

CONSULTA
FD-3054

São Paulo
2002

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia.

UMA TÉCNICA PARA FORMAÇÃO DE CÉLULAS DE
MANUFATURA BASEADA NA ANÁLISE DA ESTRUTURA
DE PRODUTO E PROCESSO.

ANDRÉ RODRIGUES ALVES

07

2002

São Paulo

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ENGENHARIA

Barreto.

Prof. Dr. Marcos Ribeiro Pereira

Orientador:

Engenharia Mecânica

Área de concentração:

Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do

**UMA TÉCNICA PARA FORMAÇÃO DE CÉLULAS DE
MANUFATURA BASEADA NA ANÁLISE DA ESTRUTURA
DE PRODUTO E PROCESSO.**

ANDRÉ RODRIGUES ALVES

Aos meus filhos, Tiago, Paulo, Heitor, Celina
e Tarsila, que têm enriquecido e dado sentido
a minha vida e a meu trabalho a cada momento.
Espero que, com pequenas ações, possa
transmitir-lhes continuamente a fé.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que tem sido fiel em todos os momentos, apesar das debilidades e fraquezas deste autor.

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Marcos Ribeiro Pereira Barreto, pelas inestimáveis e precisas diretrizes e pela transmissão de experiências que, ultrapassando o limite acadêmico, têm contribuído para meu crescimento como pessoa.

Ao Eng. Leis, pelo apoio relacionado aos aspectos computacionais do trabalho.

A minha esposa Maristela, pelo apoio, pela paciência e pelo contínuo incentivo, mesmo nas horas mais difíceis.

SUMÁRIO

1. Introdução 1

1.1. Células de Manufatura 1

1.2. Objetivo 5

2. Revisão Bibliográfica 7

Tecnologia de Grupo: Técnicas disponíveis para Formação de células de manufatura

2.1. Análise Visual 12

2.2. Sistemas de Codificação e Classificação .. 13

2.3. Técnicas de Agrupamento com Formulação
Matricial 15

2.4. Técnicas de Programação Matemática 21

2.5. Técnicas de Partição Gráfica 22

2.6. Outras Técnicas 23

2.7. Funções-objetivo utilizadas nas técnicas
para formação de células 26

2.8. Busca em Vizinhança 35

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Abreviaturas

Lista de Símbolos

Resumo

Abstract

41	3. Descrição da Técnica Proposta
41	3.1. Premissas e hipóteses adotadas
54	3.2. Estrutura de Produto e Processo
60	3.3. Partição em Fluxo
68	3.4. Formulação do Problema
73	3.5. Técnica de Solução:
73	3.5.1. Procedimento de otimização adotado
74	3.5.2. Vizinhaça
76	3.5.3. O Algoritmo
86	3.5.4. Cálculos de Capacidade
88	4. Estudo de Caso
88	4.1. Apresentação do Caso: Fixos de Acionamento .
90	4.2. Análise da Situação Inicial
91	4.3. Definição dos Parâmetros
93	4.3.1. Análise Inicial
96	4.3.2. Análise do efeito das temperaturas iniciais
	4.3.3. Análise do efeito do número de eventos
97	para partição (P)
98	4.3.4. Análise do efeito da DOE
99	4.4. A Solução Proposta

111	.....	Apêndice
104	.....	Referências Bibliográficas
103	.....	5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros
102	.....	5.1. Conclusões e Contribuições do Trabalho
102	.....	5. Conclusões

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz de incidência, um exemplo simples.

Figura 2: Matriz de incidência, após manipulação.

Figura 3: Exemplo de Dendrograma.

Figura 4: Fluxo típico em uma Planta V.

Figura 5: Fluxo típico em uma Planta A.

Figura 6: Fluxo típico em uma Planta T.

Figura 7: Exemplo simples de Estrutura de Produto

Figura 8: Representação Gráfica dos Roteiros de Fabricação dos componentes da Estrutura de Produto da Figura 7

Figura 9: Representação gráfica de uma Estrutura de Produto e Processo.

Figura 10: Representação Gráfica da Partição P1.

Figura 11: Representação Gráfica da Partição P2.

Figura 12: Representação Gráfica da Partição P3.

Figura 13: Representação Gráfica da Partição P4.

Figura 14: Gráfico do Resultado do Experimento para Análise das Temperaturas Iniciais.

Figura 15: Representação Gráfica da Partição da Solução Proposta

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1:** Exemplo de Estrutura de Produto e Processo.
- Tabela 2:** Custos de Matéria Prima
- Tabela 3:** Estrutura de Produto e Processo - Entrada de Dados
- Tabela 4:** Estudo de Caso - Situação Inicial (semente)
- Tabela 5:** Custos referentes à Situação Inicial (semente)
- Tabela 6:** Planejamento de Experimento para Análise Inicial
- Tabela 7:** Respostas do Experimento para Análise Inicial
- Tabela 8:** Análise de Variância para Custo Unitário
- Tabela 9:** Análise de Variância para Tempo de Processamento (s)
- Tabela 10:** Experimento para Análise das Temperaturas Iniciais
- Tabela 11:** Resultado do Experimento para Análise das Temperaturas Iniciais
- Tabela 12:** Resultado do Experimento para Análise do efeito do número de eventos para partição (P)
- Tabela 13:** Situação Proposta para o Caso de Fixos e Cubos
- Tabela 14:** Custos Referentes à Situação Proposta
- Tabela 15:** Resultados Obtidos
- Tabela 16:** Planilha *Param.*

Planilha **Custo**.

Planilha **Entrada**.

Planilha **Saida** na situação inicial de alocações.

Planilha **Saida** com a situação inicial da célula 1.

Planilha **Saida** na situação inicial de alocação.

Planilha **Saida** na situação inicial de partições.

Planilha **Saida** em uma situação intermediária de partições.

Planilha **Saida** em uma situação intermediária de partições.

Planilha **Saida** em uma situação intermediária de partições.

Planilha **Saida** na situação final de partições.

LISTA DE ABRVIAATURAS

- CAD** - "Computer Aided Design" ou Projeto auxiliado por computador
- CIM** - "Computer Integrated Manufacture" ou Manufatura integrada por computador
- BOM** - "Bill of Material" ou Relação de Materiais
- MRP** - "Material Replacement Program" ou Programação de Ressuprimento de Materiais
- MRP-II** - "Manufacture Requirement Planning" ou Planejamento de Recursos de Manufatura
- PFA** - "Production Flow Analysis" ou Análise do Fluxo de Produção
- ROC** - "Rank Order Clustering" - Técnica de manipulação da matriz de incidência, conforme apresentada no Capítulo 2
- CIM** - "Cluster Identification Method" - Método de Identificação de Agrupamentos
- DCA** - "Direct Clustering Analysis" - Análise de Agrupamento Direta
- FMS** - "Flexible Manufacturing System" - Sistema Flexível de Manufatura
- DOE** - Disponibilidade Operacional do Equipamento
- EPP** - Estrutura de Produto e Processo

LISTA DE SIMBOLOS

$A_{i,j}$ - Matriz de incidência, definida como uma matriz zero-um, onde as linhas correspondem aos componentes \bar{I} e as colunas correspondem às máquinas \bar{J} .

Nesta matriz, os elementos $a_{i,j}$ definem a relação entre componentes e máquinas da seguinte forma:

Se $a_{i,j} = 0$, o componente \bar{I} não é processado na máquina \bar{J} ; e

Se $a_{i,j} = 1$, o componente \bar{I} é processado na máquina \bar{J} em algum estágio de fabricação.

DOE (%) - Disponibilidade Operacional do Equipamento.

TCO (s) - Tempo de Ciclo do Operador.

TCM (s) - Tempo de Ciclo da Máquina.

CT (\$) - Custo Total (usado na função-objetivo)

CH (\$) - Custo Total de Mão-de-obra

CE (\$) - Custo Total de Estoque

CUH (em \$/semana) - Custo unitário da mão-de-obra

NTH - Número total de homens

c - indica qual é a célula (varia de 1 a C)

m - indica qual é o material (varia de 1 a Nm)

op - indica qual é a operação (varia de 1 a No)

p - indica qual é o produto (varia de 1 a Np)

i - indica o estado corrente (para o simulated annealing)

j - indica o estado proposto (para o simulated annealing)

C - Número de células de manufatura

NHC - Número de homens da célula c

Sc - Número de turnos que trabalha a célula c
CTMP - Custo total de material
CM_m - Custo do material m
CUM (\$) - Custo unitário do material m
WIP_m - Quantidade de material m
IM - Taxa do estoque, custo semanal do estoque em % do custo do material, considera custo de capital, de movimentação e armazenagem e de administração.
DS (peças/semana) - Demanda semanal do produto
T₀ - Temperatura inicial
T(t) - Função de resfriamento
T_f - Temperatura final
N(T) - Número de iterações, como função da temperatura.
N_p - Tipos de produto
N_o - Quantidade de operações
N_m - Tipos de matéria prima
t_s - Tempo disponível em minutos por turno, considerando permissões, paradas previstas e eficiência de produção
H(op) - operador responsável pela operação op
Z - quantidade de homens
TA₀ - Temperatura inicial para alocações
TP₀ - Temperatura inicial para partições
TA(F) - Função de resfriamento para alocações
TP(F) - Função de resfriamento para partições
TA_f - Temperatura final para alocações

TP_f - Temperatura final para partições

NA - Número de iterações para alocações

NP - Número de iterações para partições

A - quantidade de eventos para alocações

P - quantidade de eventos para partições

RA - razão de resfriamento para alocações

RP - razão de resfriamento para partições

Capac - capacidade de produção da célula

Capac obj - capacidade de produção que atende a demanda de

produtos da célula

Tdisp - tempo disponível para produção por turno, por semana

max(TC) - tempo de gargalo entre máquinas e operadores que

define o ritmo da célula

Tmáquina - tempo de gargalo entre as máquinas da célula

Operadores - maior tempo entre os operadores da célula

RESUMO

As técnicas para formação de células de manufatura atualmente disponíveis partem tipicamente da premissa que afirma ser necessário, primeiramente, identificar os componentes e os tipos de máquinas a serem considerados na configuração celular.

Desenvolvida a partir da quebra deste paradigma, a técnica apresentada neste trabalho baseia-se na análise e seleção de uma partição adequada da estrutura de produto e processo e na otimização de uma função-objetivo que combine custo de mão-de-obra e de material em processo.

A aplicação desta técnica é feita com o auxílio de um algoritmo de "simulated annealing", que determina tanto a nova formação de células como a alocação otimizada de mão-de-obra para cada uma das células definidas.

No estudo de caso apresentado, as novas células de manufatura, formadas com a aplicação da técnica proposta, demonstram aumento de produtividade de cerca de 30% e redução de material em processo em torno de 10%, tendo como referência as células originais.

Until now, the available cell formation techniques have considered that it is necessary, first, to identify the components and the machine types which will be considered in the cellular configuration.

Developed from this paradigm breakdown, the developed technique is based on the analysis and selection of a convenient product and process structure partition, and on an objective-function that considers labor and work-in-process costs.

The use of this technique is made with an algorithm based on simulated annealing, which defines as the new cells, as their labor allocation.

In the studied case, the new cell formation, defined from the application of the proposed technique, resulted 30% more productive, with 10% less work-in-process, than the original formation.

ABSTRACT

1. INTRODUÇÃO

1.1. Células de Manufatura

Muito já se discutiu a respeito dos benefícios das células de manufatura, principalmente no setor automobilístico. Existem muitos trabalhos indicando sua aplicação, como os de AKRIGHT; KROLL [1], KHAN; GWEE [2], VOSS; CLUTTESBUCK [3], CHAN et al. [4], SHAFER; CHARNES [5] entre tantos; alguns outros apontando seus pontos fracos, como o de FLYNN; JACOBS [6]; e outros que preferiram não firmar uma posição e deixar a conclusão em aberto, como o de AGARWAL; SARKIS [7].

AGARWAL; SARKIS [7] apresentam, na verdade, uma classificação para os diversos estudos realizados para comparar especificamente o desempenho de sistemas de manufatura celular com o de sistemas de produção baseados em layout funcional, separando-os em:

- a) estudos baseados em simulação;
- b) estudos empíricos e
- c) estudos analíticos.

Alguns estudos baseados em simulação, como o de FLYNN; JACOBS [6], para modelarem os sistemas de produção em avaliação, fizeram algumas simplificações como, por exemplo, deixaram de considerar os benefícios da aplicação de fluxo dentro das células de uma única peça por vez no balanceamento de atividades para os operadores e, tipicamente, demonstraram que o estabelecimento de manufatura celular não se traduz em vantagens para a produção.

Por outro lado, outros estudos, como o de SHANFER; CHARNES^[5], concluem que o desempenho da manufatura celular supera o de layout funcional em todos os ambientes, sempre que se consideram tanto a sobreposição de operações como as reduções de tempo de setup decorrentes da organização celular baseada em famílias de componentes.

Sumarizando, entre os nove estudos baseados em simulação analisados por AGARWAL; SARKIS^[7], encontram-se cinco que discordam das vantagens da implementação da manufatura celular, dois que definem quais as condições necessárias para que sua implementação resulte em benefícios e dois que comprovam significativas vantagens na introdução da manufatura celular.

Por outro lado, entre os quinze estudos empíricos - assim denominados por apresentarem pesquisas considerando muitas situações concretas de implementação de manufatura celular e compararem os resultados pré e pós-implementação - doze ressaltam as grandes vantagens da implementação de manufatura celular, enquanto apenas três não as comprovaram.

Finalmente, considerando que os três estudos analíticos analisados também não foram conclusivos, AGARWAL; SARKIS^[7] não firmaram posição. Entretanto, a partir deste trabalho, podem ser relacionados vários fatores relevantes para a análise e definição da formação ou não de células de manufatura. São eles:

- . distribuição de demanda entre os componentes a serem fabricados;
- . tamanho dos lotes de produção;

- . agilidade na implementação de novos produtos e outros.
 - . redução de área e percursos,
 - . redução de tempo de setup,
 - . redução do consumo e da necessidade de ferramentas de corte,
 - . maior envolvimento dos operadores,
 - . simplificação da programação de produção,
 - . melhoria de qualidade,
 - . aumento de produtividade,
 - . redução de material em processo,
- ROHLDER^[9], NEW; CLARK^[10] :
- estruturadas testemunham benefícios como (SLACK^[8], ECKSTEIN; experiências bem sucedidas, nas quais muitas empresas assim verifica-se ampla utilização de manufatura celular e inúmeras produção em layout funcional continue sendo a mais adequada, Hoje, independentemente da existência de situações onde a
- . presença de máquinas-gargalo.
 - . relação entre tempo de setup e tempo de processamento;
 - componentes;
 - . variabilidade entre os tempos de processamento dos
 - . tempo de processamento de cada componente;
 - . matriz de operações por componente;
 - . tamanho das células;
 - . movimentação intercelular;
 - . tamanho do lote de transferência;

As células de manufatura têm características que são muito importantes para a obtenção destes benefícios e dentre elas, relacionam-se:

- organização para produção intermitente em fluxo (flow shop) e impondo limitação de estoque intermediário;
- fluxo de peças entre as máquinas da célula de uma peça por vez (fluxo unitário), respeitando-se a sequência da fila inicial (FIFO - first in, first out, ou seja, o primeiro que entra é o primeiro que sai);

- sobreposição de operações com balanceamento adequado de mão-de-obra. Nota-se que normalmente, em células de manufatura, privilegia-se a otimização da mão-de-obra, mesmo se isto implicar em problema de ociosidade de equipamento;
- ritmo de produção que cadencie o fluxo de acordo com a demanda definida e onde o problema de programação simplifica-se a ponto de exigir-se apenas a definição da fila inicial, pois toda a célula pode ser considerada um único equipamento;

- gestão semi-autônoma, com maior envolvimento de operadores multifuncionais.

Além disto, a visualização de perdas, como quebras de máquinas, rejeições, esperas, produção em excesso, excesso de movimentação de materiais, excesso de movimento dos operadores, material em processo excessivo e perdas por processo inadequado, permite atuação consistente sobre elas e promovem um ambiente propício para melhorias contínuas e competitividade crescente (veja ROTHER; SHOOK^[11]).

1.2. Objetivo

Neste novo ambiente industrial, celularizado e notavelmente mais competitivo, surgem novos desafios e novos horizontes a explorar. Por exemplo, SELIM et al.^[12], após pesquisa e avaliação das metodologias correntes para formação de células de manufatura, indicam oportunidades com o desenvolvimento de trabalhos que considerem melhor utilização de máquinas e melhor balanceamento de mão-de-obra.

Motivado por sugestões como esta e pela busca contínua por novas oportunidades de ganhos de competitividade, este trabalho, após pesquisar as técnicas disponíveis de formação de células de manufatura (classificadas e apresentadas mais detalhadamente no Capítulo 2), tem por objetivo o desenvolvimento de uma técnica inovadora, que possibilite estabelecer novas formações de células.

Constatando que as técnicas atualmente disponíveis partem tipicamente da seguinte premissa, definida por SELIM et al.: "É necessário, primeiramente, identificar os componentes e os tipos de máquinas a serem considerados na configuração celular"^[12], e notando que inúmeros trabalhos já foram desenvolvidos e aplicados em muitas plantas industriais, conduzindo-as de um layout funcional para a manufatura celular, a técnica apresentada nesta dissertação quebra este paradigma e desenvolve-se a partir da análise da estrutura de produto e processo, definida e detalhada no Capítulo 3.

As novas formações celulares são estabelecidas com o objetivo de otimizar a alocação de mão-de-obra e minimizar o material em processo, sendo consideradas apenas as alternativas onde a capacidade de produção atende a demanda do mercado. Estes elementos são combinados, na formulação do problema, em uma função-objetivo que possibilita a utilização de um algoritmo de busca em vizinhança estendida, baseado em técnicas de "simulated annealing".

Como o algoritmo desenvolvido define tanto a formação celular (a partir de escolha de partição), como a alocação de mão-de-obra para cada uma das células definidas, utiliza duas rotinas de otimização, organizadas hierarquicamente, conforme é apresentado detalhadamente também no Capítulo 3.

Para comprovar a aplicabilidade da técnica sugerida, o Capítulo 4 utiliza um exemplo que, mesmo tomando como ponto de partida uma situação onde as células já estão implementadas, ainda obtém resultados expressivos, possibilitando a apresentação das considerações finais do Capítulo 5.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

TECNOLOGIA DE GRUPO: TÉCNICAS DISPONÍVEIS PARA FORMAÇÃO DE CÉLULAS DE MANUFATURA

Enquanto a organização celular difundia-se e consolidava-se na manufatura, muitas técnicas e métodos de formação de células foram desenvolvidos e aplicados. Uma vez que seu objetivo consiste em agrupar máquinas para definir as diversas células (que produzirão componentes, também agrupados em famílias), estas técnicas e métodos fazem parte de um ramo de conhecimento definido como **Tecnologia de Grupo**.

Pode-se definir Tecnologia de Grupo de diversas maneiras. SHUNK^[13] a define como "uma ação disciplinada para identificar elementos, como componentes, processos, equipamentos, ferramentas ou necessidades de clientes, a partir de seus atributos; analisando-os e procurando similaridades, agrupando-os em famílias de acordo com estas similaridades e, finalmente, aumentando a eficiência e a eficácia da gestão destes elementos, utilizando-se das vantagens destas similaridades".

O importante é observar que a palavra chave para Tecnologia de Grupo é similaridade (mas como é difícil definir, na prática, o que é similar um elemento e de outro).

- . Esta filosofia - um gerenciamento operacional baseado no reconhecimento que similaridades ocorrem na concepção, no projeto, na venda, na manufatura e no suporte a clientes - traz inúmeros benefícios, entre os quais citam-se (de acordo com SHUNK [13], MARION et al. [14], GONÇALVES [15], FEIXEIRA;MACHADO [16], KUSIAK;CHUNG [17], KUSIAK [18] e BURBIDGE [19]):
- . racionalização e padronização de projetos de componentes;
- . redução de custos de componentes;
- . racionalização e padronização de projetos de ferramentas;
- . redução de custos de ferramentas;
- . menores tempos de preparação;
- . racionalização no planejamento de processos;
- . maior facilidade na formulação de tempos padrão e estimativas de custo;
- . simplificação na programação da produção e na gestão de materiais;
- . redução nos tempos de ciclo (leadtimes) dos componentes e de material em processo;
- . simplificação nos fluxos de produção e redução do prazo de entrega;
- . maior integração da fábrica, apoiando a integração de sistemas de informação, sistemas de controle e sistemas de fluxo de materiais;

. aumento da qualidade e redução de retrabalho e refugo de materiais.

Em busca destes benefícios, muitos estudos e aplicações têm sido conduzidos ao longo dos últimos anos - mais precisamente a partir de 1977, quando INYONG HAM traduziu um trabalho realizado em 1959 por MITROFANOV, que utilizara tecnologia de grupo para redução de tempos de preparação de máquinas [13].

No caso específico das técnicas e métodos de formação de células de manufatura, podem ser citados diversos trabalhos que as apresentam e classificam, como os trabalhos de SELIM et al. [12], SING [20], FERREGO [21], CHAN et al. [4], AJMAL; ZHANG [22] e outros.

SELIM et al. [12] classificam essas técnicas em cinco grandes grupos:

a) procedimentos descritivos estabelecidos a partir da análise do fluxo de processo;

b) técnicas de agrupamento baseadas na relação entre componentes e máquinas ou operações;

c) métodos de partição gráfica;

d) métodos baseados em inteligência artificial e

e) técnicas de programação matemática.

SING [20] apresenta outra classificação, dividindo as técnicas em sete grupos:

a) sistemas de codificação e classificação;

b) técnicas de agrupamento baseadas na análise de fluxo de

processo;

c) métodos de agrupamento baseados em coeficientes de

similaridade;

d) métodos matemáticos e heurísticos;

e) métodos baseados em conhecimento e "pattern recognition"

(inteligência artificial);

f) métodos de agrupamento "fuzzy" e

g) métodos baseados em redes neurais.

FERREGO^[21], para construir um método hierárquico para formação

de células de manufatura, apenas considerou as seguintes três

classes:

a) sistemas de codificação e classificação;

b) técnicas de agrupamento baseadas na análise de fluxo de

processo;

c) métodos de agrupamento baseados em coeficientes de

similaridade.

E baseou o seu método hierárquico na técnica de agrupamento

desenvolvida por KUZIAK^[23].

CHAN et al.^[4], ao apresentarem uma técnica de agrupamento

baseada em algoritmo genético, relacionam as seguintes

categorias de técnicas:

a) formulação linear;

b) modelo de programação inteira;

- c) procedimentos heurísticos e
- d) formulação zero-um, ou seja, procedimentos baseados na relação entre componentes e máquinas ou operações.

AJMAL; ZHANG [22] classificam as técnicas em:

- a) formulação matricial (que abrange as técnicas que manipulam linhas e colunas de uma matriz que relaciona os componentes (linhas) com as máquinas ou operações (colunas) com o sentido de obter uma formação bloco-diagonal);
- b) formulações baseadas em programação matemática (que levam em consideração uma medida de distância entre os componentes);
- c) formulação gráfica (que, representando a matriz de que relaciona os componentes (linhas) com as máquinas ou operações (colunas) por um grafo, trabalha a sua decomposição e simplificação);
- d) formulações baseadas em conhecimento (ou inteligência artificial) e
- e) métodos baseados em redes neurais.

TEIXEIRA; MACHADO [16] as dividem em técnicas de formulação matricial, normal ou generalizada, e técnicas de programação matemática, quadrática, da mediana ou generalizada da mediana.

Finalizando, constata-se que outras formas de classificação podem ser encontradas em KUSIAK; CHUNG [17] e LEVASSSEUR [24].

Considerando a grande incidência de aplicação de técnicas empíricas na indústria [7] e a ausência de referências a estas técnicas nas classificações apresentadas, e para assegurar uma descrição mais completa e uma análise mais específica das técnicas disponíveis, apresenta-se a seguir uma classificação própria, desenvolvida a partir das referências relacionadas acima e de outras que serão citadas ao longo deste Capítulo.

2.1. Análise Visual

A este grupo correspondem todas as técnicas empíricas para formação das famílias, sejam de componentes, de máquinas ou outros elementos [16].

Para utilizá-las, devem ser definidos prévios e claramente os critérios a serem adotados para formação dos grupos, sob o risco de obter-se um resultado muito subjetivo.

Utilizando-se de desenhos dos componentes a serem agrupados, ou mesmo dos próprios componentes físicos, caracterizam-se pela sua simplicidade, o que explica a sua ampla utilização.

Em muitos casos utilizam-se os nomes dos componentes como indicadores para classificação em famílias, ou técnicas baseadas nos volumes de produção e gráficos de Pareto. De qualquer forma, são técnicas empíricas que, aplicadas em situações simples, apresentam resultados satisfatórios.

2.2. Sistemas de Codificação e Classificação (SCC)

Sistemas de Codificação e Classificação permitem identificar as similaridades entre as peças pelo exame de seus desenhos e atributos - formas e dimensões, material, operações necessárias para as obter e tolerâncias características - e pela codificação destes atributos por meio de código numérico ou alfanumérico, que normalmente apresentam entre nove e trinta dígitos.

Os Sistemas de Codificação e Classificação existentes obedecem a três tipos de estrutura ^[16]:

a) estrutura hierárquica, onde a interpretação de cada dígito depende do valor do precedente;

b) estrutura não-hierárquica, onde cada dígito representa uma informação independentemente dos demais;

c) estrutura híbrida, onde se utiliza uma combinação das duas estruturas anteriores.

Segundo TRIXEIRA; MACHADO ^[16], HAM identificara 44 sistemas diferentes, sendo os mais conhecidos:

OPTZ (Alemanha): com cinco dígitos primários e quatro secundários;

TECLA (Noruega): com doze dígitos;

MICLASS (Holanda): com trinta dígitos;

TOYODA (Japão): com dez dígitos;

BRISCH (Reino Unido): com quatro a seis dígitos primários e um grupo de dígitos secundários.

Outros tantos são apontados por SHUNK^[13], por exemplo, o sistema muito difundido no Japão - KKK.

Neste meio, repleto de sistemas de Codificação e Classificação, constata-se que este ainda é tema de discussão^[13].

MARION et al.^[14], não encontrando um sistema que atendesse a indústria eletroeletrônica, sugerem um esquema específico para este ramo.

TEIXEIRA; MACHADO^[16] sugerem o seu modelo, tentando ajustá-lo melhor a um ambiente de Engenharia Simultânea / CAD / CIM.

Para adotar algum deles, ou mesmo partir para a definição de um novo, o processo deverá ser muito bem analisado e planejado, pois, como reforçam KUSIAK; CHUNG^[17] e LEVASSEUR^[24], sua grande desvantagem está no grande tempo consumido e consequentemente, no seu alto custo de implantação e risco.

Comumente utilizados no cadastramento de componentes em estruturas de materiais (BOM - "Bill of Material") para levantamentos de necessidades de suprimentos de materiais e para programação de produção (MRP ou MRP-II), os sistemas de codificação são desenvolvidos pelas áreas responsáveis por este cadastramento e, normalmente, apresentam características que facilitam os trabalhos desenvolvidos pela Engenharia de Produto, Engenharia de Especificações ou correlatas.

Assim, as codificações disponíveis nem sempre apresentam as características necessárias para o agrupamento dos componentes em famílias para a formação de células de manufatura e a

As técnicas reunidas neste grupo são também conhecidas como técnicas de Análise do Fluxo de Produção (PFA - Production Flow Analysis), pois se baseiam em informações de processo como sendo os principais dados para formação de famílias. As técnicas deste grupo utilizam a matriz de incidência $A_{i,j}$ (que relaciona componentes com máquinas) e podem ser subdivididas em técnicas de agrupamento hierárquico, que envolvem mais do que um procedimento encadeado, e as técnicas de agrupamento não-hierárquico, mais simples.

2.3. Técnicas de Agrupamento com Formulação Matricial

As técnicas baseadas em sistemas de codificação e classificação utilizam os componentes e suas características como ponto de partida e, obviamente, codificando-os e classificando-os, só podem obter famílias de componentes. Portanto, as células formadas com estas técnicas restringem-se a fabricarem componentes da mesma família, da mesma natureza.

É importante ressaltar que, como as técnicas de análise visual, as técnicas baseadas em sistemas de codificação e classificação utilizam os componentes e suas características como ponto de partida e, obviamente, codificando-os e classificando-os, só podem obter famílias de componentes.

alteração da codificação, com o desenvolvimento de um novo sistema, como já mencionado, pode consumir muitos recursos.

Nota-se que as técnicas de formulação matricial sempre utilizam

a matriz de incidência $A_{i,j}$ (veja exemplo na Figura 1, a seguir), sendo i (o índice da linha) relacionado com o componente \bar{i} e j (o índice da coluna) relacionado com a máquina \bar{j} e onde:

$$a_{i,j} = 1, \text{ se o componente } i \text{ é processado pela máquina } j \text{ e}$$

$$a_{i,j} = 0, \text{ no caso contrário.}$$

Por considerarem as características de processo, estas técnicas são mais acessíveis e mais difundidas para a formação de células de manufatura do que as técnicas baseadas em sistemas de codificação e classificação. Mas trabalham, da mesma forma, a partir dos componentes e formam células restritas à fabricação dos componentes presentes na matriz e convenientemente agrupados.

Máquinas						Componentes
1	2	3	4	5	6	
1	1	1		1		1
	1	1				2
			1	1		3
					1	4
				1		5

Figura 1: Matriz de incidência, um exemplo simples.

Nos casos em que no processo não se encontrem "máquinas gargalo" (bottleneck machines) ou "componentes gargalo" (bottleneck parts) - definidos como aqueles que impedem que a matriz A_{ij} seja completamente bloco-diagonal - o problema fica facilmente resolvido com técnicas simples, como a desenvolvida por KUSIAK; CHOW [27], denominada como "Cluster Identification Method" - CIM, ou como a citada por LEVASSEUR [24] e denominada "Direct Clustering Analysis" - DCA.

Numa formulação mais generalizada, informações serão agregadas, principalmente relacionadas com custos de produção, de subcontratação e mix de produção. Como exemplo, pode ser considerado o segundo algoritmo apresentado por KUSIAK; CHOW [27].

Para os casos em que estes "gargalos" estão presentes, e na verdade é o que mais se encontra na prática, existem outras metodologias desenvolvidas. KUSIAK [18] apresenta três delas.

RIBEIRO; PRADINI [28] citam diversas metodologias comentando suas vulnerabilidades e apresentam outra, onde há a possibilidade de abordar também casos onde existem alternativas de processo produtivo, mas relacionam como informações necessárias: o volume de produção, seqüências de operações e máquinas, duração das operações, tempo disponível por máquina, custo de utilização das máquinas.

Nas técnicas de agrupamento hierárquicas, os dados da matriz de incidência A_{ij} não são divididos em grupos ou células em apenas um passo. Ao invés disto, são primeiramente separados em algumas

células, cada uma completamente dividida em pequenos grupos, e cada grupo, completamente fracionado, até que todos os grupos gerados não possam mais ser divididos.

Essencialmente, as técnicas hierárquicas podem ser subdivididas em aglomerativas e divisivas. Nas técnicas aglomerativas, o algoritmo promove uma série de fusões sucessivas, enquanto nas técnicas divisivas a direção é inversa, com o algoritmo promovendo divisões até a obtenção de grupos menores. Estas técnicas hierárquicas podem ser representadas por estruturas de árvores ou dendrogramas (veja Figura 3, abaixo), diagramas bidimensionais que ilustram as fusões ou divisões que foram realizadas em cada estágio da análise.

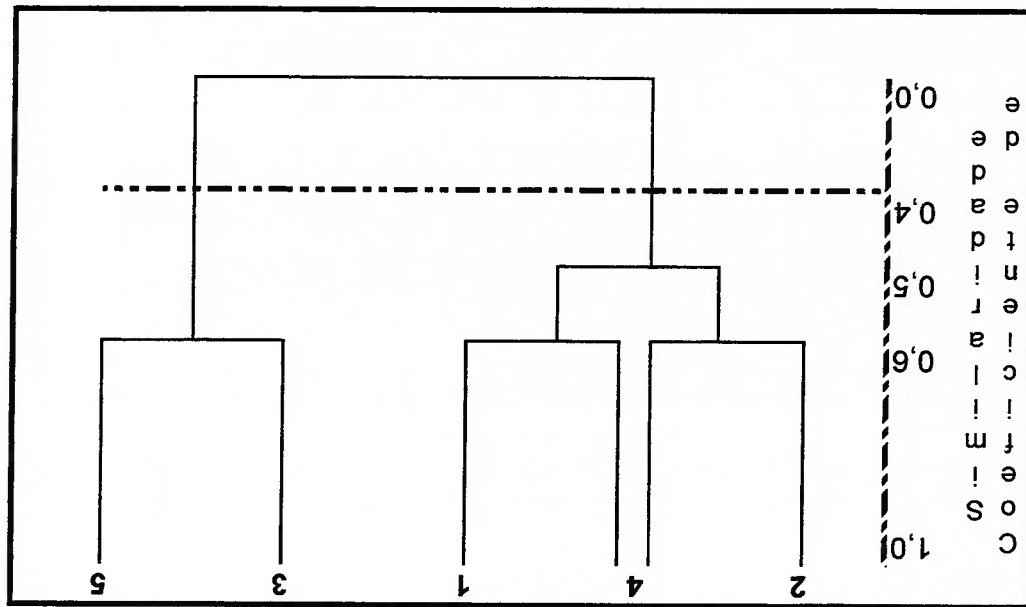


Figura 3: Exemplo de Dendrograma.

Após o cálculo dos coeficientes de similaridade, para se definir a formação das células, basta escolher um nível de similaridade e verificar o agrupamento resultante. Considerando o exemplo da

Figura 3 e o nível de similaridade marcado (ou seja: 0,4), definem-se duas células, uma com as máquinas 2, 4 e 1 e outra com as máquinas 3 e 5.

Medidas de similaridade entre máquinas ou componentes foram propostas por diversos pesquisadores para possibilitarem o desenvolvimento destas técnicas hierárquicas, e para ilustrar pode-se citar o trabalho de KUSIAK; CHO^[29], que relacionam sete metodologias heurísticas desenvolvidas para resolver o problema da formulação matricial e sete diferentes fórmulas para cálculo de similaridade, apresentando mais dois algoritmos baseados em uma fórmula de cálculo de similaridade.

O uso de coeficientes de similaridade não se restringe a algoritmos hierárquicos. ONWUBOLU; MILLO^[30] desenvolveram uma métrica para similaridade e distância, aplicando-a de forma a obter matrizes de similaridade para todas as possíveis seqüências de máquinas, calculando para cada matriz obtida o seu coeficiente de similaridade e retendo a seqüência cujo coeficiente é o menor. Fazendo-se o mesmo com as possíveis seqüências de componentes, chega-se à forma bloco-diagonal para a matriz de incidência $A_{i,j}$.

Foram desenvolvidos outros métodos de agrupamento não-hierárquicos, conforme relacionados por SELIM et al.^[12], que utilizam uma série de sementes (pontos a partir dos quais serão formadas as células), mas que só chegam a bons resultados se as escolhas das sementes forem muito bem feitas.

2.4. Técnicas de programação matemática

É difícil estabelecer uma linha divisória entre as técnicas de programação matricial e as de programação matemática, pois existem vários exemplos que poderiam ser classificados seja numa categoria, seja em outra. Isto porque, em alguns casos, as técnicas de programação matemática também utilizam cálculos de similaridade e, todos eles, na modelagem matemática também utilizam a matriz de incidência (binária ou não) como base de dados.

As técnicas de programação matemática inicialmente descrevem o problema da formação de células de manufatura em termos de equações matemáticas e utilizam programação linear, programação inteira, linear e quadrática, programação dinâmica ou programação por objetivo ("goal programming") para chegar a solução de formação celular ótima.

SELIM et al.^[12] relacionam trinta diferentes propostas de formulação matemática, cada qual com diferentes funções-objetivo, diferentes quantidades de variáveis e diferentes quantidades de restrições, todas elas exigindo software de otimização apropriado (tipicamente o LINDO^[12]).

Um dos trabalhos pioneiros, desenvolvido por KUSIAK^[31] em 1987, foi um modelo de p-mediana. Utilizando uma medida de similaridade e programação inteira, KUSIAK obtém a definição dos agrupamentos maximizando a soma das similaridades.

Outra dessas técnicas é descrita em GUNNASINGH; LASHKARI [32] e muitas outras referências podem ser obtidas no trabalho de SELIM et al. [12].

2.5. Técnicas de Partição Gráfica

As técnicas de Partição Gráfica tratam as máquinas e os componentes como vértices e os processos como arcos conectando estes vértices.

Estes modelos objetivam obter subgrafos desconectados, identificando assim as células de manufatura.

Após citar os trabalhos de RAJAGOPALAN; BATRA (1975), FABER; CARTER (1986), VOHRA et al. (1990), ASKIN; CHIU (1990) e ASKIN et al. (1991), todos aplicando a Teoria de Grafos, e o trabalho de HANSEN; DELATTRE (1978), que utiliza grafos coloridos, RATH et al. [33] estendem o conceito dos grafos coloridos e o aplicam a problemas de formação de células de manufatura.

RATH et al. [33] compararam este algoritmo com o ROC, desenvolvido por KING [25], e constataram que, em cinco casos analisados, a técnica de partição gráfica mostrou-se mais eficiente (para isto foi utilizada a medida de Eficiência em Agrupamento - "Grouping Efficiency" - sugerida por CHANDRASEKHARAN; RAJAGOPALAN - 1987).

2.6. Outras Técnicas

Técnicas baseadas em Redes Neurais, Lógica Fuzzy, Técnicas baseadas em Inteligência Artificial e outras

Algoritmos baseados em Redes Neurais também já foram extensamente estudados. Podem ser encontrados exemplos em KUSIAK; CHUNG [17], LEE; GARCIA-DIAZ [34], CHUNG; KUSIAK [35] e SURESH; KARPARTHI [36].

Para incorporar a presença de roteiros de fabricação alternativos, LEE; CHEN [37] modificaram a matriz de incidência $A_{i,j}$, tornando-a não-binária e, com uma abordagem baseada em coeficientes de similaridade e a partir de algoritmo "fuzzy", obtiveram soluções que maximizam a utilização de máquinas e minimizam o movimento intercelular.

Atualmente, o problema de formação de células tem recebido mais abordagens novas. Uma mais abrangentes, como a de ARVINDH; IRANI [38], que sugerem uma abordagem simultânea e integrada dos problemas de formação de famílias de máquinas e de componentes, de duplicação de máquinas, de layout intracelular e de layout intercelular, ou como a de REE; HWANG [39], que sugerem uma abordagem em dois estágios, para melhor solucionar os problemas com roteiros alternativos de processo - e outras mais simples, como a desenvolvida por LEVASSEUR [24], que sugere a utilização de uma metodologia simples, como o "Direct Clustering Analysis" - DCA, associada com a intervenção manual, para aproveitar as

habilidades humanas em tomar decisões subjetivas em passos-chave.

Na prática, muitas vezes a intervenção manual é recomendável. Outro exemplo onde ela é utilizada pode ser encontrado no trabalho de KHAN; GWEE^[21], que apresenta um caso prático da aplicação da técnica criada por KING^[25] ("Rank Order Clustering" - ROC) associada a duas intervenções intermediárias e utilizada para o desenvolvimento de um novo layout em determinada empresa.

Heurísticas mais elaboradas também têm sido aplicadas, como a sugerida por CHAN et al.^[4] que, após formularem o problema da formação de células com um modelo matemático, aplicam um algoritmo genético para obter a solução. Para adequar o algoritmo ao problema de formação de células, CHAN et al. definem cada indivíduo como uma alternativa de solução, os quais são descritos como um vetor de genes, no qual os genes representam sequencialmente as máquinas e os componentes e os valores dos genes representam a célula a qual pertencem respectiva e sequencialmente as máquinas e os componentes.

Outro algoritmo genético, similar ao anterior em conceito, mas onde os indivíduos são definidos por genes cujos valores representam células a que pertencem apenas os componentes, pode ser encontrado no trabalho de AL-SULTAN; FEDJKI^[40].

Em outro trabalho, após avaliarem as três principais classes de técnicas para formação de células de manufatura, a programação matemática, a partição gráfica e a formulação matricial

(manipulação da matriz de incidência), e concluírem que todas estas técnicas possuem pouca flexibilidade para serem aplicadas em um ambiente com FMS - Flexible Manufacturing System (Sistema Flexível de Manufatura), KULKARNI; KIANG ^[41] sugerem o uso de técnicas baseadas em Inteligência Artificial.

Primeiramente as classificam em:

a) Reconhecimento sintático;

b) Sistemas especialistas;

c) Matemática "Fuzzy" e

d) Redes neurais.

E, após analisarem trabalhos que as utilizam, indicam a aplicação de uma rede baseada em mapa auto-organizável onde a camada subsequente à entrada de dados consiste de um mapa bidimensional, denominado "Kohonen Layer", que, após os ajustes decorridos do processo de treinamento da rede neural, define os agrupamentos que formam as células.

Por sua vez, FERREGO et al. ^[21], apresentam uma inovação ao sugerirem um algoritmo formado por quatro passos gerais, que nada mais são do que o encadeamento de técnicas simples.

2.7. Funções-objetivo utilizadas nas técnicas para formação de células

Diversos objetivos têm sido utilizados para direcionar a solução de problemas de formação de células de manufatura. A relação de objetivos a seguir, baseada nos trabalhos de SELIM et al.^[12], visa apenas organizar a análise e subsidiar a definição da função-objetivo que será utilizada na técnica desenvolvida.

a. Minimização do número de componentes excepcionais (componente excepcional é aquele cujas operações devem ser realizadas em células diferentes);

b. Minimização do movimento intercelular de componentes excepcionais, medido pelo volume, custo ponderado ou distância percorrida ponderada;

c. Minimização dos custos de oportunidade (opportunity costs) de componentes excepcionais;

d. Minimização do investimento em duplicação de máquinas;

e. Minimização do custo de amortização do investimento em máquinas;

f. Minimização dos custos alocados às máquinas (custo operacional medido por custo hora-máquina);

g. Minimização do desbalançamento de capacidade entre as células;

h. Minimização do desbalançamento de demanda entre as células;

a. Investimento em máquinas, pois este aspecto tem um importante papel no estabelecimento de células. Se não há limitação para o valor disponível para investir, então é certo que as células formadas não apresentarão nenhum componente excepcional e nenhuma movimentação entre as células. No outro extremo, se a capacidade de

envolvendo, além de medidas de similaridade: utilização de objetivo composto ou múltiplo, neste caso, simples na formação de células de manufatura, também sugeriram a AKTURK; BALKOSE^[42], após apontarem as deficiências de objetivos

- e. Custo de treinamento de operadores.
- d. Custo da movimentação de materiais entre as células;
- c. Custo de estoque de ferramentas;
- b. Custo da operação da máquina (custo hora-máquina);
- a. Amortização do investimento em máquinas;

através de uma equação de custo que envolve: sugere uma formulação matemática que compõe diversos objetivos função-objetivo mais abrangente. O próprio SELIM et al.^[12] Estes objetivos foram muitas vezes compostos para definir uma

- m. Minimização do tempo de preparação (ou setup time).
- l. Maximização da soma de similaridades;
- k. Minimização do custo operacional total;
- j. Minimização dos custos de conversão (conversion costs);
- i. Maximização da utilização de capacidade de máquinas;

Investir por demais restritiva, a solução implicará em excessiva movimentação entre as células e fluxos reentrantes, gerando soluções com várias máquinas gargalo. Além disso, nota-se que aumentar o investimento em máquinas corresponde à redução do fator de utilização de equipamentos;

b. Balançamento de carga dentro da célula, definida como a média do quadrado das diferenças entre cada fator individual de utilização de equipamento e o fator de utilização da célula;

c. Balançamento de carga entre as células. Uma vez que faz sentido pensar nas células como fornecedoras de uma variedade de produtos para determinada área de montagem final de produtos, então os tempos de chegada das partes produzidas na área de montagem devem ser sincronizados para se evitar excesso de inventário;

d. Quantidade de escapes (o primeiro objetivo da lista anterior), usado para medir as atividades de movimentação de material.

FLYNN [43] sugere:

- a. Tempo médio de preparação (average setup time);
- b. Tempo médio de movimentação de materiais;
- c. Desempenho global;
- d. Tempo médio de fluxo;
- e. Material em processo médio;
- f. Compromisso médio de fila.

SANTORO [44] apresenta os objetivos de programação classificados

em três grandes classes:

- a. Máxima utilização de capacidade de produção;
- b. Mínimo tempo médio de fluxo, ou mínimo material em processo médio (WIP);
- c. Mínimo atraso médio de entrega.

HSU; SU [45], ao apresentarem uma técnica para a formação de células de manufatura baseada em algoritmo genético, sugeriram a utilização de outro objetivo múltiplo, neste caso, envolvendo a minimização de:

- + custos totais, compostos por investimento em máquinas e custos de transporte de componentes;
 - + balanceamento de carga dentro da célula e
 - + balanceamento de carga entre as células.
- sujeitos a:

1. cada máquina somente poderá pertencer a uma única célula;

2. cada operação de cada componente somente será designada a uma única máquina;

3. cada máquina apresenta sua própria limitação de capacidade; e

4. limitando-se o número máximo de máquinas em cada célula.

AKRIGHT; KROLL [1] salientam que um critério para avaliação do desempenho na formação de células precisa estar fortemente relacionado com os objetivos fundamentais que se buscam com esta formação:

- a. redução de tempo de preparação,
- b. obtenção de agrupamentos mutuamente separáveis;
- c. minimização do investimento em novos equipamentos;
- d. manutenção de um nível aceitável de utilização de equipamentos;
- e. aumento da qualidade do produto;
- f. redução nos níveis de inventário;
- g. redução de "lead times";
- h. manutenção na pontualidade das entregas e
- i. aumento na satisfação no trabalho e sentido de propriedade por parte dos funcionários.

Então, relacionam e comentam as seguintes medidas de desempenho utilizadas na formação de células de manufatura:

TBE (Total Bond Energy): determinada pela soma dos produtos de cada elemento da matriz de incidência $A_{i,j}$ resultante com cada um de seus quatro elementos adjacentes. Este cálculo procura fornecer uma medida de agrupamento dos "1s" da matriz de incidência, pois somente os "1s" vizinhos incrementam o TBE. Quanto maior o TBE melhor, e no caso das figuras 1 e 2 (pgs 16 e 17), vale respectivamente, 10 e 22;

MU (Machine Utilization) : determinada pela relação entre os elementos não-zero presentes nos agrupamentos formados e o total dos elementos presentes nos agrupamentos formados. Este cálculo avalia o agrupamento de uma forma diferente, verificando se os agrupamentos formados estão com o mínimo de zeros. Quanto maior o MU, melhor, e no caso das figuras 1 e 2, MU vale respectivamente, 13/30 (43,3%) e 12/15 (80,0%);

ODV (Off Diagonal Voids) : determinada pela relação entre os elementos zero presentes fora dos agrupamentos formados e o total dos elementos presentes fora dos agrupamentos formados. Esta medida avalia apenas a presença (não desejável) de elementos não-zero fora dos agrupamentos formados. Quanto maior o ODV melhor, e no caso da figura 2, OVD vale 14/15 (93,3%);

GE (Grouping Efficiency) : medida que combina as duas anteriores ponderando-as;

PE (Proportion of Exceptional Elements) : determinada pela relação entre a quantidade dos elementos não-zero não pertencentes aos agrupamentos formados e o total dos elementos não-zero. Neste caso, quanto menor o PE melhor, e no caso da figura 2, vale 1/15 (6,7%).

E constatam que nenhuma delas está diretamente relacionada com os objetivos fundamentais que haviam relacionado, apresentando outras medidas mais complexas que procuram diminuir as limitações das medidas anteriores:

GF (Grouping Efficacy): determinada pela combinação de **PE** e uma nova medida denominada **DV** (Diagonal Voids), que por sua vez é determinada pela relação entre a quantidade de elementos zero presentes nos agrupamentos definidos e a quantidade total de elementos não-zero da matriz de incidência $A_{i,j}$. A fórmula de cálculo de **GF** é:

$$GF = \frac{(1 - PE)}{(1 + DV)} \quad \text{Eq. 1}$$

No caso da figura 2, como DV vale 3/13, GF vale 75,8%.

WGF (weighted GF): uma generalização de GF que utiliza a relação:

$$r = q / (1 - q)$$

onde:

$q \mid 0 < q < 1$ é o peso que deve se atribuído aos elementos presentes nos agrupamentos e $(1 - q)$ é o peso a ser atribuído aos elementos não presentes nos agrupamentos

e é determinada pela fórmula abaixo:

$$WGF = \frac{r(1 - PE)}{PE + r(1 + DV + PE)} \quad \text{Eq. 3}$$

Com isto, permite-se incorporar nesta medida, algum fator dentre aqueles considerados relevantes para a formação das células.

VMPE (Volume weighted proportion of exceptional elements):
 expande o conceito da PE, incorporando o conceito de
 volume, e é dada pela seguinte fórmula:

$$VMPE = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M v_i a_{i,j}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M v_i e_{i,j}}$$

onde:

$e_{ij} = 1$ se a_{ij} for um elemento excepcional,

senão $e_{ij} = 0$

v_i = demanda anual do componente i .

OSPE (operations sequences proportion of exceptional elements):

expande conceitos para considerar sequências operacionais e o movimento intercelular e é dado pela

fórmula a seguir:

$$OSPE = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{L_i-1} x_{i,j}}{\sum_{i=1}^N L_i}$$

onde:

$x_{ij} = 1$ se as operações j e $j+1$ do componente i são em diferentes células,

senão $x_{ij} = 0$

L_i = número total de operações do componente i .

Eq. 5

Eq. 4

$$\text{faturados} = x a + y b + z c$$

TC = total de custo para produzir os componentes a serem

célula;

TR = total de faturamento gerado pelos componentes da

onde:

$$\text{Eq. 8} \quad PM = (1 - TC/TR) \times 100\%$$

KROLL [1] sugerem o uso de **PM** (profit margin), determinada por:

E, nos casos onde dados de custos estão disponíveis, AKRIGHT;

com outro fator relevante, em aberto, dado pelo coeficiente r.

intercelulares, procurando ponderá-los pelo volume de produção,

procuram reunir os objetivos de minimizar os movimentos

Com esta medida, formada a partir das anteriores, AKRIGHT; KROLL;

$$\text{Eq. 7} \quad WGA = \frac{r(1 - AP10)}{r(1 - AP10) + DV - AP10}, \text{ onde } r = \frac{1 - q}{q}$$

não estiverem disponíveis.

a seguir, sugerindo o seu uso sempre que dados mais adequados

bem mais complexa, o WGA, cuja fórmula de cálculo é apresentada

A partir destas medidas, AKRIGHT; KROLL [1] apresentam uma medida

onde v_i , x_{ij} e L_i seguem as definições já apresentadas.

Eq. 6

$$AP10 = \frac{\sum_{i=1}^N v_i L_i}{\sum_{i=1}^E \left(v_i \sum_{j=1}^{L_i} x_{ij} \right)}$$

combinando as medidas OSPE e WPE, será calculada como:

AP10 (actual proportion of intercellular operations):

Conforme MONTON; FENTICO^[47], Busca em Vizinhaça é uma técnica heurística geral usada para resolver problemas, onde, a partir de uma solução inicial (semente), são pesquisadas soluções adjacentes ou vizinhas, buscando sempre melhorar o valor da função-objetivo, procurando o ótimo.

2.8. Busca em Vizinhaça

Segundo esta observação e, a partir de uma análise mais detalhada dos objetivos e do que se espera obter na formação celular, este trabalho apresenta a sua própria função-objetivo no item 3.4.

Diversas outras formulações podem ser definidas, sempre de acordo com o algoritmo que está sendo apresentado. Por exemplo, BOE; CHENG^[46] utilizam o conceito de proximidade e matriz de proximidade, assim, na formulação que propõem, a função-objetivo incorpora estes conceitos.

x = custo de processamento unitário médio na célula
 a = número de elementos não-zero dentro da célula
 y = custo médio de vazios na célula
 b = número de vazios na célula
 z = custo unitário médio de elementos processados fora da célula
 c = número de elementos excepcionais

onde:

O procedimento básico pode ser descrito pelos seguintes passos:

Passo 1: Utilizando-se de alguma heurística escolhida, obtenha a semente inicial. Embora possa ser utilizada uma heurística de sorteio aleatório, como a semente inicial tem influência no resultado, sugere-se a escolha de uma boa heurística para a geração desta semente inicial.

Passo 2: Obtenha o valor da função-objetivo para esta semente.

Passo 3: Se o critério de término for atingido, pare. Senão, continue.

Passo 4: Escolha uma vizinhança.

Passo 5: Avalie as soluções, possivelmente utilizando uma heurística de suporte.

Passo 6: Após avaliar algumas alternativas na vizinhança, escolha uma ou mais novas sementes, baseado em critério de proximidade, intensificação e diversificação, e retorne ao Passo 2.

Na verdade, trabalhando com um objetivo regular, este procedimento irá conduzir a solução a um ótimo local. Assim sendo, será útil procurar soluções mais distantes da semente, utilizando-se de modelos de Busca Estendida.

Ampliação do conceito de busca em vizinhança, a Busca em Vizinhança Estendida tem por objetivo justamente poder descobrir diversos pontos de ótimo local, para poder selecionar o melhor.

Estes procedimentos consideram os conceitos de intensificação, que é a busca nas proximidades da semente que vem sendo pesquisada, tendo em vista conduzir a solução a um ponto de ótimo local, e diversificação, que é a busca em locais mais distantes, tendo em vista gerar novas possibilidades de solução, gerando mais chances de encontrar o ótimo global.

Alternar entre intensificação e diversificação torna a busca estendida e, conforme isto é feito, têm-se diferentes procedimentos. MORTON; PENTICO ^[47] descrevem os três mais comuns:

a. Tabu Search: A ideia deste procedimento é "sempre considerar o melhor movimento disponível", mesmo que ele torne o objetivo um pouco pior, gerando, assim, um movimento de diversificação. E, para evitar que no próximo movimento volte-se atrás, são armazenadas em uma tabela de movimentos proibidos, as propriedades dos m últimos movimentos.

Antes de atingir o ótimo local, o procedimento de busca em vizinhança irá melhorar a solução a cada passo. Mas depois de deixar o ótimo local, enquanto sobe a montanha em direção a diferentes regiões de solução, a lista tabelada provoca a diversificação até que a área da antiga solução seja deixada para trás.

Neste procedimento, alguns cuidados devem ser observados:

i) cada solução de ótimo local deverá ser armazenada, bem como a melhor solução encontrada;

(i) o principal trabalho adicional neste procedimento é conservar uma lista atualizada das propriedades das últimas m soluções e conferir se cada novo passo está na lista; e (ii) o procedimento não irá terminar, mesmo se encontrar o ótimo global, pois não saberá reconhecê-lo, logo um procedimento de terminação deverá ser determinado.

b. Genetic Algorithms: Algoritmos genéticos podem referir-se a quaisquer processos de busca que simulam a evolução natural.

A partir de uma população atual de possíveis soluções, as melhores são modificadas ou combinadas para formar uma nova geração de soluções. E para manter o número de soluções dentro de um limite, as piores soluções são descartadas (morrem).

Este procedimento promove a intensificação e a diversificação ao mesmo tempo, mas exige um armazenamento de muitas soluções simultaneamente, para que a população tenha quantidade suficiente de indivíduos para favorecer a evolução.

c. Simulated Annealing: Neste procedimento, desenvolvido a partir de uma analogia entre os problemas de otimização e a solidificação de substâncias fundentes (physical annealing), após a avaliação de uma nova vizinhança, não será escolhido o aparente melhor movimento (aquele que melhora a função objetivo), mas o melhor movimento definido como aquele com a maior probabilidade de sucesso e assim por diante [48].

Esta probabilidade de sucesso é definida como: $e^{-\delta/T}$,
 Onde T é a temperatura da substância fundente e
 δ é a diferença entre a função-objetivo desta nova
 solução e a função-objetivo da melhor solução
 encontrada.

Este procedimento contempla os seguintes passos:

- Passo 1:** Defina os parâmetros:
 T_0 (temperatura inicial)
 $T(t)$ (função de resfriamento)
 T_f (temperatura final)
 $N(T)$ (número de iterações, como função da
 temperatura)

Passo 2: Defina o estado inicial: $i = i_0$

Passo 3: Calcule $f(i_0)$ (função-objetivo no estado inicial)

Passo 4: Para $T = T_0$ até $T = T_f$, faça:

Para $n = 0$ até $n = N(T)$, faça:

Gere o estado j , vizinho de i

Calcule $f(j)$ e $\delta = f(j) - f(i)$

Se $\delta > 0$, então $i = j$;

senão: se $\text{ran}(0,1) < e^{-\delta/T}$,

então $i = j$

Se for atingido o critério de parada, pare.

Próximo n

Próximo T

As características do problema em questão, associadas aos parâmetros definidos para o algoritmo e ao critério de vizinhança estabelecido, irão definir a extensão da busca, assegurando a diversificação, para fugir de ótimos locais, aliada a uma intensificação suficiente para possibilitar convergência.

Logo, para se obter um algoritmo eficiente é preciso atentar-se para a escolha adequada da temperatura inicial e da função de restrição e para uma boa definição do critério de vizinhança.

3. DESCRIÇÃO DA TÉCNICA PROPOSTA

Neste capítulo, serão inicialmente apresentadas as premissas e as hipóteses adotadas no desenvolvimento da técnica proposta, definindo-se assim seu campo de aplicação.

Então, para o estabelecimento de uma base conceitual comum, serão definidos os principais conceitos aplicados na modelagem do problema e no desenvolvimento da formulação da técnica proposta, definindo-se o conceito de estrutura de produto e processo e o conceito de partição, com os elementos que os compõem.

A seguir o problema será formulado e será apresentada a função-objetivo a ser utilizada. Finalmente, a técnica será proposta com a apresentação do algoritmo desenvolvido pelo autor.

3.1. Premissas e hipóteses adotadas

Para a aplicação da técnica proposta deverão ser adotadas as seguintes premissas:

I - Planta Industrial predominantemente tipo A:

Conforme a definição de UMBLE; SRIKANTH^[49], uma planta Industrial pode ser classificada em tipo V, A, ou I.

Plantas V são aquelas que convertem matéria prima bruta ou itens parcialmente processados em uma variedade de itens finais, vendidos tanto para consumidores finais como para outras plantas de manufatura, incluindo montadoras. Como exemplos deste tipo de planta, podem ser citados processos de corte de chapas e fabricação de "blanks", processos de fundição, trefilação ou laminação e uma série de processos de usinagem que, partindo de uma mesma matéria prima, como barras de aço, produzem toda uma família de componentes cujas características vão sendo definidas a cada estágio do processo produtivo.

A Figura 4, a seguir, apresenta uma representação esquemática de uma planta tipo V.

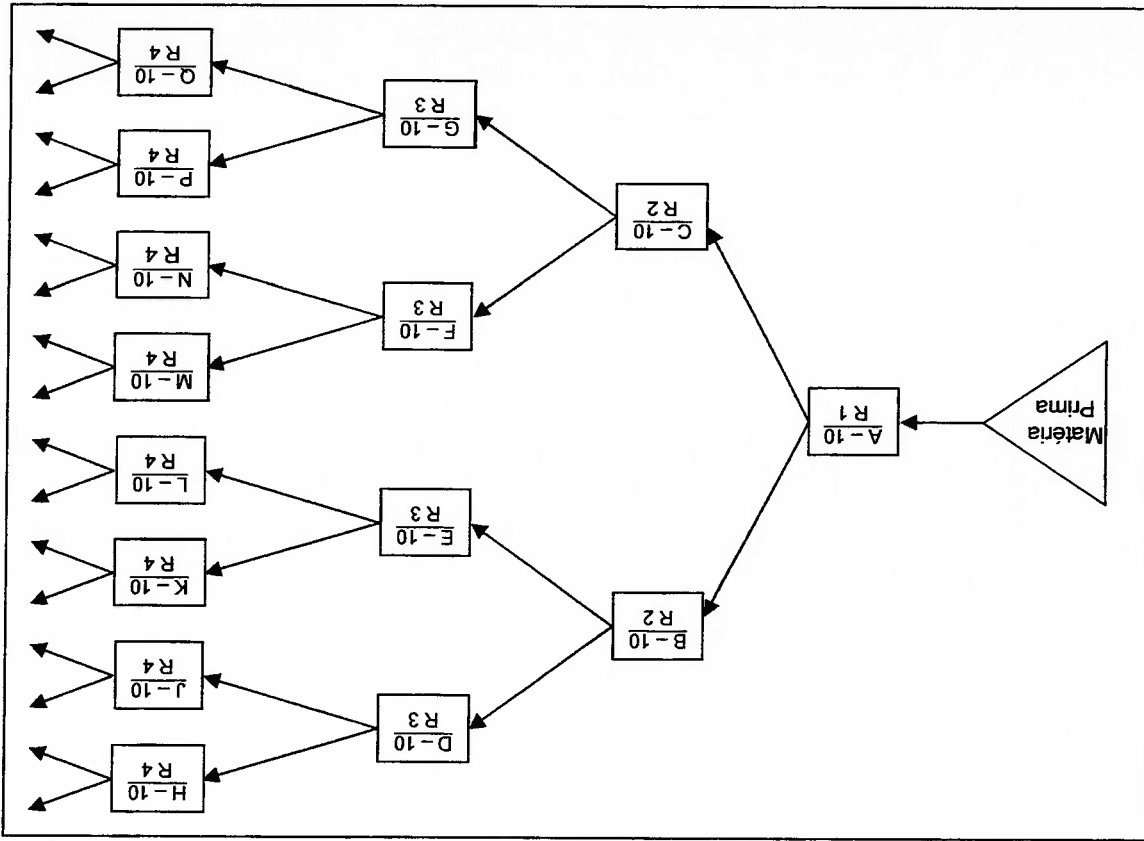


Figura 4: Fluxo típico em uma Planta V.

Nesta figura, e nas seguintes (5 e 6), cada retângulo representa uma operação de manufatura distinta no fluxo de processo, enquanto os triângulos representam a matéria prima a partir da qual o fluxo inicia ou os componentes adquiridos prontos. As letras acima da linha simbolizam o componente que está sendo manufaturado, seguidas por um número que representa a operação. A letra R, sempre abaixo da linha e seguida de um número, representa o recurso (máquina, equipamento, bancada ou outro) utilizado para processar aquela operação.

Analisando-se em maiores detalhes a planta tipo **V**, apresentada na Figura 4, observa-se que da matéria prima produz-se um componente A, utilizando-se o recurso R 1. Com o componente A, produzem-se os componentes B ou C, com o mesmo equipamento R 2. Com o componente B, produzem-se os componentes D e E, e assim por diante.

Caracterizadas por acentuada divergência ao longo do processo produtivo, geralmente as plantas tipo **V** apresentam as seguintes características básicas:

- a. O número de itens finais é grande, quando comparado com o número de itens de matéria prima;
- b. Todos os itens finais vendidos pela planta são produzidos, em essência, da mesma maneira;
- c. Os equipamentos utilizados são normalmente intensivos em capital e altamente especializados.

Em termos simples, as plantas que fabricam relativamente poucos produtos distintos, compostos por muitos diferentes componentes, são plantas **A**. Como exemplos, podem ser citadas as montadoras que produzem seus principais componentes.

A Figura 5, a seguir, apresenta uma representação esquemática de uma planta tipo **A**.

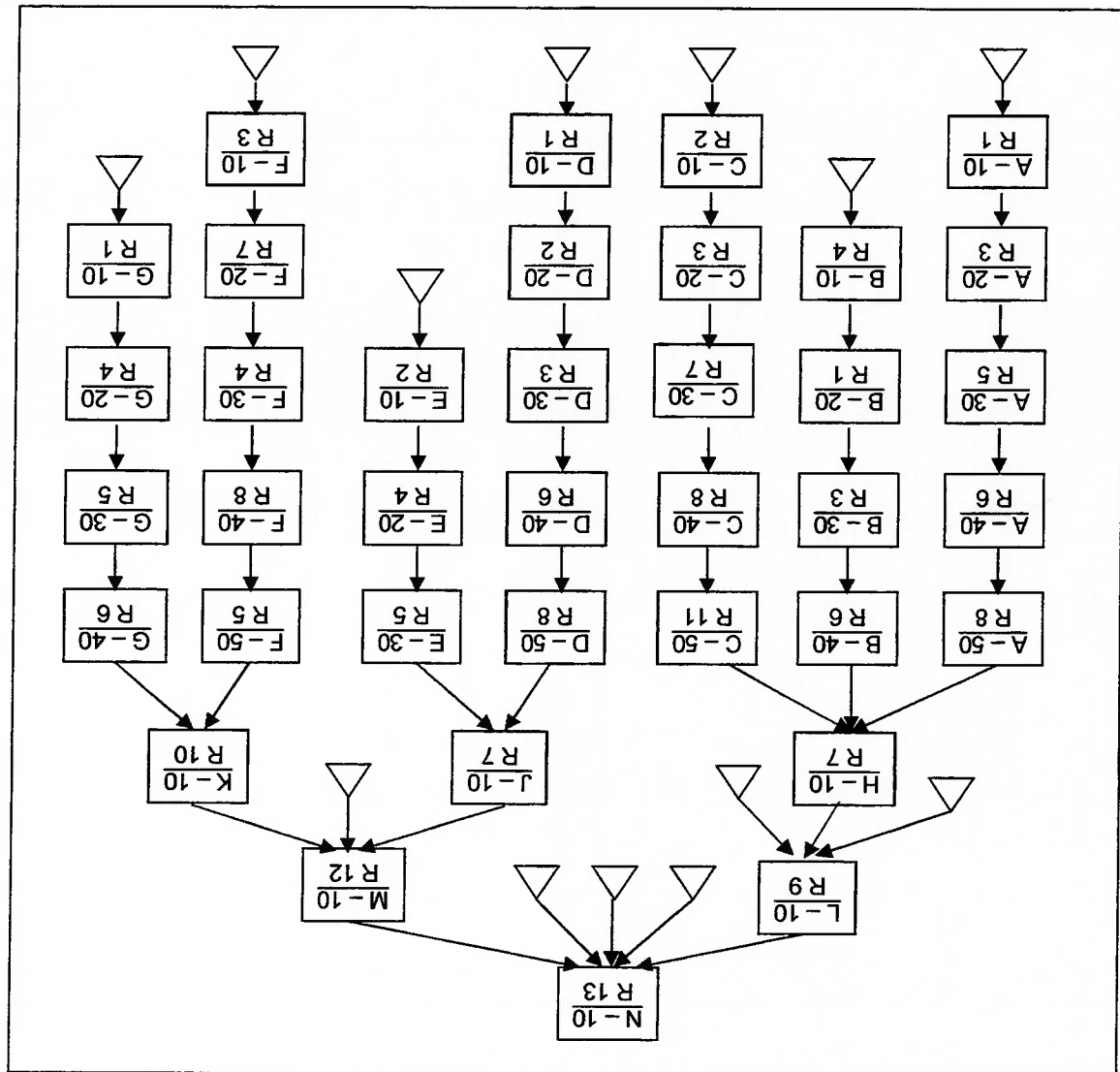


Figura 5: Fluxo típico em uma Planta **A**.

As plantas tipo **A** são dominadas pela existência de convergentes pontos de montagem e compartilham das quatro seguintes características comuns:

- a. Montam um grande número de componentes manufaturados em relativamente poucos itens finais;
- b. Os componentes são, muitas vezes, específicos para determinado item final;
- c. Os roteiros de processo para os componentes que compõem o produto são altamente distintos;
- d. As máquinas e ferramentas usadas nos processos de manufatura tendem a ser máquinas de uso geral.

O aspecto mais relevante das plantas **T** é que seus produtos finais são montados a partir de componentes comuns a diversos outros produtos finais. A primeira vista, plantas **A** e plantas **T** são muito similares. É verdade que ambas são dominadas pelas interações que ocorrem nas operações de montagem e muitas delas, que apresentam características **T** na montagem final, têm como estrutura básica uma formação tipo **A**.

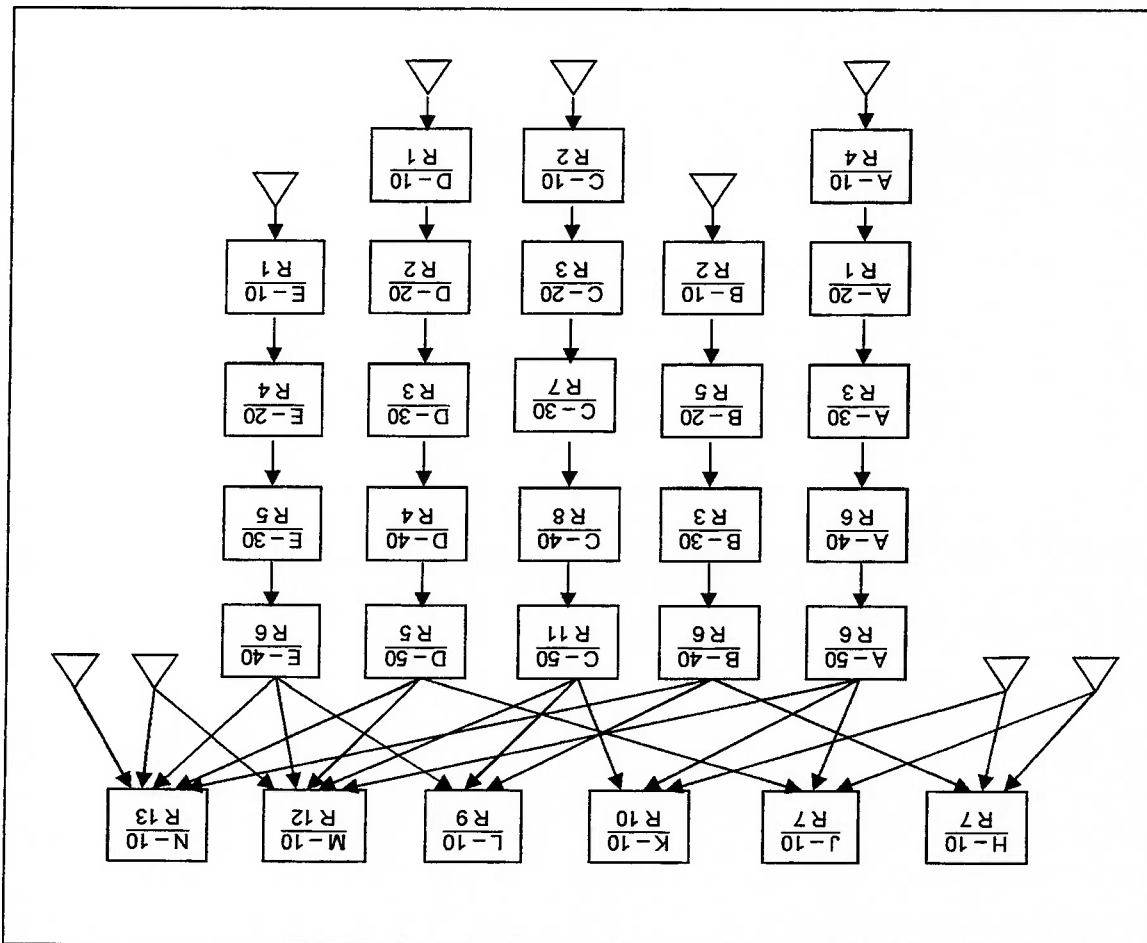
Entretanto, comparando o diagrama da Figura 5, com o da Figura 6, percebe-se que estes dois tipos de plantas têm muitas diferenças, especialmente nas características regidas pela natureza de seus pontos de montagem, que são tipicamente opostas.

A Figura 6, a seguir, apresenta uma representação esquemática de uma planta tipo **T**.

Resumindo, as plantas T apresentam quatro características que as distinguem:

- Um conjunto de componentes comprados ou manufaturados comuns são montados juntos para produzir os produtos finais;
- Os componentes são comuns para muitos diferentes produtos finais;
- Os roteiros de processo para os componentes não incluem pontos de convergência (montagens), nem pontos de divergência.

Figura 6: Fluxo típico em uma Planta T.



• **Produção em Fluxo, com Fluxo "pulado" (skip shops)** : onde as ordens não passam necessariamente em todas as máquinas, e a modelagem pode considerar que passem com tempo zero e prioridade "infinita" nestas máquinas "puladas"!

Embora em um ambiente de produção em fluxo simples cada ordem seja processada por uma série de máquinas exatamente na mesma sequência, este modelo pode apresentar algumas variações:

de máquinas a seguir.

máquinas. Neste caso, cada ordem (job) tem sua própria sequência ordem (job) não respeita necessariamente uma única sequência de intermitente geral (job shop), o roteiro de fabricação de cada processo diferentes. Já em um ambiente industrial de produção embora possam executar operações diferentes ou com tempos de seguem sempre a mesma sequência de utilização de máquinas, produção intermitente em fluxo (flow shop), as ordens (ou jobs) Segundo MONTON; PENLICO^[47], em um ambiente industrial de

II - Produção em Fluxo Intermitente, sem Fluxo reentrante:

A premissa adotada implica que, ao final de cada operação, somente há um destino e, embora possa haver, na sequência do fluxo, máquinas que não realizam operações para determinada peça, o fluxo nunca bifurca.

d. Os roteiros de processo para os componentes manufaturados são normalmente diferentes.

. Produção em Fluxo, com Fluxo Reentrante (reentrant flow shop) : onde algumas máquinas podem ser "visitadas" mais do que uma vez;

. Produção em Fluxo composto (compound flow shop) : onde cada máquina pode ser substituída por um grupo de máquinas. Comumente estes grupos podem ser formados por máquinas em paralelo ou, então, por uma linha que trabalhe por lote (batch line). Neste caso, cada grupo de máquinas será considerado como uma única máquina, com o tempo de processo dividido pela quantidade de máquinas;

. Produção em Fluxo, com restrição de fila ou estoque intermediário ("finite queue" flow shop) : onde há uma restrição de estoque em frente a cada máquina do Fluxo. Como exemplo importante deste tipo de ambiente, têm-se as células de manufatura.

A técnica desenvolvida não exige que as células de manufatura já tenham sido formadas, mas as características necessárias para a sua formação precisam estar presentes, ou seja, produção em Fluxo intermitente, sem Fluxo reentrante.

III - Tempos de Troca de Dispositivos Independentes da sequência:

Será considerado que os tempos de troca de dispositivos não são dependentes da sequência adotada, ou que a melhor sequência já está definida e ela é sempre seguida. Pode-se assim adotar um tempo médio e incorporá-lo ao cálculo da disponibilidade

operacional do equipamento (**DOE**), como será descrito no próximo tópico (3.2).

Ao contrário do que se aplica usualmente, com a incorporação do tempo de troca de dispositivos nos tempos de processo ou de operação, este trabalho sugere sua incorporação à disponibilidade operacional para que seja tratado como uma perda e abordado dentro em políticas de redução e melhoria contínua.

IV - Disponibilidade de matéria prima:

Assume-me que esteja assegurada a disponibilidade de matéria prima para a produção, qualquer que seja a alternativa formulada. Assim, a fórmula da função-objetivo não levará em conta este dado, pois ele não afetará a definição da solução.

V - Fluxo unitário dentro de cada célula:

Fluxo unitário dentro de uma célula significa que o lote de transferência de uma operação para a seguinte é de apenas uma unidade. Com isto, o operador estará disponível para realizar outras atividades enquanto a máquina produz.

Duas medidas de tempo de processo surgem a partir da adoção desta premissa:

TTCO (s) - Tempo de Ciclo do Operador: Este tempo considera apenas o tempo em que o operador esteja realizando algum serviço, seja a colocação ou a retirada da peça da máquina,

seja alguma operação manual ou ajuste da máquina (realizado a cada ciclo), seja inspeção ou anotações. Não devem ser considerados neste tempo quaisquer permissões relacionadas à fadiga, intervalos para café ou uso pessoal, nem mesmo aqueles elementos relacionados a ineficiências ou perdas.

Normalmente este tempo é cronometrado e, embora presente pequenas variações de ciclo para ciclo, será adotado constante.

TCM (s) - Tempo de Ciclo da Máquina: Este tempo considera tanto a carga e descarga da peça na máquina, quando não podem ser feitas durante o ciclo de trabalho da máquina, como o próprio ciclo de trabalho da máquina. É o tempo em que o equipamento está comprometido com a operação, seja efetivamente realizando a operação, seja sendo abastecida para tal.

Neste tempo apenas se consideram os tempos pertinentes a um ciclo de operação, para uma peça. Os tempos de troca de ferramentas, os tempos para ajustes cuja frequência seja maior que a do ciclo operacional, e os tempos de preparação não devem ser considerados aqui, nem mesmo por rateio, pois serão considerados na DOE, conforme será apresentado no tópico 3.2.

Com estas medidas de tempo surgem três situações distintas:

a. **TCO = TCM**. Situação típica de processo manual com utilização intensiva de equipamento ou máquina que depende do acompanhamento contínuo do operador. Operações em bancada e montagens são exemplos comuns desta situação.

b. **TCO > TCM**. Situação onde o processo manual é maior que a utilização do equipamento ou onde são necessários elementos adicionais como inspeção ou limpeza do componente. Linhas de montagem se caracterizam por predominância deste tipo de situação.

c. **TCO < TCM**. Situação típica de processos automáticos, em equipamentos onde a atuação do operador se restringe a descarregar, carregar e ligar a máquina e, quando necessário, fazer os devidos ajustes.

Nesta terceira situação, muito comum em indústrias de fabricação seriada, é onde residem as melhores oportunidades de ganho de produtividade, pois, com o fluxo unitário, um mesmo operador pode operar mais do que um equipamento simultaneamente.

VI - Estoques serão medidos apenas nas saídas das células:

Em função da adoção de fluxo unitário e, principalmente, de restrição de estoques intermediários, característica de produção celularizada, os estoques serão medidos apenas nas saídas das células formadas (pontos de corte), pois os estoques

intermediários serão os mesmos para quaisquer alternativas consideradas e não afetarão a definição da solução.

Estes estoques nas saídas das células serão calculados a partir da definição de um período de cobertura (dias de produção em estoque) válido para todas as células. Assim, para cada célula formada, será adotado um supermercado de produto acabado equivalente à demanda de cada componente ou conjunto produzido pela célula, no período de cobertura fixado.

Este estoque deverá ser determinado, pois a quantidade de células formadas irá influenciar o valor da função-objetivo.

VII - Custos de estoque serão calculados pelo custo da matéria prima:

O custo do estoque será calculado pelo custo da matéria prima empregada para fabricar o componente, conforme sugere SRIKANT;^[50] ROBERTSON

VIII - O custo da matéria prima, para qualquer produto cujo processo início em determinada operação, será o mesmo:

O custo da matéria prima, para qualquer produto cujo processo início na mesma operação, será adotado constante. Pois, embora esta não seja a situação mais comum encontrada em um ambiente industrial, o resultado será o mesmo, seja adotando-se um custo médio, ponderado pela demanda de cada produto, seja utilizando-

se o valor correto de custo para cada tipo de produto, multiplicando-o posteriormente pelo estoque de cada produto, que, em função das premissas anteriores, será exatamente proporcional a sua demanda. Desta forma, partindo-se do custo médio, o algoritmo adotado poderá ser simplificado.

IX - Nas operações de montagem, a quantidade de cada tipo de componente será considerada unitária:

Apenas para simplificação do algoritmo, adotam-se quantidades unitárias de componentes para a montagem de cada subconjunto. Se isto não ocorrer na prática, considera-se o artifício de multiplicar pela quantidade empregada do componente, todos os tempos de processo de todas as operações usadas para produzir o componente múltiplo, sejam os tempos de ciclo de operador, sejam os tempos de ciclo de máquina.

3.2. Estrutura de Produto e Processo

Estruturas de Produto, utilizadas para organizar a relação de componentes de determinado produto de forma hierárquica, caracterizando seus conjuntos e subconjuntos, são muito comuns na indústria manufatureira. Um exemplo muito simples pode ser visto na Figura 7, a seguir, onde os componentes estão em ovais, com seus respectivos códigos e denominações, e a matéria prima está representada em triângulos:

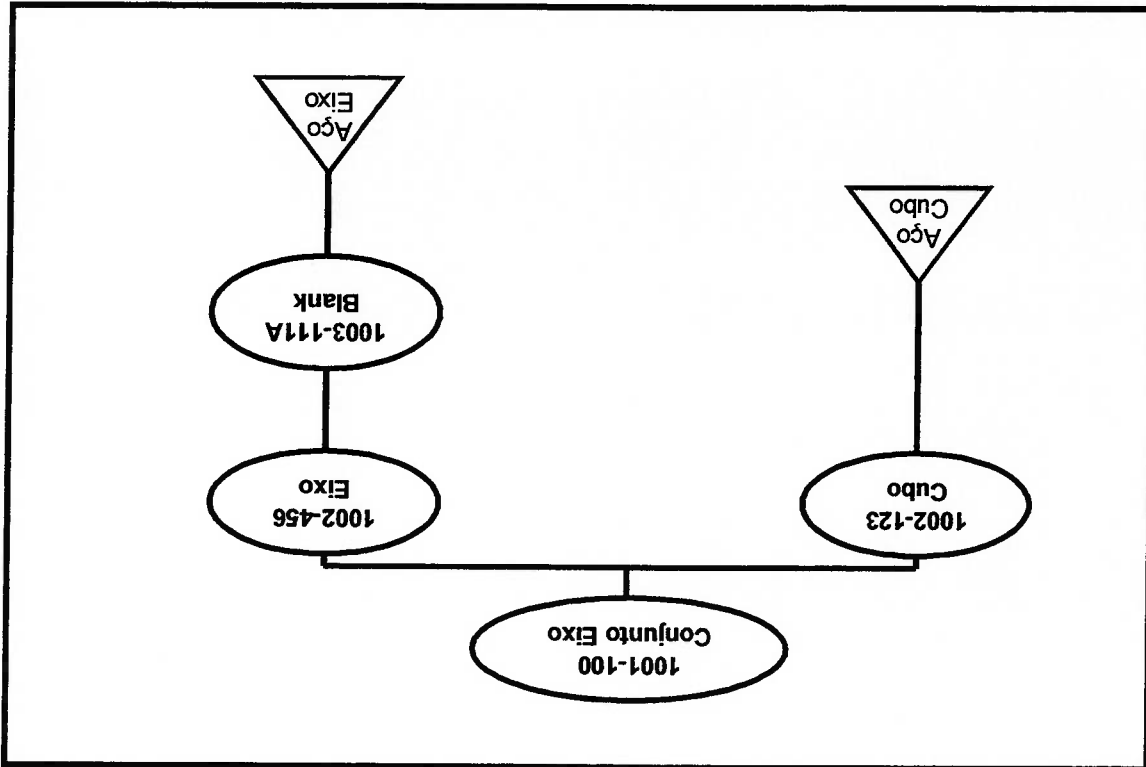


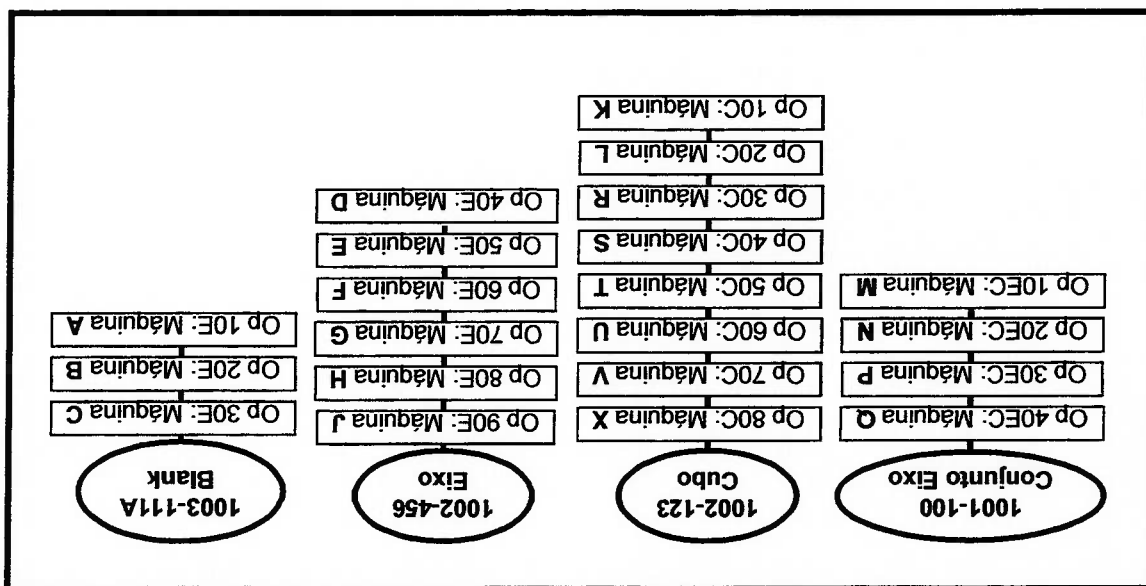
Figura 7: Exemplo simples de Estrutura de Produto

Associado a cada componente fabricado internamente, são facilmente encontrados seus respectivos Roteiros de Fabricação e, no caso da Estrutura de Produto Ilustrada na figura anterior, podem ser visto na Figura 8, a seguir:

No banco de dados de uma empresa, muitas informações são associadas tanto aos componentes das Estruturas de Produto, como às operações dos Rotéis de Fabricação.

A **Estrutura de Produto e Processo (EPP)** é um conjunto que combina as informações relevantes da Estrutura de Produto com os Rotéis de Fabricação de cada componente da estrutura e pode ser representada graficamente conforme a Figura 9. Seus elementos são todas as operações dos Rotéis de Fabricação, de todos os componentes da Estrutura de Produto, organizados de forma hierárquica, como a Estrutura de Produto.

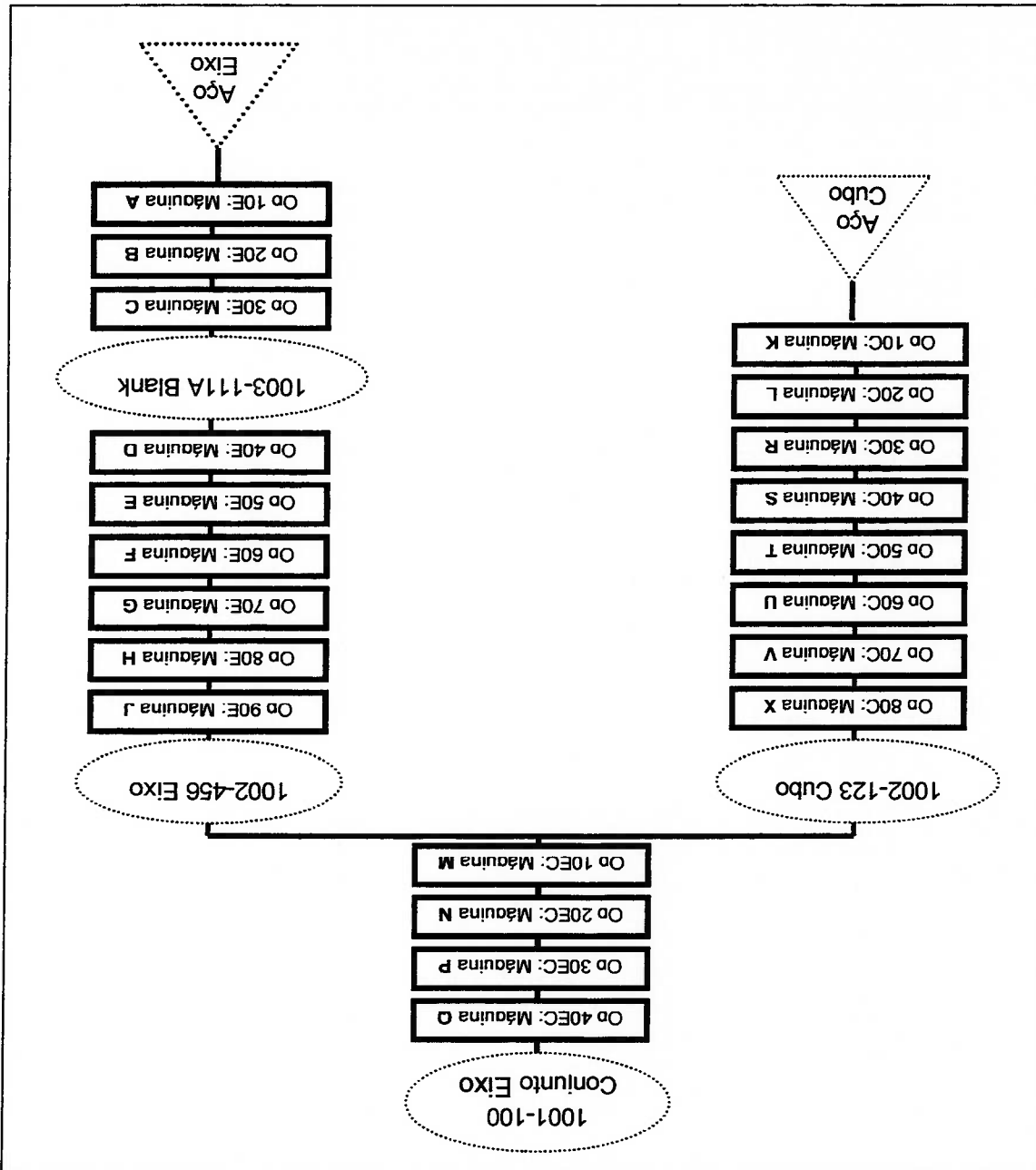
Figura 8: Representação Gráfica dos Rotéis de Fabricação dos componentes da Estrutura de Produto da Figura 7



Na representação gráfica apresentada, podem-se observar as peças que compõem o produto, no caso em três níveis de estrutura, e as etapas do processo de manufatura de cada uma das peças ou conjuntos, com os equipamentos onde são realizadas.

Processo.

Figura 9: Representação gráfica de uma Estrutura de Produto e



Para efeito de formação de células de manufatura, devem ser representadas na Estrutura de Produto e Processo apenas as peças que sofrerão alguma transformação ao longo do processo produtivo, seja uma transformação mecânica real, ou uma montagem que sofrerão alguma transformação ao longo do processo produtivo, seja uma transformação mecânica real, ou uma montagem

A cada **operação início** será associada a sua matéria-prima correspondente.

As demais operações, típicas de transformação, não receberão denominação especial e serão "**operações comuns**".

Operações como a operação 10E da fabricação do Blank do Eixo, realizada na máquina A, e a operação 10C da fabricação do Cubo, realizada na máquina K, por não apresentarem operação que as preceda, serão denominadas "**operação início**".

e Processo deverá apresentar uma e somente uma **operação fim**.

serão definidas como "**operação fim**". Cada Estrutura de Produto última operação da estrutura, sem apresentar operação posterior, 1001-100, realizada na máquina Q, que se caracterizam como a Operações como a operação 40EC da fabricação do Conjunto-Fixo

como "**operações de montagem**".

uma operação que as precedem, serão definidas neste trabalho Operações como esta, caracterizadas por apresentarem mais do que transformação.

equipamento de montagem. As demais máquinas são máquinas de máquina M pode ser uma prensa, uma máquina de solda ou um realizada na máquina M, é uma operação típica de montagem. A Neste exemplo, a operação 10EC do Conjunto-Fixo 1001-100,

que agregue algum elemento ao conjunto, seja qualquer atividade que agregue valor.

Para completar as informações para a definição da nova formação celular, outras informações de processo serão necessárias. São elas: o TCO, o TCM e a DOE. O TCO (Tempo de Ciclo do Operador) e o TCM (Tempo de Ciclo da Máquina) já foram apresentados anteriormente (no item 3.1 - V) e são os dados que consideram os tempos pertinentes a um ciclo de operação. Os tempos de troca de ferramentas, os tempos de ajustes cuja frequência seja maior que a do ciclo operacional, e os tempos de preparação não devem ser considerados aqui, nem mesmo por rateio, pois serão considerados na DOE, conforme pode ser visto a seguir.

DOE (%) - Disponibilidade Operacional do Equipamento: A DOE considera todas as perdas e paradas não planejadas do equipamento, incluindo a frequência de paradas por quebras e o tempo médio de reparo do equipamento, bem como as perdas por problemas com a qualidade e as trocas de dispositivos.

Para determinação do DOE devem ser levadas em consideração três parcelas de perdas: a disponibilidade, o desempenho e a qualidade, conforme detalhado nas fórmulas a seguir:

$$DOE = Disponibilidade \times Desempenho \times Qualidade \quad \text{Eq. 9}$$

Onde:

$$Disponibilidade = \frac{\text{Tempo Planejado}}{(\text{Tempo Planejado} - \text{Tempo Perdido})} \quad \text{Eq. 10}$$

$$\text{Desempenho} = \frac{\text{Tempo de Ciclo Projetado}}{\text{Tempo de Ciclo Real}} \quad \text{Eq. 11}$$

$$\text{Qualidade} = \frac{\text{Pegadas Boas Produzidas}}{\text{Pegadas Produzidas}} \quad \text{Eq. 12}$$

A Estrutura de Produto e Processo, representada graficamente na Figura 9, complementada com as informações de tempo de ciclo do operador (TCO), tempo de ciclo da máquina (TCM) e disponibilidade operacional do equipamento (DOE) para cada operação, pode ser apresentada em forma de tabela.

Op.	Operação	Máquina	DOE	TCO (s)	TCM (s)	Próx. Op.
10E	Op 10 Eixo	Máq. A	0,98	10	45	20E
20E	Op 20 Eixo	Máq. B	0,99	6	26	30E
30E	Op 30 Eixo	Máq. C	0,98	10	25	40E
40E	Op 40 Eixo	Máq. D	0,99	8	10	50E
50E	Op 50 Eixo	Máq. E	0,99	18	12	60E
60E	Op 60 Eixo	Máq. F	0,98	8	10	70E
70E	Op 70 Eixo	Máq. G	0,98	12	15	80E
80E	Op 80 Eixo	Máq. H	0,99	12	40	90E
10C	Op 10 Cubo	Máq. K	0,95	10	44	20C
20C	Op 20 Cubo	Máq. L	0,93	10	10	30C
30C	Op 30 Cubo	Máq. R	0,99	12	12	40C
40C	Op 40 Cubo	Máq. S	1,00	1	5	50C
50C	Op 50 Cubo	Máq. T	0,95	12	10	60C
60C	Op 60 Cubo	Máq. U	0,95	10	40	70C
70C	Op 70 Cubo	Máq. V	0,99	2	2	80C
80C	Op 80 Cubo	Máq. X	0,98	8	15	10EC
10EC	Op 10 Conj.	Máq. M	0,98	22	22	20EC
20EC	Op 20 Conj.	Máq. N	0,95	15	25	30EC
30EC	Op 30 Conj.	Máq. P	0,99	40	35	40EC
40EC	Op 40 Conj.	Máq. Q	1,00	5	15	FIM

Tabela 1: Exemplo de Estrutura de Produto e Processo.

Nota-se que foi acrescentada uma coluna para definir a "próxima operação", que se caracteriza por ser única para cada operação, conforme a Premissa I.

3.3. Partição em Fluxo

Considerando como exemplo a Estrutura de Produto e Processo representada na Figura 9 e apresentada na Tabela 1, tem-se o seguinte conjunto de operações:

$EPP = \{10E, 20E, 30E, 40E, 50E, 60E, 70E, 80E, 90E, 10C, 20C, 30C, 40C, 50C, 60C, 70C, 80C, 10EC, 20EC, 30EC, 40EC\}$

Neste conjunto de operações, a operação 10 do blank do eixo foi denominada 10E para ser diferenciada da operação 10 para fabricação do cubo, denominada 10C. Assim, todas as operações para fabricação do eixo foram acrescidas do sufixo E, todas as operações para fabricação do cubo foram acrescidas do sufixo C e todas as operações para fabricação do conjunto do eixo foram acrescidas do sufixo EC.

Uma Partição da Estrutura de Produto e Processo é um conjunto de subconjuntos da EPP, tais que a União de todos eles seja equivalente ao conjunto EPP e todas as intersecções consideradas duas a duas sejam Φ .

Nem todas as partições podem ser usadas para definir as formações celulares. Considerando as células como unidades de produção intermitente em fluxo, conforme caracterizadas no

Capítulo 1 e determinado na Premissa II, as formações celulares serão definidas a partir de partições especiais, denominadas Partições em Fluxo.

Uma Partição em Fluxo é um tipo específico de partição estabelecida a partir de um subconjunto do conjunto EPP denominado CORTE (este subconjunto CORTE deverá atender a dois requisitos apresentados adiante).

Assim, uma vez estabelecido um CORTE, tem-se uma única Partição em Fluxo associada a este CORTE, onde cada elemento (subconjunto) desta partição deverá conter uma e apenas uma operação (elemento) do subconjunto CORTE e suas respectivas operações anteriores, conforme a Estrutura de Produto e Processo.

conjuntos:

$C1 = \{30E, 90E, 80C, 40EC\}$

$C2 = \{10E, 30E, 70E, 30C, 60C, 20EC, 40EC\}$

$C3 = \{30E, 90E, 50C, 80C\}$

$C4 = \{10E, 20E, 30E, 40E, 50E, 60E, 70E, 80E, 90E, 10C, 20C, 30C, 40C, 50C, 60C, 70C, 80C, 10EC, 20EC, 30EC, 40EC\}$

Estes conjuntos estão representados graficamente nas Figuras 10, 11 e 12 a seguir, como sendo o subconjunto das operações destacadas.

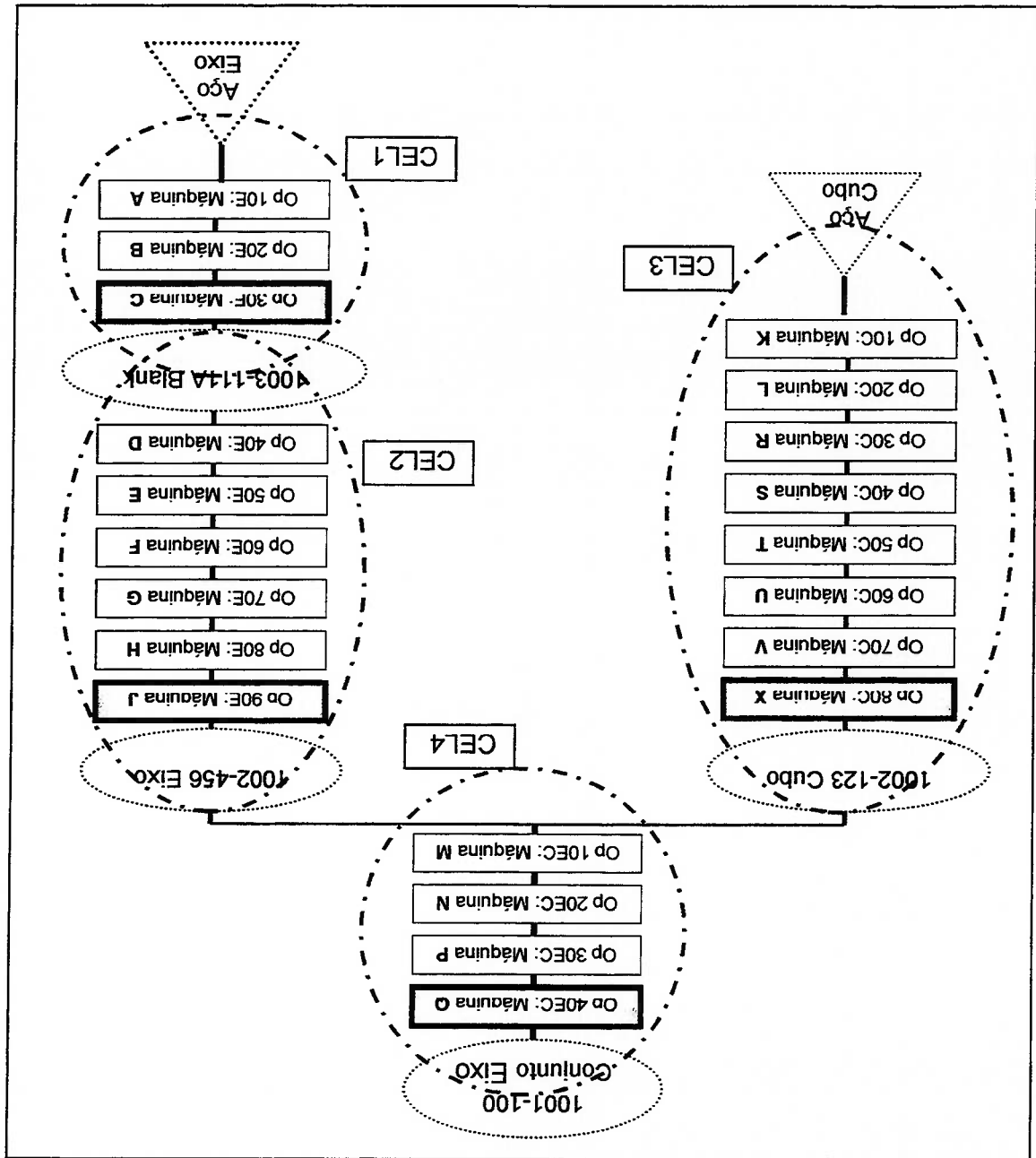


Figura 10: Representação Gráfica da Partição P1.

CEL7 = {40EC, 30EC}

CEL6 = {20EC, 10EC, 80C, 70C, 90E, 80E}

CEL5 = {60C, 50C, 40C}

CEL4 = {30C, 20C, 10C}

CEL3 = {70E, 60E, 50E, 40E}

CEL2 = {30E, 20E}

CEL1 = {10E}

$P2 = \{CEL1, CEL2, CEL3, CEL4, CEL5, CEL6, CEL7\}$, onde:

Partição $P2$:

Já na Figura 11, observa-se como o subconjunto $C2$ estabelece a

uma para o Cubo e, finalmente, uma para o Conjunto-eixo.

têm-se uma célula para o Blank do Eixo, uma para o Eixo usinado,

indústria, onde células são definidas por componentes; assim

uma Partição em Fluxo e representa um caso típico encontrado na

celular viável, onde quatro células podem ser observadas. Esta é

Assim, $P1 = \{CEL1, CEL2, CEL3, CEL4\}$ e define uma formação

CEL4 = {40EC, 30EC, 20EC, 10EC}

CEL3 = {80C, 70C, 60C, 50C, 40C, 30C, 20C, 10C}

CEL2 = {90E, 80E, 70E, 60E, 50E, 40E}

CEL1 = {30E, 20E, 10E}

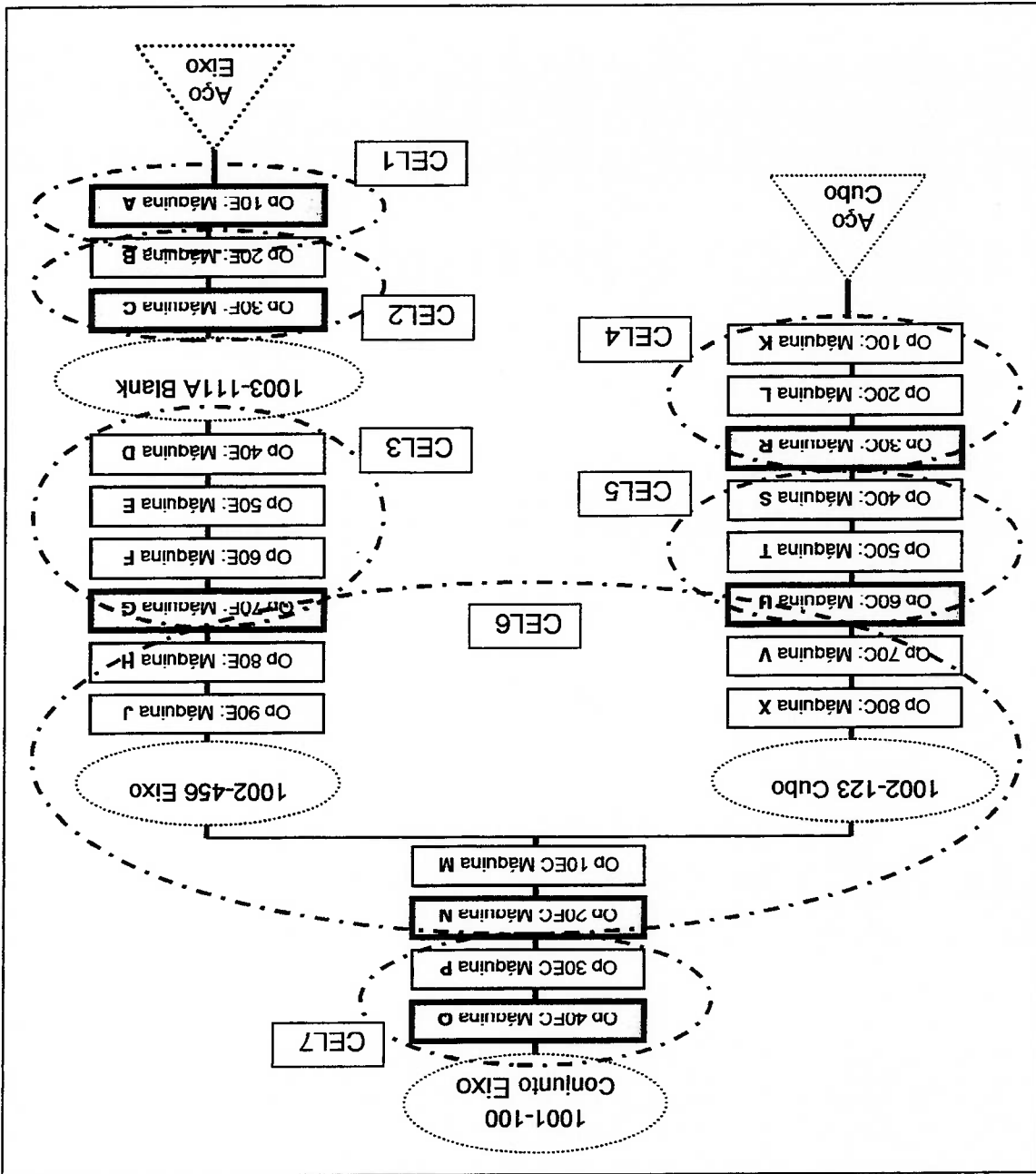
contendo uma operação de $C1$, a saber:

Formação da Partição $P1$, com seus quatro subconjuntos, cada um

Na Figura 10, observa-se como o subconjunto $C1$ estabelece a

Neste caso, o subconjunto CEL6 contém uma operação de montagem - 10EC - e suas duas operações anteriores: 80C e 90E, implicando, na respectiva formação celular, em um sincronismo entre estas duas operações.

Figura 11: Representação Gráfica da Partição P2.



Embora isto seja possível, é uma situação de difícil Tem-se, então, o primeiro requisito básico que um CORTE deve atender:

Requisito 1: Um CORTE válido deverá conter os elementos necessários para que todas as operações de montagem presentes em determinada célula não apresentem mais do que uma operação precedente na mesma célula.

No exemplo considerado, para que um CORTE seja considerado válido para a formação de células, ele deve conter pelo menos uma dentre as duas operações precedentes de 10EC: ou a operação 80C (operação 80 da fabricação do Cubo) ou a operação 90E (operação 90 da fabricação do Fixo).

O outro requisito básico que um CORTE deverá atender será:

Requisito 2: Um CORTE válido deve sempre conter a operação fim.

Uma vez que os subconjuntos das Partições em Fluxo (ou células) são definidos a partir de cada elemento do subconjunto CORTE, que será sempre considerado como o elemento da última operação a ser realizada na sua respectiva célula, este requisito é auto explicativo e, se não for atendido, obtêm-se a situação ilustrada na Figura 12, a seguir, onde uma das células não se define claramente, pois não atende a definição de partição.

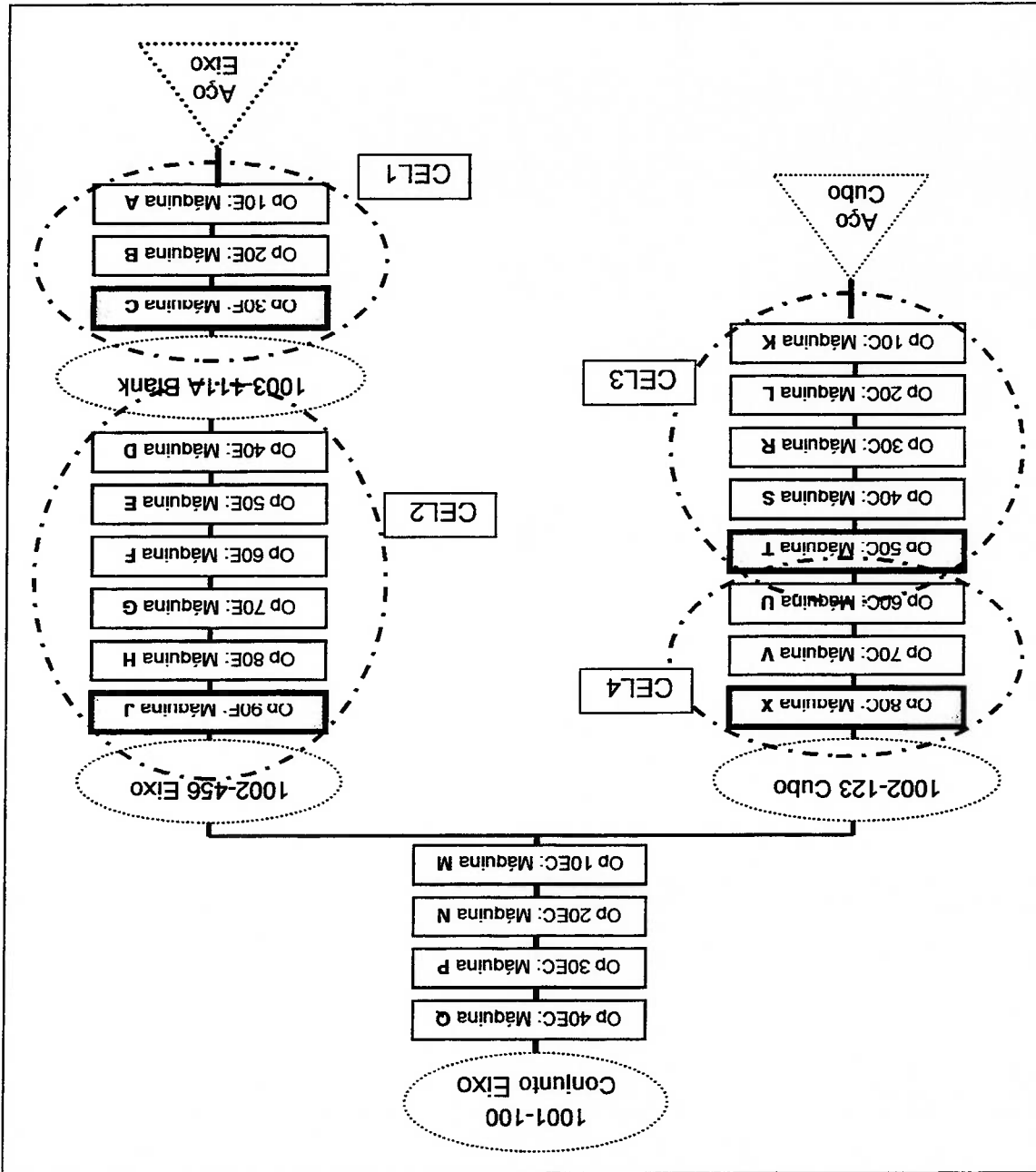
Se $P3 = \{CEL1, CEL2, CEL3, CEL4\}$ e como

$CEL1 \cup CEL2 \cup CEL3 \cup CEL4$ não é equivalente a EPP:

Logo P3 não pode ser considerada uma partição.

A quantidade de células formadas será a mesma que a quantidade de elementos do CORTE que define a Partição em Fluxo. O menor CORTE válido será aquele que contém somente os elementos essenciais que possibilitem que os dois requisitos básicos sejam atingidos. A sua quantidade de elementos será exatamente igual à

Figura 12: Representação Gráfica da Partição P3.



quantidade de operações iniciais que a Estrutura de Produto e Processo tiver. O maior CORTE válido será o conjunto de todos os elementos da Estrutura de Produto e Processo considerada, como a da Figura 13, representando a Partição P4, onde cada máquina consiste em uma célula.

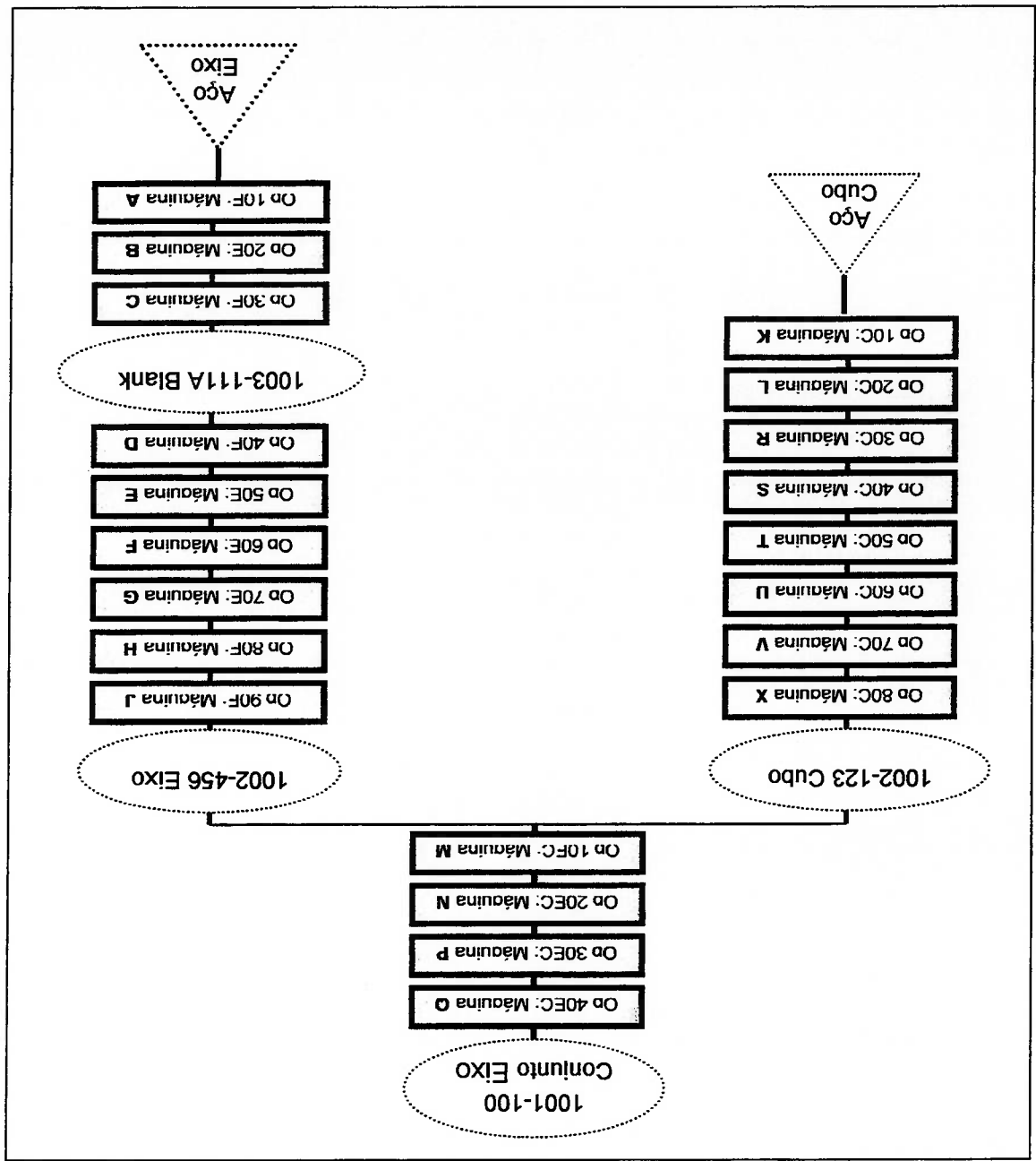


Figura 13: Representação Gráfica da Partição P4.

$P_4 = \{ \{10E\}, \{20E\}, \{30E\}, \{40E\}, \{50E\}, \{60E\}, \{70E\}, \{80E\}, \{90E\}, \{10C\}, \{20C\}, \{30C\}, \{40C\}, \{50C\}, \{60C\}, \{70C\}, \{80C\}, \{10EC\}, \{20EC\}, \{30EC\}, \{40EC\} \}$

Sumarizando:

Define-se **CORTE** como um subconjunto de EFP que contenha todas menos uma entre as operações anteriores de cada operação de montagem contida em EFP (requisito 1) e que contenha a operação fim da EFP (requisito 2).

Define-se **Partição em Fluxo** como uma partição onde cada elemento é um subconjunto que contenha uma e apenas uma operação do subconjunto CORTE correspondente e as operações anteriores sucessivamente.

Assim, um CORTE estabelece uma Partição em Fluxo, que, por sua vez, define uma formação celular, onde cada elemento da partição representa uma célula.

3.4. Formulação do Problema

Após apreciação das alternativas e dos conceitos apresentados no tópico 2.7 da Revisão Bibliográfica, a técnica proposta neste trabalho define uma formulação do problema e da função-objetivo que levam em consideração os aspectos mais relevantes da competitividade industrial, conforme os apresentam CORREA; GIANESI^[51], BARTLETT et al.^[52] e MORTON; PENTICO^[47]. São eles:

- a. **capacidade de produção:** A capacidade de produção, além de compreender os aspectos de processo e equipamentos, é influenciada pelas perdas, incluindo-se a disponibilidade operacional dos equipamentos e o setup. Note-se que dentro deste aspecto podem ser considerados investimentos e amortizações de investimentos, parâmetros amplamente considerados em projetos de formação celular.
- Assim, uma adequada formação celular, minimizando investimentos, deve assegurar capacidade de produção suficiente para atender a demanda e promover confiabilidade de entrega (pontualidade com qualidade):
- b. **material em processo (WIP):** O material em processo, utilizado para nívelamento de produção ou proteção contra perdas, influencia diretamente a velocidade de entrega e a ativação dos recursos, mas implica em custos de inventário (capital de giro) que normalmente têm impacto significativo nos resultados financeiros. Quando combinado com obsolescência ou não-qualidade, as perdas são amplificadas.
- Assim, ao definir-se as células devem ser consideradas as implicações na quantidade de material em processo e a minimização de seus custos deve ser perseguida;
- c. **movimentação de material:** Relaciona-se com movimentação de material todo o custo de manuseio e, embora a otimização do layout procure minimizá-lo, estará sempre

associado aos movimentos intercelulares, outro parâmetro bastante considerado em projetos de formação celular.

Assim, um bom projeto de formação celular obtém um mínimo de movimentos intercelulares (ou de elementos excepcionais);

d. **flexibilidade:** A flexibilidade, definida como a capacidade de mudar muito e rápido, embora ausente das avaliações de formação celular, será sempre um fator altamente relevante de competitividade;

e. **custos e ocupação de mão de obra:** Uma das grandes oportunidades exploradas em formações celulares (que trabalham com fluxo unitário) é a utilização de um único operador para operar mais do que uma máquina. O estabelecimento de uma cadência de produção facilita o uso deste recurso que se consiste em um dos principais elementos da célula e colabora significativamente para redução do custo operacional.

Assim, células bem organizadas possibilitam o melhor aproveitamento da mão de obra, reduzindo os custos operacionais relacionados;

f. **nível de participação do ser humano e sua capacidade de promover melhorias contínuas:** Favorecida nos ambientes industriais com formação celular devido a exigência de multifuncionalidade, a participação do ser humano será sempre fator de competitividade.

Estabelecidos os principais aspectos que devem ser levados em consideração para que a formação celular esteja alinhada com o crescimento da competitividade industrial, a técnica proposta deve desenvolver uma abordagem e utilizar uma função-objetivo que assegurem que estes aspectos sejam respeitados.

Será considerado, ainda, que a formação das células está sendo proposta para uma planta industrial em produção, o que implica em atendimento corrente à demanda. Assim, a capacidade de produção (item a) será considerada como restrição do problema e não como um aspecto a ser resolvido.

O material em processo (item b), o custo de movimentação de material (item c), e o custo da mão de obra (item e) serão os elementos considerados em uma função de custo a ser minimizada.

Finalmente, os aspectos de flexibilidade (item d) e da participação do ser humano (item f), normalmente inerentes ao processo de formação celular e praticamente impossíveis de serem equacionados de forma adequada, não serão considerados na abordagem proposta.

Logo, o problema pode ser formulado da seguinte maneira: Encontrar a partição em Fluxo da Estrutura de Produto e Processo e a alocação de mão-de-obra (compatível com a partição definida), que minimizem o custo total de mão-de-obra e de material em processo, expresso na função-objetivo, sujeitas às seguintes restrições:

a. restrição de demanda e capacidade: a capacidade resultante da alternativa considerada deverá ser maior ou igual à demanda dos componentes, para cada célula formada:

D_S (peças/semana): Demanda semanal do produto.

Para efeito de algoritmo, quando a capacidade da célula não atender à demanda, uma penalidade será aplicada à função-objetivo, conforme será visto no desenvolvimento do algoritmo.

b. cada máquina somente poderá pertencer a uma única célula. E, como a formação de células pela técnica apresentada considera, via de regra, situações onde as células já existem, não será considerada a possibilidade de duplicação de máquinas gargalo.

E para atender ao estabelecido na formulação do problema, opta-se por uma função-objetivo que combine custo de mão-de-obra e custo de material em processo, ou seja, o custo total a ser minimizado será expresso por:

$$CT = CH + CE \quad \text{Eq. 13}$$

Onde:

$$CH \text{ (custo total de mão-de-obra)} = CUH * NTH \quad \text{Eq. 14}$$

Onde:

CUH (custo unitário da mão-de-obra) (em \$/semana)

$$NTH \text{ (número total de homens)} = \sum_{c=1}^C NH_c * S_c \quad \text{Eq. 15}$$

Onde:

C (número de células de manufatura)

NH_c (número de homens da célula c)

S_c (número de turnos que trabalha a célula c)

Como a definição do conceito de vizinhança é fundamental para a utilização deste tipo de heurística, antes da apresentação do algoritmo, serão abordados os conceitos de vizinhança adotados.

O procedimento de otimização utilizado está baseado em um algoritmo com "Simulated Annealing", classificado como heurística de Busca em Vizinhança Estendida, conforme apresentado no item 2.8 da Revisão Bibliográfica.

3.5.1. Procedimento de otimização adotado

3.5. Técnica de Solução:

IM (taxa do estoque, custo semanal do estoque em % do custo do material, considera custo de capital, de movimentação e armazenagem e de administração).

WIP_m (quantidade do material m)
 CUM (custo unitário do material m) (\$)

Onde:

Eq. 18 CW_m (custo total do material m) = $CUM * WIP_m$

N_m (quantidade de materiais ou inícios)

Onde:

Eq. 17 $CTMP$ (custo total de material) = $\sum_{m=1}^{N_m} CW_m$

Onde:

Eq. 16 CE (custo do estoque por semana) = $CTMP * IM$

3.5.2. Vizinhaça

O algoritmo estabelece dois "simulated annealings", de forma hierarquizada, como detalhado no próximo item, um para a definição da melhor partição em fluxo (ou CORTE) e outro para a definição da melhor alocação de mão de obra para cada uma das células definidas.

A partição em fluxo, como apresentado no item 3.3, pode ser e será definida por um subconjunto do conjunto EPP denominado CORTE. Assim, para o "simulated annealing" de partição, a vizinhança será gerada ou acrescentando-se mais um elemento da EPP no subconjunto CORTE, ou retirando-se um elemento deste subconjunto CORTE. Note-se que no caso de se retirar um elemento de CORTE, deve-se assegurar que ele continue válido, conforme discutido no item 3.3.

Logo, um subconjunto CORTE será vizinho de outro subconjunto CORTE se a diferença entre eles for a presença (ou ausência) de apenas um elemento.

Estabelecida uma partição em fluxo, as células ficam automaticamente estabelecidas. Como para se definir o custo de mão de obra (um dos fatores da função-objetivo) é necessário se definir a quantidade de homens e de turnos em cada célula, é preciso aplicar-se um "simulated annealing" de alocação para cada uma das células formadas.

A alocação de uma célula será definida através de um vetor $H(op)$, que estabelece para cada operação op uma letra que designa qual é o operador responsável por executar aquela operação.

Assim, a alocação de mão de obra de cada célula, o outro parâmetro do problema, será definida por este vetor $H(op)$, cuja quantidade de letras diferentes define a quantidade de mão de obra por turno.

Logo, como para o "simulated annealing" de alocação a vizinhança deve ser gerada ou acrescentando-se um homem na célula (atribuindo-se uma operação sorteadamente qualquer a um novo operador), ou diminuindo-se a atividade de um homem da célula (passando-se uma operação sorteadamente para o homem mais próximo), isto será feito alterando-se o vetor $H(op)$.

Adotando-se o subconjunto de EPP denominado por CEL2 da partição P1 ilustrada na Figura 10:

$$CEL2 = \{90E, 80E, 70E, 60E, 50E, 40E\}$$

Seja o vetor $H = \{C, C, B, A, A\}$. Este vetor define que o homem A será responsável pelas operações 40E e 50E, o homem B será responsável pela operação 60E e o homem C será responsável pelas operações 70E, 80E e 90E.

Para se acrescentar um homem nesta célula, pode-se, por exemplo, sortear a operação 70E e atribuir uma nova letra a sua posição no vetor H, que ficaria: $H1 = \{C, C, D, B, A, A\}$.

- por unidade produzida).
- Passo 3:** Entre com o vetor de custo de matéria prima (em \$
- Passo 2:** Entre com os parâmetros dos "simulated annealing".
- Passo 1:** Entre com os parâmetros do problema.

BLOCO 1: Entrada de Dados

Os passos deste procedimento podem ser vistos a seguir.

sucessivamente.

para definição da melhor alocação de mão-de-obra, e assim
partição em fluxos), aplicam-se diversos "simulated annealings"
annealing". Após cada CORTE estabelecido (e sua respectiva
macros em VBA, integra os dois procedimentos de "simulated
O algoritmo utilizado, desenvolvido em Microsoft Excel, com

3.5.3. O Algoritmo

diferirem entre si em apenas um elemento.

Portanto, um vetor $H(op)$ será vizinho de outro vetor $H(op)$ se

$$H2 = \{C, C, A, A, A\}.$$

para o homem A, também é vizinho do primeiro vetor H:
seguinte vetor, gerado a partir da atribuição da operação 60E
Este novo vetor é vizinho do primeiro, da mesma forma que o

Passo 4: Entre com a Estrutura de Produto e Processo e suas informações complementares, em forma de tabela e definindo-se qual é a próxima operação.

Passo 5: Entre com o vetor das demandas semanais dos produtos.

BLOCO 2 : Estado Inicial Semente

Passo 6: Adota-se como estado inicial para partição, a situação corrente de formação de células de manufatura ou algum outro corte. A partição deverá estar representada por um vetor denominado $CORTEI(op)$, onde op é a operação.

Passo 7: Calcula-se a vetor auxiliar $CELLI(op)$, que define qual é a célula a que cada operação op pertence.

Passo 8: Define-se a alocação de mão-de-obra de cada uma das células do estado inicial, através do "Simulated Annealing" de Alocação.

Passo 9: Calcula-se a função-objetivo.

BLOCO 3 : Simulated Annealing:

Passo 10: Aplica-se o "simulated annealing", de forma hierárquica, sendo que as definições de alocações de mão-de-obra são feitas de forma subordinada à definição de partição.

Para cada "simulated annealing" para alocação, define-se como semente uma situação em que cada operação é realizada por um operador diferente. A alternativa escolhida no "simulated annealing" para cada alocação define o custo tanto desta alocação, como da partição a que pertence.

BLOCO 4 : Apresentação dos Resultados :

Passo 11 : Apresentação da definição da nova formação de células.

Passo 12 : Apresentação das novas alocações de mão-de-obra, otimizadas para cada uma das células formadas.

FIM

Tendo sido propiciada uma visão de conjunto do algoritmo, segue-se o detalhamento de cada passo.

BLOCO 1 : Entrada de Dados

Passo 1 : Entre com os parâmetros do problema:

N_p (tipos de produto),
 N_o (quantidade de operações),
 N_m (tipos de matéria prima),
 t_s (tempo disponível em minutos por turno, considerando permissões, paradas previstas e eficiência de produção),
 CUH (custo de mão-de-obra em \$ por operador por semana, com encargos e benefícios),

IM (taxa do estoque, conforme já definida).

Passo 2: Entre com os parâmetros dos "simulated annealing":

TA₀ (temperatura para alocações inicial)

TP₀ (temperatura para partições inicial)

TA(f) (função de resfriamento para alocações)

TP(f) (função de resfriamento para partições)

TA_f (temperatura para alocações final)

TP_f (temperatura para partições final)

NA (número de iterações para alocações)

NP (número de iterações para partições)

Passo 3: Entre com o vetor de custo de matéria prima (em

\$ por unidade final produzida).

Passo 4: Entre com a Estrutura de Produto e Processo e

suas informações complementares, em forma de tabela e definindo-se qual é a próxima operação.

Tem-se a matriz de incidência $A_{op,p}$, onde:

$A_{op,p} = 1$, se o produto p passa por aquela

operação op,

$A_{op,p} = 0$, caso contrário.

Passo 5: Entre com o vetor das demandas semanais dos

produtos:

$p(d)$, onde p designa o produto.

BLOCO 2 : Estado Inicial Semente

Passo 6 : Adota-se como estado inicial para partição a situação corrente de formação de células de manufatura ou algum outro corte. A partição deverá estar representada por um vetor denominado $CORTEI(op)$, onde op é a operação e:

$CORTEI(op)=1$, se op pertence à Partição e $CORTEI(op)=0$, no caso contrário.

O índice i , adotado em vários parâmetros e vetores, simboliza a alternativa corrente.

A nova alternativa, que será posteriormente comparada com a alternativa corrente, será indicada pelo índice j . Sempre que a alternativa j , uma vez avaliada, for adotada, seus parâmetros substituirão os parâmetros com o índice i .

Passo 7 : Calcula-se o vetor auxiliar $CELI(op)$, que define qual é a célula a que cada operação op pertence:

$$X = 1$$

Para "todas as operações da célula", faça:

$$CELI(op) = X$$

Se $CORTEI(op) = 1$, então $X = X + 1$

Próxima operação

$C = X - 1$ (com isto define-se o número de células C)

Consideram-se "todas as operações da célula", como sendo $op = 1$ até N_o .

Passo 8 : Define-se a alocação de mão-de-obra de cada uma das células do estado inicial, através do

Simulated Annealing de Alocação:

Passo A1 : Estado inicial de alocação na célula (um homem em cada operação):

A alocação em cada célula será definida pela matriz $H_i(op, produto)$, obtida da seguinte forma:

$$z = 0$$

Para "todas as operações em toda a matriz de incidência", faça:

Se $a(op, prod) = 1$, então:

$$z = z + 1$$

$$H_i(op, produto) = z$$

Próxima operação

Passo A2 : Função-objetivo do estado inicial:

Calcula-se a capacidade da célula em função do número de turnos (o número de turnos é designado por S), ou seja, fazendo-se $s = 1$, $s = 2$ e $s = 3$.

Toma-se:

Si = menor {S tal que $Cap(S)$ "atende"}.
O cálculo de $Cap(S)$ está no item 3.5.4.

$Z_i = z * S_i$ (a função-objetivo para o Simulated Annealing de Alocação é o número de homens da célula) (conforme apresentado, o índice i indica a situação corrente)

Passo A3: Simulated Annealing de Alocação:

Para $T = T_0$ até T_f , faça:

Para $n = 0$ até NA , faça:

Se n é par, "diminuem-se os homens"
 Se n é ímpar, "aumentam-se os homens"

Obtém-se H_j (op,prod)

Obtém-se Z_j :

Se "diminuem-se os homens", $Z_j = Z_i - 1$ e
 se "aumentam-se os homens", $Z_j = Z_i + 1$

Calcula-se a capacidade da célula $Capac(S)$ em função de S (número de turnos), conforme definido no item 3.5.4 e:

Se atender, toma-se $S_j = \text{menor } S$

Senão toma-se $S_j = 3$ e penaliza-se Z_j

(ou seja, faz-se $Z_j = Z_j + \frac{10 * Capac}{Capac\ obj}$)

Calcula-se a função-objetivo:

$Z_j = z_j * S_j$

$\delta = Z_j - Z_i$

Se $\delta > 0$, então: $Z_i = Z_j$; $z_i = z_j$

$S_i = S_j$; $H_i = H_j$

senão: se $\text{rand}(0,1) > e^{-\delta/T}$

então: $Z_i = Z_j$; $z_i = z_j$

$S_i = S_j$; $H_i = H_j$

! Testa-se o critério de parada:

Calcula-se Z_{\min} (número mínimo de homens), considerando apenas as operações da célula, da seguinte forma:

$$TTCO = \sum_{No}^{No} \sum_{d=1}^{d=do} a^{d,do} * TCO(do) * d(d),$$

onde TTCO é a somatória de todos os tempos de ciclo de operação multiplicados por suas respectivas demandas semanais.

$$Tdisp = ts * 60 * 5,$$

ou seja, o tempo disponível em segundos por semana é o tempo disponível em minutos por dia multiplicado por 60 s por minuto e por 5 dias por semana.

$$Z_{\min} = \text{int} \left(\frac{TTCO}{Tdisp} \right) + 1$$

Se $Z_i = Z_{\min}$, pare

Próximo n

Próximo T

Passo 9: Tendo sido determinado o número de homens de

cada célula, calcula-se a função-objetivo para a partição do estado inicial, conforme definida no tópico 3.4:

$CTI = CTO$ (custo do estado inicial)

BLOCO 3 : Simulated Annealing de Partição (ou CORTE) :

Passo 10 : Aplica-se o "simulated annealing" de Partição ou CORTE, sendo que as alocações de mão-de-obra são redefinidas para cada célula a cada nova situação utilizando-se o "simulated annealing" de Alocação, conforme apresentado no Passo 8 : A1, A2 e A3:

Para $T = TP_0$ até TP_f , faça:

Para $n = 0$ até NP , faça:

i Geração de vizinhança

$k = \text{rand}(0,1)$

Se $k > \frac{1}{2}$, então "CORTE com novo elemento"

senão "retira-se elemento de CORTE"

Detalhes sobre geração de vizinhança para o "simulated annealing" de partição foram apresentados com mais detalhes no item 3.5.2.

Com isto definem-se os novos vetores:

CORTEj (op) (conforme Passo 6) e

CELj (op) (conforme Passo 7).

Dimensionam-se as novas células, com o "Simulated de Alocação" (conforme Passo 8 : A1, A2 e A3), obtendo-se o número de homens de cada uma das células desta nova situação j.

Esta conhecido, também, o número de células Cj. Calcula-se a função-objetivo **CTj** (idem Passo 9, ou seja, aplicando-se a definição do item 3.4).

$g = CTj - CTj$

FIM

Para isto, utilizam-se os vetores H(op).

otimizadas para cada uma das células formadas:

Passo 12: Apresentação das novas alocações de mão-de-obra,

célula e os custos desta nova formação.

Apresentam-se, também, o número de turnos de cada

CELLI(op), que definem a nova partição.

São apresentados os novos vetores CORTEI(op) e

células:

Passo 11: Apresentação da definição da nova formação de

BLOCO 4: Apresentação dos Resultados:

Próximo I

Próximo n

as 15 últimas iterações, pare.

Se não houver melhoria na função-objetivo entre

! Testa-se o critério de parada para partição:

CELLI = CELLJ

CORTEI = CORTEJ

CTI=CTJ; CI = CJ

senão: se rand(0,1) < $e^{-\delta/T}$, então:

CELLI = CELLJ

CORTEI = CORTEJ

se $\delta > 0$, então: CTI = CTJ; CI = CJ

3.6.3. Cálculos de Capacidade

For ser considerada uma restrição do problema, a capacidade de produção não está presente na função-objetivo (conforme definido no tópico 3.4). Com isto, respeita-se o atendimento à demanda e o cliente qualquer que seja a solução adotada.

Esta restrição, conforme observada no Passo 9 - A3, está assegurada pela seguinte etapa do algoritmo:

Calcula-se a capacidade da célula (Capac) em função do número de turnos e:

Se atender, toma-se $S_j = \text{menor } S$
 Senão toma-se $S_j = 3$ e penaliza-se h_j
 (ou seja, faz-se $h_j = h_j + 10 \cdot \text{Capac}$)
 Capac obj

Este cálculo é feito da seguinte forma:

A expressão "se atender" significa:

$\text{Capac}(S) > \text{Capac } obj$, onde:

$$\text{Capac } obj = \sum_{p=1}^N d(p)$$

E $\text{Capac}(S)$ é calculada em função do número de turnos da seguinte forma:

$$\text{Eq. 20} \quad \text{Capac}(S) = \frac{\max(TC)}{\prod_{No}^{op\text{célula}} DOE(op) \times S \times Tdisp}$$

$$\text{Eq. 21} \quad \max(TC) = \max(\text{máximo}(Tmáquina; \text{Operadores})), \text{ onde:}$$

$$\text{Eq. 22} \quad Tmáquina = \max_{op\text{célula}}(TCM(op))$$

Operadores = máximo $\sum_{h \in célula}^{op \in célula} (TCO(op) \times y)$, onde: Eq. 23

$y = 1$, se CEL(h) = c (c é a célula em questão)
 senão $y = 0$

Testa-se Capac(S) para $S = 1$, $S = 2$ e $S = 3$

Através do estudo de caso apresentado no próximo capítulo, poderá ser obtida uma melhor compreensão do algoritmo proposto.

IM (taxa do estoque) = 0,6% / semana

CUH (custo de mão-de-obra) = \$ 200 / operador . semana

ts (tempo disponível) = 480 minutos por turno

Nm (tipos de matéria prima) = 2

No (quantidade de operações) = 25

Np (tipos de produto) = 3 (7167-175, 7180-134A e 7185-070B)

Os parâmetros do problema (passo 1 do algoritmo):

formado por um eixo e um cubo.

para eixos de acionamento e uma quarta célula para o subconjunto uma célula para cubos, uma célula para blanks de eixos, outra Produto e Processo da Tabela 1, onde, na situação original havia Trata-se de um caso similar ao apresentado na Estrutura de

constante não revelada.

valores de tempo, demanda e custos foram multiplicados por uma descrição das operações e das máquinas foram suprimidas e os sua aplicação. Entretanto, por questões de confidencialidade, a setor de autopeças e os resultados teóricos foram confirmados na O caso apresentado a seguir foi desenvolvido em uma empresa do

4.1. Apresentação do Caso: Eixos de Acionamento

4 . ESTUDO DE CASO

Es custos de matéria prima (passo 3) :

Op.	Matéria Prima m	Custo (\$)
10C	Cubo	20
10E	Fixo	15

Tabela 2 : Custos de Matéria Prima

A tabela da estrutura de produto e processo, com suas informações complementares (passo 4) e o vetor de demandas semanais (passo 5) podem ser vistos, juntos, na Tabela 3, a seguir:

Op.	Chave	Dados				Detalhes			
		Opção	Máquina	Descrição	DOE	TCOp	TCMq	Próx op	
10C	Tornear	TM18	Wicklman GSP	96,0%	10	62	20C	1	
20C	Preparar e receber de TT	BT100	Bancada	100,0%	10	40C	1	1	
40C	Pressar	PR11	Pressa Gutman	99,0%	10	50C	1	1	
50C	Rebarbar	TS14	Rotofinish ST 5	99,0%	3	60C	1	1	
60C	Preparar e receber de TT	BT101	Bancada	100,0%	10	80C	1	1	
80C	Retificar interno	RC61	Voumard	95,0%	10	90C	1	1	
90C	Ólear	EL117	Tanque de óleo	100,0%	4	10EC	1	1	
10E	Tornear	TM17	Wicklman GSP	96,0%	10	70	20E	1	
20E	Centrar	TO21	Duap center	98,0%	30	30E	1	1	
30E	Tornear	TR08	Hebert	98,0%	50	65	40E	1	
40E	Pressar engrenagem	EG05/08	Maxicut	96,0%	26	45	50E	1	
50E	Pressar engrenagem	EG09	Maxicut	96,0%	30	30	60E	1	
60E	Pressar chaveta	FR36	Voughan	99,0%	37	33	70E	1	
70E	Rebarbar engrenagem	BT113	Bancada	100,0%	38	38	80E	1	
80E	Lavar	EL112	Máquina de lavar	98,0%	8	8	90E	1	
90E	Laminar rosca	RO12	Duap Threader	96,0%	10	10	100E	1	
100E	Retificar externo	RC64	Jones & Shipman	96,0%	25	25	110E	1	
110E	Preparar e receber de TT	BT114	Bancada	100,0%	10	10	170E	1	
170E	Retificar em acabamento	RC63	Tshudin Grinder	96,0%	25	30	180E	1	
180E	Lavar e ólear	EL113	Máquina de lavar	98,0%	5	5	10EC	1	
10EC	Pressar cubo	PH13	Pressa hidráulica	99,0%	4	1	20EC	1	
20EC	Retificar	RC55	Retífica Shaudt	94,0%	42	37	30EC	1	
30EC	Retificar slots	RC65	Retífica Fortuna	92,0%	16	25	40EC	1	
40EC	Retificar	RP07	Jones & Shipman	96,0%	20	35	50EC	1	
50EC	Lavar	EL28	Máquina de lavar	98,0%	5	15	Fim	1	

Tabela 3 : Estrutura de Produto e Processo - Entrada de Dados

Nota-se que a matriz $A_{op,p}$ contém apenas as colunas dos produtos que estão no nível mais alto da estrutura, mas todas as operações da estrutura.

4.2. Análise da Situação Inicial

Com os dados do problema, pode ser definida a situação inicial (apresentada na Tabela 4, abaixo), que será utilizada tanto para se estabelecer uma referência, como para ser utilizada como semente no algoritmo.

Op.	Máquina	Descrição	Dados										Turnos
			Dados					Dados					
			DOE	TCop	TCMg	Próx op	H(op)	H(op)	H(op)	CEL	Turnos		
10C	Tornear	TM18	Máquina GSP	96,0%	10	62	20C	B1	B1	B1	B1	1	2
20C	Preparar/receber de TT	BT100	Bancada	100,0%	10	10	40C	B1	B1	B1	B1	1	2
40C	Preparar	PR11	Pressa Gutman	99,0%	10	10	50C	B1	B1	B1	B1	1	2
50C	Rebarbar	TS14	Rotofinish ST 5	99,0%	3	28	60C	B1	B1	B1	B1	1	2
60C	Preparar/receber de TT	BT101	Bancada	100,0%	10	10	80C	G1	G1	G1	G1	1	2
80C	Retificar interno	RC61	Voumard	95,0%	10	61	90C	G1	G1	G1	G1	1	2
90C	Olear	EL117	Tanque de óleo	100,0%	4	4	10EC	G1	G1	G1	G1	1	2
10E	Tornear	TM17	Máquina GSP	96,0%	10	70	20E	C2	C2	C2	C2	2	2
20E	Centrar	TO21	Dnap center	98,0%	30	30	30E	B2	B2	B2	B2	2	2
30E	Tornear	TR08	Hebert	98,0%	50	65	40E	B2	B2	B2	B2	2	2
40E	Fresar engrenagem	FG05/08	Máxicut	96,0%	26	45	50E	E3	E3	E3	E3	3	2
50E	Fresar engrenagem	FG09	Máxicut	96,0%	30	30	60E	E3	E3	E3	E3	3	2
60E	Fresar chaveta	FR36	Voughan	99,0%	37	33	70E	B3	B3	B3	B3	3	2
70E	Rebarbar engrenagem	BT113	Bancada	100,0%	38	38	80E	C3	C3	C3	C3	3	2
80E	Lavar	EL112	Máquina de lavar	98,0%	8	8	90E	C3	C3	C3	C3	3	2
90E	Laminar rosca	RO12	Dudp Threader	96,0%	10	10	100E	C3	C3	C3	C3	3	2
100E	Retificar externo	RC64	Jones & Shipman	96,0%	25	25	110E	A3	A3	A3	A3	3	2
110E	Preparar/receber de TT	BT114	Bancada	100,0%	10	10	170E	A3	A3	A3	A3	3	2
170E	Retificar em acabamento	RC63	Tshudin Grinder	96,0%	25	30	180E	A3	A3	A3	A3	3	2
180E	Lavar e olear	EL113	Máquina de lavar	98,0%	5	5	10EC	A3	A3	A3	A3	1	2
10EC	Preparar cubo	PH13	Pressa hidráulica	99,0%	4	1	20EC	A4	A4	A4	A4	4	1
20EC	Retificar	RC55	Retífica Shaudt	94,0%	42	37	30EC	A4	A4	A4	A4	4	1
30EC	Retificar slots	RC65	Retífica Fortuna	92,0%	16	25	40EC	D4	D4	D4	D4	4	1
40EC	Retificar	RP07	Jones & Shipman	96,0%	20	35	50EC	D4	D4	D4	D4	4	1
50EC	Lavar	EL28	Máquina de lavar	98,0%	5	15	fim	B4	B4	B4	B4	1	1

Tabela 4 : Estudo de Caso - Situação Inicial (semente)

Os parâmetros dos "simulated annealing", tanto para partição (ou corte), como para a alocação de mão-de-obra, devem ser definidos de modo a garantir a convergência do algoritmo após uma busca em vizinhança suficientemente estendida, evitando-se a permanência em um ótimo local, em detrimento do ótimo global. Os principais parâmetros que definem esta busca são:

4.3. Definição dos Parâmetros

Tabela 5: Custos referentes à Situação Inicial (semente)

Célula	1	2	3	4	Total	Custo
Componente	Cubo	Fixo	Fixo	Conjunto		
Estoque	1120	1120	1120	0		
Valor do estoque	22400	16800	16800	0	56000	336
Número de homens por turno	2	2	4	3		
Número de turnos	2	2	2	1		
Número total de homens	4	4	8	3	19	3800
Custo Total						4136

Nas três últimas colunas da Tabela 4 podem ser observados os valores CORTEI(op), CELI(op) e o número de turnos definido para cada célula. Pode ser observado também o vetor H(op), que define a alocação de mão de obra na situação inicial. Por exemplo, o operador responsável pela operação 10C é o operador B da célula 1, ou seja, o operador B1. Os custos relacionados com esta situação inicial estão sumarizados na Tabela 5, abaixo:

- TP₀ (temperatura para partições inicial)
- TA(f) (função de resfriamento para alocações)
- TP(f) (função de resfriamento para partições)
- TA_f (temperatura para alocações final)
- TP_f (temperatura para partições final)
- NA (número de iterações para alocações)
- NP (número de iterações para partições)

As funções de resfriamento e as temperaturas finais serão definidas por uma constante denominada razão de resfriamento e por uma quantidade de eventos, conforme fórmulas que se seguem:

Eq. 24 $TP(n+1) = RP * TP(n)$, onde RP (razão de resfriamento) < 1

Eq. 25 $TP(n) = RP^n * TP_0$, onde $0 < n < P$ (quantidade de eventos)

Eq. 26 logo, $TP_f = TP(P) = RP^P * TP_0$

E se isto vale para partição, vale também para alocação:

Eq. 27 $TA(n+1) = RA * TA(n)$, onde RA (razão de resfriamento) < 1

Eq. 28 $TA(n) = RA^n * TA_0$, onde $0 < n < A$ (quantidade de eventos)

Eq. 29 logo, $TA_f = TA(A) = RA^A * TA_0$

4.3.1. Análise Inicial

Além dos parâmetros que definem a busca, na análise inicial foram considerados mais dois fatores que podem interferir no desempenho do algoritmo: o nível de DOE e a demanda semanal.

Como esta análise tem por objetivo apenas conhecer a influência destes 10 fatores, para posterior refinamento, está sendo considerado um experimento fatorial fracional com 16 corridas, conforme definido na Tabela 6, a seguir^[53]:

Corrida	TP ₀	TA ₀	RA	RP	A	P	NA	NP	DOE	DS
1	2020	0,962	0,86	0,86	6	6	375	125	75%	2800
2	2020	0,962	0,86	0,93	12	12	1500	500	51%	2800
3	2020	0,962	0,93	0,86	12	12	1500	125	51%	2800
4	2020	0,962	0,93	0,93	12	6	375	500	75%	2800
5	2020	2,885	0,86	0,86	12	12	375	500	51%	1400
6	2020	2,885	0,86	0,93	12	6	1500	125	75%	1400
7	2020	2,885	0,93	0,86	6	6	1500	500	75%	1400
8	2020	2,885	0,93	0,93	6	12	375	125	51%	1400
9	6059	0,962	0,86	0,86	12	6	1500	500	51%	1400
10	6059	0,962	0,86	0,93	12	12	375	125	75%	1400
11	6059	0,962	0,93	0,86	6	12	375	500	75%	1400
12	6059	0,962	0,93	0,93	6	6	1500	125	51%	1400
13	6059	2,885	0,86	0,86	6	12	1500	125	75%	2800
14	6059	2,885	0,86	0,93	6	6	375	500	51%	2800
15	6059	2,885	0,93	0,86	12	6	375	125	51%	2800
16	6059	2,885	0,93	0,93	12	12	1500	500	75%	2800

Tabela 6: Planejamento de Experimento para Análise Inicial

Utilizando o algoritmo proposto, com os fatores apresentados acima, obtêm-se duas respostas: o custo final e o tempo de processamento. O custo final será dividido pela demanda semanal, obtendo-se o custo unitário.

Tabela 8 : Análise de Variância para Custo Unitário

Fator	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
TPO	1	15688	15688	15688	0.61	0.460
TAO	1	36195	36195	36195	1.41	0.274
RA	1	15813	15813	15813	0.62	0.458
RP	1	22425	22425	22425	0.87	0.381
NA	1	40905	40905	40905	1.59	0.247
NP	1	20378	20378	20378	0.79	0.402
DOE	1	1278	1278	1278	0.05	0.830
DS	1	17358	17358	17358	0.68	0.438
Erro	7	179611	179611	25659		
Total	15	349650				

As análises de variância se encontram a seguir:

O tempo de processamento foi obtido com um computador com as seguintes características: processador Pentium IV, com 128 MB de RAM, Windows Millennium e Microsoft Office XP.

Tabela 7 : Respostas do Experimento para Análise Inicial

Corrida	Ds	Custo Final	Tempo (s) de processamento	Custo unitário
1	2800	2934	15	1,048
2	2800	2902	525	1,036
3	2800	3002	120	1,072
4	2800	3102	45	1,108
5	1400	1501	440	1,072
6	1400	1450	380	1,036
7	1400	2101	7200	1,501
8	1400	1818	1320	1,299
9	1400	1501	720	1,072
10	1400	1869	2070	1,335
11	1400	1450	4032	1,036
12	1400	1869	1530	1,335
13	2800	3202	4080	1,143
14	2800	4002	2700	1,429
15	2800	3301	490	1,179
16	2800	3202	7200	1,144

Tabela 9: Análise de Variância para Tempo de Processamento (s)

Fator	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
TPO	1	10203233	10203233	10203233	6.44	0.044
TAO	1	13603188	13603188	13603188	8.59	0.026
RA	1	7572128	7572128	7572128	4.78	0.071
NA	1	6171498	6171498	6171498	3.90	0.096
NP	1	2811490	2811490	2811490	1.77	0.231
A	1	7079590	7079590	7079590	4.47	0.079
F	1	10331403	10331403	10331403	6.52	0.043
DOE	1	18440584	18440584	18440584	11.64	0.014
Ds	1	395956	395956	395956	0.25	0.635
Erro	6	9506348	9506348	1584391		
Total	15	86115416				

Nota-se, com os dados da Tabela 8, que não é possível estabelecer, com os dados disponíveis, nenhuma conclusão a respeito da influência dos fatores no resultado de custo unitário. Neste caso, é mais seguro afirmar que os parâmetros do algoritmo não afetam, de forma significativa, a função-objetivo. Entretanto, analisando-se a Tabela 9, nota-se que vários fatores influenciam o tempo de processamento: as temperaturas iniciais, tanto para partição como para alocação, o número de eventos para partição e o DOE. Logo, estes fatores serão analisados com maiores detalhes.

4.3.2. Análise do efeito das temperaturas iniciais

As temperaturas iniciais definem a extensão da busca no início do processamento do algoritmo e devem ser definidas em estreita relação com os valores da função-objetivo, pois $e^{-8/T}$, que estará sempre entre 0 e 1, deve possibilitar a oportunidade da extensão da busca com uma probabilidade adequada.

Tendo como base os dados da experiência 2, foram analisadas as situações que geram $e^{-8/T}$ próximos a 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 e 1/32, com as experiências 17, 18, 19, 20 e 21.

Os resultados, em termos de custo total, custo unitário e tempo de processamento estão apresentados, em forma gráfica, na Figura 14, a seguir.

Corrida	TP ₀	TA ₀	RA	RP	A	P	NA	NP	DOE	DS
17	1876	2,885	0,86	0,93	6	12	1500	500	51%	2800
18	938	1,443	0,86	0,93	6	12	1500	500	51%	2800
19	625	0,962	0,86	0,93	6	12	1500	500	51%	2800
20	469	0,721	0,86	0,93	6	12	1500	500	51%	2800
21	375	0,577	0,86	0,93	6	12	1500	500	51%	2800

Tabela 10: Experimento para Análise das Temperaturas Iniciais

Corrida	DS	Custo Final	Tempo (s) de processamento	Custo unitário
17	2800	3301	410	1,179
18	2800	2902	635	1,037
19	2800	2902	330	1,037
20	2800	3002	35	1,072
21	2800	2902	400	1,037

Tabela 11: Resultado do Experimento para Análise das Temperaturas Iniciais

Tabela 12: Resultado do Experimento para Análise do efeito do número de eventos para partição (P)

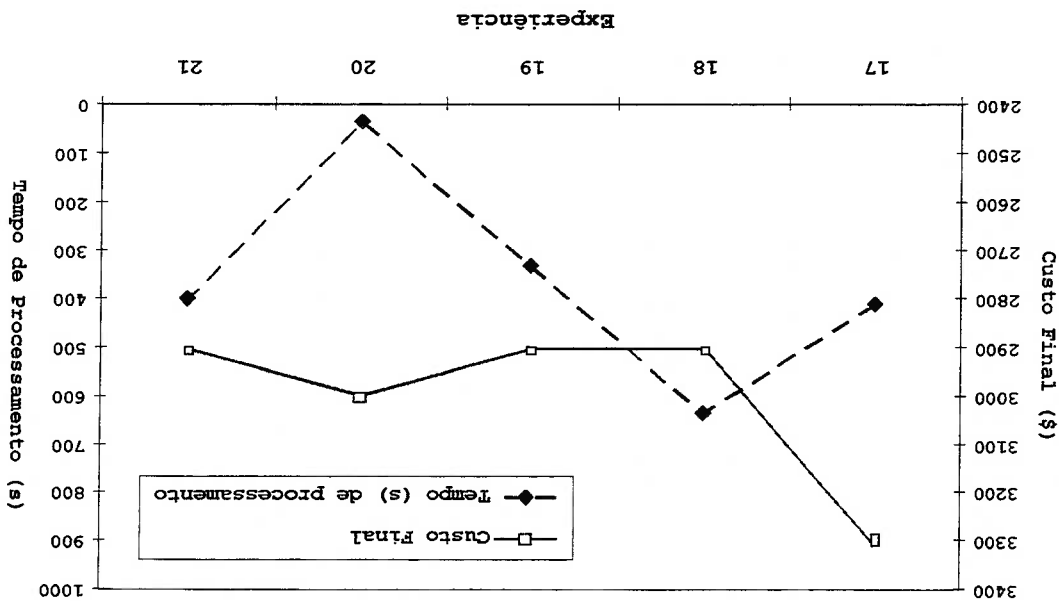
Corrida	P	Custo Final	Tempo (s) de processamento	Custo unitário
22	4	2902	330	241,867
23	8	2902	330	241,867
19	12	2902	330	241,867
24	16	2902	330	241,867
25	20	2902	330	241,867

resultados das experiências 22, 23, 19, 24 e 25. Com os mesmos dados da experiência 19, exceto P que assume os valores 4, 8, 12, 16 e 20, forma-se a Tabela 12, com os resultados das experiências 22, 23, 19, 24 e 25.

4.3.3. Análise do efeito do número de eventos para partição (P)

Nota-se que os parâmetros para Temperaturas Iniciais mais adequados para o caso apresentado correspondem ao da experiência 19, que significa $e^{-8/T}$ entre 1/4 e 1/8 da diferença entre o valor inicial do custo e o valor final.

Figura 14: Gráfico do Resultado do Experimento para Análise das Temperaturas Iniciais



Os resultados são iguais porque o algoritmo chega a uma solução antes do término dos eventos, logo a limitação P não interfere neste resultado.

Deve ser usada, portanto, apenas como limitante para o tempo de processamento, evitando que o algoritmo fique processando indefinidamente caso não convirja para uma solução.

4.3.4. Análise do efeito da DOE.

Os dois níveis de DOE (disponibilidade operacional do equipamento) considerados na análise de variância do item 4.2.1 caracterizam as diferentes situações encontradas na prática.

Percebe-se que a maior influência advém deste fator, o que indica como é difícil o estabelecimento de parâmetros gerais para o processamento do algoritmo. Sugere-se, portanto que, para cada caso estudado, sejam escolhidos seus próprios parâmetros.

4.4. A Solução Proposta

A partir da situação inicial, apresentada no item 4.2, uma série de análises foi feita, utilizando-se o algoritmo desenvolvido. O melhor resultado obtido está demonstrado na Tabela 13, a seguir:

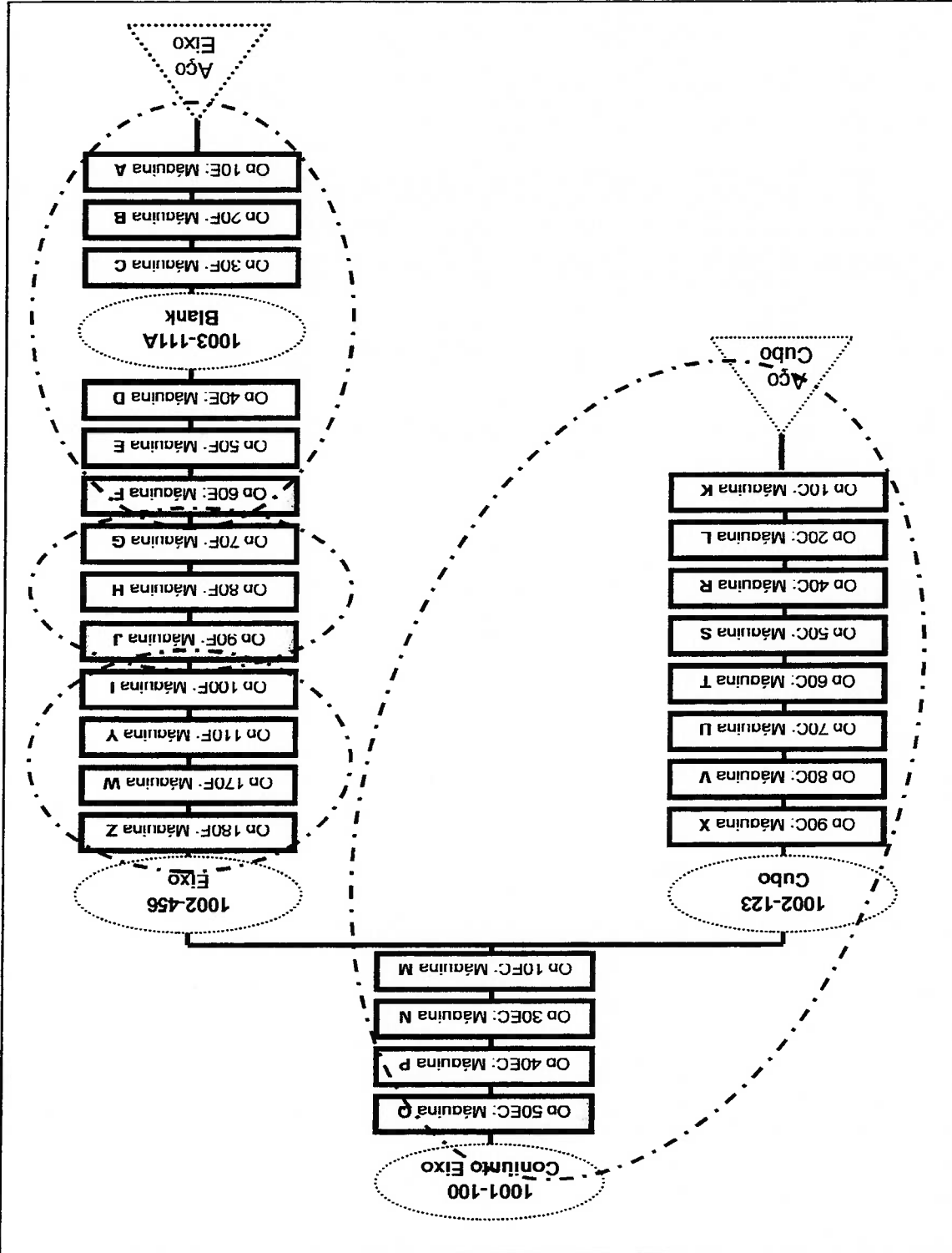
Chave	Dados de operação										Dados				Turnos
	Op. Operação	Máquina	Descrição	DOE	TCOP	TCMq	Próx op	H (op)			Corte final	CEL	Turnos		
								B	A	C					
Dados de operação													350	1800	650
Produto													7167-175	7180-134A	7185-070B
10C	Tornear	TM18	Wickman esp	96,0%	10	62	20C	B1	B1	B1			1	2	
20C	Preparar/receber de TT	BT100	Bancada	100,0%	10	10	40C	B1	B1	B1			1	2	
40C	Preparar	PR11	Prensa guzman	99,0%	10	10	50C	B1	B1	B1			1	2	
50C	Rebarbar	TS14	Rotofinish ST 5	99,0%	3	28	60C	B1	B1	B1			1	2	
60C	Preparar/receber de TT	BT101	Bancada	100,0%	10	10	80C	B1	B1	B1			1	2	
80C	Retificar interno	RC61	Vouward	95,0%	10	61	90C	F1	F1	F1			1	2	
90C	Olear	EL117	Tanque de óleo	100,0%	4	4	10EC	F1	F1	F1			1	2	
10E	Tornear	TM17	Wickman esp	96,0%	10	70	20E	A2	A2	A2			2	2	
20E	Centrar	TO21	Dup center	98,0%	30	30	30E	A2	A2	A2			2	2	
30E	Tornear	TR08	Hebert	98,0%	50	65	40E	C2	C2	C2			2	2	
40E	Preparar engrenagem	FG05/08	Maxicut	96,0%	26	45	50E	C2	C2	C2			2	2	
50E	Preparar engrenagem	FG09	Maxicut	96,0%	30	30	60E	F2	F2	F2			2	2	
60E	Preparar chaveta	FR36	Voughan	99,0%	37	33	70E	F2	F2	F2		1	2	2	
70E	Rebarbar engrenagem	BT113	Bancada	100,0%	38	38	80E	A3	A3	A3			3	1	
80E	Lavar	EL112	Máquina de lavar	98,0%	8	8	90E	B3	B3	B3			3	1	
90E	Laminar rosca	RO12	Dudp Threader	96,0%	10	10	100E	B3	B3	B3		1	3	1	
100E	Retificar externo	RC64	Jones & Shipman	96,0%	25	25	110E	B4					4	1	
110E	Preparar/receber de TT	BT114	Bancada	100,0%	10	10	170E	B4	B4	B4			4	1	
170E	Retificar em acabamento	RC63	Tshudin Grinder	96,0%	25	30	180E	B4	B4	B4			4	1	
180E	Lavar e olear	EL113	Máquina de lavar	98,0%	5	5	10EC	B4	B4	B4		1	4	1	
10EC	Preparar cubo	PH13	Prensa hidráulica	99,0%	4	1	20EC	F1	F1	F1			1	2	
20EC	Retificar	RC55	Retífica shaudt	94,0%	42	37	30EC	F1					1	2	
30EC	Retificar slots	RC65	Retífica Fortuna	92,0%	16	25	40EC	F1	F1	F1			1	2	
40EC	Retificar	RP07	Jones & Shipman	96,0%	20	35	50EC	F1	F1	F1			1	2	
50EC	Lavar	EL28	Máquina de lavar	98,0%	5	15	tim	F1	F1	F1			1	2	

Tabela 13: Situação Proposta para o Caso de Eixos e Cubos

Para facilitar a visualização, esta solução pode ser observada também na Estrutura de Produto e Processo Ilustrada na Figura 15, a seguir.

Os resultados de custo desta configuração celular proposta encontram-se na tabela 14, a seguir:

Figura 15: Representação Gráfica da Partição da Solução Proposta.



Nota-se melhor produtividade, menor material em processo, respeitandose as restrições de demanda e as características expressas através da estrutura de produto e processo. Aplicado na prática, este novo conceito de formação de células de manufatura mostra-se gerador de novas oportunidades, não só referentes àquelas demonstradas neste trabalho, mas também decorrentes de uma nova organização celular, que possibilita um novo incentivo a melhorias contínuas.

Tabela 15: Resultados Obtidos

Aspecto relevante	Situação Redução	Situação Proposta	Situação Inicial	Material em processo (\$)	Custo Total
Melhor ocupação de mão de obra	31,6%	13	19	56000	4136
Menores riscos	10,0%	50400			2902,4
Maiores competitividade	29,8%				

Comparando as Tabelas 5 e 14, verificam-se facilmente os resultados obtidos com a aplicação da técnica desenvolvida:

Tabela 14: Custos Referentes à Situação Proposta

Célula	Componente	Estoque	Valor do estoque	Número de homens por turno	Número de turnos	Número total de homens	Custo Total
1	Cubo/Conjunto	1120	16800	2	2	4	2600
2	Fixo	1120	16800	3	2	6	
3	Fixo	1120	16800	2	1	2	
4	Total	16800	50400	13	1	13	2902,4

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões e Contribuições do Trabalho

O estudo de caso apresentado, embora apenas um exemplo da aplicação da técnica proposta, demonstra a utilização do conceito de Estrutura de Produto e Processo como forma de identificação e aproveitamento de novas oportunidades para melhorar a produtividade da mão-de-obra, reduzindo-se o material em processo e assegurando contínuo desenvolvimento da competitividade industrial.

A utilização de "simulated annealing", mesmo não sendo a única opção para a aplicação do conceito apresentado (diversas outras técnicas de otimização podem ser utilizadas), apresentou-se como uma heurística bastante satisfatória.

Embora a definição dos parâmetros não seja um aspecto pronto na técnica apresentada, devendo ser abordada particularmente a cada caso estudado, a solução encontrada é normalmente robusta e o algoritmo desenvolvido facilita este trabalho.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Muitos outros trabalhos podem ser realizados a partir da utilização do algoritmo apresentado. A situação das empresas é dinâmica, não só em relação aos métodos e processos de fabricação, que estão em constante evolução, como em relação aos volumes de produção necessários para atender a uma demanda futura variável. Além disso, trabalhos contínuos são realizados para se melhorar a disponibilidade operacional dos equipamentos.

Assim, simulações podem ser feitas, apenas variando-se os parâmetros de processo, de demanda ou a DOF. Simulações que podem ajudar tanto no planejamento estratégico (por exemplo, para aquisição de novos equipamentos), como na organização industrial do dia a dia.

Estudos de sensibilidade a variações destes parâmetros podem ajudar a verificar o impacto de programas de manutenção ou aquisição de novos equipamentos.

Finalmente, espera-se que a quebra de um paradigma possibilite abrirem-se novas portas para o desenvolvimento industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AKRIGHT, William T.; KROLL, Dennis E., "Cell formation performance measures: determining when to change an existing layout"; Computers and Industrial Engineering, vol. 34, n. 1, pg 159 - 171; Jan/1998.
- [2] KHAN, M. K.; GWEI, S. H., "Plant layout improvements to a medium volume manufacturing system using systematic techniques to form just-in-time manufacturing cells"; Journal of Engineering Manufacture, vol. 211, n. B2, pg 109 - 124; 1997.
- [3] VOSS, C. A.; CLUTTERBUCK, D., "Just-in-time: A global status report"; IFS Publications; 1989.
- [4] CHAN, F. T. S.; MAK, K. L.; LUONG, T. H. S.; MING, X. G., "Machine-component grouping using genetic algorithms"; Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 14-5-6, pg 339 - 346; Out-Dez/1998.
- [5] SHAFFER, S. M.; CHARNES, J. M., "Cellular versus functional layouts under a variety of shop operations conditions"; Decision Sciences, vol. 24, n. 3, pg 665 - 682; 1993.
- [6] FLYNN, Barbara B.; ROBERT JACOBS, F., "A simulation comparison of group technology with traditional job shop manufacturing"; International Journal of Production Research, vol. 24, n. 5, pg 1171 - 1192; 1986.
- [7] AGARWAL, Atul; SARKIS, Joseph, "Review and analysis of comparative performance studies on functional and cellular manufacturing layouts"; Computers and Industrial Engineering, vol. 34, n. 1, pg 77 - 89; Jan/1998.

- [8] SLACK, N. D. C., "Vantagem Competitiva em Manufatura", Editora Atlas, São Paulo, 1993.
- [9] ECKSTEIN, A. L. H.; ROHLFEDER, T. R., "Incorporating human resources in group technology / cellular manufacturing", International Journal of Production Research, vol. 36, n. 5, pg 1199 - 1222; 1998.
- [10] NEW, C. C.; CLARK, G. R., "Just-in-Time Manufacturing", International Handbook of Production and Operation Management, Ed. R. Wild, Cassell Education Ltd., London, pg 402 - 417; 1989.
- [11] ROTHER, Mike; SHOOK, John, "Aprendendo a Enxergar: mapeando o fluxo de valor para agregar valor e eliminar desperdício", Lean Institute Brasil, Março/1999.
- [12] SELIM, H.M.; ASKIN, R.G.; VAKHARIA, A.J., "Cell formation in group technology: Review, evaluation, and direction for future research"; Computers and Industrial Engineering, vol. 34, n. 1, pg 3 - 20; Jan/1998.
- [13] SHUNK, D. L., "Group Technology Provides Organized Approach to Realizing Benefits of CIMS", IE, vol. 17, n. 4, pg 74 - 80; 1985.
- [14] MARION, D., RUBINOVICH, J. e HAM, I., "Developing a Group Technology Coding & Classification Scheme", IE, pg 90 - 97; July/1986.
- [15] GONÇALVES F., E. V., "Aplicações da Tecnologia de Grupo para Maior Produtividade na Fabricação - Tradução de Manual escrito por HAM, I., Professor of Industrial Engineering, The Pennsylvania State University", São Carlos, 1987.

- [16] TEIXEIRA, J. P. e MACHADO, V.C., "Novos Modelos de Classificação na Tecnologia de Grupo", Secção Autónoma de Engenharia Mecânica - Faculdade de Ciências e Tecnologia - Portugal, 1988.
- [17] KUSIAK, A. e CHUNG, Y., "GT/ART: Using Neural Networks to Form Machine Cells", Manufacturing Review, vol. 4, n. 4, pg 293 - 301; 1991.
- [18] KUSIAK, A., "Branching Algorithms for Solving the Group Technology Problems", Journal of Manufacturing Systems, vol. 10, n. 4, pg 332 - 343; 1991.
- [19] BURBIDGE, J. L., "The First Step in Planning Group Technology", International Journal of Production Economics, n. 43, pg 261 - 266; 1996.
- [20] SINGH, N., "Design of cellular manufacturing systems - an invited review", European Journal of Operation Research, vol. 69, pg 284 - 291; 1993.
- [21] PERRIGO, T.A.; PETERSEN, H.C.; HAHN, W.F., "Perrego algorithm: a flexible machine-grouping algorithm based on group technology techniques", International Journal of Production Research, vol. 33, n. 6, pg 1706 - 1721; 1995.
- [22] AJMAL, A.; ZHANG, S. G., "Application of a knowledge-based clustering algorithm as an aid to probe selection and inspection process planning", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture, vol. 212, n. B4, pg 299 - 305; 1998.
- [23] KUSIAK, Andrew, "An expert system for group technology", Institute of Industrial Engineering Journal, vol. 19, n. 10, pg 56 - 61, 1987.

- [24] LEVASSEUR, G. A., "An Applications-oriented Procedure for Cell Formation", Production and Inventory Management Journal, First Quarter, pg 7 - 11; 1996.
- [25] KING, J. R., "Machine-component grouping in production flow analysis: an approach using a rank order clustering algorithm", International Journal of Production Research, vol. 18, n. 2, pg 213 - 232; 1980.
- [26] CHANDRASEKHARAN, M. P.; RAJAGOPALAN, R., "GROUPABILITY: an analysis of the properties of binary data for Group Technology", International Journal of Production Research, vol. 27, pg 1035 - 1052; 1989.
- [27] KUSIAK, A.; CHOW, W., "Efficient Solving of the Group Technology Problem", Journal of Manufacturing Systems, vol. 6, n. 2, pg 117 - 124; 1987.
- [28] RIBEIRO, J. F. F.; PRADIN, B., "A Methodology for Cellular Manufacturing Design", International Journal of Production Research, vol. 31, n. 1, pg 235 - 250; 1993.
- [29] KUSIAK, A.; CHO, M., "Similarity Coefficient Algorithms for Solving the Group Technology Problem", International Journal of Production Research, vol. 30, n. 11, pg 2633 - 2646; 1992.
- [30] ONWUBOLU, Godfrey C.; MLILO, Prosper T., "Manufacturing cell grouping using similarity coefficient-distance measure", Production Planning and Control, vol. 9, n. 5, pg 489 - 493; 1998.
- [31] KUSIAK, Andrew; "The generalized group technology concept", International Journal of Production Research, vol. 25, n. 4, pg 561 - 569; 1987.

- [32] GUNASINGH, K. R.; LASHKARI, R. S., "Machine Grouping Problem in Cellular Manufacturing Systems - an Integer Programming Approach", International Journal of Production Research, vol. 27, n. 9, pg 1465 - 1473; 1989.
- [33] RATH, S. K.; DAS, C.; SAHU, S., "Graph colouring approach for cell formation problems", Production, Planning and Control, vol. 6, n. 5, pg 421 - 428; 1995.
- [34] LEE, H.; GARCIA-DIAZ, A., "A Network Flow Approach to Solve Clustering Problems in Group Technology", International Journal of Production Research, vol. 31, n. 3, pg 603 - 612; 1993.
- [35] CHUNG, Y.; KUSIAK, A., "Grouping Parts with Neural Network", Journal of Manufacturing Systems, vol. 13, n. 4, pg 262 - 275; 1994.
- [36] SURESH, N. C.; KAPARTHI, S., "Performance of Fuzzy ART Neural Network for Group Technology Cell Formation", International Journal of Production Research, vol. 32, n. 7, pg 1693 - 1713; 1994.
- [37] LEE, Choon-woo; CHEN, Jacob Jen-gwo, "Fuzzy-set-based machine cell formation in cellular manufacturing", Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 7, pg 355 - 364; 1996.
- [38] ARVINDH, B.; IRANI, S. A., "Cell Formation: The Need for an Integrated Solution of the Subproblems", International Journal of Production Research, vol. 32, n. 5, pg 1197 - 1218; 1994.

- [39] REE, P.; HWANG, H., "Two-stage Procedure for the Cell Formation Problem with Alternative Part Processing Routes", Engineering Optimization, vol. 26, pg 159 - 170; 1996.
- [40] AL-SULTAN, K. S.; FEDJKI, C. A., "A genetic algorithm for the part family formation problem", Production, Planning and Control, vol. 8, n. 8, pg 788 - 796; 1997.
- [41] KULKARNI, Uday R.; KANG, Melody Y., "Dynamic grouping of parts in flexible manufacturing systems - A self-organizing neural network approach", European Journal of Operational Research, n. 84, pg 192 - 212; 1995.
- [42] AKTURK, M. S.; BALKOSE, H. O., "Part-machine grouping using a multi-objective cluster analysis", International Journal of Production Research, vol. 34, n. 8, pg 299 - 2315; 1996.
- [43] FLYNN, B.B., "The effects of set-up time on output capacity in cellular manufacturing", International Journal of Production Research, v. 24(12), p 1761 - 1722; 1987.
- [44] SANTORO, M.; Notas de aula.
- [45] HSU, Chih-Ming; SU, Chao-Ton; "Multi-objective machine-grouping in cellular manufacturing: a genetic algorithm"; Production, Planning and Control, vol. 9, n. 2, pg 155 - 166; 1998.
- [46] BOE, Warren J.; CHENG, Chun Hung; "A close neighbour algorithm for designing cellular manufacturing systems", International Journal of Production Research, vol. 29, n. 10, pg 2097 - 2116; 1991.

- [47] MORTON, T.E.; FENTICO, D.W., "Heuristic Scheduling Systems: with applications to production systems and project management", Wiley Series in Engineering & Technology Management, 1993.
- [48] VAN LAARTHOVEN, P. J. M.; AARTS, E. H. T., "Simulated Annealing: Theory and applications", The Netherlands, Reidel, Dordrecht, 1987.
- [49] UMBLE, M.M.; SRIKANTH, M.L., "Synchronous Management: profit-based manufacturing for the 21st century", The Spectrum Publishing Company, vol 2: 1997.
- [50] SRIKANTH, Mokshahgundam L.; ROBERTSON, Scott A., "Measurements for effective decision making - A Guide for manufacturing companies", The Spectrum Publishing Company, Guilford, Connecticut, USA, pg 78; 1995.
- [51] CORREA, H.L.; GIANESI, I.G.N.; "Just-in-time, MRP II e OPT: Um enfoque estratégico", Editora Atlas, 2a. Edição, São Paulo, 1996.
- [52] BARLETT, H.; BAKEVANOGLOU, A.; KOCHHAR, A. K., "The application of systematic techniques to the re-layout of low-volume manufacturing system", Part B: Journal of Engineering Manufacture - Proc. Instn Engrs - vol. 208 - pg 89 - 102; IMechE 1994.
- [53] MASON, R. L.; GUNST, R. F.; HESS, J. L. "Statistical Design and Analysis of Experiments", John Wiley and Sons; 1989.

APÊNDICE

DETALHES DA APLICAÇÃO DO ALGORITMO PROPOSTO

Neste Apêndice estão detalhados, com o apoio de tabelas e algumas explicações complementares, os passos do algoritmo proposto.

A.1. Bloco 1: Entrada de Dados

Os dados são colocados em planilhas de Excel, conforme observado nas Tabelas 16, 17 e 18, a seguir.

Parâmetros do problema e da simulação		
descrição	var.	valor
quantidade de produto (inteiro)	Np	3
quantidade de operações (inteiro)	No	25
quantidade de matérias-primas (inteiro)	Nm	2
tempo disponível por turno (min por turno)	ts	480
custo de mão-de obra (R\$ / operador*semana)	ch	200,00
taxa de estoque (%)	iw	0,6%
número de estados de S.A. para alocação	nA	6
número de estados de S.A. para corte	nC	12
temperatura inicial de S.A. para alocação	TIA	0,962
temperatura inicial de S.A. para corte	TIC	625
razão de restrição para alocação	RA	0,86
razão de restrição para corte	RC	0,93
temperatura final de S.A. para alocação	TFA	0,402
temperatura final de S.A. para corte	TFC	817,1
número de interações para alocação	KA	20
número de interações para corte	KC	20
número de interações para alocação	NA	1500
número de interações para corte	NC	500
eficiência da produção (%)		90%
fator de custo (\$)		10,0%
quantidade de dias de cobertura do estoque (inteiro)		2
critério número máximo de interacao (inteiro)	Z	5

Tabela 16: Planilha *Param*.

A.2. Bloco 2 : Estado Inicial Semente

Os resultados das macros são apresentados na planilha **Saida**, que se altera a medida que o algoritmo processa as informações.

Na primeira etapa do algoritmo, a planilha se apresenta com a semente inicial, onde o estado inicial das alocações define um operador para cada operação (passo 8 - A.1.), conforme pode ser visto na Tabela 19, a seguir:

Op.	Detalhes	Máquina	Descrição	Dados	TCop	TCMq	Prex. op.	Entr.	Celula	Entr.
10C	Tomar	TM18	Wickman 2 1/4" 6SP	96,0%	10	62	20C	1	1	0
20C	Preparar e receber de TT	BT100	Bancada	100,0%	10	40C				1
40C	Preparar	PR11	Pressa gutman	99,0%	10	50C				1
50C	Rebarbar	TS14	Rotomash Oro ST 5	99,0%	3	28				1
60C	Preparar e receber de TT	BT101	Bancada	100,0%	10	80C				1
80C	Rebarbar interno	RC61	Vomard intern. GR	95,0%	10	61	90C	6	6	1
90C	Operar	EL117	Tanque de óleo	100,0%	4	70	10EC	7	7	1
10E	Tomar	TM17	Wickman 1 3/4" 6SP	96,0%	10	70	20E	1	1	0
20E	Centrar	TO21	Duap s/ facing center	98,0%	30	30	30E	2	2	2
30E	Centrar	TR08	Hebert	98,0%	50	65	40E	3	3	1
40E	Preparar engranagem	FG05/08	Marcut Gear Shaper	96,0%	26	45	50E	1	1	3
50E	Preparar engranagem	FG09	Marcut Gear Shaper	96,0%	30	30	60E	2	2	3
60E	Preparar chaveta	FR36	Vonghan Keysester	99,0%	37	33	70E	3	3	1
70E	Rebarbar engranagem	BT113	Bancada	100,0%	38	38	80E	4	4	3
80E	Lavar	EL112	Máquina de lavar	98,0%	8	8	90E	5	5	3
90E	Laminar roscas	RO12	Duap 1 freeder	96,0%	10	10	100E	6	6	3
100E	Rebarbar externo	RC64	Jones & Shipman	96,0%	25	25	110E	7	7	3
110E	Preparar e receber de TT	BT114	Bancada	100,0%	10	10	170E	8	8	3
170E	Rebarbar em acabamento	RC63	Tshudin Gimder	96,0%	25	30	180E	9	9	1
180E	Lavar e olear	EL113	Máquina de lavar	98,0%	5	5	10EC	10	10	3
10EC	Preparar cubo	PH13	Pressa hidráulica	99,0%	4	1	20EC	1	1	2
20EC	Rebarbar	RC55	Reifca Shaudt	94,0%	42	37	30EC	2	2	1
30EC	Rebarbar alto	RC65	Reifca Fortuna	92,0%	16	25	40EC	3	3	4
40EC	Rebarbar	RP07	Ret. Jones & Shipman	96,0%	20	35	50EC	4	4	1
50EC	Lavar	EL28	Máquina de lavar	98,0%	5	15	mm			4

Tabela 19: Planilha **Saida** na situação inicial de alocações.

Nota-se que, para cada uma das quatro células, foi definido um homem diferente para cada operação.

Será detalhado a seguir, utilizando-se apenas a célula 1 (Tabela 20), que contém 7 operações, logo 7 operadores por turno, como o algoritmo estabelece o "simulated annealing" de alocações.

Capac(1) = 2076 < 2800 = Capac obj, portanto "não atende".

$$Capac(S) = \frac{\max(TC)}{\prod_{op \in célula}^{No} DOE(op) \times S \times Tdisp} = 1 * 144000 * 0,894 / 62$$

Logo, para S = 1, tem-se:

$$Assim, \max(TC) = 62 \text{ s.}$$

$$Operadores = \max_{h \in célula} (\sum_{op \in célula} (TCO(op) \times y)) = 62 \text{ s}$$

$$Máquina = \max_{op \in célula} (TCM(op)) = 62 \text{ s}$$

$$\prod_{No}^{op \in célula} DOE(op) = 0,96 * 1 * 0,99 * 0,99 * 1 * 0,95 * 1 = 0,894 = 89,4\%$$

$$Tdisp = 480 * 60 * 5 = 144000 \text{ s por semana por turno;}$$

Como $Tdisp = ts * 60 * 5$, então:

$$Capac \text{ obj} = 350 + 1800 + 650 = 2800 \text{ (conforme a Eq. 19).}$$

do número de turnos. Assim, faz-se S = 1 e obtêm-se:

O próximo passo (passo A.2.) é o cálculo de capacidade em função

célula 1.

Tabela 20: Detalhe da Planilha **Saida** com a situação inicial da

Chave	Detalhes		Dados							
Op.	Operação	Máquina	Descrição	DOE	TCOp	TCMq	Próx. op.			
10C	Tornear	TM18	Wickman 2 1/4" 6SP	96,0%	10	62	20C	1	1	1
20C	Prepara e receber de TI	BT100	Bancada	100,0%	10	10	40C	2	2	2
40C	Preparar	PR11	Pressa guinam	99,0%	10	10	50C	3	3	3
50C	Rebarbar	TS14	Rotofinish Ocro ST 5	99,0%	3	28	60C	4	4	4
60C	Prepara e receber de TI	BT101	Bancada	100,0%	10	10	80C	5	5	5
80C	Retificar interno	RC61	Vournard intern. GR	95,0%	10	61	90C	6	6	6
90C	Olear	EL117	Tanque de óleo	100,0%	4	4	106C	7	7	7

Dados de operação		Demanda		
7185-0708	7180-134A	7167-175	350	1800
				650

Mas $Capac(2) = 4152$ e $Capac(3) = 6229$, maiores que 2800.

Assim, toma-se o menor S que atende, ou seja $S_i = 2$, e

obtem-se o valor da função-objetivo:

$$Z_i = Z * S_i = 7 * 2 = 14$$

A.3. Simulated Annealing para Alocação

Inicia-se com $H_i(op)$ da Tabela 20, $S_i = 2$, $z_i = 7$ e $Z_i = 14$.

Com os parâmetros definidos, têm-se:

T	n	vizinho	$H_j(op)$	$\max(TC)$	S	Cap(S)	Z_j	δ	$\text{rand}(0,1) e^{-\delta/T}$	opção
0,96	0	menor	1234667	62	2	4152	12	-2	$\delta < 0$	$i = j$
0,96	1	maior	1234567	62	2	4152	14	+2	$0,99 > 0,12$	$i = i$
0,96	2	menor	1233667	62	2	4152	10	-2	$\delta < 0$	$i = j$
0,96	3	maior	1238667	62	2	4152	12	+2	$0,53 > 0,12$	$i = i$
0,96	4	menor	1236667	62	2	4152	10	0	$0,75 > 1$	$i = j$
...										
0,96	8	menor	3336666	62	2	4152	4	-2	$\delta < 0$	$i = j$
0,96	9	maior	3376666	62	2	4152	6	+2	$0,10 > 0,12$	$i = j$
...										

Tabela 21: Primeiros passos do simulated annealing de alocação.

Conforme pode ser observado na Tabela acima, sempre que $\delta < 0$, a nova situação é adotada ($i = j$), mas quando $\delta > 0$ têm-se tanto casos, como os das linhas 1 e 3, onde $\text{rand}(0,1) > e^{-\delta/T}$ e a nova situação não é adotada ($i = i$), como casos como os das linhas 4 e 8, onde $\text{rand}(0,1) \leq e^{-\delta/T}$ e a nova situação é adotada.

E como: C_{UH} (custo unitário da mão-de-obra) = \$200 / semana, logo:

$$C_H \text{ (custo total de mão-de-obra)} = C_{UH} * N_{TH} = 19 * 200 = 3800$$

Como:

$$C_{TMP} \text{ (custo total de material)} = \sum_{m=1}^{N_m} C_{W_m} = 56000, \text{ conforme pode ser visto na Tabela 5, e}$$

$$I_{W} = 0,6 \%$$

$$C_E \text{ (custo do estoque por semana)} = C_{TMP} * I_{W} = 56000 * 0,6\% = 336$$

$$C_{TI} = C_H + C_E = 3800 + 336 = 4136$$

A.5. Simulated Annealing para Partição

Inicia-se com o CORTE da Tabela 19 e a alocação HI(op) da Tabela 22. Assim tem-se a situação inicial (semente) para partição, com o custo detalhado no item anterior: $C_{TI} = 4136$ (passo 9).

Aplica-se o "simulated annealing" de Partição com os seguintes dados:

Para $T = 625$ até 262 (com $RP = 0,93$), faça:

Para $n = 0$ até 500 , faça:

i Geração de vizinhança

$$k = \text{rand}(0,1)$$

Se $k > \frac{1}{2}$, então "CORTE com novo elemento"

senão "retira-se elemento de CORTE"

E para exemplificar este procedimento, seguem-se as Tabelas 23, 24, 25 e 26, obtidas da simulação real.

Próximo I

Próximo n

Se não houver melhoria na função-objetivo entre as 15 últimas iterações, pare.
i Testa-se o critério de parada para partição:

```

      CELI = CELJ
      CORTEI = CORTEJ
      CTI=CTJ; CI = CJ
      senão: se rand(0,1) < e-δ/T, então:
          CELI = CELJ
          CORTEI = CORTEJ
      se δ < 0, então: CTI = CTJ; CI = CJ
      δ = CTJ - CTI
  
```

Calcula-se a função-objetivo **CTJ**.

partições.

Tabela 23: Planilha Saída em uma situação intermediária de

Passo do Algoritmo		2 de 2	Custo atual	8.700,80	NTA	6	Custo inicial	5.075	nc	16	Redução	50,8%	ntc	1	Custo mín.	1.835,2	Observ:																																																				
<table border="1"> <tr> <td rowspan="3">Dados de operação</td> <td>Produto</td> <td>7167-1/5</td> <td>7180-134A</td> <td>7185-070B</td> <td colspan="13"></td> </tr> <tr> <td>Demanda</td> <td>350</td> <td>1800</td> <td>650</td> <td colspan="13"></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td colspan="13"></td> </tr> </table>																		Dados de operação	Produto	7167-1/5	7180-134A	7185-070B														Demanda	350	1800	650																														
Dados de operação	Produto	7167-1/5	7180-134A	7185-070B																																																																	
	Demanda	350	1800	650																																																																	
Chave																																																																					
Op.	Máquina	Descrição	DOE	TCOP	TCMq	Próx. op.																																																															
10C	Troncar	TM18	96,0%	10	62	20C	A1	A1	A1	0																																																											
20C	Preparar e receber de TT	BT100	100,0%	10	10	40C	A1	A1	A1	1																																																											
40C	Preparar	PR11	99,0%	10	10	50C	A1	A1	A1	1	0																																																										
50C	Rebarbar	TS14	99,0%	3	28	60C	A1	A1	A1	1																																																											
60C	Preparar e receber de TT	BT101	100,0%	10	10	80C	A1	A1	A1	1																																																											
80C	Rebarbar interno	RC61	95,0%	10	61	90C	D1	D1	D1	1																																																											
90C	Óleo	EL117	100,0%	4	4	10EC	D1	D1	D1	1																																																											
10E	Troncar	TM17	96,0%	10	70	20E	B2	B2	B2	2	0																																																										
20E	Centrar	TC21	98,0%	30	30	30E	B2	B2	B2	2	1																																																										
30E	Troncar	TR08	98,0%	50	50	40E	B2	B2	B2	2	2																																																										
40E	Preparar engrenagem	FG05/08	96,0%	26	45	50E	F2	F2	F2	2	1																																																										
50E	Preparar engrenagem	FG09	96,0%	30	30	60E	F2	F2	F2	2	1																																																										
60E	Preparar chaveta	FR36	99,0%	37	33	70E	C2	C2	C2	2	1																																																										
70E	Rebarbar engrenagem	BT113	100,0%	38	38	80E	C2	C2	C2	2	1																																																										
80E	Lavar	EL112	98,0%	8	8	90E	C2	C2	C2	2	1																																																										
90E	Laminar roscas	RO12	96,0%	10	10	100E	C2	C2	C2	2	1																																																										
100E	Rebarbar externo	RC64	96,0%	25	25	110E	M2	M2	M2	2	1																																																										
110E	Preparar e receber de TT	BT114	100,0%	10	10	170E	M2	M2	M2	2	1																																																										
170E	Rebarbar em acabamento	RC63	96,0%	25	30	180E	M2	M2	M2	2	1																																																										
180E	Lavar e óleo	EL113	98,0%	5	5	10EC	M2	M2	M2	2	1																																																										
10EC	Preparar cubo	PH13	99,0%	4	1	20EC	D1	D1	D1	2	1																																																										
20EC	Rebarbar	RC55	94,0%	42	37	30EC	D1	D1	D1	1	1																																																										
30EC	Rebarbar slots	RC65	92,0%	16	25	40EC	D1	D1	D1	1	1																																																										
40EC	Rebarbar	RP07	96,0%	20	35	50EC	D1	D1	D1	0	1																																																										
50EC	Lavar	EL28	98,0%	5	15	fm				1	1																																																										

Passo do Algoritmo

ntA	1	Custo Início	4.125
nc	17	Redução	1.200
ntC	1	Custo mín.	1.835,2

Observ.	
---------	--

Dados de operação	
Produto	7167-175 7180-134A 7185-070B
Demanda	350 1800 650

Chave	Detalhes		Dados		DOE	TCOP	TCMq	Prex. op.	Corte	Célula	Ent.
	Operação	Máquina	Descrição	Prex. op.							
10C	Tornear	TM18	Waldman 2 1/4" GSP	96,0%	10	10	20C	A1	A1	1	0
20C	Preparar e receber de TT	BT100	Bancada	100,0%	10	10	40C	A1	A1	1	1
40C	Preparar	PR11	Prema guthman	99,0%	10	10	50C	A1	A1	1	1
50C	Rebarbar	TS14	Rotomish Ocro ST 5	99,0%	3	28	60C	A1	A1	1	1
60C	Preparar e receber de TT	BT101	Bancada	100,0%	10	10	80C	A1	A1	1	1
80C	Retificar interno	RC61	Vomard Intern. GR	95,0%	10	61	90C	D1	D1	1	1
90C	Operar	EL117	Tanque de óleo	100,0%	4	4	10EC	D1	D1	1	1
10E	Tornear	TM17	Waldman 1 3/4" GSP	96,0%	10	70	20E	B2	B2	2	0
20E	Centrar	TO21	Duap s/ facing center	98,0%	30	30	30E	B2	B2	2	1
30E	Tornear	TR08	Hebert	98,0%	50	65	40E	B2	B2	2	1
40E	Preparar engrenagem	F005/08	Maxicut Gear Shaper	96,0%	26	45	50E	F2	F2	2	1
50E	Preparar engrenagem	F009	Maxicut Gear Shaper	96,0%	30	30	60E	F2	F2	2	1
60E	Preparar chaveira	FR36	Voughan Keyseater	99,0%	37	33	70E	C2	C2	2	1
70E	Rebarbar engrenagem	BT113	Bancada	100,0%	38	8	80E	C2	C2	2	1
80E	Lavar	EL112	Máquina de lavar	98,0%	8	8	90E	C2	C2	2	1
90E	Laminar rosca	RO12	Duap Threader	96,0%	10	10	100E	C2	C2	2	1
100E	Retificar externo	RC64	Jones & Shipman	96,0%	25	25	110E	M2	M2	2	1
110E	Preparar e receber de TT	BT114	Bancada	100,0%	10	10	170E	M2	M2	2	1
170E	Retificar em acabamento	RC63	Tahudin Grinder	96,0%	25	30	180E	M2	M2	2	1
180E	Lavar e olear	EL113	Máquina de lavar	98,0%	5	5	10EC	M2	M2	1	1
10EC	Preparar cubo	PH13	Prema hidráulica	99,0%	4	1	20EC	D1	D1	1	2
20EC	Retificar	RC55	Retifca Shaudt	94,0%	42	37	30EC	D1	D1	1	1
30EC	Retificar slots	RC65	Retifca Fortuna	92,0%	16	25	40EC	D1	D1	1	1
40EC	Retificar	RP07	Ret Jones & Shipman	96,0%	20	35	50EC	D1	D1	1	1
50EC	Lavar	EL28	Máquina de lavar	98,0%	5	15	fm			1	1

Tabela 24: Planilha Saída em uma situação intermediária de partições.

Passo do Algoritmo

3800,8	Custo atual	3 de 3	1	Custo inicial	4,23
20,83	Redução	18	1	Custo mn.	1835,2

Observ:

Demandas		Produto		Demanda	
7185-070B	7180-134A	7167-175	1800	650	

Chave	Detalhes		Dados		Op.	
	Máquina	Descrição	DOE	TCOP	TCMq	Prex. op.
10C	TM18	Wickman 2 1/4" 6SP	96,0%	10	20C	
20C	BT100	Bancada	100,0%	10	40C	
40C	PR11	Prema gumman	99,0%	10	50C	
50C	TS14	Rotofinish Ocro ST 5	99,0%	3	60C	
60C	BT101	Bancada	100,0%	10	80C	
80C	RC61	Vomard Intern. GR	95,0%	10	90C	
90C	EL117	Tanque de óleo	100,0%	4	10EC	
10E	TM17	Wickman 1 3/4" 6SP	96,0%	10	20E	
20E	TO21	Duap s/ facing center	98,0%	30	30E	
30E	TR08	Hebert	98,0%	50	40E	
40E	FG05/08	Mactcut Gear Shaper	96,0%	26	50E	
50E	FG09	Mactcut Gear Shaper	96,0%	30	60E	
60E	FR36	Vonghan Kyster	99,0%	37	70E	
70E	BT113	Bancada	100,0%	38	80E	
80E	EL112	Máquina de lavar	98,0%	8	90E	
90E	RO12	Duap Threader	96,0%	10	100E	
100E	RC64	Jones & Shipman	96,0%	25	110E	
110E	BT114	Bancada	100,0%	10	170E	
170E	RC63	Tshadin Grinder	96,0%	25	180E	
180E	EL113	Máquina de lavar	98,0%	5	10EC	
10EC	PH13	Prema hidráulica	99,0%	4	20EC	
20EC	RC55	Redfca Shandt	94,0%	42	30EC	
30EC	RC65	Redfca Fortuna	92,0%	16	25	
40EC	RP07	Ret Jones & Shipman	96,0%	20	35	
50EC	EL28	Máquina de lavar	98,0%	5	15	

Tabela 25: Planilha Saída em uma situação intermediária de partições.



