

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

VALIDAÇÃO DA ORGANIZAÇÃO CELULAR DE EMPRESA DA INDÚSTRIA
METALMECÂNICA COM BASE NA TECNOLOGIA DE GRUPO

por

Tomás Miranda Aloise

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2018



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

VALIDAÇÃO DA ORGANIZAÇÃO CELULAR DE EMPRESA DA INDÚSTRIA
METALMECÂNICA COM BASE NA TECNOLOGIA DE GRUPO

por

Tomás Miranda Aloise

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof.^a Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Flávio José Lorini

Comissão de Avaliação:

Prof. Patric Daniel Neis

Prof. Flávio José Lorini

Prof. Heraldo José de Amorim

Porto Alegre, junho de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por todo amparo provido para que eu concluísse esta etapa com sucesso;

A meus amigos, que me acompanharam e sem a ajuda e companheirismo dos quais a trajetória não teria sido a mesma;

Ao meu namorado e colega, que me apoiou e me motivou a sempre dar o melhor de mim;

À Universidade, que propõe um espaço desafiador para a discussão e compartilhamento do conhecimento;

Ao meu Prof. orientador, Flávio José Lorini, por sua paciência, compreensão, dedicação e instrução ao guiar-me no desenvolvimento deste trabalho;

À equipe da empresa objeto deste trabalho, por abrir suas portas, compartilhar seu tempo e fornecer apoio para este trabalho.

ALOISE, T. M. **Validação da Organização Celular de Empresa da Indústria Metalmeccânica com Base na Tecnologia de Grupo**. 2018. 24f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

Tendências de mercado pressionam empresas cada vez mais a otimizar seus sistemas produtivos para acompanhar uma redução no ciclo de vida de produtos, perfis de cliente e de demanda variáveis e um tempo de resposta rápido a flutuações de mercado. A implementação de sistemas de manufatura flexíveis se beneficia dos conceitos elaborados pela filosofia da Tecnologia de Grupo, que almeja, através do agrupamento de itens similares, o projeto de um sistema ágil, robusto e flexível, aumentando a produtividade e a qualidade e, ao mesmo tempo, reduzindo custos. O presente trabalho busca validar a organização celular de uma empresa considerada de excelência, a qual teve seu atual arranjo físico fabril estabelecido de forma orgânica, à medida que produtos eram lançados e diretrizes corporativas do sistema enxuto de manufatura, fornecidas. Para a validação, é primeiramente realizada uma aplicação do algoritmo de *Rank Order Clustering*, conforme disposto na literatura – método que, no caso específico, não forneceu um agrupamento satisfatório. Disto, constata-se a necessidade de definição de rotas principais sendo um outro algoritmo aplicado para tanto. Uma nova perspectiva é tomada, considerando os efeitos da máquina gargalo da peça e o algoritmo de identificação de grupos proposto por Kusiak e Chow. O algoritmo não é diretamente aplicável às restrições levantadas, e é, portanto, adaptado. Os resultados obtidos são discutidos com a empresa, cuja equipe constata que a metodologia desenvolvida na definição de rotas ótimas de peças será aproveitada pelos programadores de produção na alocação de peças em células, em horizontes de curto e médio prazo. A partir dessas discussões, também, indaga-se a possibilidade de se obterem melhores resultados somente após uma análise mais abrangente, questionando-se os atuais fluxos produtivos e processos de fabricação e, portanto, sendo repensado o processo produtivo como um todo. Destaca-se, ao fim, a insuficiente discussão na literatura quanto aos métodos e impactos da definição de uma rota ótima no agrupamento e o enfoque da literatura acerca da Tecnologia de Grupo no aspecto matemático do problema.

PALAVRAS-CHAVE: Tecnologia de Grupo, *Rank Order Clustering*, manufatura celular.

ALOISE, T. M. **Validation of a Company's Cellular Organization in the Metalworking Industry Based on Group Technology**. 2018. 24f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

Market trends pressure companies constantly to optimize their productive systems to keep up with a reduction in product life cycles, variable customer and demand profiles and a quick response time to market fluctuations. The implementation of flexible manufacturing systems benefits from the concepts elaborated by the Group Technology Theory, which, through the grouping of similar items, aims for the project of a nimble, robust and flexible system, thus increasing productivity and quality, while at the same time, reducing costs. This work strives to validate the cellular organization of a company considered to be one of excellency, which had its current physical layout established in an organic way, as products were released and corporate guidelines regarding lean manufacturing systems, deployed. For the validation, the Rank Order Clustering algorithm is first applied as described in the literature – a method which, in this specific case, did not provide a satisfactory clustering. From that, the necessity of establishing primary routes is ascertained, for which another algorithm is applied. A new perspective is taken, considering the effects of the part's bottleneck machine and the Clustering Identification Algorithm proposed by Kusiak and Chow. The algorithm is not promptly applicable due to the restrictions raised, and it is, therefore, adapted. The results obtained are then discussed with the company, whose team states that the methodology developed in the definition of optimal part routes is to be employed by the production schedulers in their allocation of parts in cells, for short- and medium-term horizons. From these discussions, as well, it's inquired the possibility of attaining better results only after a broader analysis, questioning the current production flows and the fabrication processes, thus being reassessed the productive process as a whole. It's noted, at the end, the insufficient discussion in literature regarding the methods and the impacts of defining an optimal route in clustering analysis, as well as the literature's focus on the mathematical aspects of the Group Technology problem.

KEYWORDS: Group Technology, Rank Order Clustering, cellular manufacturing.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos do trabalho	1
1.2 Justificativa para o trabalho	2
1.3 Estrutura do Trabalho	2
2. ARRANJOS FÍSICOS NA MANUFATURA	2
3. MÉTODOS DE AGRUPAMENTO CELULAR	3
3.1 Método de ordenamento <i>Rank Order Clustering (ROC)</i>	4
3.2 Método de ordenamento de Kusiak & Chow	5
4 RESTRIÇÕES DE PROJETO.....	6
4.1 Sequência básica de operações	6
4.2 Interdependência das máquinas	6
4.3 Tamanho da célula	7
4.4 Carregamento das máquinas	7
4.5 Balanceamento das células	8
5. DEFINIÇÃO DAS CÉLULAS E ANÁLISE	8
6. IMPLEMENTAÇÃO	9
6.1 Entrada dos dados fornecidos no modelo	9
6.2 Primeira análise: metodologia simples	9
6.3 Segunda análise: definição de rotas principais	10
6.4 Redefinição de rotas principais e aplicação do algoritmo de Kusiak & Chow adaptado	12
7. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
8. CONCLUSÃO	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
APÊNDICE.....	16

1. INTRODUÇÃO

O ciclo de vida de um produto possui quatro estágios: nascimento, crescimento, maturação e declínio. Uma contínua tendência do mercado é a redução do tempo que leva para um determinado produto completar esse ciclo, exigindo que as empresas ofereçam uma variedade de produtos maior e entregues em volumes individuais menores [Askin e Goldberg, 2002]. Para se adequarem perante ciclos de vida menores de produto, maior diversidade na demanda e a exigência de tempos de resposta mais curtos a tais flutuações, as fábricas tiveram de encontrar meios de diminuir seus estoques e adotar sistemas de manufatura mais flexíveis a fim de se manterem competitivas [Lorini, 1993].

Essa tendência tem início no mercado consumidor, contudo, a adoção de sistemas de produção que seguem a filosofia Just in Time, em que o pedido do cliente desencadeia a ordem de produzir, se expande para os fornecedores [Groover, 2011], tornando esse sistema bastante presente na indústria metalmeccânica hoje. Afinal, o sistema produtivo compreende a empresa como um todo, incluindo suas relações com fornecedores e a cadeia de suprimentos. Dentro desse sistema, a combinação dos processos de manufatura forma o sistema de manufatura, o qual, conforme supracitado, para atender às tendências de demanda, tem sido pressionado a tornar-se flexível, no sentido de que se adapta rapidamente a mudanças de demanda e de perfil do cliente [Black, 1998].

Na acepção de Askin e Goldberg, a flexibilidade exigida de uma empresa pode ser dividida entre flexibilidade estratégica e flexibilidade operacional. Esta última, mais pertinente a este trabalho, engloba a flexibilidade de *mix* de peças (a habilidade de alterar a proporção de produção de peças sem altos custos de setup nem de investimentos), de rotas (alternativas de planos de processo ou duplicação de máquinas na fábrica), de operação (opção de produzir internamente e/ou subcontratar a produção), de máquina (número de operações às quais uma máquina pode ser ajustada para atender) e, finalmente, de movimentação de materiais (a capacidade de transportar diferentes quantidades de peças em diversas frequências e diversos pontos). De forma mais ampla e sucinta, Lorini descreve que a flexibilidade de um sistema de manufatura almeja:

“... uma combinação de equipamentos, sistemas de controle e de comunicação integrados na manufatura, para um desempenho de alta produtividade, com capacidade de respostas de modo rápido e econômico a mudanças no ambiente operacional.” [Lorini, 1993].

Uma filosofia que viabiliza sistemas de manufatura flexíveis (*FMS – Flexible Manufacturing Systems*) é a Tecnologia de Grupo, que mediante o agrupamento de peças e recursos em grupos com características semelhantes, i.e., “famílias”, busca vantagens econômicas e operacionais, com ramificações na diminuição de estoques, facilidade no gerenciamento do chão de fábrica, maior capacitação de operadores, redução em ferramental e em tempo de setup, aumento na qualidade, entre outras vantagens. Um dos principais benefícios da aplicação dessa teoria, entretanto, é a redução de tempos improdutivos, os quais, em um sistema tradicional de fabricação com leiaute funcional, compreendem até 95% do tempo total de produção [Lorini, 1993; Kusiak e Chow, 1988].

1.1 Objetivos do trabalho

O objetivo do presente trabalho consiste na validação da atual organização de células de manufatura em uma empresa do setor metalmeccânico sob a ótica da teoria de Tecnologia de Grupo, em que os resultados da análise devem indicar uma aproximação ao estado da arte de organização fabril e a comparação do estado atual da empresa a isto gera propostas para melhorias organizacionais no chão de fábrica decorrentes de novos agrupamentos, assim como a reflexão da sua influência no fluxo de materiais e balanceamento, podendo impactar em ganhos de produtividade.

1.2 Justificativa para o trabalho

A empresa objeto do estudo de caso deste trabalho já opera no que é considerado um modelo eficiente e moderno de produção, o leiaute celular [Amantino, 2005]. Contudo, este foi implementado a partir de diretrizes corporativas, e a inserção de novos produtos e máquinas desde então tem sido feita, também, de maneira empírica e observando-se cada caso, faltando a aplicação do método científico no sistema como um todo. Na fábrica, análises holísticas da organização fabril foram apenas executadas com o objetivo de reduzir riscos de segurança e movimentações entre unidades de manufatura, porém nunca com o objetivo de servir como base para aperfeiçoar o balanceamento da produção. Atualmente, células são sobrecarregadas enquanto outras são subutilizadas, o que, no cenário atual de flexibilização da demanda frente a um orçamento restrito, é inadequado à viabilidade das operações.

Na indústria, a empresa considerada é tomada como um padrão de excelência operacional. Nesse sentido, espera-se que a análise do estado de organização fabril ou (i) confirme os benefícios da implementação do leiaute celular juntamente à aplicação deste de forma empírica, ou (ii) evidencie as perdas oriundas da implementação dessa maneira, assim como da falta de atualização da organização de forma holística. Neste texto é tratada apenas uma unidade produtiva da empresa – um subgrupo que, por si só, representa um conjunto completo de processos fabris de usinagem, conformação e tratamento térmico e dispõe de uma gama de peças bastante variada.

1.3 Estrutura do trabalho

Esta monografia inicia-se na apresentação dos conceitos que fundamentam o trabalho: são descritos os arranjos físicos observados em fábricas, bem como suas principais vantagens e desvantagens (seção 2), e então são definidos e explicados os algoritmos de agrupamento celular empregados (seção 3), as restrições impostas pela operação fabril consideradas na análise (seção 4), e procedimentos de avaliação da eficiência dos agrupamentos resultantes (seção 5). Após a fundamentação, na seção 6 é detalhado o procedimento aplicado na análise desta dissertação, listando-se as aproximações feitas e descrevendo-se a estrutura dos programas desenvolvidos. Ao final, os resultados das análises são reunidos e sua discussão com a empresa é descrita, encaminhando-se à conclusão do trabalho.

2. ARRANJOS FÍSICOS NA MANUFATURA

Conforme Slack et. al., 1999, apud Izquierdo, 2013, há quatro tipos básicos de arranjos físicos: posicional, funcional, celular e em linha (fig. 2.1). O arranjo mais apropriado irá depender principalmente da diversidade dos produtos e do volume da demanda, descrevendo um fluxo mais intermitente ou contínuo (fig. 2.2).

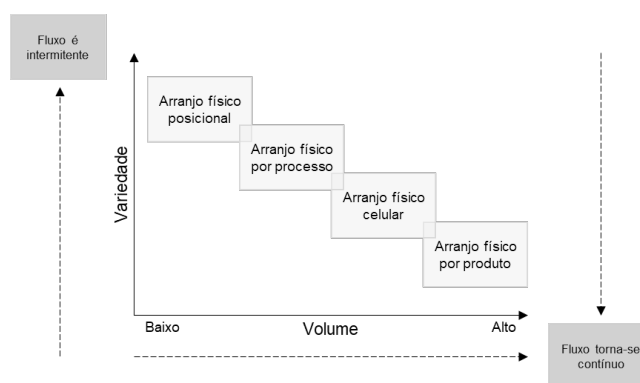


Figura 2.1 – Relação entre variedade e volume em diferentes arranjos físicos – adaptado de Izquierdo, 2013.

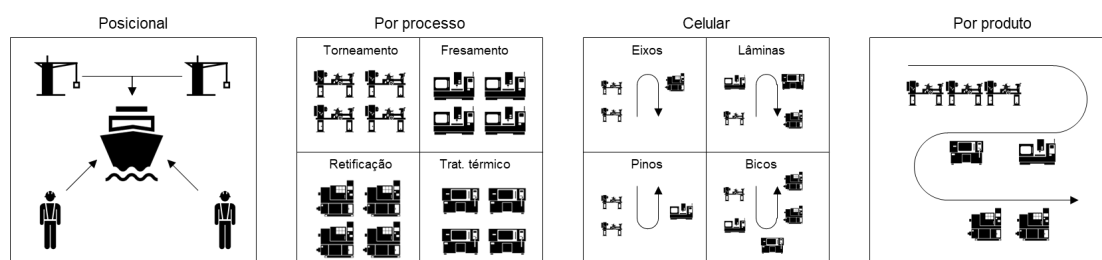


Figura 2.2 – Tipos de leiaute fabril – adaptado de Askin e Goldberg, 2002

Os mesmos tipos são explicados por Askin e Goldberg, 2002 (fig. 2.2). No posicional, insumos, equipamentos e operadores se deslocam até o produto sendo construído, como é o caso na construção civil, de navios e de aeronaves. O arranjo por produto, ou em linha, como também pode ser chamado, é o oposto. Nele, os volumes de demanda são grandes o suficiente para justificar, economicamente, que equipamentos sejam dedicados a um único produto que, como o nome sugere, segue uma linha dedicada à sua manufatura.

Destacam-se na indústria metalmeccânica os arranjos por processo (ou chamado funcional) e celular. O primeiro consiste na disposição de áreas com processos similares, conhecidas também como *job shops*, e é utilizado nos casos em há uma considerável variedade entre os produtos e faz-se necessária a especialização nos processos produtivos. Este arranjo é bastante flexível, porém o excesso de movimentações – as quais compõem o tempo improdutivo de processamento – dificulta o controle do chão de fábrica e resulta em longos tempos de atravessamento, definido como o tempo entre a ordem de produção e a entrega do produto.

Já o segundo, o celular, busca segmentar os produtos em famílias de peças similares, normalmente baseando-se nas máquinas e/ou ferramentais empregados em sua produção. Cada célula é tratada como uma mini fábrica, com tempos de movimentação mais curtos e uma programação da produção dedicada. Dentre as vantagens desse arranjo frente ao por processo (funcional), Izquierdo levanta a melhoria no controle da produção, redução nos tempos de preparação da célula, melhora na qualidade, pela proximidade dos operadores com o produto final, e no geral aumento de velocidade e eficiência oriunda da concentração de recursos em um espaço. Este arranjo, contudo, assim como o leiaute por produto, funciona otimamente quando a demanda é estável e os ciclos de vida dos produtos, longos – a flexibilidade do sistema em si é baixa, e alterações no leiaute fabril em função de mudanças de processo decorrentes de atualizações de produtos podem ser onerosas. Por outro lado, ao mesclar os arranjos por processo e por produto, o arranjo celular propõe, à família de peças que atende, a flexibilidade do leiaute de processo e a eficiência da organização em linha.

3. MÉTODOS DE AGRUPAMENTO CELULAR

A presente metodologia se baseia naquelas empregadas em estudos sobre o tema de Tecnologia de Grupo e sua aplicação à organização do chão de fábrica. Em alguns trabalhos, como os de Amantino, 2005, e Brito, 2010, estruturaram suas análises com início no cadastro padronizado dos dados, então na execução de algoritmos de agrupamento difundidos na literatura, seguida pela aplicação das restrições do projeto de célula. Brito, especificamente, discute a aferição da eficiência do agrupamento conforme disposto na literatura.

A aplicação da Tecnologia de Grupo no âmbito da manufatura, especificamente na formação de famílias de peças e máquinas arranjadas em células, é realizada através de (i) técnicas de classificação ou de (ii) *Cluster Analysis*. As técnicas de classificação englobam os métodos de agrupamento por (a) inspeção visual e (b) classificação por código. O emprego da *Cluster Analysis* é amplo, sendo aplicada à biologia, ao gerenciamento de dados, à medicina, a sistemas de controle, entre outros. Na organização da manufatura, a técnica é aplicada pela formulação de (a) grafos, (b) de programação matemática e (c) de matrizes [Kusiak e Chow,

1988], sendo esta conhecida também como análise de fluxo de produção (*PFA – Production Flow Analysis*), termo cunhado por Burbidge [Lorini, 1993].

Desde o final da década de 1980 e o início da década de 1990, múltiplos algoritmos são descritos por diversos autores na tentativa de melhor modelar o agrupamento de peças e máquinas. Classicamente, têm-se os algoritmos baseados em arranjos, em agrupamento hierárquico e em técnicas heurísticas, assim como suas variações. Mais tarde, foram desenvolvidos algoritmos por meio de analogias com a manufatura, como os genéticos, de redes neurais, *simulated annealing* e modelos *fuzzy* [Brito, 2010].

3.1 Método de ordenamento *Rank Order Clustering (ROC)*

No presente trabalho, o mais relevante algoritmo dentre as análises de arranjo, o Rank Order Clustering (ROC), elaborado por J. R. King em 1980, foi considerado. Amantino, 2005, concluiu em sua análise comparativa que o algoritmo ROC obteve resultados iguais ou superiores aos outros procedimentos considerados, ao mesmo tempo em que sua implementação é mais simples e seu esforço computacional, menor.

O algoritmo de agrupamento hierárquico se inicia no desenho da matriz binária de incidência peça-máquina, com as peças definindo as colunas e as máquinas, as linhas. Na matriz, um valor igual a “1” indica que a peça incide na máquina e que o oposto corresponde a um valor igual a “0”. Para fins de simplificação visual, quando o valor for “0”, o espaço será deixado em branco. O processo que se segue é iterativo, escrevendo-se a palavra binária das linhas em valor decimal – por exemplo, (001010) é equivalente ao decimal “10”, conforme a matriz desenhada na figura 3.1, que será utilizada na ilustração deste algoritmo. Uma vez calculados os valores em base decimal para cada linha, é indicada a ordem sequencial referente à sua grandeza.

$$\text{linha 1: } (0 \cdot 2^5) + (0 \cdot 2^4) + (1 \cdot 2^3) + (0 \cdot 2^2) + (1 \cdot 2^1) + (0 \cdot 2^0) = 10$$

peso:	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0		
	1	2	3	4	5	6	decimal	ordem
1			1		1		10	5
2		1	1				24	4
3	1			1			36	2
4		1	1		1		26	3
5	1			1		1	37	1

Figura 3.1 – Matriz com ponderação nas linhas. Fonte: Lorini, 1993.

Em seguida, as linhas são reorganizadas conforme seus respectivos valores de base decimal em ordem decrescente do topo da matriz à sua base. O mesmo processo é realizado nas colunas, desta vez dispostas em ordem decrescente da esquerda para a direita.

	1	2	3	4	5	6	peso
5	1			1		1	2^4
3	1			1			2^3
4		1	1		1		2^2
2		1	1				2^1
1			1		1		2^0
decimal	24	6	7	24	5	16	
ordem	1	5	4	2	6	3	

Figura 3.2 – Matriz com ponderação nas colunas. Fonte: Lorini, 1993

A partir da reorganização das linhas e então das colunas com base na ordem decrescente dos valores decimais calculados em cada dimensão, e da repetição dos procedimentos quando necessário, tem-se a matriz classificada resultante, em que as famílias de peças e máquinas são, neste exemplo, facilmente visíveis.

	1	4	6	3	2	5	decimal	ordem
5	1	1	1				56	1
3	1	1					48	2
4				1	1	1	7	3
2				1	1		6	4
1				1		1	5	5
decimal	24	24	16	7	6	5		
ordem	1	2	3	4	5	6		

Figura 3.3 – Matriz com linhas ordenadas. Fonte: Lorini, 1993

No exemplo, obteve-se o agrupamento das peças em duas famílias:

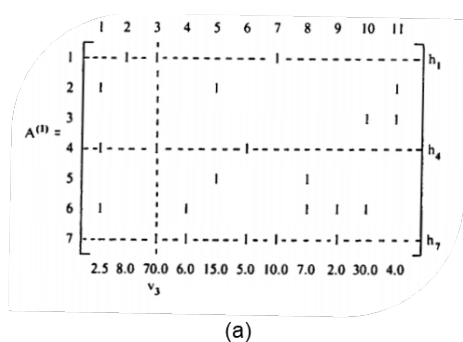
- família 1: peças (1, 4, 6) nas máquinas (5, 3), formando a célula 1;
- família 2: peças (3, 2, 5) nas máquinas (4, 2, 1), formando a célula 2.

3.2 Método de ordenamento de Kusiak & Chow

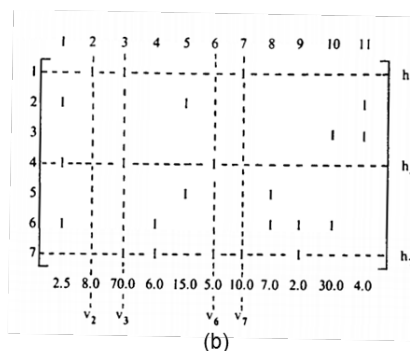
Em 1987, Kusiak e Chow propuseram um algoritmo de identificação celular no artigo “*An Efficient Cluster Identification Algorithm*” (“Um Algoritmo de Identificação de Grupos Eficiente”, em tradução livre). Ao final do mesmo ano, os autores rerepresentaram o algoritmo, desta vez considerando os custos de terceirização da produção no momento de exclusão de peças do agrupamento quando o número máximo de máquinas é atingido.

O algoritmo é heurístico, partindo:

- da seleção de uma peça (coluna) com o maior custo de subcontratação, a partir da qual é traçada uma linha vertical. Todo valor binário “1” que a linha atravessa, indica uma máquina a ser incluída no agrupamento.
- De cada valor “1” cruzado, uma linha horizontal (representativa da máquina) é desenhada, enaltecendo as peças que poderão compor a célula (fig. 3.4a).
- Por ordem decrescente de custo de subcontratação, peça incidente é avaliada quanto ao critério do número máximo de máquinas. Aquelas que não violarem a condição de número máximo de máquinas, são incluídas na célula. Todas outras, são excluídas da análise. No exemplo abaixo, seriam as peças 1, 4 e 9 são excluídas (fig. 3.4b).
- As peças e máquinas agrupadas são removidas da matriz.
- Sobre a matriz resultante, então, realiza-se o mesmo processo. Se ela for vazia, o algoritmo é encerrado (fig. 3.4c). As peças excluídas da análise são então dispostas no lado direito da matriz. (fig. 3.4d).



(a)



(b)

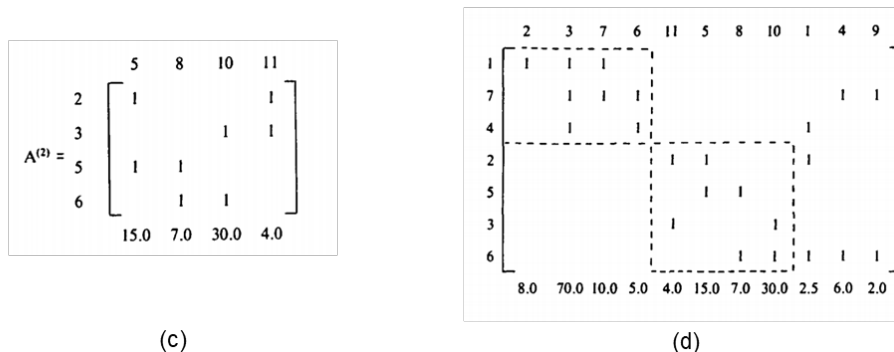


Figura 3.4 – Procedimento do algoritmo de Kusiak e Chow. Fonte: Kusiak & Chow, 1987b.

A maneira como este algoritmo considera os custos de subcontratação deu origem ao tratamento de sobrecarga na análise considerada na seção 6.2. Após a aplicação do ROC, este algoritmo foi considerado integralmente na análise.

4. RESTRIÇÕES DE PROJETO

As restrições consideradas no projeto da célula, são (i) a interdependência das máquinas (ii) o tamanho da célula, (iii) o carregamento das máquinas, e (iv) o balanceamento das células [Lorini, 1993, Amantino, 2005]. Fundamentalmente, contudo, a sequência básica de processos deve ser respeitada no processo de agrupamento.

4.1 Sequência básica de operações

O componente fabricado na unidade produtiva estudada segue a seguinte sequência básica de processos:

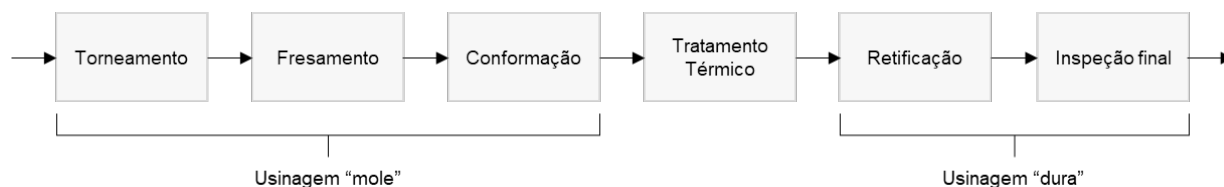


Figura 4.1 – Sequência básica de operações

Atualmente, esta sequência disposta na figura 4.1 é a mesma para as oito células em formato de "U" que compõem a unidade. Eventualmente, as peças requerem operações especiais de usinagem e tratamento térmico, para quais existem máquinas específicas dentro das células e distribuídas em três anexos.

4.2 Interdependência das máquinas

A interdependência das máquinas é entendida como a condição que máquinas diferentes, por razões de compatibilidade, instalação, porte etc., devem sempre estar no mesmo agrupamento. Nesta análise, é considerada ainda no cadastro dos dados para a formação da matriz peça-máquina. Na operação atual, operações gargalo como torneamento e retificação possuem máquinas duplicadas, triplicadas ou até quadruplicadas. Por serem máquinas similares, dimensionadas em função das peças que hoje processam e trabalharem como uma, assim foram consideradas.

4.3 Tamanho da célula

A restrição do tamanho de célula é usualmente adotada como ponto de corte em algoritmos heurísticos, em que é pré-definido um número máximo de máquinas [Amantino, 2005]. Por vezes, ao ser executado um agrupamento, na tentativa de considerar todas as incidências de peças em máquinas, tem-se como resultado um agrupamento muito extenso, o que na prática é compreendido como uma célula de tamanho exagerado, à qual planos de trabalho muito diversos se aplicam, sendo aproximada a um leiaute funcional.

Por se tratar de uma fábrica já organizada em células, o tamanho desta deve ser definido como aquele em que não haja mais de uma máquina para realizar a mesma operação, ou seja, em uma célula, a operação de torneamento de face, por exemplo, deve ser realizada por uma única máquina.

4.4 Carregamento das máquinas

Previamente ao planejamento da produção, i.e., a definição de alocações e prazos para a fabricação dos itens, a condição de carregamento das máquinas deve ser atendida. Em termos práticos, o carregamento $L(i,j)$ é compreendido como o total de horas-máquina que devem ser empregadas para a máquina (i) suprir a demanda da peça (j) estipulada para um certo horizonte de tempo. O carregamento é calculado a partir da multiplicação do tempo de processamento da peça na máquina $t(i,j)$ multiplicado pela demanda no horizonte D_j , a qual é corrigida pela taxa de refugo média da máquina si .

$$L(i,j) = t(i,j) * \left(\frac{D_j}{1-si}\right) \quad 4.1$$

Este número deve ser comparado à disponibilidade da máquina A_i , compreendida como o total de horas-máquina disponíveis no mesmo horizonte de tempo.

$$A_i = (Knp) \cdot ci \quad 4.2$$

K = o tempo de duração de um turno;
 n = número de turnos de trabalho no dia;
 p = período de dias úteis considerado;
 ci = coeficiente de utilização da máquina, que agrega perdas de disponibilidade devido a preparações da máquina, a manutenções, etc.

A condição a ser seguida é que o carregamento total da máquina não deve ser maior que a sua disponibilidade A_i , que pode ser também entendida como o limite de carregamento. Ou seja:

$$\sum_{j=1}^j L(i,j) \leq A_i \quad 4.3$$

Se o carregamento da máquina for superior à sua disponibilidade, constata-se que não é possível atender à demanda de peças dentro do horizonte estipulado, e que não há solução de planejamento de produção que cumpra os prazos de entrega. Dessa forma, a condição de carregamento precede o balanceamento e deve ser considerada no projeto de célula.

Nestas situações, do ponto de vista de sistemas de manufatura, há duas alternativas: ou duplica-se a máquina sobrecarregada ou deixa-se de fazer peças até que a máquina atinja seu nível de carga aceitável. As consequências dessas decisões, contudo, devem ser analisadas cuidadosamente, uma vez que o investimento em uma nova máquina ou a subcontratação da produção usualmente incorrem custos elevados, e devem ser considerados junto à estratégia da empresa.

4.5 Balanceamento das células

Uma vez definidas as alocações das máquinas no ambiente fabril e as peças nelas processadas, as sequências de produção são calculadas com base na capacidade instalada. A programação da produção, nesta etapa, busca o equacionamento das cargas nas máquinas dentro de um horizonte mais curto de tempo, evitando a sobrecarga e a ociosidade, o que é conhecido como problema de balanceamento, largamente estudado na literatura [Pinedo, 2000]. Esta etapa, portanto, compreende à fase posterior ao proposto neste trabalho, baseando-se na organização dos postos de trabalho no chão de fábrica.

5. DEFINIÇÃO DAS CÉLULAS E ANÁLISE

Em aplicações de algoritmos de agrupamento, dependendo da metodologia aplicada, a definição de células pode ser feita pelo próprio algoritmo, por um algoritmo posterior ou pelo analista. Por exemplo, ao ser aplicado o algoritmo ROC, a definição de células é feita pelo analista, a partir de uma análise visual sobre o resultado, ou pela aplicação de um algoritmo após o agrupamento, o qual definirá as fronteiras das células. Algoritmos como o de Kusiak e Chow inerentemente definem de forma automática as células, resultado que é então revisado pelo analista.

Independente da forma como foram definidas as células, é possível realizar uma comparação quantitativa de diferentes agrupamentos. O indicador de eficiência do agrupamento (*Group Efficiency – GE*) proposto por Chandrasekharan e Rajagolapan (1989), considera dois fatores principais:

- a relação (θ_1) entre as incidências (valores “1”) registradas dentro das células sobre o total de incidências;
- a relação (θ_2) entre as não-incidências (valores “0”) registradas fora das células sobre o total de não-incidências.

Estes dois fatores representam, respectivamente, os elementos extracelulares, que devem ser minimizados, e grau de similaridade entre os elementos de uma mesma célula, que deve ser maximizado. Contudo, a relação entre esses dois parâmetros ocorre de forma inversa. Ao tentar-se minimizar o número de elementos extracelulares, por exemplo através da adição de células ou duplicação de máquinas, a similaridade intracelular tende a diminuir. Almejando o equilíbrio entre os dois parâmetros, Chandrasekaran e Rajagolapan os relacionaram por uma média ponderada:

$$GE = p\theta_1 + (1 - p)\theta_2, 0 \leq p \leq 1 \quad 5.1$$

Sendo θ_1 e θ_2 :

$$\theta_1 = \frac{e_1}{\sum_{r=1}^k GrCr} \quad 5.2$$

$$\theta_2 = 1 - \frac{e_0}{MN - \sum_{r=1}^k GrCr} \quad 5.3$$

onde:

k = número total de células identificadas;

M = número total de linhas (máquinas) na matriz incidência;

N = número total de colunas (componentes) na matriz incidência;

e_1 = número total de incidências intracelulares após reordenamento;

e_0 = número total de incidências extracelulares após reordenamento;

Gr = número total de linhas (máquinas) na célula ‘r’;

Cr = número total de colunas (componentes) na célula ‘r’;

ρ = fator de ponderação da média.

O indicador também serve para reavaliar a matriz agrupada após eventuais ajustes feitos pelo analista, permitindo uma comparação objetiva das alterações na matriz.

6. IMPLEMENTAÇÃO

A implementação segue a metodologia descrita no início da seção três, em que os dados são cadastrados, processados pelo algoritmo de agrupamento e então são aplicadas as restrições. As premissas básicas e seu cadastro no modelo foram mantidas em todo o trabalho, e estão descritas na seção 6.1. Contudo, o banco de dados fornecido mostrou-se incompatível com a metodologia proposta inicialmente, e a partir disto foram elaboradas outras duas, descritas na sequência.

6.1 Entrada dos dados fornecidos no modelo

Para a montagem da matriz de incidência peça-máquina, execução do algoritmo de agrupamento e aplicação das restrições, os dados foram configurados em duas tabelas: uma contendo a matriz de incidência peça máquina com os valores de processamento em seu corpo, e outra contendo quatro listas: as peças e suas respectivas demandas, as máquinas e seus coeficientes de utilização, a taxa de refugo média considerada, e os tempos relativos à jornada (duração de um turno, número de turnos por dia, período de dias úteis considerado). A primeira tabela, da qual se origina a matriz binária de incidência, em conjunto com a segunda, aloca a totalidade de dados para os cálculos de carregamento. Abaixo, algumas considerações relativas aos dados fornecidos e aproximações sugeridas pela empresa:

- Buscando-se uma análise eficaz, foram apenas consideradas as máquinas operatrizes. Operações auxiliares como lavagem, oleamento e inspeção foram desconsideradas.
- As máquinas operatrizes que trabalham em conjunto e representam uma interdependência de máquinas foram unificadas previamente ao cadastro. Deste modo, se, por exemplo, três máquinas operam como uma, estas foram recadastradas como uma única máquina operando em um terço da sua média de tempo de processamento.
- A fim de minimizar erros de cadastros duplicados de tempos de processamento, para cada incidência de peça e máquina foi tomada a média do banco de dados.
- Os coeficientes de utilização são fornecidos por célula, não por máquina especificamente. Como a modelagem considera a máquina apenas e não a célula existente, com o intuito de diminuir o erro, foi considerado o mesmo coeficiente de utilização médio para todas as máquinas, de 75%.
- A taxa de refugo medida pela empresa é, em condições normais de operação, de 0,05%. Idealmente, o dado seria fornecido por máquina, mas este é medido, novamente, por célula.
- A demanda fornecida compreendia um período de seis meses – um prazo considerado curto para um projeto de célula, mas suficiente para a análise de validação proposta.
- O período considerado, então, compreende 150 dias úteis, e opera-se com 3 turnos de, em média, 7 horas cada, totalizando 3150 horas no horizonte analisado.

6.2 Primeira análise: metodologia simples

A primeira análise seguiu a metodologia disposta na literatura, aplicando diretamente a matriz de incidências no método ROC e, inserindo-se as restrições consideradas máquina a máquina, chegar-se-ia em um agrupamento resultante para então ocorrer a definição de células, como descrito na figura 6.1. Na aplicação de restrições do algoritmo, por política da empresa, não se pode considerar a duplicação de máquinas. Dessa forma, o algoritmo verifica o carregamento referente a cada peça e segrega aquelas com menor carga até que a condição do

carregamento limite seja encontrada. Assim, para que o analista possa observar os impedimentos referentes ao balanceamento e à capacidade das máquinas para cada linha (máquina), o algoritmo toma a peça com a menor carga total, e a transfere ao lado extremo direito da matriz, repetindo o processo até que a capacidade da máquina esteja dentro do limite de carregamento. Isso se torna possível uma vez que os tempos de processamento das diversas peças na mesma máquina não varia significativamente, e se faz necessário pois os custos de produzir a peça externamente não são dados disponíveis prontamente. O fluxograma do algoritmo é ilustrado na figura 6.1:

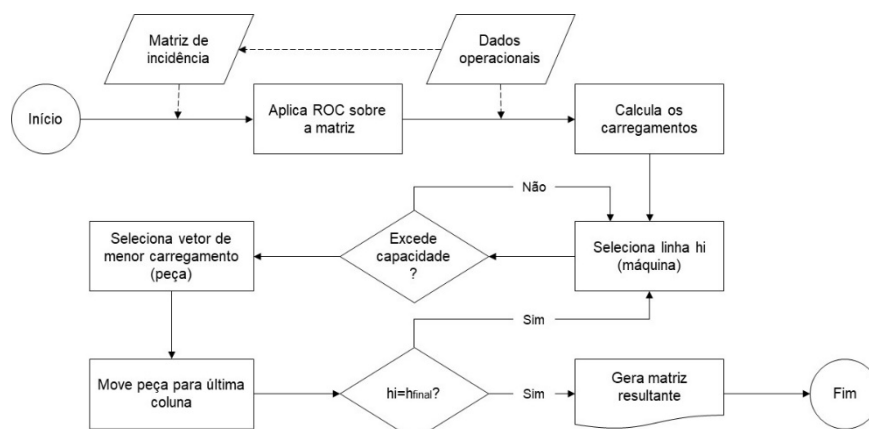


Figura 6.1 – Fluxograma explicativo do programa

Nesta primeira análise, contudo, não foi observado um agrupamento claro (vide figura A1 do Apêndice) e nem pôde ser aplicado o cálculo das restrições. Como uma peça pode ser homologada em mais de uma célula, o programa considerava a mesma operação mais de uma vez, ou seja, uma máquina possuía mais incidências de peças do que seria operacionalmente necessário. Nesse sentido, a totalidade da matriz de incidência não poderia ser aplicada ao algoritmo ROC, impondo a condição descrita na seção 4.3. Sua implementação, portanto, demandou a adição de uma etapa anterior à aplicação do ROC – a definição de rotas principais, a qual é descrita na seção seguinte.

6.3 Segunda análise: definição de rotas principais

As peças consideradas têm, na maioria dos casos, diversos planos de trabalho possíveis, ou seja, há mais de uma rota de máquinas a ser seguida. Para ser obtido um arranjo celular, concluiu-se que as operações não devem ser redundantes. Ao eleger uma máquina principal para executar a operação, é definido um componente da rota descrita no plano de trabalho da peça. Espera-se que o plano de trabalho almeje aquela combinação que retorne a maior produtividade. Contudo, deve-se ressaltar que este nem sempre representa o menor custo. Nos casos em que há ociosidade de máquinas, é comum haver uma maior utilização daquelas que levam mais tempo para produzir peças, mas, ao empregar-se ferramentas menos custosas, representam um aproveitamento financeiro mais efetivo do maquinário. No caso da empresa estudada, entretanto, a demanda e os prazos de entrega são tais que a produtividade é um fator a ser priorizado.

Para atingir esse objetivo e minimizar o carregamento final da unidade de produção contemplada, aquela peça com maior demanda, considerando uma operação específica com mais de uma opção de rota, deve ser alocada na máquina que oferece o menor tempo de processamento. Este cálculo pode ser definido como um algoritmo preparatório, i.e., que prepara a matriz de incidência peça-máquina para o algoritmo de agrupamento. O algoritmo trabalha sobre a matriz de incidência peça-máquina em que os valores que ligam a peça à máquina são os respectivos carregamentos. Para obter-se uma produtividade ótima do conjunto de peças,

estas são priorizadas pela sua demanda. Para fins de análise, as máquinas são ordenadas de acordo com a operação que realizam. O fluxograma da figura 6.2 é explicado na sequência.

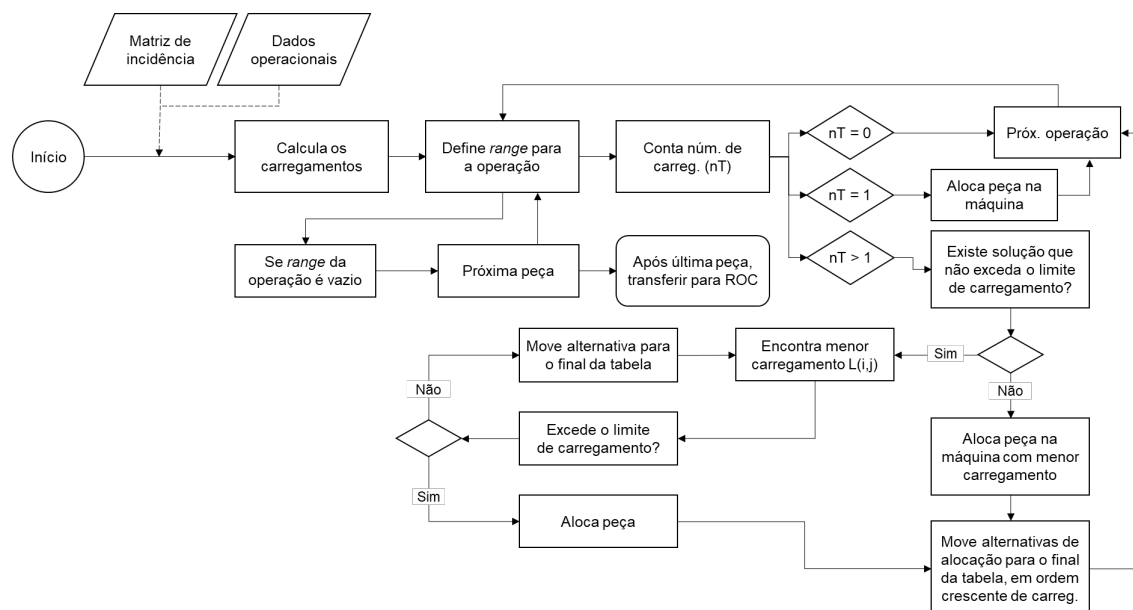


Figura 6.2 - Fluxograma do algoritmo de definição de rotas principais.

O algoritmo inicia calculando o carregamento $L(i,j)$ conforme descrito na seção 4.4. Então, para uma peça (coluna), o algoritmo percorre as operações. Para cada operação, há três cenários possíveis.

- (i) Em operações que houver mais de uma máquina elegível a compor o plano de trabalho ($nT > 1$) o algoritmo seleciona aquela configuração com o menor carregamento e adiciona ao carregamento total da máquina. Se, ao adicionar a peça à máquina ocorre sobrecarga, seguindo por ordem crescente do carregamento $L(i,j)$ busca-se a próxima máquina disponível. Caso não houver alternativa que não exceda o limite de carregamento de alguma máquina, a peça é alocada na máquina que obtiver o menor carregamento até a presente etapa de cálculo. As alternativas de alocação são segregadas para o final da planilha em ordem crescente de carregamento, gerando alternativas de planos de trabalho conforme a produtividade, possibilitando ao analista realizar mudanças quando houver variações na demanda e exigir uma mudança no planejamento de produção.
- (ii) Caso haja apenas uma opção de alocação ($nT = 1$), a mesma ocorre, mesmo que exceda o limite de carregamento.
- (iii) Se não houver incidência ($nT = 0$), o algoritmo prossegue para a próxima operação.

Após percorrer todas as operações da peça, o algoritmo segue para próxima coluna, que representa a peça com a próxima menor demanda, e assim o faz, sucessivamente, até todas as peças terem sido avaliadas. Uma vez definidas as rotas principais, a matriz é normalizada e o algoritmo ROC é aplicado, seguindo o procedimento descrito na seção 6.2. Previamente à análise final, os carregamentos devem ser novamente considerados, afinal, conforme disposto na explanação da etapa anterior à aplicação do ROC, pode haver casos em que não foi encontrada uma solução para a alocação da peça em uma máquina sem exceder seu carregamento limite.

Esta metodologia não gerou um agrupamento, como pode ser observado na figura A2 do Apêndice. Foi testada a metodologia para a divisão dos processos em usinagem “mole” (processos anteriores ao tratamento térmico), tratamento térmico e usinagem “dura” (processos posteriores ao tratamento térmico), conforme a figura 4.1. Por se tratar de processos bastante distintos, envolvem treinamento, tempos de processo e tempos de preparação de máquina

bastante distintos, sendo tratados separadamente (e não em uma mesma célula) em outras unidades de manufatura da empresa. Contudo, essas tentativas também não geraram agrupamentos, como pode ser observado nas figuras A3a, A3b e A3c no Apêndice.

6.4 Redefinição de rotas principais e aplicação do algoritmo de Kusiak & Chow adaptado

Como possível solução para que fossem encontradas rotas principais, foi levantada a hipótese de tornar o processo iterativo, seguindo com a aplicação das restrições da maneira descrita na seção 6.2 e repetindo o processo para as peças que fossem segregadas no cálculo. Porém, até o momento, não havia sido considerado o impacto da máquina gargalo na definição da rota principal, tendo sido cada operação considerada um caso isolado, e não uma etapa dentro de um processo.

Em “A Meta”, Goldratt e Cox, 1990, exploram, no que é conhecido como “Teoria das Restrições”, os efeitos da máquina gargalo no sistema em que está inserida. Ao aplicar a teoria à organização celular, compreende-se que a capacidade da célula será definida pela máquina gargalo. A máquina gargalo é aquela que, dentro de uma sequência de máquinas, possui a maior carga, usualmente oriunda de um maior tempo de processamento. Sob esta ótica, eleger a máquina com a maior produtividade tem pouco efeito se, inerentemente à sequência de operações, outra irá impor um gargalo. Ou seja, ao analisar-se diferentes possibilidades de alocações de uma peça para uma mesma operação, deve-se almejar o menor gargalo possível, excluindo alternativas que o excedam.

Deste princípio, a matriz é preparada para o algoritmo de agrupamento descrito na figura 6.3. Para cada peça, é percorrida cada operação. Naquelas em que houver mais de uma possibilidade de alocação, o valor mínimo de carregamento é inserido em uma matriz auxiliar. Para operações com apenas uma possibilidade de alocação, o carregamento também é inserido na matriz auxiliar. O valor máximo contido nessa matriz é o gargalo e, para a coluna analisada, qualquer valor acima deste é excluído, de forma a manter apenas aquelas operações as quais o menor gargalo é obtido. O algoritmo de Kusiak e Chow (1987b), contudo, não é diretamente aplicável, pois, mesmo após a preparação supracitada, há ainda múltiplas opções de alocação na matriz e, portanto, o método é adaptado.

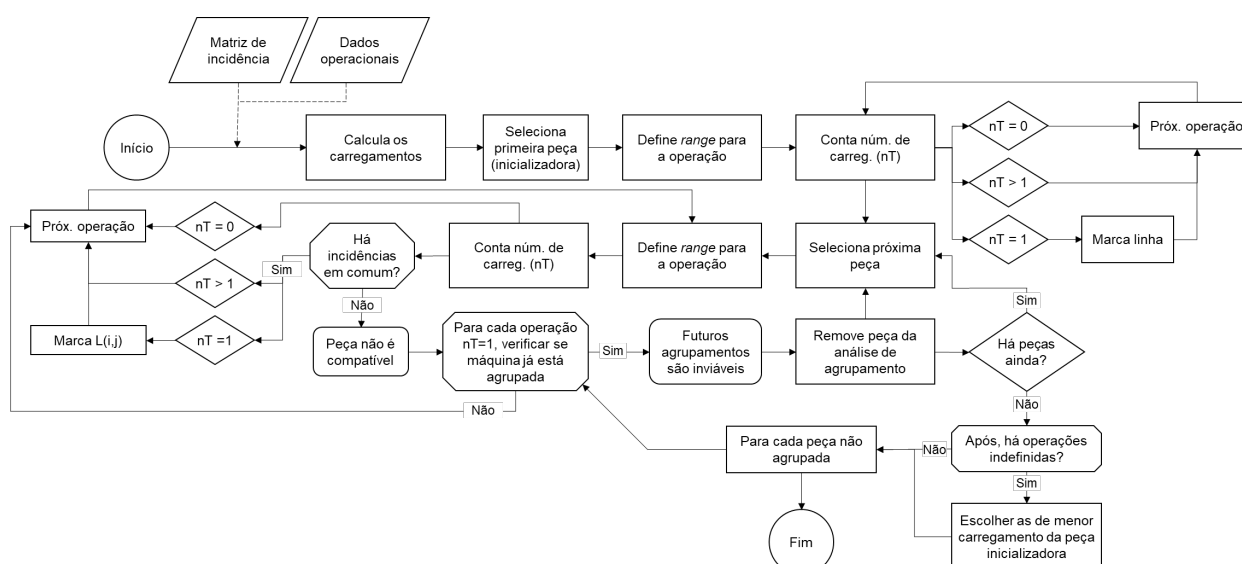


Figura 6.3 – Fluxograma do algoritmo adaptado de Kusiak e Chow.

Assim como no programa da seção 6.3, as peças são dispostas na matriz em ordem decrescente da demanda. (i) Seguindo a metodologia de Kusiak e Chow, é selecionada a primeira coluna. (ii) Contudo, é feita uma linha horizontal apenas naquelas máquinas em que o

número possível de alocações (nT) é igual a um. (iii) A peça seguinte é comparada, operação por operação – lembrando que, para uma mesma operação, é possível que haja mais de uma máquina incidente – sendo verificado se, para a operação, a inclusão da peça exigiria a adição de uma máquina em relação àquelas nas quais a peça inicializadora (a primeira da matriz na iteração) incide. (iv.a) Em caso negativo, a operação é tomada como compatível, e segue-se para a próxima operação. (iv.b) Se necessária a adição de uma máquina para uma mesma operação, a peça viola a restrição de tamanho de célula, descrita na seção 4.3. Neste caso, é verificado caso torna-se inviável futuros agrupamentos da peça. Para tanto, observa-se se, em uma operação na qual $nT=1$, a máquina incidente já foi agrupada. Se estiver livre, futuros agrupamentos são viáveis. Se não, futuros agrupamentos são inviáveis e a peça é segregada da análise. Após observadas todas as peças, a condição de viabilidade de agrupamento é revista, considerando que mais máquinas foram agregadas à célula ao longo do agrupamento. Como proposto no artigo de Kusiak e Chow, as peças e máquinas agrupadas (ou cujo agrupamento de mostra inviável frente às restrições) são removidas da matriz sucessivamente a cada iteração, as quais se seguem até o ponto em que a matriz resultante seja vazia. Em casos específicos em que há mais de uma opção de alocação que não afeta futuros agrupamentos, a máquina que demonstrar o menor carregamento na peça inicializadora é tomada.

No caso estudado, o agrupamento de 52 peças (aquelas com demanda maior que zero), em 75 máquinas operatrizes foi possível em 4 iterações. Vinte e duas das 52 peças foram agrupadas, representando menos da metade das peças demandas, apenas 42,3% das peças. Em termos de volume do carregamento total, peças com demandas significativas foram deixadas de fora dos agrupamentos. No lado das máquinas, 45 máquinas (60%) foram agrupadas. As restantes foram excluídas dos agrupamentos.

Na análise do carregamento de cada máquina a partir do agrupamento resultante, a célula dois, maior célula resultante, possui diversas máquinas sobrecarregadas. A sobrecarga e o baixo índice de agrupamento das máquinas e peças indicam a necessidade da consideração do limite de carregamento da máquina concomitante ao processo heurístico de agrupamento, fator não explorado no algoritmo proposto por Kusiak e Chow, 1987b, que possivelmente reduziria a extensão do agrupamento final. O agrupamento analisado não é aplicável à realidade operacional da fábrica, e por essa razão dispensa adicionais análises de eficiência do agrupamento. A matriz resultante está disposta da figura A4 do Apêndice.

7. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

As metodologias aplicadas e os resultados foram levados à empresa para discussão. Junto a profissionais da área de produção da empresa, com extenso conhecimento da situação atual do chão de fábrica, levantou-se algumas questões acerca dos (i) resultados obtidos nos agrupamentos, sobre (ii) a consideração de separação das células conforme processos de usinagem “mole”, tratamento térmico e usinagem “dura”, assim como a (iii) aplicabilidade dos resultados encontrados no âmbito operacional.

- (i) O resultado obtido da metodologia descrita na seção 6.2 mostrou uma grande similaridade entre as atuais células “I” e “H” da empresa estudada. Disto, foi comentado que as peças são homologadas para cada célula, não por máquina, e que a decisão de homologação não é unicamente do cliente, mas envolve a eficiência das máquinas, disponibilidade da célula de produção para o processo de homologação e identificação da sinergia entre as células por algum colaborador. Dessa maneira, seria possível homologar a maior parte das peças em ambas as células, auferindo maior flexibilidade à produção.
- (ii) A separação dos processos é compreensível, mas ainda pouco estudada dentro da empresa. Alega-se que haveria poucas restrições de processo nas máquinas de tratamento térmico, engendrando um *job shop* intermediário entre dois grupos de células, o que já é praticado em outra unidade de manufatura da empresa.
- (iii) Embora não tenha sido possível chegar a um agrupamento para a validação do atual, o conceito levantado na seção 6.3 se mostrou de grande valor para a equipe de

planejamento e controle da produção (PCP). Hoje, a programação no chão de fábrica, de curto prazo, é feita no casamento da demanda imediata e a disponibilidade de células. Contudo, não há um critério claro para a alocação de peças em células disponíveis, e muito se depende do conhecimento do gestor da linha de produção. Foi sugerido que o algoritmo de definição de rotas principais descrito seja aplicado a uma matriz de incidência peça-célula, e que o resultado sirva como um guia de prioridades dinâmico na programação da produção no curto, ou até médio, prazos.

Dentro da análise dos resultados obtidos, é bastante relevante a informação que as peças são homologadas por célula, o que pode ter dificultado a formação de um novo agrupamento. Contudo, como levantado pela equipe entrevistada, exceto em casos específicos de processos especiais ou exigências dos clientes, as peças podem ser homologadas em quase todas as máquinas. Nessa acepção, levanta-se a hipótese de viabilizar uma reforma na organização fabril de acordo com a seguinte estratégia:

- (i) homologar as peças no maior número possível de máquinas;
- (ii) a partir da aplicação de algoritmos de agrupamento, identificar aquelas que exigem processos especiais;
- (iii) identificar benefícios e desvantagens em se organizar o leiaute fabril de maneira tal que as células sejam distintas entre os três grupos de processos (usinagem “mole”, tratamento térmico e usinagem “dura”);
- (iv) e implementar a alocação de peças por ordem de prioridade (salvo aquelas que exijam processos especiais inclusos em células específicas), conforme a metodologia estabelecida na seção 6.3. Desta maneira, é ampliado o número de células, mas espera-se que haja um considerável ganho em produtividade oriundo do aumento de flexibilidade.

8. CONCLUSÃO

O trabalho almejou validar a organização celular de uma empresa tomada como padrão de excelência na indústria. De sucessivas aplicações de algoritmos de agrupamento, de definições de rota e ajustes às restrições, não foi possível chegar a um resultado que permitisse uma proposta de nova definição na organização para o chão de fábrica sem um completo estudo dos métodos de produção e fluxos de fabricação vigentes, dadas as características do *mix* de itens produzidos.

Na aplicação da metodologia do algoritmo ROC, evidenciou-se a necessidade de ser considerada apenas uma alternativa de rota para cada peça. Na busca pela solução deste problema, percebeu-se a carência, na literatura, de análises de Tecnologia de Grupo que considerem mais de uma possibilidade de rota e seus impactos no sistema. A solução elaborada, conforme a seção 6.3, não resultou em uma combinação de rotas que gerasse um agrupamento. Uma das melhorias percebidas foi a consideração dos efeitos da máquina-gargalo da peça e como o gargalo afeta a definição de um plano ótimo de trabalho.

Ao ser considerado o gargalo, conforme disposto na seção 6.4, a alocação de peças nas máquinas foi flexibilizada. A aplicação dessa análise concomitante ao algoritmo de Kusiak e Chow adaptado gerou um agrupamento. Este, contudo, não se mostrou aplicável à realidade operacional da fábrica e retornou sobrecargas nas máquinas. Considerando que o algoritmo teve de ser adaptado para a aplicação proposta, e a partir de uma análise da literatura disponível, encontra-se diversos estudos acerca dos algoritmos do ponto de vista matemático, mas poucos dissertam sobre sua implementação como ferramenta de análise de um ambiente fabril.

Nas entrevistas com a equipe da empresa objeto deste estudo de caso, compreendeu-se que as rotas fornecidas são baseadas na organização fabril atual, e que, após as análises deste trabalho, a elaboração de uma nova organização exigiria a análise de todas as combinações possíveis de incidência. Por outro lado, a metodologia de definição de rota ótima da seção 6.3 se mostrou de utilidade para os programadores da produção, que dinamicamente podem definir critérios de alocação das peças nas células disponíveis com as prioridades de demanda e produtividade a fim de obter menor carregamento total.

Para trabalhos futuros, a partir das conclusões obtidas neste trabalho sugere-se: o estudo aprofundado da busca pela rota ótima; a identificação da sua correlação com seus impactos no agrupamento final; o desenvolvimento da adaptação ao algoritmo de Kusiak e Chow empregada neste trabalho e sua aplicação a matrizes encontradas na literatura; a análise, como estudo de caso, dos impactos e da aplicabilidade da ferramenta de alocação de peças em células sugerida; um novo estudo de caso considerando todas as combinações de incidência para a validação da organização fabril; a aplicação de algoritmos complexos, como *simulated annealing* ou algoritmos genéticos no estudo de caso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amantino, E. B. “**Sistema para Projeto de Célula de Manufatura: Definição de Agrupamentos**”. 2005. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Askin, R. G. e Goldberg, J. B. “**Design and Analysis of Lean Production Systems**”. John Wiley & Sons, 14th edition, 2002.

Black, J. T.; “**O Projeto da Fábrica com Futuro**”. Porto Alegre: Bookman, 1998.

Brito, E. S. “**Aplicativo para Modelamento 3D de Layout Celular com Base em Tecnologia de Grupo**”. 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Chandrasekharan, M. P. e Rajagolapan, R. “**GROUPABILITY: an analysis of the properties of binary data matrices for group technology**”. International Journal of Production Research, vol. 27, no. 6, p. 1035-1052, 1989.

Goldratt, E. M. e Cox, J. “**A Meta**”. São Paulo: Claudiney Fullmann, 4^a edição rev., 1990.

Groover, M. P.; “**Automação Industrial e Sistemas de Manufatura**”. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 3^a edição, 2011.

Izquierdo, R. C. “**Projeto de Formação de Células de Manufatura através da Utilização de Algoritmos Genéticos**”. 2013. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Kusiak, A. e Chow, W. S. “**An Efficient Cluster Identification Algorithm**”. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, vol. 17, no. 4, p. 696-699, 1987a.

Kusiak, A. e Chow, W. S. “**Efficient Solving of the Group Technology Problem**”. Journal of Manufacturing Systems, vol. 6, no. 2, p. 117-124, 1987b.

Kusiak, A. e Chow, W. S. “**Decomposition of Manufacturing Systems**”. IEEE Journal on Robotics and Automation, vol. 4, no. 5, p. 457-471, 1988.

Lorini, F. J.; “**Tecnologia de Grupo e Organização da Manufatura**”. Florianópolis: Editora da UFSC, 1^a edição, 1993.

Pinedo, M. L.; “**Planning and Scheduling in Manufacturing and Services**”. Springer, 2nd edition, 2000.

