade entre o número de agrupamentos gerados por uma solução de projeto, tanto entre si como em relação ao número total de elementos de MI.
Densidade da Matriz ρ	Calculada através da relação $NU / (M \times N)$, onde : NU : número de elementos “1” da MI M x N : número de elementos de MI Valores de ρ até 0,3 são considerados ideais para conseguir boas soluções de projeto; Valores de ρ no intervalo compreendido entre 0,3 e 0,5 significam possibilidades menores de sucesso; Valores de ρ maiores que 0,5 indicam grande dificuldade em encontrar soluções adequadas.

Os valores definidos na tabela 3 são apenas orientativos. Baseiam-se na experiência acumulada em projetos para implantação de células através de formulação matricial e identificação de agrupamentos (Batocchio & Maestrelli, 1997).

Uma vez caracterizada a solução encontrada, deve-se analisar a eficiência dos agrupamentos gerados. Para isso, é necessário apresentar as possíveis soluções de projeto que a análise para identificação de agrupamentos pode gerar.

3.3. Conjunto de Medidas para Eficiência de agrupamentos

Para se obter, a partir de um determinado conjunto de dados, as condições para identificação dos grupos que formam as células, é necessário aplicar um algoritmo de agrupamento. Existem muitos algoritmos que podem ser utilizados (Correia Filho, 1998). A figura 2 seguinte apresenta as possíveis soluções (a) e (b), que podem ser geradas quando se aplica sobre os dados de uma matriz MI, um determinado algoritmo.

Desse modo, a solução de projeto sob aspecto da eficiência dos agrupamentos obtidos, considera que quanto mais a solução encontrada se aproximar da condição ideal (grupos mutuamente exclusivos), melhor será a solução.

Para medir esta eficiência são utilizados quatro parâmetros, que compõem o conjunto de medidas de eficiência de agrupamentos.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
P1	1	1	1	0	0	0
P2	1	1	0	0	0	0
P3	1	1	1	0	0	0
P4	1	0	1	0	0	0
P5	0	0	0	1	1	1
P6	0	0	0	1	0	1
P7	0	0	0	0	1	1

(a)

Solução perfeita : grupos mutuamente exclusivos e sem elementos de exceção configuram estrutura bloco diagonal perfeita

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
P1	1	1	1	0	0	0
P2	1	1	0	0	0	0
P3	1	1	1	0	0	0
P4	1	0	1	0	0	1
P5	0	0	1	1	1	1
P6	0	0	0	1	0	1
P7	0	0	0	0	1	1

(b)

Solução imperfeita : grupos parcialmente separáveis e com 2 elementos de exceção configuram estrutura bloco diagonal incompleta

Figura 2. Tipos de soluções encontradas em identificação de agrupamentos a partir de formulação matricial

A medida de eficiência GE (Chandrasekharan & Kumar, 1990), o percentual de elementos de exceção %EE (Chu & Tsai, 1990), a medida de proporcionalidade MPA e a medida de ocupação matricial MOM estão definidos a seguir :

$$GE (\text{eficiência de agrupamento}) = q \times (N1 / NT1) + (1-q) \times (N2 / NT2)$$

onde :

q = 0,5 (fator de peso considera como igualmente importantes para a eficiência da solução as duas parcelas que compõem a medida)

N1 : número de elementos "1" dentro dos grupos da MI;

NT1 : número total de elementos dentro dos grupos da MI;

N2 : número de elementos "0" fora dos grupos da MI;

NT2 : número total de elementos fora dos grupos da MI.

%EE (percentual de elementos de exceção) = NE / NTE

NE : número de elementos "1" fora dos blocos de MI;

NTE : número total de elementos "1" da matriz MI.

MPA (medida de proporcionalidade dos agrupamentos gerados)

$$MPA = \sum_{k=1}^p \left| a_k \cdot b_k - \left(\frac{m \cdot n}{p^2} \right) \right| ; \text{ onde :}$$

p: número de agrupamentos gerados pela solução;
 a_k e b_k : são as peças e máquinas que formam o k-ésimo agrupamento;
m e n : são as dimensões da MI;

MOM (medida de ocupação matricial)

$$MOM = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{k=1}^p a_k \cdot b_k ; \text{ onde :}$$

p: número de agrupamentos gerados pela solução;
 a_k e b_k : são as peças e máquinas que formam o k-ésimo agrupamento;
m e n : são as dimensões da MI.

A tabela 4 seguinte apresenta as condições consideradas ideais de projeto, envolvendo as medidas de eficiência de agrupamentos.

Tabela 4. Valores Ideais para o conjunto de medidas de eficiência de agrupamentos

<i>Conjunto de Medidas de Eficiência</i>	<i>Condições Ideais de Projeto</i>
GE (Medida de Eficiência de Agrupamento)	Como valor orientativo, estima-se que valores de GE acima de 0,9 indicam soluções adequadas. GE =1.0 indica solução perfeita
%EE (Percentual de elementos de exceção)	%EE = 0 indica solução perfeita
MPA (Medida de Proporcionalidade dos agrupamentos)	MPA = 0 indica melhor condição de proporcionalidade (todos os grupos gerados com mesmas dimensões)
MOM (Medida de Ocupação Matricial)	MOM = 1/P indica a melhor condição de ocupação (inversamente proporcional ao número de agrupamentos gerados)

Os valores de GE, %EE, MPA e MOM formam o conjunto de medidas para avaliar a eficiência de agrupamentos que serão utilizados neste trabalho, tanto para verificar o projeto original das células como para comparar as suas condições de utilização à condição ideal.

No item seguinte deste trabalho é apresentado estudo de caso de aplicação do sistema proposto em uma empresa fabricante de autopeças que utiliza células de manufatura.

4. APLICAÇÃO DO SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE CÉLULAS DE MANUFATURA

A empresa estudada possui várias unidades. Os dados analisados neste trabalho referem-se à unidade onde existem 10 células de manufatura, compostas por máquinas ferramentas de usinagem (aproximadamente 100 máquinas), envolvendo a fabricação de cerca de 50 diferentes componentes (discos de freio).

A figura 3 apresenta a subfábrica II ,de discos de freio para veículos leves. Esta subfábrica foi estudada durante três meses, para avaliação de suas condições cotidianas de funcionamento e comparação com as condições de projeto.

PEÇAS																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
M1	1	1	1																			
M2	1	1	1																			
M3	1	1	1																			
M4	1	1																				
M5	1	1	1																			
M6				1																		
M7					1																	
M8	1			1																		
M9	1	1	1																			
M10				1	1	1	1															
M11				1	1	1	1															
M12				1	1	1	1															
M13				1	1	1	1															
M14				1	1																	
M15				1	1																	
M16				1	1	1	1															
M17				1	1	1	1															
M18				1	1																	
M19				1	1	1	1															
M20								1	1	1	1	1										
M21								1	1	1	1	1										
M22								1	1	1	1	1										
M23								1	1	1	1	1										
M24								1	1	1	1	1										
M25								1	1													
M26								1	1	1	1	1										
M27													1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
M28													1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
M29													1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
M30													1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
M31													1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
M32													1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 3. Matriz de incidência da subfábrica II : Células de manufatura para veículos leves

A tabela 6 apresenta os resultados para os conjuntos de medidas de caracterização e eficiência de agrupamentos para a subfábrica II.

As medidas de caracterização e de eficiência foram realizadas para as condições de projeto original (PI) e para três meses consecutivos de trabalho nestas células (identificados por T1, T2 e T3). Foi incluída na tabela a condição teórica ideal para a MI considerada, de acordo com as considerações sobre faixas de valores adequadas, feitas nos itens 3.2 e 3.3. deste trabalho.

Nos meses analisados, nem sempre todas as peças de cada agrupamento foram produzidas, causando diferenças para os valores encontrados nas medidas de avaliação de desempenho.

Tabela 6 : Resultados da avaliação das condições de projeto das células da subfábrica II

AVALIAÇÃO	CARACTERIZAÇÃO				EFICIÊNCIA DE AGRUPAMENTO			
	M x N	M / N	ρ	P	GE	%EE	MPA	MOM
Medida								
Período T1	12x30	2,50	0,23	4	0,99	0	91	0,24
Período T2	12x32	2,67	0,23	4	0,98	0	101	0,23
Período T3	10x32	3,20	0,21	4	0,93	0	79	0,23
Projeto Original (PI)	22x32	1,45	0,21	4	0,98	0	46	0,23
Condições Ideais para MI	-----	(5 a 10)	< 0,3	---	> 0,9	0	0	0,25

Sempre que uma peça da célula não é produzida em um período, ou que uma máquina não é utilizada conforme previsto no projeto original, considera-se que o seu desempenho fica afetado, pois a célula não está sendo utilizada conforme seu projeto original.

Outros aspectos devem ser analisados nesta avaliação : as quantidades variáveis das peças produzidas, as cargas de máquinas e as condições de balanceamento.

Neste trabalho, tal análise não será realizada, mas sua consideração é fundamental para complementar a avaliação do desempenho das células, sob o aspecto das suas condições dinâmicas de funcionamento.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Através dos valores encontrados na Tabela 6, verifica-se que quando as células trabalham sob condições diferentes das especificadas em projeto, seu desempenho, de acordo com as medidas apresentadas, sofrerá alterações. Nem sempre estas alterações significarão diminuição do rendimento planejado. No caso do mês T1, por exemplo, o valor da medida GE foi superior ao da condição de projeto. No entanto, para todas as situações analisadas, a proporcionalidade dos agrupamentos (medida através de MPA) sempre apresenta valores mais distantes da situação ideal.

O que ocorre nestes casos é que a própria configuração da MI original se altera, em função das modificações que os programas de produção sofrem mensalmente. Em alguns casos, um agrupamento pode transformar-se em uma linha produtiva de uma única peça, descaracterizando a célula.

O conjunto de medidas utilizado mostra que, à medida em que as condições de utilização das células se distanciam da condição original de projeto, os valores dos parâmetros se distanciam das faixas consideradas adequadas.

Esta análise, baseada no sistema de avaliação proposto neste trabalho, mostra que é necessário monitorar constantemente o funcionamento das células para que suas condições de trabalho cotidianas não sejam completamente distintas das condições de projeto.

Estas diferenças, reveladas pelas medidas utilizadas, pode levar a problemas principalmente na dinâmica de funcionamento das células, quanto às questões de dimensionamento e balanceamento dos equipamentos e máquinas.

Não é objetivo deste trabalho avaliar estas condições, mas devem ser associadas ao modelo proposto, medidas de avaliação que verifiquem o comportamento dinâmico das células sob estes aspectos.

6. CONCLUSÃO

O sistema de avaliação proposto neste trabalho permite monitorar o funcionamento de células de manufatura, para verificar se suas condições de funcionamento estão próximas das condições de projeto, para as quais foram planejadas.

Este diagnóstico é importante, pois permite, quando associado à avaliação da dinâmica de funcionamento (dimensionamento e balanceamento), avaliar o desempenho das células e concluir sobre seu potencial de utilização. Isto permitirá às empresas que investem em projetos de células e modificações de arranjo físico, monitorar a utilização das células para que elas sejam utilizadas em seu pleno potencial.

Desse modo, garante-se que os benefícios da manufatura celular sejam atingidos.

REFERÊNCIAS

- Aurrecoechea, et al., 1994, The evaluation of manufacturing cell designs, International Journal of Operations and Production Management, vol.14, n.1, pp 60-74.
- Batocchio & Maestrelli, 1997, Um método para identificação de agrupamentos em manufatura celular, Anais do XVII Enegep e 3rd. International Congress of Industrial Engineering, Outubro, 1997, Gramado, CD Rom.
- Burbidge, 1992, Change to group technology: process organization is obsolete, International Journal of Production Research, vol. 30, n.5, pp. 1209-1219.
- Chandrasekharan & Kumar, 1990, Grouping Efficacy: a quantitative criterion for goodness of block diagonal forms of binary matrices in group technology, International Journal of Production Research, vol. 28, n.28, pp233-243.
- Chu & Tsai, 1990, A comparison of three array-based clustering techniques for manufacturing cell formation, vol. 28, n.28, pp1417-1433.
- Correia Filho, A . N., 1998, Proposta de um método para identificação do ferramental de grupo baseado em análise de agrupamentos, Tese (Mestrado), Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara Doeste, 1998. 91p.
- Gupta, 1993, Design of manufacturing cells for flexible environment considering alternative routing, International Journal of Production Research, vol. 31, n.6, pp1259-1274.
- Jha, N. K. 1991, Handbook of Flexible Manufacturing Systems, Academic Press Inc. 328p.
- Kusiak, A . , 1990, Intelligent Manufacturing Systems, Prentice Hall, 443p.

PERFORMANCE ANALYSIS OF MANUFACTURING CELLS

Abstract. Cellular manufacturing has been used more frequently in Brazilian industries since the second half of 80's. The cellular systems are considered the first step to world class manufacturing or lean production. This kind of production system is very adequate to job shops to reduce times. The design of manufacturing cells has some critical phases: the clusters identification, the definition of similarity degrees and the machine tools selection are the most important of them. This paper proposes a method based on cluster analysis and matrix formulation that uses two sets of measures to evaluate cell design. This evaluation system is used to compare the preliminary conditions of cell design with the actual design. The paper includes a case study in a Brazilian automotive parts industry that uses manufacturing cells.

Key words : cellular manufacturing - cell design - group technology - performance analysis