

Sumário

Lista de figuras	ii
Lista de tabelas	ii
1 Sistemas Integrados de Manufatura	1
1.1 Introdução	1
1.2 Tecnologia de Grupo	2
1.2.1 Inspeção Visual	3
1.2.2 Classificação e Codificação	3
1.2.2.1 Classificação	4
1.2.2.2 Sistema de Codificação	5
1.2.3 Análise do Fluxo de Produção (PFA)	5
1.2.4 Máquina - Peça	7
1.2.5 Algoritmos Aplicados em Tecnologia de Grupo	11
1.2.5.1 Rank Order Clustering (ROC)	11
1.2.5.2 Directive Clustering Analysis (DCA)	14
1.2.5.3 Cluster Identification Algorithm (CIA)	16
1.2.5.4 Modelos de Programação Inteira	18
distância absoluta	18
distância euclidiana	18
distância ponderada	18
distância de Hamming	19
1.2.6 Medidas de desempenho	23
1.2.6.1 Porcentagem de Elementos Excepcionais - PE	23
1.2.6.2 Utilização das máquinas - MU	23
1.2.6.3 Eficiência de Agrupamento - GE	24
1.2.6.4 Aplicação aos problemas	24
1.2.7 Considerações	24
1.3 Células de Manufatura	25
1.3.1 Definições	25
1.3.2 Classificação	26
1.3.2.1 Quanto ao Tipo	26

	Célula por Produto	26
	Célula por Processo	26
	Célula por Tecnologia de Grupo	27
1.3.2.2	Quanto ao grau de automação	27
	Célula com Máquina Única	27
	Célula com Movimentação Manual	27
	Células com Movimentação Semi-integrada	28
	Sistema Flexível de Manufatura (FMS)	29
1.3.3	Benefícios	29
1.3.4	Quando a Estrutura Celular é Recomendada	30
1.3.5	Áreas e Atividades da Empresa Afetadas pela Implantação	31
1.3.5.1	Engenharia do Produto	32
1.3.5.2	Programação, Produção, Controle de Estoques e Sistemas Computacionais	32
1.3.5.3	Controle da Qualidade	33
1.3.5.4	Entrada de Pedidos, Vendas e Mercado	33
1.3.5.5	Recursos Humanos	34
1.3.5.6	Contrato de Trabalho, Plano de Carreira e Remuneração	34
1.3.5.7	Outras Áreas	35
1.3.6	Etapas de um Projeto de Célula de Manufatura	35
1.3.7	Cuidados ou Problemas que podem surgir com a implantação	37
1.3.8	Uma Análise da Abordagem Atual	38
1.3.8.1	Células de Remanescentes ou <i>Fractional Cells</i>	41
1.3.8.2	A Importância da Consideração das Demandas e dos Tempos de Processamento nos Projetos de Células de Manufatura	43
1.3.8.3	Algoritmos que Consideram as Demandas, as Sequências de Operações e os Tempos de Processamento como Critério para a Formação de Famílias e Células	44
1.3.8.4	A Ligação entre a Tecnologia de Grupo e o Projeto de Células de Manufatura	46

Capítulo 1

Sistemas Integrados de Manufatura

Material baseado na Tese de Doutorado de
Alexandre Augusto Massote,
apresentada no
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da USP
em novembro de 20001

1.1 Introdução

Várias empresas vêm buscando uma melhoria na competitividade introduzindo novas estruturas de produção e novas tecnologias de manufatura. Percebe-se, para tanto, um grande enfoque quanto ao processo, métodos, *lay-out*, automação, fluxos, movimentação e outros voltados diretamente à produção. A Célula de Manufatura é uma destas estruturas que vem sendo largamente empregada pelas empresas e, se bem implementada, propicia resultados significativos. Vale observar que a implantação de Células de Manufatura requer o desenvolvimento de uma série de etapas, tais como, estudos relativos à Tecnologia de Grupos, estudos relativos à Organização do Trabalho e à Programação da Produção, pois, quando se muda a estrutura da produção deve-se também mudar ao mesmo tempo a estrutura de planejamento e programação da produção e a estrutura do trabalho, pois as competências requeridas, as redefinições de responsabilidade, a abrangência de atuação, as relações de hierarquia e o processo decisório devem estar harmoniosamente compatíveis com a estrutura e a tecnologia de manufatura selecionadas. Mas, muitas vezes estas fases são negligenciadas e como consequência a implantação das Células não traz os resultados esperados.

A aplicação da Tecnologia de Grupo é uma das fases mais importantes no projeto de células de manufatura. A Tecnologia de Grupo pode ser considerada como sendo uma filosofia gerencial que busca o agrupamento de máquinas em células e de peças em famílias em função das similaridades existentes entre os produtos ou peças e/ou pelas características de manufatura. As células de manufatura segundo HERAGU [14] podem ser definidas como uma aplicação da Tecnologia de Grupo, onde a estrutura de produção é organizada em células de máquinas, ou processos, e cada célula é projetada para fabricar uma certa família

de peças. Estes conceitos têm sido aplicados em vários ambientes de manufatura e os principais benefícios alcançados são: redução dos tempos de *setup*, redução dos estoques de produtos semi-acabados, redução dos custos e tempos de movimentação, melhoria da qualidade, simplificação dos fluxos de materiais, simplificação dos sistemas de controle e melhoria da motivação dos operadores.

A maioria dos algoritmos de Tecnologia de Grupo baseiam-se somente nos atributos de fabricação necessários para a produção das peças consideradas, onde as operações necessárias de cada peça em cada máquina podem ser representadas na forma de uma matriz binária, chamada matriz de incidência.

Esta abordagem simplifica bastante a obtenção da solução, mas existem outros aspectos fundamentais que devem ser considerados nos projetos de células de manufatura tais como: capacidades das máquinas, tempos de processamento de cada peça em cada máquina, seqüência de operações de cada peça e as demandas a serem atendidas de cada peça. Entretanto, a maioria dos algoritmos encontrados na literatura não leva estes fatores em consideração e assim, se aplicados em projetos de células de manufatura, podem gerar soluções que levem a configurações de baixa eficiência. HERAGU [14] em seu trabalho alerta sobre este fato e defende a idéia de que uma nova classificação dos algoritmos de Tecnologia de Grupo deve ser feita, e assim propõe uma composta por dois grupos: O primeiro seriam os algoritmos de agrupamento propriamente dito e o segundo seriam os algoritmos específicos para aplicação em projetos de células de manufatura.

Várias pesquisas têm sido desenvolvidas na busca de metodologias eficientes para a formação de células de manufatura e algumas procuram incorporar os aspectos fundamentais mencionados anteriormente. Para tanto, são usadas a programação matemática, heurística, métodos gráficos, inteligência artificial, redes neurais, lógica *fuzzy* entre outras.

Este capítulo tem como foco central o apoio à decisão, na interface entre a aplicação da Tecnologia de Grupo e o Projeto de Células de Manufatura. Apresenta os principais enfoques dados ao problema de agrupamento e as medidas de desempenho mais usadas para avaliá-los, as etapas que devem ser consideradas em um projeto de célula de manufatura e as áreas e atividades da empresa que são afetadas por sua implantação.

1.2 Tecnologia de Grupo

A Tecnologia de Grupo (GT) é um enfoque moderno aplicado ao estudo de sistemas de manufatura que vem sendo utilizado por muitas indústrias tais como *jobshops* e de produção tipo *batch*. Destaca-se a sua importância nos projetos de células de manufatura. Tradicionalmente, para a organização dos sistemas de produção em massa, eram usados arranjos em linha e para outros tipos de produção arranjos por processos. Nestes tipos de estruturas, a redução dos tamanhos dos lotes poderia acarretar uma elevação dos custos devido, entre outros, ao incremento dos custos de *setup*. A Tecnologia de Grupo invalidou esta relação, obtendo economias mesmo para pequenos lotes. A GT é, portanto, uma técnica que propicia a melhoria da produtividade em sistemas de produção, obtendo-se benefícios significativos

tais como: redução de ciclos de fabricação, redução de material em processo, confiabilidade nos prazos de entrega, menor movimentação de materiais entre outros.

O problema básico na Tecnologia de Grupo é a identificação de células de máquinas e famílias de peças. Sendo assim, procura-se identificar e explorar as similaridades dos produtos, ou peças, e processos de manufatura. Existem três maneiras para o reconhecimento de semelhanças, ou similaridades, de peças segundo GROOVER [10]:

- Inspeção Visual;
- Classificação e Codificação;
- Análise do Fluxo de Produção.

Outras Técnicas de Análise para formação de famílias e células tais como as de KING e NAKORNCHAL [17] e KUSIAK [18], baseadas nos atributos de fabricação, ou operações necessárias para a fabricação de uma família, têm sido desenvolvidas desde a análise do fluxo de produção proposta por BURBIDGE [3], e são chamadas de:

- Máquina - Peça

Esta é a abordagem de agrupamento mais utilizada, atualmente, para o projeto de células de manufatura.

1.2.1 Inspeção Visual

É o método mais simples e o menos dispendioso. A classificação das peças em uma família é feita por análise visual diretamente nas peças ou através de seus desenhos ou fotografias. É considerado o menos preciso e eficiente de todos pois tem uma dependência muito grande da habilidade e experiência do analista. A sua utilização em aplicações práticas atualmente é muito restrita, face ao melhor desempenho e eficiência dos outros métodos e portanto é considerada como uma referência histórica.

1.2.2 Classificação e Codificação

Este método é de todos, o que requer maior tempo e mão de obra e também o mais complicado de se aplicar. Muitos sistemas têm sido desenvolvidos pelo mundo mas nenhum tem sido universalmente adotado. Uma das razões é que o sistema de classificação e codificação deve ser customizado para cada empresa ou aplicação. Os principais benefícios alcançados após a implantação de um projeto bem desenvolvido de classificação e codificação são relacionados por HAM [11]:

- facilita a formação de famílias de peças e de células de máquinas;
- permite atualização rápida de projetos, desenhos e planos de processo;

- reduz a duplicação de desenhos;
- fornece estatísticas confiáveis sobre as operações necessárias;
- facilita a estimativa exata das ferramentas e a lógica de carregamento;
- permite a racionalização dos dispositivos, reduzindo os tempos de *setups* e o tempo total de fabricação;
- permite a racionalização e a melhoria dos projeto das ferramentas;
- facilita a elaboração dos planos de produção e da programação da produção;
- melhora as estimativas de custo e facilita os procedimentos da contabilidade;
- fornece a melhor utilização de ferramentas e a melhor ferramenta, dispositivos de fixação e operadores a serem usados;
- facilita a programação de controle numérico.

A implantação de um sistema deste tipo, traz como consequência imediata na área de projeto do produto, a geração de peças similares às já existentes e já identificadas pelo código. A geração de catálogos de formas semelhantes, de funções e componentes compostos obriga o projetista a utilizar-se de peças já projetadas, uma vez que, havendo facilidade de recorrência e padronização, se consegue eliminar horas de projeto e evitar diversificação de peças e consequentemente estoques, ferramentas e dispositivos (SÉRIO [29]).

1.2.2.1 Classificação

A classificação dos componentes é feita baseada nos seguintes critérios:

1. **Classificação sem orientação específica:** A identificação dos componentes é feita por uma sequência numérica sem um significado específico. A aplicação de Tecnologia de Grupo se restringe à formação de famílias de componentes similares em forma. As famílias são por si só determinadas;
2. **Classificação orientada para projeto:** É feita pelas características que possibilitem identificar famílias de peças pelos atributos de projeto. Esta classificação pode não ser útil sob o ponto de vista de manufatura mas facilita o controle e a recorrência a desenhos, permitindo sua racionalização, simplificação e padronização. Apenas similaridades de formas ou dimensões identificadas por atributos de projeto, não irão garantir que as peças pertencerão a uma mesma família de fabricação
3. **Classificação orientada para processo:** Os componentes que requerem tecnologia semelhante de fabricação ou sequência de operações são classificados na mesma categoria.

4. **Classificação orientada para o fluxo de fabricação:** As peças são da mesma família quando pela análise da ordem de fabricação têm o mesmo fluxo para a fabricação. Após as peças serem agrupadas em famílias pela similaridade de seus códigos, selecionam-se as máquinas necessárias a sua fabricação, ou seja, define-se a célula.
5. **Classificação orientada para o produto:** As peças são codificadas de modo que indiquem o produto a que pertencem. Para a Tecnologia de Grupo esta classificação não se aplica.

1.2.2.2 Sistema de Codificação

Os sistemas de codificação permitem um exame completo de todas as peças ativas no processo de formação de famílias de peças, permitindo a formação independente da origem ou uso da peça. Os códigos são classificados de acordo com sua forma construtiva:

1. **Monocódigos:** É um código integrado, onde cada caractere do código precedente, qualifica o código seguinte. Têm a estrutura semelhante à estrutura em árvore, dividindo a população total em subgrupos.
2. **Policódigos:** Cada caractere é independente dos demais. Um ou mais símbolos são atribuídos a uma ou mais características previstas, para ocorrer em uma população de itens com necessidades específicas. São indicados para representação de informações não permanentes tais como tamanho do lote, consumo anual etc. Um policódigo orientado para processos expressaria custo, acabamento superficial, precisão, processo atual, lote, tempo de preparação etc. o objetivo deste tipo de código é a padronização de processo ou estabelecimento de processo alternativo.
3. **Híbridos ou Mistos:** São monocódigos pequenos interligados como um policódigo, visando aumentar sua capacidade. Como códigos deste tipo pode-se citar os sistemas Optiz e Miclass,

1.2.3 Análise do Fluxo de Produção (PFA)

É um método para identificar famílias de peças e associá-las a um grupo de máquinas. Não usa a classificação e codificação, portanto nenhum sistema de códigos e assim não usa o desenho das peças para identificar as famílias. Este método analisa a seqüência de operações e a rota de diferentes peças pelas máquinas em uma dada fábrica, e agrupa-as em função de suas rotas de fabricação serem idênticas ou semelhantes. Estes grupos formados são usados para a formação lógica da célula de máquinas. Como usa somente os dados de manufatura e não usa os desenhos das peças para a definição do agrupamento, este método pode gerar soluções com duas características indesejáveis. A primeira é que peças com geometrias muito diferentes podem requerer a mesma rota de processamento. E a segunda é que peças com geometrias semelhantes podem requerer rotas de fabricação muito diferentes. Outra

desvantagem deste método é que não fornece mecanismos para a racionalização das rotas de fabricação pois se baseia nas rotas já existentes para cada peça, não analisando se poderiam ser melhoradas ou otimizadas. Entretanto, alguns autores indicam que a melhor maneira de se introduzir a Tecnologia de Grupo em uma empresa é primeiro mudar para o arranjo físico celular com os métodos e processos já existentes, com o mínimo possível de investimentos em novos recursos e equipamentos. Sendo assim, pela sua relativa simplicidade este método é recomendável como o inicial para se introduzir a Tecnologia de Grupo na área de manufatura.

Os procedimentos para análise do fluxo de produção (PFA) podem ser organizados nos seguintes passos (GROOVER [10]):

- **Coleta de dados:** O primeiro passo é definir de todas as peças fabricadas quais serão consideradas no estudo. Pode-se desejar considerar todas as peças fabricadas, transformando toda a planta em estrutura celular ou pode-se querer considerar apenas uma parte das peças e como consequência adotar a estrutura celular para apenas uma parte da fábrica. Definida as peças, precisa-se somente de um número que identifique cada uma das peças consideradas e as suas respectivas seqüências de operações. É bom notar que após a determinação das famílias e células, outros dados devem ser considerados para um bom projeto de célula de máquinas tais como tamanho dos lotes, tempos padrões, produção anual entre outros.
- **Classificação das rotas de processo:** Classificar as peças em grupos de acordo com a similaridade de suas seqüências de operações. O procedimento é a separação das peças em vários pacotes e cada um destes pacotes é caracterizado pela similaridade das seqüências de operações. Ao final, cada pacote obtido corresponde a um grupo. A cada grupo formado deve ser dado um número que representará a família de peças obtida.
- **Tabela do fluxo de produção:** As peças e máquinas selecionadas no passo anterior devem ser colocadas agora em uma tabela onde as colunas representam as peças, e as linhas, as máquinas. Esta tabela permite uma boa visualização das relações entre as peças e as seqüências de operações necessárias.
- **Análise:** É o passo mais subjetivo e difícil e o mais importante para a obtenção de uma boa solução final. Baseado na tabela obtida no passo anterior, as linhas da tabela devem ser rearranjadas buscando-se deixar juntas, ou seja em linhas vizinhas, as peças que têm seqüência de operações idênticas ou similares. Os diferentes grupos de peças são indicados pelos blocos obtidos com este procedimento bem como o grupo de máquinas. Invariavelmente obtêm-se famílias de peças que necessitam de processamento em outro grupo. Estas peças devem ser analisadas para se verificar a possibilidade de uma revisão no processo de fabricação de modo que se consiga processá-la em um único grupo. Se não for possível esta peça deve continuar sendo fabricada em um processo convencional.

Como este método baseia-se nas seqüências de operações que foram elaboradas para um processo de fabricação diferente da estrutura celular, estas diferenças podem refletir-se na seqüência de operações da nova estrutura. Esta seqüência de operações pode ter passos que não são ótimos, ilógicos e desnecessários. Consequentemente o agrupamento final resultante da análise do último passo pode não ser ótima. Entretanto este método tem uma grande vantagem sobre os outros dois descritos anteriormente que é o pequeno tempo necessário para a sua aplicação.

1.2.4 Máquina - Peça

Esta é a abordagem de agrupamento mais utilizada, atualmente, para o projeto de células de manufatura. É uma extensão do método de análise do fluxo de produção (PFA) onde as operações necessárias para a fabricação das peças nas máquinas podem ser representadas na forma de uma matriz, chamada matriz de incidência.

A matriz de incidência $A = a_{ij}$ tem m linhas que representam as máquinas e n colunas que representam as peças. O elemento a_{ij} é igual a 1 se a peça j requer uma operação na máquina i e a_{ij} é igual a 0 quando não requer operação.

A Figura 1.1 mostra uma matriz de incidência com 10 máquinas e 12 peças.

		peças											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
m	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
á	2	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
q	3	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
u	4	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
i	5	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
n	6	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0
a	7	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0
s	8	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
	9	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0

Figura 1.1: Matriz de Incidência 1

Este é o ponto de partida para o desenvolvimento e implementação das várias técnicas para formação de células. O objetivo dos algoritmos de formação de famílias máquina - peça é rearranjar as linhas e colunas da matriz de incidência de tal maneira que a matriz resultante fique com todos os elementos iguais a "1" agrupados em blocos na diagonal, onde cada bloco na matriz rearranjada indica um grupo de peças e o correspondente grupo de máquinas, e assim, as famílias de peças e as células de máquinas podem ser identificadas nesta estrutura. Uma perfeita estrutura de blocos diagonais existirá, caso seja possível formar células de máquinas e famílias de peças, de modo que cada família possa ser processada em uma única

célula de máquinas. A Figura 1.2 é a matriz resultante depois do agrupamento em três células de máquina - peça distintas.

		peças											
		9	10	11	6	2	4	7	12	1	5	8	3
m	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
á	7	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
q	10	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
u	2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
i	5	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
n	8	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
a	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
s	4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

Figura 1.2: Matriz de Incidência 2

Na Figura 1.2 pode ser observado que a família de peças 1 é composta pelas peças 9, 10, 11 e 6 e a célula de máquinas 1 pelas máquinas 1, 7 e 10. Assim, a família de peças 1 é processada pela célula de máquinas 1, a família de peças 2 pela célula de máquinas 2 e a família 3 pela célula 3.

Quando não se consegue tal estrutura perfeitamente, as peças e as máquinas são agrupadas com o objetivo de minimizar os elementos excepcionais para um dado número de células de máquinas. Os elementos excepcionais são os elementos que estarão fora dos blocos da diagonal principal com valor '1', representando o número total de processamentos que as peças terão em máquinas de outras células. O agrupamento final, na Figura 1.3, mostra esta situação. Vale observar que a matriz final será diferente quando se usam diferentes métodos de agrupamento.

Durante as duas últimas décadas muitos métodos foram desenvolvidos para resolver o problema de formação de famílias máquinas - peças. CHU [7] classifica estes métodos em:

- manipulação de matriz;
- agrupamento hierárquico;
- agrupamento não hierárquico;
- programação matemática;
- técnicas gráficas e;

		peças												
		2	7	11	12	5	8	9	1	2	6	4	10	13
m	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
á	6	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
q	7	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
u	2	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
i	5	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
n	9	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0
a	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
s	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

Figura 1.3: Matriz de Incidência 3

- heurística.

Também são considerados muitos critérios de desempenho, tais como:

- custo total de movimentação;
- utilização média das máquinas;
- tempo médio de *setup*;
- tempo médio de fabricação e;
- outros.

Os primeiros algoritmos desenvolvidos foram principalmente baseados na manipulação de matriz. Neste método, linhas e colunas são rearranjadas para a obtenção da diagonal de blocos, da qual as células de máquinas e famílias de peças são obtidas. Pode-se citar o ROC (rank order clustering) de KING [16], o DCA (direct clustering analysis) de CHAN e MILNER [4] e o CIA (cluster identification algorithm) de KUSIAK e CHOW [19].

No agrupamento hierárquico, as similaridades e as diferenças entre máquinas são computadas e estas são agrupadas de modo a minimizar as diferenças e maximizar as similaridades. Como exemplo de algoritmos de agrupamento hierárquico tem-se o SLA (single linkage algorithm) de McAULEY [23] e o ALA (average linkage algorithm) de SEIFFODINI [28]. Métodos de agrupamento não hierárquicos são repetitivos na natureza, diferentemente dos métodos de agrupamento hierárquico. Este método é usado nos algoritmos ZODIAC de CHANDRASEKHARAN e RAJAGOJALAN [6] e GRAFICS de SRINIVASAN e NARENDHAN [31].

Os problemas de formação de células têm sido formulados, também, usando o modelo *p-median* de KUSIAK [19], programação dinâmica de STEUDEL e BALLAKUR [32] e programação inteira BOCTOR [2]. Estas técnicas são usadas para resolver problemas de pequenas dimensões.

Para problemas de grandes dimensões o método heurístico tem sido usado com mais eficiência porque os algoritmos existentes para resolver problemas de otimização demandam um grande tempo de processamento e na maioria das vezes um tempo inviável do ponto de vista prático. VOHRA *et. al.* [34] sugeriu um enfoque baseado em redes para formação de células enquanto que ASKIN (1991) tem usado o caminho Hamiltoniano para rearranjar a matriz de incidência de máquinas e peças.

Vale observar que todos estes métodos apontam para o agrupamento de um conjunto de máquinas em células e um conjunto de peças em famílias. Este enfoque tem dado boas soluções para problemas onde as famílias de peças e células de máquinas existam naturalmente. Entretanto falha, quando existem vários elementos excepcionais após a diagonalização dos blocos. Nestes casos, a melhor alternativa seria tentar a formação de *fractional cell*, isto é, parte das máquinas agrupadas em células e as restantes agrupadas em uma célula de "remanescentes", que funciona como um *jobshop*. O uso prático deste método pode ser observado no estudo de WEMMERLOV e HYER [35]. Segundo MURTHY [25], embora a idéia de formação de *fractional cell* venha sendo mencionada na literatura de Tecnologia de Grupo, como BURBIDGE [3] e GREEN e SADOWSKI [9], onde é considerada a idéia de célula de remanescentes, observa-se pouca pesquisa nesta área. Pela constituição de células de remanescentes, o número de elementos excepcionais pode ser reduzido em uma grande quantidade de problemas. Na formação tipo *fractional cell* é permitida a movimentação de peças de uma célula para uma célula de remanescentes, mas a movimentação entre células deve ser evitada. Na análise, movimento de uma célula para outra é tratado como um elemento excepcional enquanto que movimento de uma célula para uma célula de remanescentes não é considerado como um elemento excepcional. O objetivo é minimizar os elementos excepcionais. Se uma solução é obtida sem nenhum elemento excepcional, a matriz é perfeitamente conveniente para formação de *fractional cell*, desde que exista movimentação de material somente entre células e células de remanescentes.

Recentemente, novas técnicas tais como reconhecimento do padrão de HARHALAKIS [12], agrupamento *Fuzzy* e sistemas especialistas (KUSIAK [18]) têm sido aplicadas para resolver estes problemas. E, mais recentemente ainda, pesquisas com redes neurais artificiais (ANN) têm mostrado a sua eficiente aplicação na solução de problemas de agrupamento máquina - peça, especialmente para problemas de grandes dimensões, como mostram KAPARTHI e SURESH [15].

Sistemas paralelos tais como redes neurais podem ser usados para observar e comparar diferentes soluções em um intervalo de tempo muito pequeno, mesmo para problemas de grandes dimensões. Uma revisão detalhada desta proposta é feita por DAGLI e HUGGAHALI [8].

MOON [24] propôs uma ativação iterativa e um modelo de competição na qual a rede neural baseia-se em estabelecer inicialmente as similaridades das peças, as similaridades das máquinas e a relação máquina - peça, obtida da matriz máquina - peça. Então, as peças e as máquinas são agrupadas usando redes neurais que ativam unicamente cada grupo de peça e grupo de máquinas. Assim, este modelo requer a computação de similaridades entre cada par de peças e máquinas. Outra aplicação de redes neurais para o problema de formação

de células é a busca da melhoria da eficiência. MALAKOOTI e YANG [22] desenvolveram um algoritmo usando redes neurais de aprendizado não supervisionado para problemas de formação de grupos. O algoritmo é composto de duas fases. Na fase 1, os centros das células são identificados. Na fase 2, o agrupamento das máquinas é feito tendo como base a distância entre o vetor de máquinas e os centros, e os limites superior e inferior do número de máquinas designado para cada célula. O agrupamento das peças é feito usando o mesmo procedimento.

1.2.5 Algoritmos Aplicados em Tecnologia de Grupo

Nesta seção são apresentados alguns algoritmos aplicados em Tecnologia de Grupo. Para melhor verificar o potencial dos métodos aplicados à solução de problemas de formação de grupos máquinas - peças, os algoritmos foram selecionados de modo que abrangessem dois grupos distintos: heurística e otimizante. Os algoritmos heurísticos estão descritos na ordem cronológica de seus respectivos desenvolvimentos, o modelo otimizante é um modelo de programação inteira de KUSIAK [19] chamado *p-median Model*. Estes algoritmos e o *p-median Model* foram selecionados para serem apresentados pela grande importância que têm, pois foram, e ainda são, referência para a maioria dos desenvolvimentos posteriores.

1.2.5.1 Rank Order Clustering (ROC)

Este algoritmo foi desenvolvido por KING [16]. O método estabelece uma ponderação sobre a matriz de incidência onde 1 representa que a peça será processada naquela máquina e 0, caso contrário. Um valor decimal correspondente a cada valor binário é atribuído para linhas e colunas. Com estes valores, rearranjar as linhas e colunas da matriz de modo iterativo, até que linhas e colunas fiquem dispostas em ordem decrescente. O método consiste dos seguintes passos:

- *Passo 1:* Para cada linha da matriz de incidência, atribuir um peso binário posicional a cada um de seus elementos e calcular o seu peso decimal correspondente;
- *Passo 2:* Rearranjar as linhas da matriz na ordem decrescente dos valores dos pesos decimais obtidos no passo anterior;
- *Passo 3:* Para cada coluna da matriz obtida no passo 2, atribuir um peso binário posicional a cada um de seus elementos e calcular o seu peso decimal correspondente;
- *Passo 4:* Rearranjar as colunas da matriz na ordem decrescente dos valores dos pesos decimais obtidos no passo anterior;
- *Passo 5:* Repetir os passos de 1 a 4 até não haver mais mudanças de posições dos elementos em cada linha ou coluna.

Considere n o número de peças e m o número de máquinas. Os pesos decimais para cada linha i e coluna j são calculados da seguinte forma:

$$\text{linha}_i : \sum_{k=1}^n a_{ik} \times 2^{n-k}$$

$$\text{coluna}_j : \sum_{k=1}^m a_{jk} \times 2^{m-k}$$

Exemplo 1.1 Aplicação Numérica

Seja a matriz de incidência:

		peças						
		1	2	3	4	5	6	7
m	1	0	1	0	1	0	0	1
á	2	0	0	1	0	1	0	0
q.	3	1	1	0	1	0	0	1
	4	1	0	1	0	0	1	0
	5	0	0	1	1	1	1	0

- *Passo 1:* Para cada linha da matriz de incidência, atribuir um peso binário posicional a cada um de seus elementos e calcular o seu peso decimal correspondente;

$$\text{linha}_i : \sum_{k=1}^n a_{ik} \times 2^{n-k}$$

Como $n = 7$, tem-se, por exemplo, para a linha 1:

$$\text{linha}_1 : 0 \times 2^{7-1} + 1 \times 2^{7-2} + 0 \times 2^{7-3} + 1 \times 2^{7-4} + 0 \times 2^{7-5} + 0 \times 2^{7-6} + 1 \times 2^{7-7}$$

$$\text{linha}_1 : 0 + 2^5 + 0 + 2^3 + 0 + 0 + 2^0 = 41$$

		peças							
		1	2	3	4	5	6	7	
Peso Binário		2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0	Peso Decimal
máquinas	1	0	1	0	1	0	0	1	41
	2	0	0	1	0	1	0	0	20
	3	1	1	0	1	0	0	1	105
	4	1	0	1	0	0	1	0	82
	5	0	0	1	1	1	1	0	30

- *Passo 2:* Rearranjar as linhas da matriz na ordem decrescente dos valores dos pesos decimais obtidos no passo anterior;

		peças						
		1	2	3	4	5	6	7
m	3	1	1	0	1	0	0	1
á	4	1	0	1	0	0	1	0
q.	1	0	1	0	1	0	0	1
	5	0	0	1	1	1	1	0
	2	0	0	1	0	1	0	0

- *Passo 3:* Para cada coluna da matriz obtida no passo 2, atribuir um peso binário posicional a cada um de seus elementos e calcular o seu peso decimal correspondente;

$$\text{coluna}_j : \sum_{k=1}^m a_{ik} \times 2^{m-k}$$

Como $m = 5$ e considerando, por exemplo, a coluna_1 , calcula-se:

$$\text{coluna}_1 = 1 \times 2^{5-1} + 1 \times 2^{5-2} + 0 \times 2^{5-3} + 0 \times 2^{5-4} + 0 \times 2^{5-5}$$

$$\text{coluna}_1 = 24 + 23 + 0 + 0 + 0 = 24$$

			peças						
			1	2	3	4	5	6	7
m	3	2^4	1	1	0	1	0	0	1
á	4	2^3	1	0	1	0	0	1	0
q.	1	2^2	0	1	0	1	0	0	1
	5	2^1	0	0	1	1	1	1	0
	2	2^0	0	0	1	0	1	0	0
Peso Decimal			24	20	11	22	03	10	20

- *Passo 4:* Rearranjar as colunas da matriz na ordem decrescente dos valores dos pesos decimais obtidos no passo anterior;

		peças						
		1	4	2	7	3	6	5
m	3	1	1	1	1	0	0	0
á	4	1	0	0	0	1	1	0
q.	1	0	1	1	1	0	0	0
	5	0	1	0	0	1	1	1
	2	0	0	0	0	1	0	1

- *Passo 5:* Repetir os passos de 1 a 4 até não haver mais mudanças de posições dos elemento em cada linha ou coluna.

Verifica-se que não há mais mudanças de posição, a solução encontrada então é:

		peças						
		1	4	2	7	3	6	5
m	3	1	1	1	1	0	0	0
á	4	1	0	0	0	1	1	0
q.	1	0	1	1	1	0	0	0
	5	0	1	0	0	1	1	1
	2	0	0	0	0	1	0	1

Traduzindo esta solução, tem-se:

Célula 1: máquinas { 01, 03 e 04}

Célula 2: máquinas { 02 e 05}

Família 1: peças { 01, 02, 04 e 07}

Família 2: peças { 03, 05 e 06}

1.2.5.2 Directive Clustering Analysis (DCA)

Este algoritmo foi desenvolvido por CHAN e MILNER [4] e consiste dos seguintes passos:

- *Passo 1:* Determinar o número total de elementos "1" em cada linha e em cada coluna na matriz de incidência;
- *Passo 2:* Rearranjar as linhas na ordem crescente do número total de elementos "1";
- *Passo 3:* Rearranjar as colunas na ordem decrescente do número total de elementos "1";
- *Passo 4:* Repetir os passos de 1 a 3 até que não haja nenhuma mudança de posição dos elementos da matriz.

Exemplo 1.2 Aplicação Numérica

Será usado o mesmo problema: Matriz de Incidência

		peças						
		1	2	3	4	5	6	7
m	1	0	1	0	1	0	0	1
á	2	0	0	1	0	1	0	0
q.	3	1	1	0	1	0	0	1
	4	1	0	1	0	0	1	0
	5	0	0	1	1	1	1	0

- *Passo 1:* Determinar o número total de elementos "1" em cada linha e em cada coluna na matriz de incidência;

		peças							
		1	2	3	4	5	6	7	
m	1	0	1	0	1	0	0	1	3
á	2	0	0	1	0	1	0	0	2
q.	3	1	1	0	1	0	0	1	4
	4	1	0	1	0	0	1	0	3
	5	0	0	1	1	1	1	0	4
		2	2	3	3	2	2	2	

- *Passo 2:* Rearranjar as linhas na ordem crescente do número total de elementos "1";

		peças							
		1	2	3	4	5	6	7	
m	2	0	0	1	0	1	0	0	
á	1	0	1	0	1	0	0	1	
q.	4	1	0	1	0	0	1	0	
	3	1	1	0	1	0	0	1	
	5	0	0	1	1	1	1	0	

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

		peças							
		1	2	5	6	7	3	4	
m	2	0	0	1	0	0	1	0	
á	1	0	1	0	0	1	0	1	
q.	4	1	0	0	1	0	1	0	
	3	1	1	0	0	1	0	1	
	5	0	0	1	1	0	1	1	

- *Passo 4:* Repetir os passos de 1 a 3 até que não haja nenhuma mudança de posição dos elementos da matriz.

Fazendo as mudanças necessárias, com a repetição dos passos 2 e 3, a solução encontrada é:

		peças						
		2	4	7	1	3	5	6
m	1	1	1	1	0	0	0	0
á	3	1	1	1	1	0	0	0
q.	5	0	1	0	0	1	1	1
	2	0	0	0	0	1	1	0
	4	0	0	0	1	1	0	1

Portanto, a solução encontrada foi:

Célula 1: máquinas { 01e 03 }

Célula 2: máquinas { 02,04 e 05 }

Família 1: peças { 01, 02, 04 e 07 }

Família 2: peças { 03, 05 e 06 }

1.2.5.3 Cluster Identification Algorithm (CIA)

KUSIAK e CHOW [19] aplicaram o conceito apresentado por IRI (1968) no desenvolvimento deste algoritmo. O CIA permite checar a existência de grupos mutuamente separáveis na matriz de incidência. O algoritmo consiste dos seguintes passos:

- *Passo 0:* Estabelecer o número da iteração $k = 1$
- *Passo 1:* Selecionar uma linha i na matriz de incidência e desenhar uma linha horizontal h_i ;
- *Passo 2:* Para cada elemento igual a 1 encontrado na linha h_i , desenhar uma linha vertical v_j passando por estes elementos;
- *Passo 3:* Para cada elemento igual a 1 encontrado na linha v_j , desenhar uma linha horizontal h_k passando por estes elementos;
- *Passo 4:* Repetir os passos 2 e 3 até não ser mais possível desenhar linhas passando por um elemento igual a 1 pertencente a uma linha v_j ou h_k . Todos os elementos que estão no cruzamento de uma linha h_k com uma linha v_j formam a célula de máquinas $MC - k$ e a família de peças $PF - k$;
- *Passo 5:* Definir uma nova matriz de incidência inicial, retirando as linhas e colunas (máquinas e peças) que já fazem parte de uma célula e família, obtidas nos passos de 1 a 4;
- *Passo 6:* Se a matriz obtida contiver todos os elementos iguais a zero, o que significa que todas as máquinas já foram alocadas em uma célula e todas as peças já alocadas em uma família ou se obtiverem elementos excepcionais, fim do algoritmo. Caso contrário,

incrementar a variável k ($k = k + 1$), que controla o número de iterações e voltar para o passo 2.

Exemplo 1.3 Aplicação Numérica

Será usado o mesmo problema: Matriz de Incidência

		peças						
		1	2	3	4	5	6	7
m á q.	1	0	1	0	1	0	0	1
	2	0	0	1	0	1	0	0
	3	1	1	0	1	0	0	1
	4	1	0	1	0	0	1	0
	5	0	0	1	1	1	1	0

- Passo 1: Selecionar uma linha i na matriz de incidência e desenhar uma linha horizontal h_i ;

		peças						
		1	2	3	4	5	6	7
m á q.	1	0	1	0	1	0	0	1
	2	0	0	1	0	1	0	0
	3	1	1	0	1	0	0	1
	4	1	0	1	0	0	1	0
	5	0	0	1	1	1	1	0

- *Passo 2:* Para cada elemento igual a 1 encontrado na linha h_i , desenhar uma linha vertical v_j passando por estes elementos;

		peças						
		1	2	3	4	5	6	7
m á q.	1	0	1	0	1	0	0	1
	2	0	0	1	0	1	0	0
	3	1	1	0	1	0	0	1
	4	1	0	1	0	0	1	0
	5	0	0	1	1	1	1	0

- *Passo 3:* Para cada elemento igual a 1 encontrado na linha v_j , desenhar uma linha horizontal h_k passando por estes elementos;

		peças						
		1	2	3	4	5	6	7
m á q.	1	0	1	0	1	0	0	1
	2	0	0	1	0	1	0	0
	3	1	1	0	1	0	0	1
	4	1	0	1	0	0	1	0
	5	0	0	1	1	1	1	0

- *Passo 4:* Repetir os passos 2 e 3 até não ser mais possível desenhar linhas passando por um elemento igual a 1 pertencente a uma linha v_j ou h_k . Todos os elementos que estão no cruzamento de uma linha h_k com uma linha v_j formam a célula de máquinas $MC - k$ e a família de peças $PF - k$;

		peças						
		1	2	3	4	5	6	7
m á q.	1	0	1	0	1	0	0	1
	2	0	0	1	0	1	0	0
	3	1	1	0	1	0	0	1
	4	1	0	1	0	0	1	0
	5	0	0	1	1	1	1	0

Como se pode observar o algoritmo não encontrou uma solução para este problema, ou seja, a solução final indica a existência de uma única célula de máquinas e uma única família de peças, igual à matriz de incidência.

1.2.5.4 Modelos de Programação Inteira

A maioria dos modelos matemáticos, desenvolvidos para a solução de problemas de formação de grupos, considera a medida de distância d_{ij} entre as peças i e j , KUSIAK [19].

A distância d_{ij} entre as peças i e j é uma função no conjunto dos números reais com as seguintes propriedades:

1. reflexiva: $d_{ii} = 0, \forall i$;
2. simétrica: $d_{ij} = d_{ji}, \forall i$ e j ;
3. desigualdade triangular: $d_{ij} \leq d_{ik} + d_{jk}, \forall i, j$ e k ;

distância absoluta : $d_{ij} = \sum_{k=1}^m |a_{ki} - a_{kj}|$

distância euclidiana : $d_{ij} = [\sum_{k=1}^m (a_{ki} - a_{kj})^2]^{1/2}$

distância ponderada : $d_{ij} = (\sum_{k=1}^m w_k |a_{ki} - a_{kj}|^r)^{1/r}$, onde w_k é um peso atribuído à máquina k , e, se $r = 1$ a distância é a absoluta ponderada, e se $r = 2$ é euclidiana ponderada.

distância de Hamming : $d_{ij} = \sum_{k=1}^m \delta(a_{ki} - a_{kj})$

onde: $\delta(a_{ki} - a_{kj}) = \begin{cases} 1 & \text{se } a_{ki} \neq a_{kj} \\ 0 & \text{se não} \end{cases}$

O modelo de programação matemática apresentado aqui é conhecido como **Agrupamento pelo Método das p -medianas**

Este método utiliza da Programação Inetira (PI). O PI é definido:

Dados:

- n : número de peças;
- p : número de famílias de peças (pré-definido);
- d_{ij} : distância entre as peças i e j .

Variáveis:

- $x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se a peça } i \text{ pertence à família } j \\ 0 & \text{se não} \end{cases}$

Função Objetivo: minimizar a soma total das distâncias entre as peças i e j :

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij}.$$

Restrições:

- Cada peça pertence a uma única família:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall \quad i = 1, 2, \dots, n;$$

- O número total de famílias é igual a p :

$$\sum_{i=1}^n x_{ii} = p;$$

- Uma peça só pode estar em uma família j se esta família existe ($x_{jj} \geq 0$):

$$x_{ij} \leq x_{jj}$$

- Domínio das variáveis:

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall \quad i, j$$

O modelo acima foi desenvolvido considerando a possibilidade de haver apenas uma seqüência de operações para cada peça i . KUSIAK [19], desenvolveu um outro modelo, chamado Generalized p-median Model, relaxando esta restrição, permitindo com isto considerar mais que um plano de operações para cada peça i e adicionalmente os custos de operação são associados a cada plano de operação.

Exemplo 1.4 Aplicação Numérica

Será usado o mesmo problema: Matriz de Incidência

		peças						
		1	2	3	4	5	6	7
m	1	0	1	0	1	0	0	1
á	2	0	0	1	0	1	0	0
q.	3	1	1	0	1	0	0	1
	4	1	0	1	0	0	1	0
	5	0	0	1	1	1	1	0

Usando HAMMING (LEE 1981) para determinar a medida de distância, d_{ij} é a distância entre a peça i e a peça j .

Tomando-se $i = 1$ e $j = 2$ tem-se

$$d_{12} = \delta(a_{11}, a_{12}) + \delta(a_{21}, a_{22}) + \delta(a_{31}, a_{32}) + \delta(a_{41}, a_{42}) + \delta(a_{51}, a_{52}) = 1 + 0 + 0 + 1 + 0$$

$$d_{12} = 2.$$

Tomando-se $i = 2$ e $j = 3$ tem-se

$$d_{23} = \delta(a_{12}, a_{13}) + \delta(a_{22}, a_{23}) + \delta(a_{32}, a_{33}) + \delta(a_{42}, a_{43}) + \delta(a_{52}, a_{53}) = 1 + 1 + 1 + 1 + 1$$

$$d_{23} = 5$$

Calculando-se d_{ij} para os outros valores de i e j , obtém-se a seguinte matriz:

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

Fazendo $p = 2$, ou seja, deseja-se definir duas famílias de peças. As variáveis do modelo abaixo, estão escritas na formatação apropriada para o software Lindo e não como descritas anteriormente. Assim, a variável X_{12} é equivalente à $x_{1,2}$.

$$\begin{aligned} \min \\ 2X_{12} + 3X_{13} + 3X_{14} + 4X_{15} + 2X_{16} + 2X_{17} + \\ 2X_{21} + 5X_{23} + 2X_{24} + 4X_{25} + 4X_{26} + \\ 3X_{31} + 5X_{32} + 4X_{34} + 1X_{35} + 1X_{36} + 5X_{37} + \\ 3X_{41} + 2X_{42} + 4X_{43} + 3X_{45} + 3X_{46} + 1X_{47} + \\ 4X_{51} + 4X_{52} + 1X_{53} + 3X_{54} + 2X_{56} + 4X_{57} + \\ 2X_{61} + 4X_{62} + 1X_{63} + 3X_{64} + 2X_{65} + 4X_{67} + \\ 2X_{71} + 5X_{73} + 1X_{74} + 4X_{75} + 4X_{76} \end{aligned}$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} &= 1 \\ X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26} + X_{27} &= 1 \\ X_{31} + X_{32} + X_{33} + X_{34} + X_{35} + X_{36} + X_{37} &= 1 \\ X_{41} + X_{42} + X_{43} + X_{44} + X_{45} + X_{46} + X_{47} &= 1 \\ X_{51} + X_{52} + X_{53} + X_{54} + X_{55} + X_{56} + X_{57} &= 1 \\ X_{61} + X_{62} + X_{63} + X_{64} + X_{65} + X_{66} + X_{67} &= 1 \\ X_{71} + X_{72} + X_{73} + X_{74} + X_{75} + X_{76} + X_{77} &= 1 \\ X_{11} + X_{22} + X_{33} + X_{44} + X_{55} + X_{66} + X_{77} &= 2 \\ X_{21} - X_{11} &\leq 0 \\ X_{31} - X_{11} &\leq 0 \\ X_{41} - X_{11} &\leq 0 \\ X_{51} - X_{11} &\leq 0 \\ X_{61} - X_{11} &\leq 0 \\ X_{71} - X_{11} &\leq 0 \\ X_{12} - X_{22} &\leq 0 \\ X_{32} - X_{22} &\leq 0 \\ X_{42} - X_{22} &\leq 0 \\ X_{52} - X_{22} &\leq 0 \\ X_{62} - X_{22} &\leq 0 \\ X_{72} - X_{22} &\leq 0 \\ X_{13} - X_{33} &\leq 0 \\ X_{23} - X_{33} &\leq 0 \\ X_{43} - X_{33} &\leq 0 \\ X_{53} - X_{33} &\leq 0 \\ X_{63} - X_{33} &\leq 0 \\ X_{73} - X_{33} &\leq 0 \\ X_{14} - X_{44} &\leq 0 \\ X_{24} - X_{44} &\leq 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
X_{34} - X_{44} &\leq 0 \\
X_{54} - X_{44} &\leq 0 \\
X_{64} - X_{44} &\leq 0 \\
X_{74} - X_{44} &\leq 0 \\
X_{15} - X_{55} &\leq 0 \\
X_{25} - X_{55} &\leq 0 \\
X_{35} - X_{55} &\leq 0 \\
X_{45} - X_{55} &\leq 0 \\
X_{65} - X_{55} &\leq 0 \\
X_{75} - X_{55} &\leq 0 \\
X_{16} - X_{66} &\leq 0 \\
X_{26} - X_{66} &\leq 0 \\
X_{36} - X_{66} &\leq 0 \\
X_{46} - X_{66} &\leq 0 \\
X_{56} - X_{66} &\leq 0 \\
X_{76} - X_{66} &\leq 0 \\
X_{17} - X_{77} &\leq 0 \\
X_{27} - X_{77} &\leq 0 \\
X_{37} - X_{77} &\leq 0 \\
X_{47} - X_{77} &\leq 0 \\
X_{57} - X_{77} &\leq 0 \\
X_{67} - X_{77} &\leq 0
\end{aligned}$$

$$x_{IJ} \in \{0, 1\} \quad \forall i \vee j$$

Resolvendo o modelo acima se obtém a seguinte solução:

$$X_{17} = X_{27} = X_{47} = X_{77} = 1$$

$$X_{33} = X_{53} = X_{63} = 1$$

A matriz final fica então:

		peças						
		1	2	4	7	3	5	6
m	1	0	1	1	1	0	0	0
á	3	1	1	1	1	0	0	0
q.	2	0	0	0	1	1	1	0
	4	1	0	0	0	1	0	1
	5	0	0	1	0	1	1	0

Portanto, a solução encontrada foi:

Célula 1: máquinas {01e 03}

Célula 2: máquinas {02,04 e 05}

Família 1: peças {01, 02, 04 e 07}

Família 2: peças {03, 05 e 06}

1.2.6 Medidas de desempenho

Existem vários parâmetros ou metodologias para se avaliar o desempenho de um método. Para os algoritmos aplicados na solução de problemas de formação de famílias e células, chamados máquina-peça, MALAKOOTI e YANG [22], em seus estudos, propuseram três medidas:

- Porcentagem de Elementos Excepcionais (PE)
- Utilização das Máquinas (MU)
- Eficiência de Agrupamento (GE)

1.2.6.1 Porcentagem de Elementos Excepcionais - PE

A qualidade do método de agrupamento pode ser avaliado pelo número de elementos excepcionais, CHAN e MILNER [4]. A porcentagem de elementos excepcionais (PE) pode ser obtida pela divisão do número de elementos excepcionais (NE) pelo número total de elementos com valor "1" (N) na matriz final.

Seja então:

- **NE**: número de elementos excepcionais; e
- **N**: número total de elementos com valor 1 na matriz de incidência,

então:

$$PE = NE / N$$

1.2.6.2 Utilização das máquinas - MU

É a porcentagem do tempo que as máquinas de cada grupo estão em produção, CHANDRA-SEKHARAN e RAJAGOPALAN [5]. Sendo N1 o número total de "1" dentro dos grupos, R o número de grupos, mr o número de máquinas pertencentes ao grupo r e nr o número de peças pertencentes ao grupo r, o MU pode é calculado da seguinte forma:

Seja:

- **N1**: número total de elementos com valor 1 dentro dos grupos;
- **R**: número de grupos;
- m_r : número de máquinas pertencentes ao grupo r; e
- n_r : número de peças pertencentes ao grupo r,

então:

$$MU = N1 / \sum_{r=1}^R m_r n_r$$

1.2.6.3 Eficiência de Agrupamento - GE

É uma medida de desempenho de agrupamento agregada, definida por CHANDRASEKHARAN e RAJAGOPALAN [5]. Sendo; NE o número de elementos excepcionais, MN as dimensões da matriz de incidência e mr e nr como já definidos anteriormente, o GE pode ser calculado da seguinte forma:

Seja:

- MN: produto das dimensões da matriz de incidência A,

então:

$$GE = 0,5 MU + 0,5 (1 - NE/MN \sum_{r=1}^R m_r n_r)$$

1.2.6.4 Aplicação aos problemas

Algoritmo	PE(%)	MU(%)	GE(%)
Rank Order Clustering (ROC)	18.8	72.2	77.3
Directive Clustering Analysis (DCA)	12.5	82.4	85.6
Cluster Identification Algorithm (CIA)	*	*	*
Programação Inteira	12.5	82.4	85.6

1.2.7 Considerações

Para o exemplo apresentado, o algoritmo heurístico Directive Clustering Analysis (DCA) e a Programação Inteira (método otimizador) obtiveram os mesmo desempenho para as três medidas consideradas (porcentagem de elementos excepcionais, utilização das máquinas e eficiência de agrupamento). O Rank Order Clustering (ROC), obteve um desempenho inferior para as três medidas de desempenho. O Cluster Identification Algorithm (CIA) embora não tenha chegado a uma solução para o exemplo, tem apresentado um bom desempenho em várias aplicações práticas. Os aspectos computacionais requeridos, embora não fosse o enfoque deste trabalho, mesmo para a programação inteira (utilizado o software Lindo) foram compatíveis e viáveis quando aplicados ao problema estudado. Entretanto, deveriam ser estudados, de forma mais profunda, problemas de dimensões maiores para que se pudesse determinar o método de solução (ou algoritmo) ideal do ponto de vista computacional versus as dimensões dos problemas (matriz de incidência). Como proposta de estudos futuros, poderia se determinar em que tipo, ou características, de problemas os algoritmos estudados tendem a falhar ou não propiciam soluções satisfatórias.

A aplicação da Tecnologia de Grupo é uma etapa importante do projeto de célula de manufatura pois é ela que determina efetivamente quais serão as famílias de peças e células de máquinas a serem implementadas na nova estrutura de manufatura. Entretanto, se se compararem as diversas etapas necessárias para um projeto de células de manufatura, as diversas áreas da empresa que serão afetadas pelas suas implantações, ambos descritos na próxima seção, com o pequeno número de variáveis consideradas pelos algoritmos de Tecnologia de Grupo, pode-se afirmar que as soluções obtidas por estes devem ser rigorosamente

analisadas para se verificar antecipadamente qual será o desempenho efetivo desta nova estrutura. Por outro lado, as medidas de desempenho encontradas na literatura enfocam preponderantemente a qualidade do agrupamento, ou seja, medem a eficiência do algoritmo quanto à sua capacidade de agrupar peças em famílias e máquinas em células mas, o que se deveria medir é a qualidade da solução final quanto à sua aplicação em projetos de células de manufatura. Por exemplo, o fato de se obter uma eficiência de agrupamento elevada não significa necessariamente que o desempenho da célula de manufatura proposta na solução também será elevado. Obter um baixo índice de elementos excepcionais na solução final também não significa que não se terão problemas na implantação das células e que até se pode ter um desempenho menor que o da estrutura de manufatura original. As demandas de cada produto, os tempos de processamento de cada produto em cada máquina bem como as características do problema a ser estudado, interferem diretamente no desempenho das células, mas estas variáveis não são consideradas na análise da solução final.

1.3 Células de Manufatura

1.3.1 Definições

As células de manufatura podem ser definidas como sendo a organização da estrutura de produção em grupos de máquinas onde, cada grupo, ou célula, contém os recursos humanos e materiais necessários para a execução de todas as operações de fabricação de uma determinada família de peças, dentro da área delimitada pelo grupo (célula pura). As máquinas pertencentes a um certo grupo devem ser arranjadas em um local específico de tal modo que possam processar a família de peças de maneira econômica e racional, garantindo assim, a obtenção dos benefícios oriundos desta estrutura.

Elas também são chamadas de Células de Manufatura Flexíveis (FMC) pela sua grande flexibilidade de utilização. Segundo NYMAN [26], inicialmente a maioria das células eram células de máquinas mas, atualmente as células de manufatura flexíveis são comumente encontradas numa grande variedade de aplicações. Elas são chamadas de Células de Manufatura ao invés de Células de Máquinas porque outros tipos de serviços, que não são executados em máquinas, são cada vez mais encontrados nas células, tais como, processos de montagem manual, tratamento térmico, limpeza, empacotamento, transporte, etc. Além disso, a organização de estruturas de produção em células não está restrita somente à manufatura. Estes conceitos são utilizados hoje, também, em escritórios, lojas de departamento, prestação de serviços, fluxos de documentos, entre outros. Por outro lado, conforme NYMAN [26], a palavra flexibilidade no nome tornou-se apropriado a medida que um número crescente de técnicas foram desenvolvidas possibilitando a produção de uma variedade mais ampla de peças quanto a dimensões e formas, através de um grupo de diferentes máquinas, ajustando a saída da célula de acordo com as necessidades especificadas pelo cliente. Assim, a palavra flexibilidade é incorporada à célula de manufatura pela sua flexibilidade na aplicação dos conceitos nos diversos ramos de atividade empresarial, e pela sua flexibilidade em poder produzir diferentes tipos de peças e serviços.

O termo Célula de Manufatura é algumas vezes usado para descrever, ou representar, a operacionalização da Tecnologia de Grupo (GROOVER, [10]), pois a Tecnologia de Grupo é uma filosofia de manufatura que busca melhorar a eficiência através do agrupamento de peças em famílias e de máquinas em grupos. Esta eficiência é obtida pelo arranjo dos equipamentos de produção em grupos, ou células, para facilitar o fluxo e a sequência de operações.

1.3.2 Classificação

Existem diversos tipos de classificação utilizadas para classificar as células de manufatura. Serão apresentadas duas maneiras de classificação que são, normalmente, as mais utilizadas e encontradas na literatura e são, também, as mais adequadas ao contexto deste curso:

- Classificação quanto ao tipo;
- Classificação quanto ao grau de automação.

1.3.2.1 Quanto ao Tipo

As células de manufatura devem ser projetadas como se fossem um pequeno negócio autônomo (NYMAN [26]), a ser operado por um grupo de pessoas e que já se tenham traçado previamente os objetivos a serem alcançados e os critérios de desempenho a serem considerados. Baseado nisto e tendo conhecimento dos produtos a serem fabricados e dos seus processos, o primeiro passo é desenvolver um projeto macro da célula que normalmente é de um dos três tipos básicos (NYMAN [26]):

- Célula por Produto;
- Célula por Processo;
- Célula por Tecnologia de Grupo.

Célula por Produto É o tipo de célula que produz um único produto acabado e o transporta para o cliente. O produto pode ser completamente manufaturado por um grupo específico de operadores em uma pequena área. Não deve ser confundido com uma fábrica especializada a qual normalmente é composta por várias células. Esse tipo, comparado aos outros dois, é o que tem o maior potencial de benefícios econômicos e de desempenho, visto que permite a eliminação de quase todas as atividades que não agregam valor.

Célula por Processo Este tipo produz componentes de um produto ou famílias de produtos que requerem processos comuns e que possam ser agrupados, mas não necessariamente seguem a mesma sequência de operações. Frequentemente os processos envolvidos não permitem que sejam instaladas múltiplas células por produto, em função dos investimentos em equipamentos requeridos ou considerações físicas ou ambientais. Podem proporcionar significativa melhoria na moral da equipe em função da organização do trabalho em grupo e nos custos de algumas operações.

Célula por Tecnologia de Grupo É o tipo mais conhecido e que contém o maior número de publicações, e pode ser considerado como sendo um nível intermediário entre um equipamento dedicado e um jobshop. Produz peças de formas similares, não necessariamente componentes de um produto ou família de produtos. É considerado por muitos como o precursor dos conhecimentos atuais sobre células. Os benefícios econômicos propiciados por este tipo são, na maioria das vezes, menores que os proporcionados pelos outros dois tipos.

1.3.2.2 Quanto ao grau de automação

As células de manufatura podem ser classificadas, também, em função do grau de automação e integração, em um dos seguintes grupos (GROOVER [10]):

- Célula com máquina única;
- Célula com movimentação manual;
- Célula com movimentação semi-integrada;
- Sistema Flexível de Manufatura (FMS).

Célula com Máquina Única Como o próprio nome diz, é composta por uma única máquina que possui todas as ferramentas e dispositivos de fixação necessários para a fabricação de uma ou mais famílias de peças. Este tipo de célula pode ser usado quando todas as operações de fabricação podem ser executadas em um único tipo de processo básico.

Célula com Movimentação Manual É um arranjo de várias máquinas usadas para produzir uma ou mais famílias, também. Não possui nenhum equipamento de movimentação automático entre as máquinas da célula, que é feita por operadores manualmente. Dependendo do tamanho e peso das peças, a movimentação é feita com o auxílio de um equipamento de transporte comandado por um operador. Normalmente o arranjo físico é em "U" pois este tipo de arranjo é considerado o mais apropriado quando existe uma certa variedade de seqüências e movimentações das peças entre as diversas máquinas que compõem a célula (figura 1.4) (GROOVER [10]). Permite a utilização de operadores multifuncionais o que facilita a operação e a movimentação entre máquinas.

Este tipo é algumas vezes implementado em um arranjo convencional por processo sem um novo arranjo dos equipamentos. É feita simplesmente uma atribuição a certas máquinas para fazerem parte de um determinado grupo e terem suas utilizações restritas à fabricação de uma família de peças. Obviamente os benefícios relativos à redução substancial das necessidades de movimentações, propiciadas pela estrutura celular, não são obtidos com este procedimento.

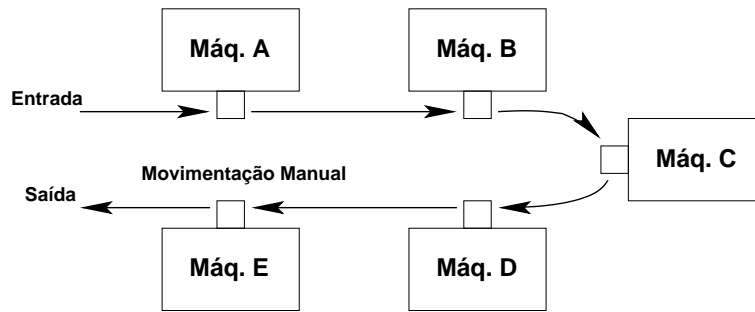


Figura 1.4: Célula de manufatura com movimentação manual e arranjo em “U”

Células com Movimentação Semi-integrada Usa sistemas automáticos de movimentação tais como correias transportadoras, para mover as peças entre as máquinas da célula. Quando as peças produzidas na célula têm seqüências de operações idênticas ou similares, um arranjo em linha é o mais apropriado. Neste caso as máquinas são alocadas ao longo da correia transportadora em função da seqüência das operações (figura 1.5).

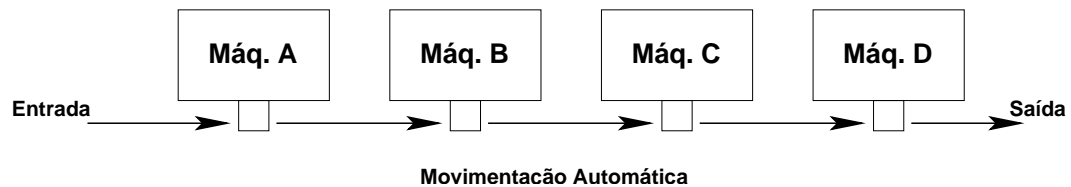


Figura 1.5: Célula de manufatura com movimentação semi-integrada com *lay out* em linha

Se a seqüência de operações de cada peça é muito variada, usa-se um arranjo em *loop*, já que esse permite a circulação da peça pela célula (figura 1.6).

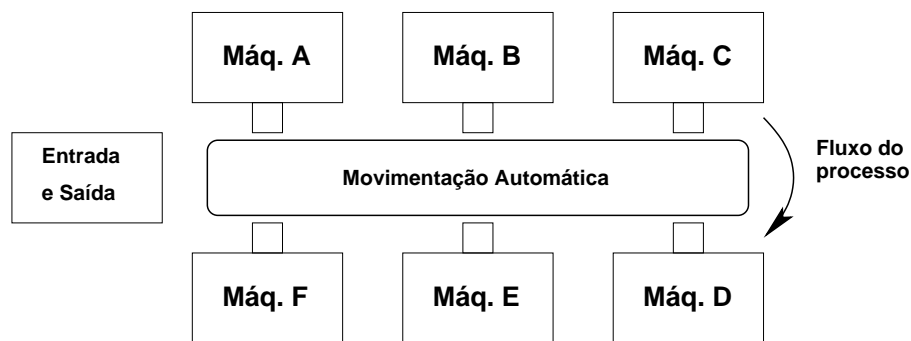


Figura 1.6: Célula de manufatura com movimentação semi integrada com *lay out* em *loop*

Sistema Flexível de Manufatura (FMS) É o que possui o mais alto grau de automação. Combina estações de trabalho automáticas, ou centros de usinagem, com sistemas de movimentação plenamente integrados. Computadores fazem o controle dos equipamentos de produção, através de bancos de dados que são especialmente desenvolvidos com dados da manufatura, integrados a sistemas de informações para planejamento, sequenciamento e coordenação das operações. Um FMS pode ser definido como uma combinação de equipamentos, sistemas de controle e de comunicação, integrados na manufatura, para um desempenho de alta produtividade e com capacidade de respostas rápidas e econômicas a mudanças eventualmente necessárias.

1.3.3 Benefícios

A implantação de células de manufatura atinge não somente as atividades relacionadas diretamente com as operações de fabricação, mas também as áreas de apoio como: engenharia do produto, engenharia de projetos, manutenção, programação da produção, suprimentos, distribuição, vendas, recursos humanos, treinamento e atendimento aos clientes. Estas áreas também obtêm benefícios diretos e indiretos, através da simplificação de procedimentos, integração do trabalho, melhoria nos prazos, pontualidade na entrega, padronização de projetos, entre outros.

Os benefícios obtidos diretamente nos processos produtivos são:

- redução do ciclo de fabricação;
- redução do material em processo;
- redução do tempo de *setup*;
- redução dos tempos de processo;
- redução das necessidades de movimentação;
- redução dos tempos de movimentação;
- redução de retrabalhos e perdas;
- redução dos estoques;
- redução do espaço necessário para a fábrica;
- redução dos tempos de planejamento.
- fluxo do material mais organizado;
- controle da produção mais simples e eficaz;
- melhoria dos padrões de qualidade;

- controle da qualidade mais simples;
- melhoria do nível de motivação do pessoal devido aos aspectos sociológicos do trabalho em grupo;
- maior envolvimento dos operadores no processo como um todo, fazendo-os sentirem-se mais valorizados, favorecendo a melhoria da qualidade e da produtividade;
- supervisão mais objetiva e racional, dando ao supervisor visão clara dos objetivos da célula devido a sua delimitação e abrangência;

É fácil concluir que todos estes benefícios recaem diretamente na redução de custos e propiciam condições mais favoráveis para a competitividade da empresa. A célula de manufatura permite, na maioria das vezes, processar todas as operações necessárias para transformar uma matéria-prima em produto acabado, utilizando um pequeno número de operadores, o que lhes permite acompanhar todas as fases e verificar o resultado final de seus trabalhos. Isto proporciona um nível maior de satisfação do pessoal, pois conseguem perceber a importância de seus resultados para a empresa. Como estão muito próximos das atividades desenvolvidas e integrados ao ambiente da célula, sentem-se mais responsáveis e detectam erros em condições de ser corrigidos em tempo, contribuindo para a melhoria da qualidade e consequentemente da produtividade.

LORINI [21] ressalta que a estrutura celular, projetada adequadamente e aplicada a sistemas produtivos, cria todo um ambiente, ou uma base, que facilita a automatização, favorecendo a utilização das modernas tecnologias computacionais de auxílio à manufatura, que podem ser totalmente integrados como um sistema CIM (Computer Integrated Manufacturing).

1.3.4 Quando a Estrutura Celular é Recomendada

SLACK [30] recomenda o arranjo da estrutura de produção em células de manufatura, em função do volume de produção e da variedade de produtos. Posiciona sua aplicação em relação aos demais tipos de arranjo, que são definidos por ele como quatro:

- arranjo físico posicional;
- arranjo físico por processo;
- arranjo físico celular;
- arranjo físico por produto.

O arranjo físico posicional deve ser utilizado para volumes baixos e variedade relativamente alta, pois o fluxo de materiais não é uma questão central visto que os produtos fluem muito pouco frequentemente através das operações. Com volumes maiores e variedade menor, o fluxo dos materiais torna-se uma questão mais importante. Se a variedade é alta, um

arranjo definido completamente pelo fluxo torna-se complexo porque os produtos poderão ter diferentes padrões de fluxo e neste caso deve ser usado o arranjo físico por processo. Quando a variedade de produtos se reduz, mas ainda não é pequena, de modo que grupos de produtos, ou famílias, possam ser identificados em função da similaridade de suas necessidades, o arranjo físico celular torna-se mais adequado. Quando a variedade de produtos é relativamente pequena e o fluxo pode ser regularizado, o arranjo físico por produto pode tornar-se mais adequado. Assim, a medida que o volume aumenta, a decisão quanto ao tipo de arranjo baseia-se fortemente no fluxo do processo. A medida que a variedade é reduzida, a decisão baseia-se no processamento do produto. A figura 1.7 apresenta a relação entre o tipo de arranjo físico adequado ao volume e variedade (SLACK [30]).

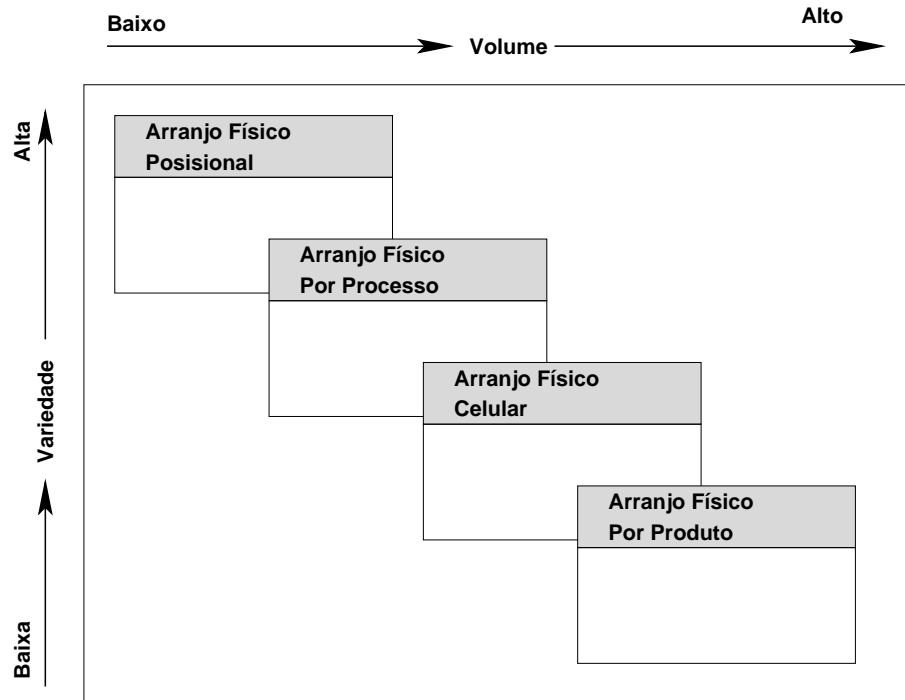


Figura 1.7: Tipo de Arranjo Físico em função do volume de produção e variedade dos produtos

1.3.5 Áreas e Atividades da Empresa Afetadas pela Implantação

Algumas empresas vêem a adoção de células de manufatura apenas como uma nova maneira de fabricar seus produtos, através de um novo arranjo de suas máquinas e equipamentos. Entretanto, a idéia central dos conceitos de células de manufatura implica em uma nova maneira de conduzir as atividades de manufatura. Sendo assim, as atividades relacionadas direta ou indiretamente com a produção, devem ser completamente reestruturadas, pois os benefícios relativos à sua implantação só podem ser plenamente obtidos com a solução de

problemas relacionados a outros departamentos, funções ou áreas da empresa. Se os outros departamentos não mudarem suas maneiras de operar, existirá uma grande probabilidade de se ver fracassada a implantação de uma célula de manufatura.

As principais áreas da empresa a serem afetadas a curto prazo, são descritas por NYMAN [26] e a seguir apresentadas:

- engenharia do produto;
- programação, produção, controle de estoques e sistemas computacionais;
- controle da qualidade;
- entrada de pedidos, vendas e mercado;
- recursos humanos e pessoal;
- contrato de trabalho, plano de carreira e remuneração;
- outras áreas.

1.3.5.1 Engenharia do Produto

Com a implantação de células de manufatura, não se deve ter uma grande variedade de linhas de produtos, com pequenas diferenças entre eles como uma grande diversidade de tamanhos por exemplo. Isto traz um incremento significativo nos custos de fabricação. Assim, o projeto dos produtos e as atividades de engenharia devem ser mudadas e passarem a dar atenção para este detalhe. Uma racionalização de peças ou padronização deve ser feita. A engenharia do produto deve ter um bom conhecimento das restrições, características e capacidades das células de manufatura existentes na empresa. O objetivo é obter uma grande velocidade de produção e conseqüentemente maiores benefícios financeiros. Uma grande variedade de formas, tamanhos, tipos e dimensões, demanda um aumento dos tempos de *setup*, de fixação e variedade de ferramentas, e com isto a velocidade de produção diminui. Mesmo que os produtos já fabricados em células existentes sejam simples e o número de peças esteja sob controle, o envolvimento da equipe da engenharia do produto poderia permitir um melhor planejamento da célula de manufatura por possibilitar a consideração de possíveis futuras necessidades de produção. Também, com o conhecimento sobre as características da célula de manufatura, o tempo necessário para o desenvolvimento e lançamento de novos produtos pode ser diminuído, aumentando a competitividade da empresa frente aos concorrentes.

1.3.5.2 Programação, Produção, Controle de Estoques e Sistemas Computacionais

Estas áreas são as que sofrem maior impacto, e mais imediatos, com a implantação de células de manufatura. Elas devem refletir as atividades da manufatura e, se o chão de fábrica for mudado radicalmente, os sistemas devem ser alterados para se adequarem à nova realidade.

Freqüentemente os operadores da célula devem decidir qual a melhor seqüência em que as peças devem ser processadas, visando minimizar os tempos de *setup* e as trocas de ferramentas. Eles assumem a responsabilidade por algumas programações anteriormente feitas pelo departamento de programação e controle da produção. Entretanto, para evitar um acúmulo de ordens de produção não executadas ou por conveniência dos operadores ou por ineficiência da programação elaborada por eles, programações de curto prazo devem ser feitas por um sistema centralizado em um departamento que tenha a visão geral e global das necessidades de todas as outras unidades, e distribuídas pelas células, para não comprometer o resultado final da empresa como um todo.

Como resultado da implantação de células de manufatura, freqüentemente não se têm estoques intermediários, ou estoques entre máquinas. As células podem ser ligadas diretamente com as operações de montagem, reduzindo ou eliminando os estoques de produtos semi-acabados. Assim, o controle de estoques torna-se muito mais fácil e esta função é a que mais rapidamente é adaptada à nova estrutura. A eliminação potencial de estoques é uma das mais fortes argumentações utilizadas para justificar a implantação de células de manufatura.

Se os departamentos ou sistemas afetados não conduzirem suas atividades, de maneira diferente, ajustando-as à nova realidade, o resultado será o caos e os benefícios não serão alcançados. Uma das chaves para o sucesso da implantação é o envolvimento prévio destas unidades para que elas se comprometam, também, com as mudanças que se farão necessárias.

1.3.5.3 Controle da Qualidade

Pelo método tradicional, o controle da qualidade é feito por uma unidade de controle da qualidade, através de seus inspetores, que verificam os produtos feitos por outras pessoas. Este método tem várias desvantagens e foi considerado obsoleto na década de setenta, com o estabelecimento de novos padrões e conceitos de qualidade. Na estrutura celular o controle de qualidade é feito diretamente pelos operadores da célula, que é a tendência mais moderna e atual para se controlar a qualidade. Os operadores, ou um deles, são responsáveis pelo desempenho de todas as etapas do processo de uma peça ou família de peças. Se é detectada alguma anormalidade, os operadores deverão estar habilitados para rapidamente localizar o problema e implementar as ações corretivas necessárias para bloquear a causa geradora da não conformidade. Esta responsabilidade não pode ser assumida por operadores não capacitados, ou seja, com o grau de capacitação usado na estrutura anterior à adotada. Os operadores das células de manufatura são envolvidos também na manutenção e preparação de seus equipamentos. A estrutura celular permite, através de seus operadores, uma melhoria significativa nos níveis de qualidade, eliminando ou minimizando os retrabalhos, desperdícios e peças rejeitadas.

1.3.5.4 Entrada de Pedidos, Vendas e Mercado

Com a implantação de células de manufatura, muda-se a programação da produção, não somente o modelo de programação, como também a freqüência de sua elaboração. Além

disto, consegue-se uma redução significativa no tempo do ciclo de fabricação. Assim, com estes benefícios alcançados, entre outros, pode-se mudar a relação da empresa com o mercado, tornando-se mais ágil, flexível, respondendo melhor às necessidades dos clientes. A área de vendas, portanto, deve mudar seus procedimentos, sistemática de recebimento das entradas de pedidos, frequência de confirmação dos pedidos e prazos de entrega. A área de mercado, por sua vez, deve incorporar em seus modelos de previsão e de planejamento, os resultados dos benefícios obtidos com esta nova organização da estrutura de produção.

1.3.5.5 Recursos Humanos

Haverá um grande impacto nos operadores das células de manufatura, nas equipes de apoio à produção e no papel da supervisão e gestão. Se o aspecto humano não for considerado no projeto da célula, a possibilidade de fracasso é muito grande. Deve-se dar destaque à elaboração de um plano de educação e treinamento visto que várias técnicas operacionais e gerenciais novas e procedimentos serão implementados junto com a célula. Como a estrutura celular representa uma maneira diferente de organizar a manufatura e de uma forma mais ampla, o negócio, a sua implantação efetiva requer o comprometimento de toda a organização e sendo assim, o tratamento dos aspectos humanos se tornam indispensáveis.

1.3.5.6 Contrato de Trabalho, Plano de Carreira e Remuneração

É um assunto relevante para o sucesso da implantação da estrutura celular e muitas vezes não é tratado. Nos contratos de trabalho convencionais, é especificado claramente qual é a função e responsabilidade a ser desempenhadas por cada um dos trabalhadores tais como: mecânico, eletricista, operador, lubrificador, inspetor de qualidade e outros. Por outro lado o plano de carreira é estruturado por níveis em cada um dos cargos, por exemplo, operador I, operador II, operador sênior e assim sucessivamente. Nas células de manufatura, os trabalhadores executarão várias tarefas, que na estrutura convencional são realizadas por diferentes cargos, como os descritos acima. Para se eliminar estas divergências funcionais ou contratuais, usualmente o mais indicado é classificar os trabalhadores das células de manufatura como operadores, pois esta estrutura requer que os trabalhadores movam-se de um posto de trabalho para outro, mantendo o fluxo de produção, que é a característica básica das operações.

Entretanto, quando os outros cargos são eliminados e as respectivas funções atribuídas aos operadores, uma nova visão para um plano de cargos e salários deve ser estabelecido, principalmente para manter a motivação e a conseqüente produtividade do pessoal, apesar de os operadores sentirem uma grande satisfação em executar diferentes tarefas, maior poder de decisão e sentirem-se como parte importante de uma equipe. Portanto, uma nova política de remuneração deve ser elaborada também, pois o operador de uma célula de manufatura é multifuncional, acarretando um enriquecimento do cargo.

1.3.5.7 Outras Áreas

Outras áreas, que apesar de não estarem ligadas diretamente às atividades de produção, também são normalmente afetadas pelas células de manufatura, e podem-se citar:

- **Contabilidade:** Normalmente é a unidade da empresa responsável pela apuração dos custos. Ela deve adaptar seus sistemas para possibilitar a coleta e processamento de informações de custos pois o trabalho não é mais atribuído a uma máquina, ou posto de trabalho mas sim a um grupo de máquinas.
- **Compras e Controle de Materiais:** É comum adotar-se nas células de manufatura o conceito de Just in Time, Kanban e em certas situações é estabelecido um contato direto entre o fornecedor e um operador da célula. Com isto os procedimentos de compra, controle e os horizontes de planejamento devem ser adaptados para a nova realidade. É às vezes instituída parcerias com fornecedores, para longos períodos de fornecimento, mudando assim as estratégias de negociação e os termos dos contratos de compras.
- **Distribuição:** A empresa passa a responder mais rapidamente aos clientes e isto traz um impacto direto na cadeia de distribuição. Esta cadeia deve ser examinada, podendo-se reduzir o estoque de produtos acabados, o sistema de transporte, os centros de distribuição, o que também é muito usado para justificar projetos de células de manufatura.

1.3.6 Etapas de um Projeto de Célula de Manufatura

As células representam um compromisso entre a flexibilidade do arranjo físico por processo e a simplicidade do arranjo físico por produto (SLACK [30]). No caso do arranjo físico por processo, o foco está na localização dos vários recursos da operação. Já o arranjo físico por produto, o foco está nos requisitos do produto. O arranjo celular deve considerar as necessidades de ambos. Para simplificar a tarefa de projetar, às vezes é interessante concentrar-se em um dos aspectos.

Concentrando-se no processo, pode-se usar uma técnica de agrupamento (cluster analysis) para determinar quais grupos de processo agrupam-se naturalmente. Isto envolve o exame de cada tipo de processo e o questionamento de quais outros tipos de processo um produto, ou peça, irão requisitar. Concentrando-se no produto, pode-se usar um sistema de codificação e classificação de peças. Estes sistemas utilizam códigos de múltiplos dígitos para cada peça ou produto. Os códigos indicam características das peças ou produtos tais como forma, tamanho, material usado, e outros fatores que definem algumas de suas necessidades de processamento. Existem vários sistemas de codificação disponíveis comercialmente: o sistema Brisch do Reino Unido, o sistema Opits da Alemanha e o sistema Miclass da Holanda (SLACK [30]).

Entretanto, uma das abordagens mais usada para alocar tarefas e máquinas à células é a Análise do Fluxo de Produção (PFA) pois considera simultaneamente os requisitos do produto e o agrupamento dos processos.

Segundo NYMAN [26] um dos principais fatores de sucesso de um programa para a implantação de células de manufatura é a equipe do projeto pois a implantação requer a quebra de uma série de tradições e tabus. Mas o ponto de partida deve ser dado e assumido pela alta direção da empresa que deve acompanhar de perto todas as fases do programa de implantação.

É importante notar que várias unidades e sistemas da empresa são afetados e portanto deve ser desenvolvido um projeto específico para cada uma dessas áreas para adequá-las à utilização das células de manufatura.

Para a implantação de um programa de implantação de células de manufatura, NYMAN [26] propõe as seguintes etapas:

- Lançamento do Programa;
 - elaboração do Programa de reestruturação da organização;
 - anteprojeto de implantação;
 - projeto básico.
- Levantamento de Dados;
 - organização do trabalho;
 - Informações sobre os produtos;
 - Informações sobre os processos;
 - previsões;
 - dados sobre o mercado e clientes;
 - utilização das máquinas e equipamentos;
 - fluxo do processo;
 - arranjo físico;
 - máquinas e equipamentos disponíveis;
 - qualidade;
 - controle da produção e programação;
 - tempos de processamento;
 - ciclos de operação;
 - estoques;
 - ferramentas.
- Concepção da Célula de Manufatura;

- Processos;
 - carregamento;
 - máquinas e equipamentos;
 - fluxo do processo;
 - arranjos físicos alternativos;
 - movimentação de materiais;
 - modelagem e simulação;
 - financeiro e econômico.
- Avaliação
 - custo benefício;
 - seleção da melhor alternativa;
 - aprovação.
 - Acompanhamento;
 - Projeto final;
 - Implantação.

Este texto aborda a etapa relativa à concepção da célula, concentrando-se na modelagem, que é a aplicação de Tecnologia de Grupo, na simulação e nos aspectos econômicos.

1.3.7 Cuidados ou Problemas que podem surgir com a implantação

É comum algumas empresas buscarem introduzir na manufatura novas e sofisticadas tecnologias, pensando que este é o grande fator diferencial para o aumento da produtividade. Isto acontece também com a implantação de células de manufatura. Busca-se passar diretamente de uma estrutura tradicional para o mais sofisticado tipo de célula que é o FMS (sistema flexível de manufatura). Esta prática tem levado várias empresas ao fracasso na implantação, gastando grandes somas de dinheiro e o que é pior, após a reestruturação seus resultados pioram significativamente. A implantação de célula de manufatura é complexa e interfere praticamente em todas as áreas e rotinas da empresa. Portanto, o melhor, e o mais indicado, é começar da maneira mais simples possível, aproveitando ao máximo as máquinas já existentes e os mesmos processos que vêm sendo utilizados, de modo que todas as áreas vão avançando simultaneamente e de uma maneira organizada e planejada caminhem para uma evolução tecnológica.

A engenharia do produto e a equipe de mercado devem estar plenamente envolvidas e comprometidas com o programa de implantação de células de manufatura. Pode-se dizer que a continuidade do sucesso, após a implantação das células, depende fundamentalmente

destas duas áreas, pois pequenas mudanças no projeto do produto ou o lançamento de novos produtos podem implicar em grandes problemas e dificuldades para a manufatura. Pode inclusive descaracterizar toda a estrutura de família de peças e grupos de máquinas concebidos no projeto original de implantação. Assim, compatibilizar as atividades de projeto e de manufatura é essencial para manter a flexibilidade que é uma das características desta estrutura, entretanto não é uma tarefa fácil, pois exige uma mudança radical nos procedimentos e na tomada de decisão.

Outro ponto importante é destacado por LORINI [21]: "Como em qualquer ambiente em que se pretende introduzir mudanças de atitudes ou procedimentos, envolvendo aspectos humanos, haverá sempre uma natural resistência a reestruturar os hábitos e rotinas de trabalho, em qualquer nível que se atue. Implementar uma nova filosofia para organizar um ambiente de manufatura, como a Tecnologia de Grupo, não é diferente. Por isso, um processo de alteração da organização irá gerar fortes resistências e terá que ter um assíduo acompanhamento e principalmente um envolvimento da gerência maior, um ponto de sustentação e decisão para resolver os conflitos que inevitavelmente irão ocorrer". A resistência a mudanças pode aparecer de diferentes formas, em função da personalidade de cada pessoa envolvida e também em diferentes graus.

Finalmente, a estruturação em células de manufatura pode muitas vezes não ser o mais adequado e sua adoção, muitas vezes decidida por modismo, pode prejudicar consideravelmente os resultados que a empresa vinha alcançando na estrutura convencional. Portanto, antes de sua adoção, as atividades, estrutura, processos e produtos da empresa, devem ser exaustivamente estudados para se tomar a decisão mais adequada. Por outro lado, a etapa relacionada à Tecnologia de Grupo pode gerar alternativas que, se adotadas, podem propiciar resultados piores que a estrutura convencional, em função de vários outros fatores que normalmente não são considerados.

1.3.8 Uma Anlise da Abordagem Atual

Como se pôde ver, as células de manufatura requerem, para sua implantação, várias etapas e vários projetos aplicados nas diferentes áreas da empresa. Sob o enfoque de formulação de problemas, o que torna o projeto de células de manufatura um problema complexo é o grande número de variáveis envolvidas, de diversas naturezas e muitas vezes conflitantes entre si sob o aspecto de otimização. A estruturação de uma unidade de produção em células de manufaturagem implica numa simplificação matemática profunda quantos aos modelos de programação da produção pois, pode-se passar de um modelo com $n! \times m$ possibilidades de seqüências de produção para vários modelos, tantos quantos forem o número de células, de $n!$ possibilidades. Isto implica também em mudanças na elaboração dos planos mestres de produção e deve-se ter um programa geral que agregue todos os programas das células, sob pena de se ter um comprometimento significativo dos prazos de entrega dos produtos finais e um aumento dos produtos em processo (estoques intermediários de peças, conjuntos e produtos semi-acabados). Se esta reformulação não for adequada, todos os benefícios relacionados à produtividade (eficiência) não serão obtidos.

Outro item importante é o relacionado aos operadores. Tanto sob o aspecto de capacitação quanto ao dimensionamento e organização do trabalho. Na reestruturação em células de manufatura a mão-de-obra existente terá que passar por um programa de educação e treinamento e depois, distribuída entre as células. Esta distribuição deve ser feita com o uso de ferramentas de apoio eficientes, pois caso contrário pode provocar um desbalanceamento enorme na mão-de-obra, gerando para alguns operadores ociosidade e para outros sobrecarga de trabalho. O dimensionamento e a distribuição da mão-de-obra não é um problema trivial, principalmente se a referência for a estrutura anterior, o que é normalmente uma tendência de conduta.

As demandas de cada peça ou produto e os respectivos tempos de processamento em cada máquina são itens de grande relevância para os projetos de células de manufatura. As mudanças nas movimentações das peças pela fábrica e a diminuição dos estoques intermediários, interferem diretamente no desempenho.

Com relação à Tecnologia de Grupo pôde-se constatar que várias técnicas foram, e ainda estão sendo aplicadas para desenvolver novas soluções para agrupamento. Dispõe-se atualmente de bons algoritmos que utilizam diferentes critérios e cobrem uma grande quantidade de problemas. Estas soluções são muito eficientes quando se obtêm células puras, ou seja, todos os elementos da matriz final de solução estão na sua diagonal principal. Entretanto, quando pela próprias características do problema em estudo, têm-se elementos excepcionais na matriz final, o distanciamento da realidade ou das necessidades de um projeto de células de manufatura se tornam evidentes. A Tecnologia de Grupo, qualquer que seja o algoritmo utilizado, tem como base somente as informações relativas às operações necessárias de cada peça e os tipos de máquinas disponíveis, considerando somente uma unidade de cada tipo, o que em grande parte das aplicações é uma grande restrição. Já as células de manufatura, como visto anteriormente, é cercada de um grande número de variáveis. Estas diferenças de considerações e necessidades, entre a Tecnologia de Grupo e as células de manufatura, abrem uma lacuna que deve ser melhor analisada. Em relação aos resultados objetivados com a implantação de células de manufatura, os elementos excepcionais obtidos na solução final podem comprometer, e muito, a obtenção destes, e em muitas vezes, levá-los para níveis piores que os alcançados na estrutura convencional.

A obtenção de elementos excepcionais na matriz final, dada como solução por um algoritmo de Tecnologia de Grupo, significa que não se conseguiu agrupar perfeitamente as peças em famílias e as máquinas em células, de forma a se obter células puras, ou seja, o elemento excepcional indica que aquela peça necessita de processamento em outra célula, além da sua célula de origem. Isto não é necessariamente devido à ineficiência do algoritmo de Tecnologia de Grupo empregado, mas sim em função das características do problema em estudo. Os elementos excepcionais trazem uma série de inconvenientes e muitas vezes contrários aos conceitos de estruturação em células de manufatura.

Para tratar os problemas de elementos excepcionais, que é justamente a interface entre a aplicação da Tecnologia de Grupo e o projeto das células de manufatura, existem algumas sugestões feitas por autores, que serão apresentadas e depois analisadas.

Segundo SLACK [30] quando ocorre a existência de elementos excepcionais, existem três formas de se lidar, mas nenhuma delas totalmente satisfatória:

1. Outra máquina igual à máquina que processa o elemento excepcional, poderia ser comprada e alocada na célula original da peça que tem elemento excepcional. Isto resolveria o problema, mas requereria investimento de capital para a compra da nova máquina que poderia ficar subutilizada.
2. Mandar as peças que têm elementos excepcionais para a outra célula, depois de terem sido processadas na célula original, ou mesmo no meio de seu roteiro de produção, se necessário. Esta solução evita a necessidade de compra de outra máquina, mas entra em conflito com um das idéias básicas do arranjo celular que é obter simplificação de um fluxo previamente complexo.
3. Se há vários componentes com este problema, pode ser necessário conceber uma célula especial para eles, normalmente chamadas de fractional cells ou células de remanescentes, que seria quase como um mini-arranjo físico por processo. Novamente, isto não é totalmente de acordo com a simplicidade buscada pelo arranjo celular e também pode envolver algum investimento de capital. A célula de remanescentes, entretanto, remove os componentes inconvenientes do resto da operação, deixando-a com um fluxo mais simples e previsível.

LORINI [21] sugere quatro possibilidades para tratar as peças que têm elementos excepcionais:

1. Serem fabricadas em um ambiente de lay out funcional.
2. Terem rotas de processamento alteradas, buscando-se em um plano alternativo a adequação às células existentes.
3. Serem reprojetadas, de modo que se tornem compatíveis com os aspectos de processo dos demais itens existentes.
4. Terem sua fabricação contratada por terceiros.

Já SÉRIO [29] é enfático e sugere que os elementos excepcionais devem ser eliminados e para isto existem cinco maneiras:

1. Replanejar as operações das peças que têm elementos excepcionais, por estarem fora de sua célula original, para outras máquinas já pertencentes ao grupo original, de tipo semelhante.
2. Relocar equipamentos entre os grupos principais.
3. Mudar o método

4. Mudar o projeto
5. Comprar a peça em vez de fabricar

Segundo GROOVER [10], invariavelmente existirão peças que não se ajustarão perfeitamente a um único grupo, ou seja, terão elementos excepcionais. Estas peças devem ser analisadas para se determinar se a sua sequência de operações pode ser desenvolvida de maneira que pertençam a um único grupo. Se isto não for possível, estas peças devem continuar sendo fabricadas em um processo convencional.

1.3.8.1 Células de Remanescentes ou *Fractional Cells*

Quando existem elementos excepcionais após a diagonalização dos blocos, uma das alternativas indicadas na literatura é tentar a formação da *fractional cell*, ou célula de remanescentes, isto é, parte das máquinas são agrupadas em células e as restantes são agrupadas em uma célula de "remanescentes", que funciona como um jobshop. O uso prático deste método pode ser observado no estudo de WEMMERLOV e HYER [35].

Como já visto anteriormente, segundo MURTHY [25], embora a idéia de formação de "fractional cell" venha sendo mencionada na literatura de Tecnologia de Grupo, como BURBIDGE [3] e GREEN e SADOWSKI [9], onde é considerada a idéia de célula remanescentes, observa-se pouca pesquisa nesta área. O número de elementos excepcionais pode ser reduzido em uma grande quantidade de problemas, pela constituição de células de remanescentes. Na formação tipo *fractional cell* é permitida a movimentação de peças de uma célula para uma célula de remanescentes, mas a movimentação entre células deve ser evitada. Nesta análise, o movimento de uma célula para outra é tratado como um elemento excepcional enquanto que o movimento de uma célula para uma célula de remanescentes não é considerado como um elemento excepcional. O objetivo é minimizar os elementos excepcionais. Se uma solução é obtida sem nenhum elemento excepcional, a matriz é perfeitamente conveniente para formação de *fractional cell*, desde que exista movimentação de material somente entre células e células de remanescentes.

Entretanto, vale observar que independente da peça estar se movimentando de sua célula original para uma outra célula ou para uma célula de remanescentes, os aspectos indesejáveis de movimentação são os mesmos. É verdade que a célula de remanescentes proporciona uma solução que dependendo das características do problema em estudo, necessita de um investimento menor para aquisição de máquinas, mas muitas vezes, também dependendo das características do problema, se a solução fosse tratada de outra maneira, este investimento em máquinas não seria necessário. Quanto aos aspectos de produção, esta movimentação pode comprometer a capacidade do sistema e como consequência os resultados. Além disto, a programação e o controle da produção podem ficar extremamente complexos e como o grupo de operadores na estrutura celular passa a ser o responsável pelos resultados da célula, a priorização da produção destas peças que possuem elementos excepcionais fica na dependência do interesse dos operadores quanto aos resultados objetivados pelo grupo, isto poderá acarretar uma ociosidade das máquinas de outras células, principalmente quando o elemento

excepcional de uma determinada peça se dá no meio de sua sequência de operações, pois a peça sai da célula e a continuidade de seu processamento dependerá de quando a outra célula dará o seu retorno.

A seguir será analisada a movimentação de uma peça entre uma célula e outra, ou para uma célula de remanescentes (*fractional cell*), verificando-se os efeitos desta movimentação. O problema a seguir será usado para estudar esta movimentação: Uma dada peça tem a sequência de operações conforme mostra a Figura 1.8, e que representa um pequeno trecho da estrutura da manufatura original.

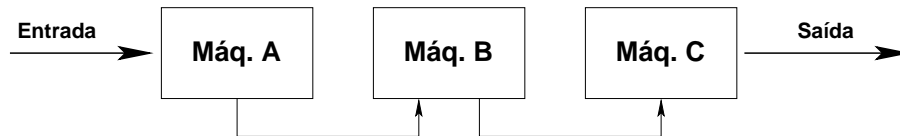


Figura 1.8: Sequência de operações da peça na estrutura de manufatura original

Após a reestruturação em células de manufatura obteve-se um elemento excepcional pelo processamento desta peça na máquina B, que após o agrupamento, pertence a outra célula, ou a uma célula de remanescentes, conforme mostra a Figura 1.9.. Para manter-se as características de células de manufatura, é necessário criar uma estação de transferência entre as duas células obtidas

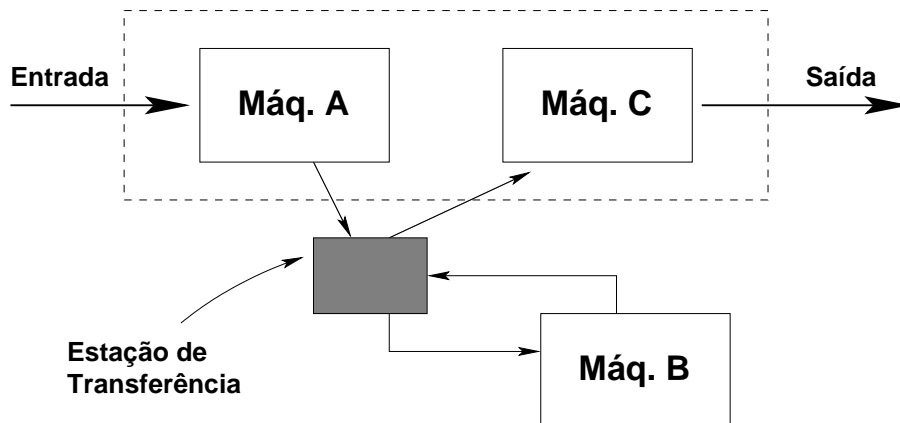


Figura 1.9: Sequência de operações da peça na nova estrutura em células de manufatura

Analisando-se a Figura 1.8 pode-se observar que a peça, após a entrada no processo, tem duas movimentações: uma entre a máquina A e a máquina B e outra entre a máquina B e a máquina C. Já na estrutura celular (Figura 1.9), pode-se observar o aumento da necessidade de movimentações, pois após a entrada, a peça deve fazer quatro movimentações: a primeira entre a máquina A e a estação de transferência, outra entre a estação de transferência e a máquina B, outra entre a máquina B e a estação de transferência e finalmente entre a estação

de transferência e a máquina C. Portanto, sempre que se obtém um elemento excepcional, aumenta-se em duas o número de movimentações necessárias, para cada elemento excepcional obtido com a solução final. Este fato vai diretamente contra alguns conceitos que norteiam os projetos de célula de manufatura que são: diminuir as necessidades de movimentações das peças, diminuir os estoques intermediários, facilitar o fluxo de materiais e facilitar a programação e o controle da produção. Este trabalho busca uma solução, ou melhorar a decisão nos projetos de células de manufatura, para os casos em que se obtém elementos excepcionais na solução final da Tecnologia de Grupo.

1.3.8.2 A Importância da Consideração das Demandas e dos Tempos de Processamento nos Projetos de Células de Manufatura

Quando se busca organizar a estrutura de produção em células de manufatura, pode-se querer reestruturar a fábrica toda, transformando-a em diversas células de manufatura, ou pode-se querer reestruturar somente uma parte desta, para processar apenas algumas peças previamente selecionadas.

1. No primeiro caso, está-se levando em conta todos os recursos disponíveis na estrutura original, relocando-os em células de manufatura e todas as peças produzidas, agrupando-as em famílias.
2. No segundo caso, somente parte dos recursos e peças são relocados.

Como já visto, a Tecnologia de Grupo entra justamente nesta etapa que é a referente a determinação do agrupamento de máquinas em células e de peças em famílias. Entretanto, nenhum algoritmo de Tecnologia de Grupo faz esta distinção e isto pode trazer sérias implicações.

- **Considerando a estruturação da fábrica toda:** Para melhor entender as implicações, pode-se supor que a estrutura original é organizada em um *layout funcional*. Esta estrutura é composta por várias máquinas de cada tipo ao passo que a Tecnologia de Grupo convencional considera somente uma máquina de cada tipo. É fácil perceber que a estrutura original tinha uma certa capacidade de produção, em função do número de máquinas de cada tipo disponíveis e portanto, poderia atender uma certa demanda de cada peça fabricada, mas a solução proposta por um algoritmo de Tecnologia de Grupo aponta para a alocação de apenas uma máquina de cada tipo nas diversas células de manufatura e nunca um determinado tipo de máquina poderá pertencer a mais de uma célula. Assim, é óbvio concluir que a adoção direta da solução proposta por um algoritmo de Tecnologia de Grupo convencional implicará em uma redução da capacidade de produção em relação à estrutura original, que dependendo do caso pode ser substancial. Sendo assim, é necessário, após a obtenção da solução final proposta por um algoritmo de Tecnologia de Grupo e antes de se dar continuidade ao projeto das células de manufatura, se fazer uma análise detalhada das capacidades

destas células de manufatura, considerando-se para seus dimensionamentos os tempos de processamento de cada peça em cada máquina e as respectivas demandas.

- **Considerando a estruturação somente de uma parte da fábrica:** Neste caso, somente alguns recursos serão relocados e somente algumas peças serão consideradas e todas as observações feitas para o caso anterior também são válidas para este, mas, além destas, outras implicações surgem nesta situação, pois parte dos recursos serão reestruturados em células e os outros permanecerão na estrutura original processando as peças que não foram selecionadas. Tomando-se todos os cuidados descritos para o caso anterior para dimensionar as células, é muito provável que não se tenham problemas para atender as demandas requeridas das peças processadas na nova estrutura celular. Entretanto, as demandas das peças não selecionadas para a reestruturação podem ter o atendimento das demandas comprometido, pois a reestruturação foi feita com a relocação de parte dos recursos disponíveis na estrutura original e se por acaso estes recursos também eram utilizados pelas peças não selecionadas, a estrutura original não terá mais a disponibilidade destes recursos e isto poderia, no caso extremo, inviabilizar a fabricação de algumas peças ou não ter capacidade para atender as demandas requeridas. Portanto, é necessária uma análise detalhada antes de se dar continuidade ao projeto das células de manufatura, tanto dos aspectos relacionados à produção, quanto da viabilidade econômica de se fazer investimentos na compra de novos equipamentos.

O lado oposto também deve ser analisado, ou seja, a reestruturação da produção em células de manufatura para demandas muito baixas. Nas estruturas celulares, principalmente para as mais automatizadas, como é o caso dos FMSs, os custos dos equipamentos, tanto das máquinas, quanto dos sistemas de movimentação, ferramentas, dispositivos de fixação e de controle são muito altos e portanto a máxima utilização destes se torna imprescindível para justificar tal investimento e a reestruturação. Por isto é importante considerar as demandas de cada peça e os respectivos tempos de processamento de cada peça em cada máquina.

1.3.8.3 Algoritmos que Consideram as Demandas, as Seqüências de Operações e os Tempos de Processamento como Critério para a Formação de Famílias e Células

Os algoritmos convencionais de Tecnologia de Grupo consideram somente a matriz de incidência para as propostas de solução. A partir destes algoritmos, vários autores propõem extensões, incorporando outros aspectos e variáveis, objetivando a minimização ou maximização de algum critério por eles estabelecidos. A seguir serão apresentados alguns algoritmos que consideram as demandas de cada peça e/ou os tempos de processamento de cada peça em cada máquina e/ou as seqüências de operações.

AHMED [1] considera o volume a ser produzido de cada peça (demanda) e os custos de movimentação. Seu algoritmo heurístico é conhecido como VMC (volume and material handling cost) e parte da matriz de incidência. A solução inicial consiste em considerar cada máquina como sendo uma célula. O algoritmo prossegue iterativamente, combinando duas

células (máquinas) em cada interação. O custo total de movimentação vai mudando para cada par formado e o par que fornece a maior redução do custo é então agrupado.

LOGENDRAN [20] considera o peso total das movimentações intra e inter- células como medida de desempenho na fase de agrupamento e em uma segunda fase propõe uma rotina de melhoramento da solução. Este algoritmo é uma extensão de um outro trabalho do autor (1990) que não considerava as seqüências de operações.

OKOGBAA [27] propõe um algoritmo heurístico INCFR (inter-cell flow reduction) onde a formação inicial da célula é feita pela escolha das máquinas que proporcionam a mínima movimentação entre si (IMF). A seqüência de operações é usada para determinar o número de operações consecutivas que ocorrem entre um par de máquinas. Para cada máquina ainda não escolhida, ou alocada, é calculado um parâmetro chamado SCR (safety combination rate) para cada célula candidata. As máquinas com valores de SCR mais altos que um valor limite previamente especificado são assinaladas para uma célula candidata na ordem decrescente dos IMF. OKOGBAA propõe ainda uma extensão do INCFR que considera as demandas de cada peça.

HARHALAKIS [13] propõe uma solução para variações das demandas de cada peça, considerando uma demanda média objetivada para cada peça e seus respectivos desvios padrão. Considera também os tempos de processamento de cada peça em cada máquina e as seqüências de operações. O procedimento proposto é composto por dois passos. No primeiro passo é determinado o valor médio viável de produção de cada tipo de peça, independente da configuração final das células, visando à maximização do lucro. No segundo passo é determinada a movimentação média de cada configuração candidata, obtida pela aplicação do algoritmo proposto por HARHALAKIS [12]. Vale observar que a consideração das demandas é utilizada somente para balizar a solução do primeiro passo.

VERMA [33] propõe um algoritmo heurístico que considera as seqüências de operações, a demanda de cada peça e o custo de movimentação intra e inter-células. Inicialmente cada máquina é considerada como sendo uma célula e em cada interação posterior cada par de células é considerado para ser combinado em uma única célula e, a mudança do custo total de movimentação devido a esta junção é calculado, tendo como base as seqüências de operações, os custos de movimentações intra e inter-células, tanto os de saída das células quanto os de retorno, e, a demanda de cada peça é usada como fator de peso. A escolha para se fazer a junção de um par de células é feita tendo como referência a mudança mais negativa do custo total de cada um dos pares. Este procedimento é repetido até que não se tenha mais redução dos custos totais de movimentação pela junção de células.

Vale observar que todos os algoritmos apresentados obtêm a solução em mais de um passo. Nenhum deles, exceto HARHALAKIS [13], considera simultaneamente as seqüências de operações de cada peça, as demandas de cada peça e os tempos de processamento de cada peça em cada máquina. Mas mesmo HARHALAKIS [13] considera as demandas bem como os tempos de processamento somente para limitar a solução do primeiro passo de seu algoritmo, ou seja, não considera estes aspectos para a obtenção da solução final. Tendo como base a análise das movimentações feita, é fácil concluir que na busca da quantificação das movimentações é imprescindível a consideração dos tempos de processamento de cada peça,

bem como os tempos das movimentações entre as células e não somente seus custos, pois, dependendo dos valores destes tempos, as movimentações podem não trazer degradações dos resultados ou podem penalizar significativamente as capacidades das células. Outro ponto importante também a ser considerado é a maneira que é feita esta movimentação, ou peça por peça ou em lotes. Esta análise não é feita por nenhum dos algoritmos apresentados. E, o mais importante, nenhum dos algoritmos elimina a possibilidade de se obter elementos excepcionais na solução final e portanto, assim como os algoritmos convencionais, pode gerar soluções de agrupamento que aplicado ao projeto de células de manufatura, sem uma análise bem detalhada, não traga os resultados esperados.

1.3.8.4 A Ligação entre a Tecnologia de Grupo e o Projeto de Células de Manufatura

Já pode ser considerado evidente, levando em conta tudo que foi mostrado até aqui, a importância da Tecnologia de Grupo para os projetos de células de manufatura, pois é esta que basicamente determina a configuração que terá a nova estrutura de produção. Dependendo da solução obtida nesta fase, pode-se obter uma estrutura que leve à obtenção de todos os benefícios propiciados pela estrutura celular ou pode-se obter uma estrutura cujos resultados podem ser inferiores à estrutura original, o que será mostrado no próximo item. Esta degradação dos resultados acontece basicamente quando se têm elementos excepcionais na solução final e conforme GROOVER [10] isto é quase que inevitável de acontecer na maioria das aplicações, pois, quando o aparecimento de elementos excepcionais na solução está relacionado diretamente à estrutura do problema em estudo, não há algoritmo que possa modificar esta situação.

Apesar da importância dos elementos excepcionais no desempenho da estrutura celular, percebe-se uma lacuna entre a aplicação da Tecnologia de Grupo e o projeto das células propriamente dito. Como mostra o texto acima, na literatura existente não foi encontrado um procedimento preestabelecido que avalie efetivamente o desempenho da solução proposta quando aplicado diretamente na linha de produção. Mesmo as recomendações mostradas apontam para algumas decisões a serem tomadas, antes que seja feita uma análise aprofundada dos efeitos dos elementos excepcionais. Sendo assim, considera-se que esta lacuna existente entre a Tecnologia de Grupo e o Projeto de Células de Manufatura é de relevante importância.

Entretanto, este processo de análise envolve uma estrutura de resolução de problemas complexa devido ao tamanho do problema e a grande variedade de elementos considerados. Sendo assim, a análise do problema foi feita em várias etapas, através da aplicação de vários algoritmos de Tecnologia de Grupo, da simulação de vários cenários, análise dos resultados obtidos, estabelecimentos de hipóteses, validação e finalmente, após o equacionamento adequado do problema, o desenvolvimento de modelos distintos que poderiam ser aplicados à solução de diversas situações.

Referências Bibliográficas

- [1] M. U. Ahmed, N. U. Ahmed, and U. Nandkeolyar. A volume and material handling cost based heuristic for designing cellular manufacturing cells. *Journal of Operations Management*, 10(4):488–511, 1991.
- [2] F. F. Boctor. A linear formulation of the machine-part cell formation problem. *International Journal of Production Research*, 29:1081–1100, 1991.
- [3] J. L. Burbidge. Production flowanalysis. *Production Engineer*, 1971.
- [4] H. M. Chan and D. A. Milner. Direct clustering algorithm for group formation in cellular manufacture. *Journal of Manufacturing Systems*, 9, 1982.
- [5] M. P. Chandrasekharan and R. Rajagopalan. MODROC: An extension of rank order clustering for group technology. *International Journal of Production Research*, 24:1221–1233, 1986.
- [6] M. P. Chandrasekharan and R. Rajagopalan. ZODIAC-an algorithm for concurrent formation of part families and machine cells. *International Journal of Production Research*, 25:835–850, 1987.
- [7] C. H. Chu. Cluster analysis in manufacturing cell formation. *Omega*, pages 289–295, 1989.
- [8] C. Dagli and R. Huggahalli. Neural network approach to group technology. In New York: Elsevier, editor, *Knowledge Based Systems and Neural Networks-Techniques and Applications*, pages 213–228. R. Sharda and J. Y. Cheung and N. J. Cochran, 1991.
- [9] T. J. Green and R. Sadowski. Cellular production control. *Journal of Manufacturing Systems*, 12(2):137–144, 1983.
- [10] M. Groover. *Automation, Production Systems and Computer Integrated Manufacturing*. New Jersey: Prentice Hall, 1987.
- [11] I. Han. Introduction to group technology. Technical Report MMR076-03, Society of Manufacturing Engineers, Dearbon, Michigan, 1976.

- [12] G. Harhalakis. An efficient heuristic in manufacturing cell formation for group technology application. *International Journal of Production Research*, 28:185–198, 1990.
- [13] G. Harhalakis, G Ioannou, I. Minis, and R. Nagi. Manufacturing cell formation under random product demand. Technical report, Institute for Systems Research, University of Maryland, 1993.
- [14] S. S. Heragu. Group technology and cellular manufacturing. *IEEE, Trans. Sys. Man. Cybern.*, 1994.
- [15] S. Kaparthi and N. C. Suresh. Machine-component cell formation in group technology: a neural network approach. *International Journal of Production Research*, 30(6):1353–1367, 1992.
- [16] J. R. King. Machine-component grouping in production flow analysis: an approach using a rank order clustering algorithm. *International Journal of Production Research*, 18:213–232, 1980.
- [17] J. R. King and V. Nakornchai. Machine-component group formation in group technology: Review and extension. *International Journal of Production Research*, 20, 1982.
- [18] A. Kusiak. *Intelligent Manufacturing Systems*. Prentice Hall International - New Jersey, 1990.
- [19] A. Kusiak and W. S. Chow. Efficient solving of the group technology problem. *Journal of Manufacturing Systems*, 6:117–124, 1987.
- [20] R. Logendran. Impact of sequences of operations and layout of cells in cellular manufacturing. *International Journal of Production Research*, 1991.
- [21] F. J. Lorini. *Tecnologia de Grupo e Organização da Manufatura*. Editora da UFSC, 1993.
- [22] B. Malakooti and Z. Yang. A variable-parameter unsupervised learning clustering neural network approach with application to machine-part group formation. *International Journal of Production Research*, 33:2395–2413, 1995.
- [23] J. McAuley. Machine grouping for efficient production. *Production Engineer*, 51:53–57, 1972.
- [24] Y. Moon. Interactive activation and competition model for machine-part family formation. In Washington D.C., editor, *International Journal Conference on Neural Networks*, volume 2, pages 667–670, 1990.
- [25] V. R. Murth and G. Srinivasan. Fractional cell formation in group technology. *International Journal of Production Research*, 33:1323–1337, 1995.

- [26] L. R. Nyman. *Making Manufacturing Cells Work*. Society of Manufacturing Engineers - MacGraw-Hill, Michigan, 1992.
- [27] O. G. Okogbaa, M. Chen, C. Changchit, and R. L. Shell. Manufacturing system cell formation and evaluation using a new inter-cell flow reduction heuristic. *International Journal of Production Research*, 30(5):1101–1118, 1992.
- [28] H. Seifoddini. A note on the similarity coefficient method and the problem of improper machine assignment in group technology applications. *International Journal of Production Research*, 27(2):1161–1165, 1989.
- [29] L. C. Sérgio. *Tecnologia de Grupo no Planejamento de um Sistema Produtivo*. Editora Ícone - São Paulo, 1990.
- [30] N. Slack, S. Chambers, C. Harland, A. Harrison, and R. Johnston. *Administração da Produção*. Editora Atlas - São Paulo, 1997.
- [31] G. Srinivan and T. T. Narendran. GRAFICS-a nonhierarchical clustering algorithm for group technology. *International Journal of Production Research*, 20:463–478, 1991.
- [32] H. J. Steudel and A. Ballakur. A dynamic programming based heuristic for machine grouping in manufacturing cell formation. *Computers and Industrial Engineering*, 12:215–222, 1987.
- [33] P. Verma and F. Y. Ding. A sequence-based materials flow for designing manufacturing cells. *International Journal of Production Research*, 33(12):3267–3281, 1995.
- [34] T. Vohra, D. S. Chen, J. C. Chang, and H. C. Chen. A network approach to cell formation. *International Journal of Production Research*, 28:2075–2084, 1990.
- [35] U. Wemmerlov and N. L. Hyer. Cellular manufacturing in the u. s. industry - a survey of users. *International Journal of Production Research*, 27:1511–1530, 1989.