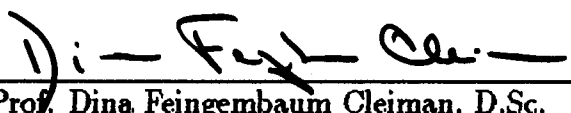



**MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA MANUFATURA
AUTOMATIZADA**

Angel Guillermo Coca-Balta

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.


Aprovada por:


Prof. Dina Feingebaum Cleiman, D.Sc.
(Presidente)


Prof. Antônio Alberto F. de Oliveira, D.Sc.


Prof. Heitor Mansur Caulliraux, D.Sc.


Prof. Luis E. Torres Guardia, D.Sc.


Prof. Luiz Satoru Ochi, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
NOVEMBRO DE 1991

COCA-BALTA, ANGEL GUILLERMO

**Modelos de Otimização para Manufatura Automatizada[Rio de Janeiro]
1991**

**xii, 72 p., 29.7 cm, (COPPE/UFRJ, D.Sc., ENGENHARIA DE SISTE-
MAS E COMPUTAÇÃO, 1991)**

TESE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1 Otimização. I. COPPE/UFRJ II. Título(Série).

O Autor:

Angel Guillermo Coca-Balta, nasceu em 26 de Junho de 1944 no município de Huaral, Departamento de Lima, no Perú. É formado em Matemática pela Universidade de San Marcos de Lima - Perú onde tem vínculo empregatício como Professor Associado do Departamento de Matemática Aplicada.

Em 1983, obteve o grau de Mestre em Ciências em Engenharia de Sistemas e Computação pela COPPE-UFRJ.

Faz vinte e cinco anos, é casado com Judith Velarde de Coca e tem dois filhos: Luis Guillermo, quase formado em Estatística, e Cecilia Judith, ainda na Escola Secundária.

*No ano das nossas Bodas de Prata de Matrimônio,
à Judith, eu dedico.
Ao invés de problemas, ela formula soluções.*

AGRADECIMENTOS:

- A Professora Dina F. Cleiman, pela proposta e orientação deste trabalho, dedicando-se admiravelmente.
- Aos Professores Clóvis Gonzaga e Nelson Maculan por ter patrocinado a minha vinda à COPPE para o curso de Doutorado.
- Ao Professor Antônio de Oliveira pelas sugestões e incentivo.
- Ao Professor Heitor Caulliraux pelas sugestões e incentivo.
- Ao Professor Luiz S. Ochi pelo seu constante apoio ao estudo das aplicações da Otimização nos problemas de Manufatura Flexível.
- Ao Professor Luis Torres Guardia pelas importantes sugestões.
- Ao Professor Oswaldo Agostinho da UNICAMP e da Equipamentos CLARK Ltda., pela valiosa informação a respeito dos sistemas de manufatura e pelas sugestões propostas.
- A Professora Katherine Stecke, da Universidade de Michigan, por ter-nos fornecido importante bibliografia, da sua autoria e patrocínio editorial, na ocasião do "TIMS XXX-SOBRAPO XXIII Joint International Meeting" no Rio de Janeiro em Julho de 1991.
- A CAPES pela Bolsa concedida.
- A Universidade de San Marcos de Lima-Perú pela licença concedida.
- Aos professores, colegas e funcionários da COPPE, pela orientação, amizade e apoio logístico recebidos.

Resumo da Tese apresentada à COPPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA MANUFATURA AUTOMATIZADA

Angel Guillermo Coca-Balta

Novembro de 1991

Orientadora: Dina Feingbaum Cleiman

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

No ambiente de Sistemas de Manufatura Automatizada, descreve-se os principais problemas operacionais no gerenciamento dos Sistemas de Manufatura Flexível. Esses problemas são modelados como sendo problemas de Otimização Matemática que visam melhorar a produção. Os modelos e algoritmos apresentados permitem evitar a não-linearidade usando modelos de fluxos em redes.

Abstract of Thesis presented to COPPE as partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

OTIMIZATION MODELS FOR AUTOMATIC PRODUCTION

Angel Guillermo Coca-Balta

November, 1991

Thesis Supervisor: Dina Feingebaum Cleiman

Department: System Engineering and Computing.

In a Automatic Production approach, we show the main operations problems to management the Flexible Manufacturing Systems. We use Mathematical Otimizations models to improve production. It is used networks flows models instead of nonlinear models

Resumen de la Tesis presentada a la COPPE como requisito parcial para la obtención del Grado de Doctor en Ciências (D.Sc.)

MODELOS DE OPTIMIZACION PARA MANUFACTURA AUTOMATIZADA

Angel Guillermo Coca-Balta

Noviembre, 1991

Orientadora de Tesis: Dina Feingembaum Cleiman

Departamento: Programa de Ingenieria de Sistemas y Computação

En un ambiente de Sistemas Automáticos de Manufactura, se describe los principales problemas operacionales para el gerenciamiento de los Sistemas de Manufactura Flexible. Esos problemas son modelados como problemas de Optimización Matemática para mejorar la producción. Los modelos y algoritmos presentados usan modelos de fluxos em redes e permiten evitar la no-linealidad.

Índice

I	Introdução	1
II	Sistemas de Manufatura	6
II.1	Os Processos de Manufatura Discreta	6
II.1.1	Um pequeno histórico	8
II.1.2	Produção JIT: Just-in-Time	8
II.2	Tecnologia de Grupos	9
II.3	Automação da Produção	10
II.3.1	Controle Numérico	10
II.3.2	HARD e SOFT automação	10
II.4	Sistemas de Manufatura Flexível	11
II.4.1	Sistema de manipulação de material	11
II.4.2	Máquinas de controle numérico	12
II.4.3	Definições adicionais	12
II.5	Tipos de Sistemas de Manufatura Flexível	13
II.6	Flexibilidade	15
II.6.1	Tipos de Flexibilidade	15

II.6.2	Medida da Flexibilidade	16
II.7	Otimização nos SMF	18
II.7.1	Problemas Operacionais	18
II.7.2	Critérios de Otimalidade nos Problemas Operacionais	19
III	Plano de Processamento	21
III.1	Escolha do Plano de Processamento	21
III.1.1	Produção de uma peça	22
III.1.2	Plano de Processamento	22
III.1.3	Problema de Recobrimento de Conjuntos na escolha do Plano de Processamento	25
III.1.4	Ordenação Topológica	26
III.2	Multi-escolha nos planos de Processamento	27
III.2.1	Uma formulação em Grafos para o problema de multi-escolha	28
III.2.2	Uma formulação do problema em Programação Inteira	29
III.2.3	Solução do Problema modelado	30
IV	Seqüenciamento dos Processos	33
IV.1	Problema de seqüenciamento dos Planos de Processamento	33
IV.1.1	Custo do set-up na mudança dos planos de processamento	34
IV.1.2	O modelo de scheduling	35
IV.1.3	O Problema do Caixeiro Viajante (PCV) Modelado como um Problema de Fluxo em Rede de dois Produtos	37

V Designação Tarefa-máquina-ferramenta	40
V.1 Um modelo multi-máquina	41
V.1.1 Um critério de otimalidade	43
V.1.2 As restrições	44
V.1.3 Resolução do problema	46
V.2 Um Modelo em Redes Generalizadas	47
V.2.1 Redes Generalizadas	48
V.2.2 O Problema de Fluxo numa Rede Generalizada	49
V.3 Modelo em RG para um problema de designação tarefa-máquina	49
V.3.1 Notações	49
V.3.2 O modelo	50
VI Problemas de Grupamento	53
VI.1 Peças, ferramentas e Tecnologia de Grupos	54
VI.2 Uma interpretação do problema	54
VI.3 Um critério de Otimalidade	55
VI.4 Os modelos	56
VI.4.1 Coeficientes de semelhança	56
VI.4.2 Problema de Grupamento das Peças e Ferramentas como um problema em grafos	56
VI.5 Um modelo Linear para o Problema de Grupamento	58
VI.6 Um modelo de fluxo em redes	59
VI.6.1 O Modelo	60

VI.6.2 Algoritmo Preliminar	61
VI.6.3 Convergência e Complexidade Computacional	61
VI.7 O Algoritmo	62
VI.7.1 O Algoritmo	62
VI.7.2 Observações	63
VI Conclusões	65

Capítulo I

Introdução

As novas ideias relativas à manufatura de bens discretos surgidas nos últimos vinte a vinte e cinco anos, estão sendo aplicadas nos chamados países desenvolvidos e o Brasil começa a tomar consciência dessas alterações na filosofia de fabricação [4].

A filosofia de produção em grandes series e a filosofia de produção em massa imperante nas décadas de 1950 e 1960 começou a mostrar-se inadequada, principalmente perante os equipamentos muito complexos e com pouca possibilidade de alterações (Seção II.3.2). Aparece nessa época os conceitos e técnicas de automação e informatização.

Nesse ambiente de automatização, o Japão e os países europeus, começaram a desenvolver sistemas de manufatura adequados, desenvolveu-se então, a máquina-ferramenta de controle numérico e as demais componentes das células e sistemas de manufatura flexível. A tecnologia desses sistemas, tem como principais objetivos:

- Atender as exigências por parte dos consumidores por produtos cada vez mais diversificados.
- Diminuição dos estoques.
- Diversificação da produção sem perda de produtividade.
- Rapidez na entrega dos pedidos.
- Aumento na qualidade do produto.

- Atendimento das especificações individuais dos clientes. etc.

Esses objetivos passaram a ser significativos para a conquista e manutenção de um espaço no mercado e dentro desses critérios, desenvolveram-se novas técnicas de produção como por exemplo: "Zero Inventory" e "JIT" (Produzir somente o necessário); técnicas que estão referidas na Seção II.1.2.

Um Sistema de Manufatura Flexível conforme dito no Capítulo II é um tipo de sistema automatizado de manufatura capaz de responder aos requerimentos tecnológicos para que sejam atingidos os objetivos acima apresentados, sendo que a flexibilidade, passa a assumir um papel fundamental como característica necessária ao bom desempenho da produção.

No Brasil, um dos primeiros estudos sistemáticos à respeito da flexibilidade dos sistemas de manufatura foi feito por AGOSTINHO [3], determinando-se alguns índices de medida de flexibilidade, logo apareceram outros trabalhos na literatura, os quais são referidos na Seção II.6.2 como um produto de nossa pesquisa bibliográfica; aparece também o trabalho de CAULLIRAUX et.al [12] do qual participamos ativamente.

Na Seção II.6 será tratado o conceito de Flexibilidade como característica de um tipo de sistema de manufatura automatizada. Essa característica é enfocada segundo diferentes critérios, produzindo diferentes tipos de Flexibilidade inter-relacionadas segundo SETHI and SETHI [41] como é assinalada na figura I.1.

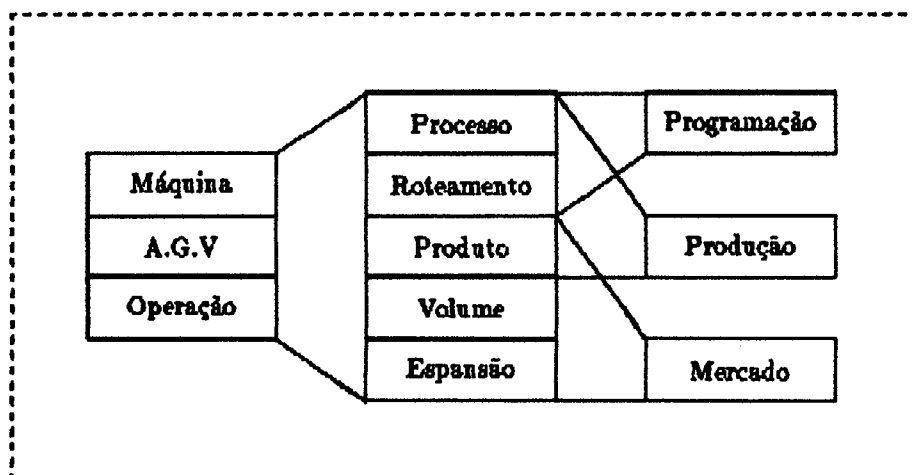


Figura I.1: Interrelação entre tipos de Flexibilidade

Nessa figura aparecem as características de flexibilidade das máquinas,

de sistemas de manipulação de material (A.G.V) e operação, como fundamentais para a obtenção de uma boa flexibilidade na Produção e para melhor atender as exigências do Mercado. Esses tipos de flexibilidade têm a ver muito com o uso ótimo das máquinas, do sistema de manipulação do material e a melhor solução dos problemas operacionais que serão apresentados nos próximos Capítulos.

Considerando, então que a flexibilidade das máquinas, dos sistemas de manipulação do material e de operação são fatores básicos para uma boa programação da produção e conquista do mercado, faz-se necessário um uso ótimo do próprio sistema e portanto, temos um primeiro motivo para o desenvolvimento deste trabalho.

O gerenciamento do sistema pode ser feito segundo critérios propriamente empresariais que geralmente não usam critérios matemáticos de otimalidade, como por exemplo o uso de modelos que consideram conceitos de custos, tempo de execução, tempo ocioso das máquinas, espaços de deslocamento do material e do produto, etc. Neste trabalho é considerado o uso desses fatores dentro dos critérios de otimalidade.

Na nossa pesquisa a nível de pessoas: pesquisadores universitários e inclusive pessoas envolvidas com o gerenciamento de sistemas existentes no parque industrial brasileiro, permitiu-nos concluir a existência de poucos ou quase nenhum critério de Programação Matemática usado a nível do gerenciamento do sistema como máquina. Foi mais um motivo para iniciar este trabalho.

Considerando os altos custos da própria máquina, seus custos operacionais e a manutenção, justificar-se-á o estudo de problemas relacionados com o uso ótimo dos sistemas automáticos. De outro lado, como já foi dito, pouca difusão tem tido os métodos de otimização nessa área da indústria nacional, o que gera a idéia de difundir as técnicas de otimização no ambiente de Sistemas de Manufatura. Pretendemos então que este trabalho seja uma primeira tentativa na formulação dos problemas do gerenciamento dos sistemas automáticos, usando métodos de Programação Matemática.

Para que o desenvolvimento de nosso trabalho fique enquadrado num ambiente de manufatura propício, nossa escolha foi pela produção tipo job-shop pois

é ali que fica evidente a importância da flexibilidade e o gerenciamento ótimo dos sistemas de manufatura.

Na pesquisa bibliográfica nós achamos pouquíssimos trabalhos relacionados com o tema desta tese; e entre os quais é importante resaltar o trabalho de KUMAR [29] relacionado com o problema de grupamento de peças e ferramentas. Infelizmente ele trabalha com um modelo não-linear o que pode acarretar uma complexidade computacional elevada na procura da melhor solução.

Diante da presença de outros modelos não-lineares, foi um de nossos objetivos, tentar retirar a não-linearidade, não simplesmente como um problema de modelagem mas sim como a aplicação de alguma técnica ou enfoque usando ferramental de otimização como por exemplo, teoria dos fluxos em redes. Não se trata então de um simples método de linearizar um modelo não-linear, trata-se mais do problema de reformular o enfoque dado ao modelo e aos respectivos algoritmos.

Em termos gerais, um dos primeiros problemas a ser superado foi o conhecimento e interpretação da terminologia usada a respeito, isso é basicamente o que é apresentado no Capítulo II. Uma descrição dos Sistemas de Manufatura Flexível e os conceitos próprios desse ambiente são apresentados na Seção II.4; apresenta-se também a descrição dos principais problemas que têm que se resolver na procura do uso ótimo do sistema.

Os Sistemas de Manufatura Flexível são usados basicamente para a fabricação dos chamados produtos discretos ou seja, peças isoladas ou conjuntos de peças, que por exemplo, têm na indústria metal mecânica uma maior aplicabilidade. Para um melhor uso do sistema na elaboração de um dado tipo de peça, faz-se necessária a resolução de um problema chamado de Escolha do Plano de Processamento o que é apresentado no Capítulo III.

Considerando-se então a produção de um conjunto de tipos diferentes de peças, segundo será explicado, faz-se necessário resolver um problema chamado de Sequenciamento dos Processos, o que será feito no Capítulo IV

Os modelos existentes para a solução de alguns problemas como sendo Problemas de Grupamento e Designação Tarefa-Máquina são basicamente do tipo Não-Linear (vide STECKE [42]) e existe na Literatura da Programação

Matemática trabalhos que apresentam algoritmos para resolver esses tipos de modelos, mas como já foi dito, consideramos muito importante modelar os problemas evitando precisamente essa não-linearidade; é o que é feito e apresentado no Capítulo V e no Capítulo VI, mediante o uso de critérios de fluxos em redes. Esses critérios podem ser consultados nos trabalhos de CLEIMAN and COCA-BALTA [14], COCA-BALTA e CLEIMAN [16], GLOVER et.al [19], GRINOLD [22], PICARD and QUEIRANE [39], etc.

Capítulo II

Sistemas de Manufatura

A tecnologia nos sistemas de manufatura tem apresentado diferentes fases, desde o convencional tipo “transfer line” com participação humana, até os sistemas completamente automatizados. Como decorrência do desenvolvimento da automatização da indústria, apareceram novos conceitos e técnicas para o planejamento da produção, sendo que para a produção de pequenos e médios lotes sujeitos a demandas imprevisíveis ou de alta variação, os Sistemas de Manufatura Flexível são os mais usados atualmente, e é baseado neles que o nosso trabalho é desenvolvido. Neste capítulo apresenta-se uma descrição geral desses tipos de Sistemas de Manufatura, bem como o conceito de flexibilidade.

II.1 Os Processos de Manufatura Discreta

Nos sistemas de manufatura existe dois tipos básicos de plantas industriais: Plantas de Processos industriais contínuos e Plantas de Manufatura de peças Discretas.

Nos processos industriais contínuos, considera-se a produção dos produtos “contínuos” ou seja aqueles que não podem se dividir em peças isoladas, como por exemplo a produção de açúcar, tintas, etc.

Os processos de produção discreta, chamados também de intermitente considera a produção individual de peças que segundo a quantidade produzida pode ser dividida em Produção em Massa, Produção em Batch ou médios lotes e Produção de tipo Job-shop ou de pequenos lotes.

	Produção		
	em massa	em lotes	job-shop
volume de produção	alto	mediano	pequeno
variedade de produção	pequena	mediana	alta
destresa do operario	pequena	mediana	alta
especialização das máquinas	alta	mediana	pequena

Figura II.1: Características da Produção Discreta

Produção em massa - É caracterizada pelos elevados volumes de unidades de uma pequena variedade de tipos de peças. Todos os tipos de peças, são muito bem padronizados e só permitem pequenas mudanças no seu desenho a medios ou longo prazo.

Em termos de previsão da procura dos produtos, ela é vista como relativamente estável ou seja só poderiam existir pequenas mudanças a medio ou longo prazo. No desenho da fábrica é considerado o uso de máquinas altamente especializadas ou máquinas "dedicadas".

Produção em lotes - É caracterizada basicamente pelo manufaturamento de volumes medianos de um conjunto medianamente variavel de tipos de peças. Geralmente, cada operação é executada para todo o lote antes da execução de outra operação.

Produção tipo job-shop - É caracterizada pelo tamanho muito pequeno do volume a ser produzido o que faz com que uma maior versatilidade do sistema de produção seja requerida. É considerada uma alta variedade de tipos de produtos e a padronização é mínima.

Em termos da procura dos produtos, geralmente não é estável e pode estar sujeita a imprevistos dependentes de uma série de fatores.

Este tipo de produção tem estreita relação com o critério Just-in-Time que será descrito na Seção II.1.2

O tamanho da produção nesses tipos de processos tem uma relação inversa à variedade dos tipos de peças a serem produzidas. Na maior variedade dos tipos das peças, os lotes são de menor tamanho. Outras relações são apresentadas na figura II.1

II.1.1 Um pequeno histórico

No início do século a produção em massa era sinônimo de manufatura de automóveis, onde essa orientação era a seguinte de acordo com Henry Ford: “o cliente pode ter o automóvel da cor que quiser, desde que seja preto”. Isso pode ser interpretado como a restrição da variedade na produção, o que permitiu que a manufatura de automóveis tenha sido exemplo de produção em massa.

Para facilitar o dito processo de produção, os fabricantes padronizaram o produto, permitindo o uso de máquinas “dedicadas” ou especializadas capazes de produzir grandes volumes de automóveis, do mesmo tipo.

Nos últimos vinte anos tem havido muitas mudanças à respeito dos sistemas de manufatura. Os clientes com o incentivo das campanhas de comercialização passaram a procurar uma maior variedade nas características dos carros; além da variedade na cor, foi requisitada uma variedade nos implementos adicionais de luxo, conforto e, principalmente, na questão tecnológica do próprio automóvel.

Tudo isso fez com que os empresários trocassem rapidamente o critério de produção em massa para um critério caracterizado como de produção em lotes, com a finalidade de atender a procura de uma variedade de tipos de automóveis.

II.1.2 Produção JIT: Just-in-Time

É um critério de produção que procura *fabricar somente os tipos de peças necessárias, no prazo certo e nas quantidades necessárias* com a finalidade de atingir os seguintes objetivos: *zerar defeitos, estoque e paradas; diminuir tempo de set-up* (II.4.3), *manipulação de material, tempo de processamento, tamanho do lote, etc.*

Alguns desses objetivos não são atingidos totalmente e nem todos são considerados pelos tomadores de decisão nas empresas. De outro lado, as empresas têm que ter um lay-out adequado nas suas fábricas, que por sua vez têm que ser altamente automatizadas.

BROWNE et al. [11] considera um conjunto de três elementos básicos para que a produção de tipo JIT possa atingir os seus objetivos:

- Uma perfeita inter-relação entre a procura no mercado e o desenho dos produtos.
- Estabelecimento de boas relações com os fornecedores para atingir uma adequada distribuição das matérias primas.
- A definição de famílias de produtos para facilitar a produção.

A respeito desse último elemento, é evidente que ele tem uma relação direta com o nosso trabalho, pois poderíamos procurar famílias que cumpram com algum critério de otimalidade.

II.2 Tecnologia de Grupos

A Tecnologia de Grupos como uma filosofia nos processos automatizados de manufatura tem como objetivo o incremento da eficiência da produção aproveitando a similaridade do desenho das peças e a semelhança dos processos de fabricação mediante o subsequente grupamento de família de peças.

A decomposição das operações na fábrica em subsistemas, conduz à redução das atividades de manipulação do material, menor número de atrasos, um menor estoque transitorio das peças em processo e um melhor controle do processo, ou seja, o gerenciamento da produção de uma família de peças e o uso do conjunto das ferramentas correspondente, é obviamente bem mais simples do que o gerenciamento do sistema todo.

A Tecnologia de Grupos como um conceito de manufatura, visa obter vantagens mediante a redução dos custos e acrescimos de produtividade, principalmente nos lotes de mediano e pequeno tamanho. A redução dos custos está relacionada principalmente com os custos de set-up ou arrumação das máquinas e as ferramentas. As ferramentas requisitadas para a manufatura das peças de cada grupo podem, então, ser também agrupadas (Capítulo VI) para logo processar as peças em uma seqüência ótima conforme será analisado no Capítulo IV.

II.3 Automação da Produção

As mudanças históricas, o avanço tecnológico na qualidade dos produtos e a variedade na procura, variedade não somente nos produtos mas também nos detalhes de cada tipo, fizeram com que a tecnologia de manufatura pudesse se superar trocando a mecanização pela automatização, com a minimização da mão de obra na manipulação das máquinas e no processo de fabricação. Entre os tipos de automação é importante salientar as máquinas de controle numérico, a automação "hard" e "soft."

II.3.1 Controle Numérico

Controle Numérico é um tipo de automação programável onde as operações das máquinas são controladas por números e símbolos. A coleção dos números fazem parte de um Programa que permite à máquina produzir uma peça. Quando um novo tipo de peça vai ser produzido, um novo programa tem que ser usado.

Com a introdução da automação nas fábricas, a partir dos anos 50, o controle humano foi substituído pelo Controle Numérico e Controle Computarizado. Para tanto as máquinas convencionais foram substituídas pelas máquinas de *Controle Numérico (MCN)* e logo pelo *Controle Numérico Computarizado (CNC)*

A troca dos programas no uso das máquinas de controle numérico mesmo como o set-up delas requer de uma ampla característica de Flexibilidade, conceito que será tratado numa próxima seção.

As máquinas de controle numérico oferecem uma ampla característica de flexibilidade como por exemplo, o fato de poder reprogramar os processos, diante da presença da produção de pequenos lotes de variados tipos de peças.

II.3.2 HARD e SOFT automação

Segundo BROWNE et al. [11] são considerados dois níveis de automação. Na produção de lotes pequenos o uso das máquinas MCN permite um controle programado ou um "Software"-Controle, e nesse caso temos a automação SOFT que possui

uma ampla característica de flexibilidade, o que a diferencia da automação HARD onde é nula a flexibilidade da automação. O tipo de automação HARD é aquela que permite a chamada produção em massa. O nosso trabalho está relacionado com o caso da automação SOFT, ou seja, com os sistemas flexíveis.

II.4 Sistemas de Manufatura Flexível

Um Sistema de Manufatura Flexível é basicamente um sistema *integrado* de manufatura formado por um conjunto de máquinas (geralmente, máquinas de controle numérico), por um sistema automático de manipulação dos materiais (AGV) e por um sistema computacional de controle. O conceito de automatização contém implicitamente a condição do uso de um computador, além de um sistema inteligente como parte integral do seu sistema de controle.

Um Sistema de Manufatura Flexível : SMF, é uma nova estrutura na linha de produção que visa garantir uma eficiência no processamento simultâneo de lotes pequenos de peças, e que usa, geralmente, as vantagens da automatização.

No gerenciamento dos Sistemas de Manufatura Flexível aparece um conjunto de considerações, não necessariamente próprias do sistema enquanto conjunto de máquina, mas sim no relacionado com aspectos do tipo da produção ou melhor, seja dito, do tipo gerencial tais como: demanda do mercado, critérios da produção, possibilidades de estocagem, fornecimento das matérias primas, custos, etc., aspectos que fogem ao propósito deste trabalho e que podem ser consultados numa ampla bibliografia existente: BROWNE et.al [11], MARIOTI et.al [37] MONDEN [38], ZACCARELLI [48], etc.

II.4.1 Sistema de manipulação de material

O termo *Sistema de manipulação de material* é usado para referir-se aos aparelhos ou dispositivos cuja primeira finalidade é de transportar as peças em processo de fabricação ou a matéria prima correspondente e as ferramentas. Este sistema de transporte é fundamental no sentido de poder deslocar as peças desde o armazém (*buffer*) até as máquinas e entre estas segundo um roteiro pré determinado pelo

processo de produção.

Entre os principais dispositivos para a manipulação dos materiais, pode-se mencionar: Faixa ou banda de transporte, reboques, trilhos para o deslizamento dos robôs ou dos dispositivos para mudança de ferramentas, rolamentos de transporte, etc.

II.4.2 Máquinas de controle numérico

Define-se como *Controle Numérico: CN*, o processo de controlar uma máquina-ferramenta usando um programa pré-estabelecido e sustentado por dados numéricos. Esta definição gera então o conceito de *Máquina de Controle Numérico (MCN)*.

Na década de 50 o uso dos dados numéricos era feito usando as fitas perfuradas e permitia que um conjunto de tarefas fossem desenvolvidas pelas máquinas-ferramentas com um mínimo de ações do operador. Com o avanço da tecnologia computacional aparece o conceito de *Controle Numérico Computadorizado: CNC*, segundo o qual é incorporado um minicomputador como parte integral do sistema de controle.

II.4.3 Definições adicionais

Tendo em vista que a literatura existente sobre Sistemas de Manufatura Flexível encontra-se basicamente em inglês e que os termos a seguir são amplamente utilizados, é importante apresentar aqui as seguintes definições:

Magazine .- É o termo não traduzido do inglês equivalente a *tambor* ou *cilindro* para colocar as ferramentas em condições operacionais.

Tool slot .- É o termo do inglês usado na literatura para denominar os "orifícios" ou posições que o magazine possui para montar as ferramentas. Nós usaremos o termo *Posição das ferramentas*.

Fixture .- É o termo não traduzido do inglês equivalente a *ferramenta de fixação* ou seja aquele aparelho usado para segurar as peças ainda em processo de

usinagem mesmo como a matéria prima a ser processada. Nós usaremos o termo *Fixador*.

Gripper .- É o termo não traduzido do inglês que define um tipo de fixador para segurar as peças que precisam de movimento de rotação para a sua usinagem.

Pallet .- É o termo equivalente a *Bandeja* ou mesa de trabalho onde são colocadas as peças a serem processadas. As peças são fixadas usando-se os "fixadores". Comumente é chamado de *palete*.

Layout .- É o termo não traduzido do inglês usado para referir-se ao *Desenho* ou configuração física do sistema: o conjunto das máquinas e outras facilidades. Comumente é chamado de *Leyaute*.

Set-up .- É o termo usado na literatura para referir-se ao tempo gasto para que o sistema fique pronto para desenvolver uma ou algumas tarefas, isto é, o tempo gasto para a montagem ou remontagem das ferramentas nas máquinas.

Buffer .- Numa estação de trabalho é o local (armazém) para colocar as peças já processadas ou ainda na espera de serem processadas.

Lead Time .- É o tempo do precessamento de uma dada peça.

II.5 Tipos de Sistemas de Manufatura Flexível

Segundo o número de máquinas de controle numérico e o correspondente desenho (lay-out) do SMF, tem-se a seguinte classificação segundo KUSIAK [30] :

Módulos .- Constituídos por uma máquina, por um armazém (buffer), um tambor de ferramentas (*magazine*) e bandeja (*pallets*) para o deslocamento do material. Figura II.2

Células .- Constituído por vários módulos e um sistema de manipulação de material comum. Figura II.3

Grupo .- Constituído por várias células que desenvolvem tarefas similares.

Sistema .- Constituído por vários grupos que podem desenvolver tarefas não necessariamente idênticas.

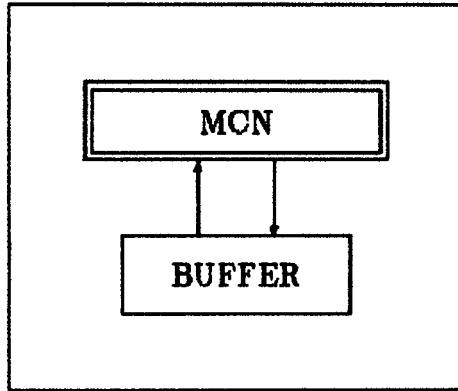


Figura II.2: Modulo de Manufatura Flexível

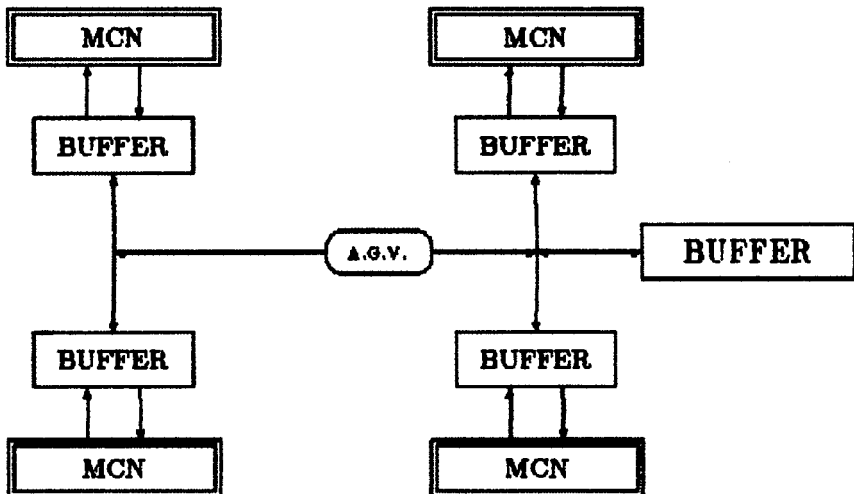


Figura II.3: Célula de Manufatura Flexível

II.6 Flexibilidade

A característica fundamental de um SMF é a *Flexibilidade* que pode-se definir como a capacidade do sistema a se adaptar às mudanças do processo ou do seu gerenciamento. Para tanto, vários parâmetros ou critérios de análise podem ser utilizados, acarretando a aparição de diferentes classificações desta característica, segundo é dito pelo GUPTA and GOYAL [23]

II.6.1 Tipos de Flexibilidade

Nós vamos apresentar uma classificação dos tipos de flexibilidade que é a mais comum nas pesquisas relacionadas com o tema e que são descritas por BROWNE et al. [10].

1. Flexibilidade das máquinas.
2. Flexibilidade de processo.
3. Flexibilidade do produto.
4. Flexibilidade de roteamento.
5. Flexibilidade de volume.
6. Flexibilidade de expansão
7. Flexibilidade de operação
8. Flexibilidade da produção.

Faremos a seguir uma breve descrição destes tipos de flexibilidade:

Flexibilidade das máquinas .- Definida como a habilidade de poder substituir ferramentas gastas ou deterioradas, trocar ferramentas no magazine e montar ou remontar algum acessório de fixação sem interferência ou longos tempos de "set-up".

Flexibilidade de processo .- Definida como a habilidade do sistema de poder processar simultâneamente uma mistura de diferentes tipos de peças com pouca ou nenhuma interrelação.

Flexibilidade do produto .- Definida como a habilidade do sistema de mudar o tipo de produto a ser processado, de forma econômica e rapidamente.

Flexibilidade de roteamento .- Definida como a habilidade de poder mudar a seqüência das "visitas" às máquinas, sem ter que modificar o conjunto das peças que estão sendo processadas. Essa mudança do roteamento, geralmente é necessária quando alguma máquina ou ferramenta apresenta algum defeito, e é possível quando cada operação pode ser realizada pelo menos em duas máquinas.

Flexibilidade de volume .- Definida como a habilidade de poder operar o sistema de maneira eficiente, mesmo diante de mudanças nos volumes de produção. Esta habilidade está relacionada basicamente com os custos e condições de estocagem.

Flexibilidade de expansão .- Definida como a habilidade de expandir o sistema.

Flexibilidade de Operação .- Definida como a habilidade de poder mudar a ordem das operações no processamento de um tipo de peça.

Flexibilidade da produção .- Definida como a capacidade de produzir um universo amplo de tipos de peças.

Esses oito tipos de flexibilidade têm uma inter-relação entre eles, segundo SETHI and SETHI [41] como já referenciado no Capítulo I.

II.6.2 Medida da Flexibilidade

A questão de medida da flexibilidade é um dos temas de ampla discussão quando trata-se da avaliação dos sistemas de produção já existentes ou ainda aqueles a serem montados.

Na literatura aparecem vários trabalhos propondo algum tipo de medida da flexibilidade, o que revela grande interesse em desenvolver essas técnicas de medida. A seguir é apresentado um resumo da literatura existente sobre o assunto.

Para o caso simples de um sistema formado por uma única máquina, TAYMAZ [45] faz um aporte considerando os conceitos de Produtividade, Esforço de *setup* e *resetup*, para obter uma medida da flexibilidade de volume a partir da flexibilidade de máquina. Conclui que existe uma relação inversa entre a flexibilidade de máquina e o tamanho ótimo do lote a ser manufaturado.

Para o caso de ter um sistema formado por um conjunto de máquinas, BRILL [9] considera a flexibilidade das máquinas, individual e coletivamente, e relacionando-as com um dado conjunto de tarefas. Exemplos a respeito são apresentadas em MANDELBAUM and BRILL [36]

Considerando como parâmetros básicos as rotas ou percursos existentes para o desenvolvimento das operações num dado conjunto de peças ou produtos, ABDEL-MALEK and WOLFE [1] propõem um tipo de medida que permite relacionar, em termos de flexibilidade, dois conjuntos de tarefas. Este tipo de medida, permite avaliar a flexibilidade do sistema ao respeito da mudança para um novo conjunto de tarefas.

Um enfoque axiomático no desenvolvimento da teoria da flexibilidade nos sistemas de manufatura, é apresentado pelo KUMAR [28].

CAULLIRAUX et al. [12] apresentam um critério para avaliar comparativamente a flexibilidade das indústrias fazendo uso dos índices já conhecidos na literatura. Especificamente usa os índices propostos por ABDEL-MALEK and WOLFE [1], AZONE and BERTELLE [5], BRILL and MANDELBAUM [9], KUMAR [28], MANDELBAUM and BRILL [36] e TAYMAZ [45].

Para cada índice usado considera-se os fatores que o determinam, formulando assim duas matrizes: $[\text{ÍNDICE} \times \text{FATOR}]$ e $[\text{FATOR} \times \text{INDÚSTRIA}]$ que logo, mediante a "operação" definida particularmente para o caso, é gerada uma outra matriz que permite comparar a versatilidade das indústrias segundo cada critério determinante dos índices; assim por exemplo, o índice de TAYMAZ considera a flexibilidade das máquinas de maneira individual, o índice de BRILL and MAN-

DELBAUM considera uma flexibilidade coletiva e o índice de ABDEL-MALEK and WOLFE um índice em termos das mudanças para novos conjuntos de tarefas.

II.7 Otimização nos SMF

Considerando os altos custos dos componentes de um SMF e visando um melhor aproveitamento das facilidades que a flexibilidade oferece, justifica-se a tarefa de otimizar o uso do sistema, bem como o seu desenho. A respeito dos elevados custos é necessário considerar também as limitações no número de ferramentas que o sistema dispõe.

No contexto do SMF, são considerados dois tipos de problemas, sendo que os primeiros são os chamados de *Desenho* ou escolha ótima dos componentes, e os segundos são os chamados de *Operação* ou uso ótimo dos componentes do sistema.

A respeito dos problemas de desenho para a escolha dos componentes de um sistema de manufatura, é necessário um estudo detalhado da indústria da qual é conformante. Esse estudo é realizado mediante a solução dos seguintes problemas:

- Problema de organização, relacionado geralmente com a escolha das peças a serem fabricadas.
- Seleção dos componentes do SMF.
- Seleção do sistema de manipulação de material.
- Seleção do sistema de *fizadores e paletes*.
- Seleção do sistema computacional para controle.
- Desenho (lay-out) e integração dos sistemas acima referenciados.

II.7.1 Problemas Operacionais

Com relação ao melhor uso dos componentes do SMF e considerando-se o elevado custo do mesmo, é necessário obter uma boa taxa de retorno do investimento o que pode ser atingido mediante a solução dos seguintes problemas:

- Planejamento.
- Grupamento.
- Balanceamento da capacidade de trabalho das máquinas. (carga de máquina).
- Seqüenciamento.

Estes problemas serão considerados nos próximos capítulos.

II.7.2 Critérios de Otimalidade nos Problemas Operacionais

Com a finalidade de se fazer um melhor uso do sistema, um critério de otimalidade tem que ser predeterminado. Compete ao tomador de decisões propor o critério de otimalidade; o que, depende do tipo de problema a ser resolvido e em geral à política gerencial da empresa que está se administrando.

Veremos no Capítulo VI, por exemplo, que o critério de otimalidade tem a ver com um menor inter-relacionamento entre os grupos a se formarem. No Capítulo V que trata da alocação de tarefas e ferramentas nas máquinas é considerado um critério de distância a ser percorrido pelas peças antes, logo depois e durante o processo de usinagem; considera-se também um critério chamado de balanceamento de carga das máquinas como feito no trabalho de BERRADA and STECKE [8].

Num estudo feito por SCHRIBER and STECKE [40] à respeito do uso da Programação Matemática e da Simulação, eles propõem um critério de “maximizar o uso das máquinas”, garantindo assim um mínimo do tempo ocioso.

Um critério bem mais simples é usado por STECKE and TOCZYLOWSKI [43]: Maximizar o lucro.

Alguns desses critérios individuais serão usados e analisados com mais detalhes nos capítulos seguintes.

É evidente que alguns critérios de otimalidade poderiam ser de tipo multi-objetivo, isso depende do tomador de decisão, motivo pelo qual não temos

usado esses modelos específicos que poderiam aparecer. Uns dos parâmetros que poderiam ter sido usados é o prazo da entrega das mercadorias mas que a condição da flexibilidade do sistema poderia superar numa primeira instância ou simplesmente acrescentar a condição como sendo mais uma restrição. Um comentário amplo à respeito, é feito no Capítulo V.

Capítulo III

Plano de Processamento

Neste Capítulo iniciamos a descrição e modelagem dos Problemas Operacionais assinalados na Seção II.7.1 e que permitem um melhor uso dos sistemas de manufatura na produção de produtos discretos, ou seja peças isoladas ou por pequenos lotes. Considere-se então, a fabricação de um tipo de peça qualquer, a que pode ser obtida usando alguns tipos de processos, como por exemplo:

- A partir de um pedaço de matéria prima mediante:
 - cortes ou retirada de parte do material (Figura III.1).
 - furos.
 - processos de forja.
- Usinagem de uma peça pre-fabricada por um processo de fundição.

III.1 Escolha do Plano de Processamento

Foi desenvolvido nesta tese um modelo geral para a produção de um único tipo de peça, a partir de um volume de matéria prima, mediante cortes para a retirada de pequenos volumes. O problema abordado é chamado de Determinação de um Plano de Processamento e o modelo é válido ainda para os processos de usinagem.

III.1.1 Produção de uma peça

A tarefa da produção da peça P , é descrita a seguir.

- A peça P é obtida mediante a retirada de um conjunto de volumes v_1, v_2, \dots, v_m de uma peça \mathcal{P} de matéria prima.
- Cada volume a ser retirado é definido pela porção de matéria prima que a peça \mathcal{P} perde, mediante um corte, um furo ou alguma ação das máquinas.
- Os volumes v_i são retirados individualmente ou por grupos mediante uma operação elementar O_j .
- Cada operação elementar é definida como sendo a operação ou tarefa de retirar uma porção de matéria prima de \mathcal{P} usando um conjunto de ferramentas apropriadas.
- Para cada peça e segundo a disponibilidade de máquinas e ferramentas existem várias operações elementares.

Uma vez definidos os volumes v_1, \dots, v_m e considerando a disponibilidade das máquinas e ferramentas são definidas as operações elementares, sendo que algumas delas farão parte do Plano de Processamento a ser tratado a seguir.

III.1.2 Plano de Processamento

Um Plano de Processamento é definido como um conjunto de operações elementares, visando realizar uma tarefa total, por exemplo, remover todos os volumes definidos para a produção de uma peça e seguindo um critério de otimalidade.

Seja a tarefa de retirar um conjunto de volumes $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ de uma peça de matéria prima. Considere, também, as seguintes notações que serão utilizadas para a formulação do Plano de Processamento:

- $V = \{v_1, \dots, v_m\}$ é o conjunto de todos os volumes a serem removidos numa dada peça.

- $V_j = \{v_{j1}, v_{j2}, \dots, v_{jk}\}$, $k \leq m$ é o sub-conjunto de k volumes de material que pode ser removido por um mesmo conjunto de ferramentas, ou seja numa única operação elementar. Note que $V = \cup_{j=1}^n V_j$, onde n é o número total das possíveis operações elementares, ou equivalentemente, são as possíveis arrumações (set-ups) das máquinas.
- $F_j = \{f_{j1}, \dots, f_{js}\}$ é o conjunto de s ferramentas para remover V_j .

Uma operação elementar é redefinida agora, como sendo:

$$O_j = \{V_j, F_j\}$$

Um exemplo

Considere a Figura III.1 representando a produção da peça “(b)” a partir da matéria prima “(a)”. O problema é dimensionado no espaço de três dimensões mas com finalidade didática consideramos uma representação da peça em duas dimensões.

A peça “(c)” (ou seja “b”) é obtida a partir da peça “(a)” de matéria prima, retirando os volumes assinalados em “(d)”, isto é: $V = \{v_1, \dots, v_5\}$.

Dependendo do tipo do ferramental e máquinas disponível, a retirada desses cinco volumes poderia ser feito como indicado em “(e)”, ..., “(h)”, ou alguma combinação adequada.

Pode-se considerar então, segundo nossa notação:

- $V_1 = \{v_1\}, \dots, V_5 = \{v_5\}$
- $V_6 = \{v_1, v_2\}, \dots$
- $V_n = \{v_2, v_3, v_4\}$

Cada operação V_j tem um custo κ_j definido a seguir:

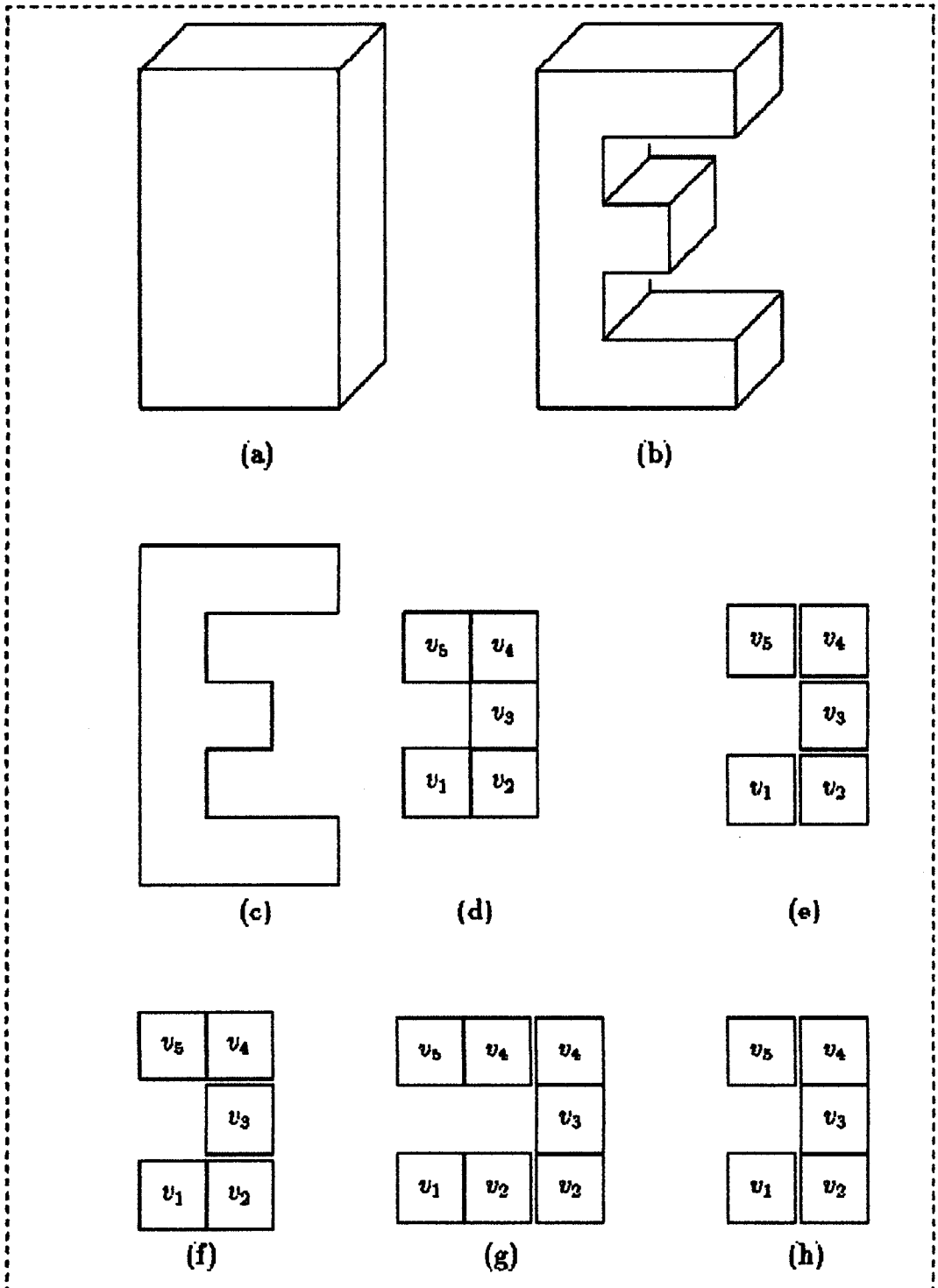


Figura III.1: Plano de Processamento

Custo da Operação Elementar

Cada operação elementar V_j tem um custo de set-up, de operação ou de algum outro parâmetro para serem considerados no critério de otimalidade. Esse custo será representado por: $\kappa_j, j = 1, \dots, n$.

Para definir cada operação elementar chamado também de esquema de corte, monta-se a matriz de incidência A_{mn} onde m é o número total de volumes a ser retirado e n é o número total de subconjuntos de volumes V_j que podem ser removidos na respectiva operação elementar $O_j, j = 1, \dots, n$.

Tem-se então $A = [a_{ij}]_{mn}$ onde :

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se } v_i \in V_j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Isto é, $a_{ij} = 1$ se o volume de material i for removido na operação elementar O_j . Com isto, cada coluna de A corresponde a um esquema de corte ou operação elementar.

Define-se o vetor $x \in R^n$ tal que $x^t = (x_1, x_2, \dots, x_n)^t$ onde cada ordenada corresponde à decisão de se realizar ($x_j = 1$), ou não, ($x_j = 0$) o corte j definido pela operação elementar O_j . Esta escolha é feita com o objetivo de se minimizar o custo total do plano de processamento.

III.1.3 Problema de Recobrimento de Conjuntos na escolha do Plano de Processamento

O problema considerado pode ser descrito, resumidamente, da seguinte forma:

1. Tem-se m volumes de matéria-prima (v_1, v_2, \dots, v_m) que devem ser retirados de uma determinada peça.
2. $O = \cup_{j=1}^n O_j$ são as operações elementares possíveis de serem feitas.
3. A questão é determinar um subconjunto de O denotado por $P = \cup_{j=1}^p O_j$ que minimize o custo total de produção de tal forma que todos os volumes definidos em V sejam removidos, ou seja, $\cup_{j=1}^p V_j = V, p \leq n$.

Como deverá ser determinado um subconjunto de O , tal que $\cup_{j=1}^p V_j = V$ e o objetivo é minimizar os custos, este problema de determinação do Plano de Processamento pode ser formulado como um Problema de Recobrimento, o que é mostrado a seguir:

$$\min \quad \sum_{j=1}^n \kappa_j * x_j \quad (\text{III.1})$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} * x_j \geq 1; \quad i = 1, \dots, m \quad (\text{III.2})$$

$$x_j \in \{0, 1\}; \quad j = 1, \dots, n. \quad (\text{III.3})$$

Ou equivalentemente:

$$\min \quad \kappa^t x \quad (\text{III.4})$$

$$\text{s.a.} \quad Ax \geq e \quad (\text{III.5})$$

$$x_j \in \{0, 1\}; \quad j = 1, \dots, n. \quad (\text{III.6})$$

Entretanto, algumas restrições necessárias à modelagem de um problema real não foram consideradas, como por exemplo limites com relação ao número de máquinas e ferramentas. Mas a formulação proposta permite que estas novas restrições sejam introduzidas sem alterar sua estrutura. O problema acima modelado é resolvido usando a heurística proposta por CHVATAL [13]

III.1.4 Ordenação Topológica

Após se obter um Plano de Processamento ótimo, é necessário que seja estabelecida a seqüência na qual as operações elementares deverão ser realizadas.

Para tanto, é indispensável que se analise a condição de que, dependendo das restrições de precedência, alguns volumes só poderão ser removidos após a retirada outros. Ou seja:

- $O_i \prec O_j \Leftrightarrow$ os volumes que impediam a execução de O_j foram retirados por O_i .

Aqui é definida uma ordenação topológica para as operações elementares.

SZWARCFITER [44] propõe um algoritmo de ordenação topológica baseado na teoria dos grafos, que foi adaptado para este problema. Este algoritmo adaptado é apresentado a seguir:

Início

dados de entrada

Seqüência de operações elementares $O = \cup_{j=1}^p O_j$;

Precedência da retirada dos volumes

para $j=1, \dots, p$; efetuar

escolher O_j que não tenha precedência em O

retirar de O a operação elementar O_j e as restrições de precedência que consideravam seus elementos como antecedentes

definir $OT_j = O_j$;

fim

Observação

Neste capítulo tem sido modelado o problema da escolha de um Plano de Processamento para a fabricação de um único tipo de peça. No Capítulo IV será considerado o problema de sequenciar a fabricação de um conjunto de tipos de peças com planos predeterminados. Agora apresentaremos um novo tipo de problema que considera simultaneamente a escolha do plano de processamento para cada peça e a seqüência da execução dos planos.

III.2 Multi-escolha nos planos de Processamento

Se tivermos um conjunto de tipos de peças, cada uma com um plano de processamento já escolhido, o problema de gerenciamento do processo de manufatura torna-se um problema de Seqüência de Processamentos que é considerado no Capítulo IV.

Consideremos agora um conjunto de m tipos de peças cada um com um conjunto de planos de processamento para escolher um deles. Na seção anterior foi considerada a escolha do plano de processamento para um tipo de peça de maneira isolada. Seja, então, o problema da escolha do plano de processamento para cada tipo de peça mas considere-se também a inter-relação entre os planos segundo o

ferramental usado. O critério de otimalidade que será usado é o de menor custo de set-up para o grupo total das peças.

Se consideramos o setup relacionado com o processamento de um plano dado, ele será função das ferramentas a serem usadas pelo plano e das ferramentas que foram usadas no processamento anterior, isto gera um custo de troca que deve ser definido para cada par de planos mediante a chamada "distância de Hamming" c_{ij} , conforme será explicado na Seção IV.1.1.

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^n \lambda_k * \delta(b_{ki}, b_{kj}) \quad (\text{III.7})$$

Onde c_{ij} corresponde ao custo de troca do ferramental depois de ter sido executado o plano i e antes de ser executado o plano j .

III.2.1 Uma formulação em Grafos para o problema de multi-escolha

Seja a seguinte notação:

- $K = \{k_1, \dots, k_m\}$ o conjunto de tipos de peças a serem manufaturadas.
- N_k é o conjunto de planos de processamento para cada tipo de peça k em K .
- N é o conjunto dos planos de processamento, onde

$$N = \bigcup_{k \in K} N_k$$

- A é o conjunto dos pares de planos (n_k, n_l) que correspondem a N_k e N_l , sendo que $k \neq l$ e que $(k, l) \in K \times K$.
- c_{ij} é a distância (custo) de Hamming para todo par (i, j) em A .
- ϕ_i é o custo de processamento do plano P_i .

Da definição de $N_k, \forall k \in K$, e da definição do conjunto A , temos então um grafo completo m -partite $G = (N, A)$, onde de cada m -parte N_k , temos que escolher um único nó S_k .

Seja então $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$, o conjunto de planos escolhidos, denote-se por $A^S \subseteq A$ ao conjunto dos arcos de extremos nos pontos de S .

Um critério de otimalidade para a escolha do conjunto S e portanto para a escolha do conjunto dos arcos A^S é de *Minimizar* a equação a seguir:

$$\sum_{(i,j) \in A^S} c_{ij} + \sum_{i \in S} \phi_i \quad (\text{III.8})$$

Segundo esse critério de otimalidade o nosso modelo da escolha dos planos de processamento é interpretado como o da obtenção do **Máximo Clique** (S, A^S) de custo mínimo no grafo m -partite (N, A)

III.2.2 Uma formulação do problema em Programação Inteira

Define-se:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{se plano } i \text{ é selecionado.} \\ 0, & \text{senão.} \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se planos } i \text{ e } j \text{ são selecionados.} \\ 0, & \text{senão.} \end{cases}$$

O problema é o de escolher um plano de processamento para cada conjunto de planos correspondentes a um tipo de peça com o critério de otimalidade de que o somatório das distâncias e dos custos dos planos escolhidos sejam minimizados. O modelo é:

$$\text{Minimizar } \frac{1}{2} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} * y_{ij} + \sum_{i \in N} \phi_i * x_i \quad (\text{III.9})$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{i \in N_k} x_i = 1, \quad k \in K \quad (\text{III.10})$$

$$x_i + x_j - 1 \leq y_{ij}, \quad (i, j) \in A \quad (\text{III.11})$$

$$x_i \in \{0, 1\}, \quad i \in N \quad (\text{III.12})$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad (i, j) \in A \quad (\text{III.13})$$

A restrição III.10 garante que para cada tipo de peça será escolhido um único plano de processamento e a restrição III.11 garante a compatibilidade entre cada dois pares de planos escolhidos.

III.2.3 Solução do Problema modelado

Esse tipo de problema não pode ser resolvido exatamente como sendo um problema de Programação Inteira, por causa da sua elevada complexidade computacional, sendo resolvido por KUSIAK and FINKE [32] usando a heurística dada a seguir:

Algoritmo KUSFIN

O algoritmo é dado por duas rotinas: CONSTRU e MUDA, o primeiro constrói uma solução viável e a segunda melhora a solução já obtida.

CONSTRU

Seja a seqüência dos conjuntos N_1, \dots, N_m dos planos de processamento de cada tipo de peça $k \in \{1, \dots, m\}$. deseja-se construir a seqüência $S = \{S_1, \dots, S_m\}$ a partir da seqüência dos conjuntos, ou seja, primeiro escolhemos S_1 em N_1 , logo S_2 em N_2 e assim até S_m em N_m .

No estagio k , seja a subseqüência $S^{(k)} = \{S_1, \dots, S_k\}$ já escolhida, o algoritmo é dito a seguir:

Passo 0 Ponha $S^0 = \emptyset$, $k = 1$

Passo 1 (Seleção de $S_k \in N_k$)

Escolha S_k com custo $\phi_k(S_k)$, tal que:

$$\phi_k(S_k) = \text{Minimo}_i \left\{ \phi_i + \sum_{j \in S^{(k-1)}} c_{ij} \right\}, \quad \forall i \in N_k$$

Passo 2 Faça:

$$S^{(k)} = S^{(k-1)} \cup \{S_k\}$$

Passo 3 • Se $k = m$, faça $S = S^k$, FIM.

• senão, $k = k + 1$, va para Passo 1.

O Passo 1 faz uma escolha do melhor dos planos no conjunto N_k , considerando fixos os planos já escolhidos, ou seja a escolha de cada S_k depende das escolhas feitas no Passo 1 das iterações anteriores e depende também da escolha original da seqüência dos N_i .

Precisa-se então da rotina chamada de MUDA para avaliar a escolha já feita e melhorá-la. A rotina MUDA fará uma escolha do tipo: o que acontece se na iteração k não tivesse sido escolhido o plano S_k ? . A rotina proposta é dada a seguir:

MUDA

Passo 0 $l = 0, k = 1$.

Passo 1 (Mudança em N_k)

Obter $T_k \in N_k$ com custo ϕ'_k tal que:

$$\phi'_k = \text{Minimo}_i \left\{ \phi_i + \sum_{j \in S - \{S_k\}} c_{ij} \right\}, \quad \forall i \in N_k$$

se $T_k \neq S_k$, faça: $S = S - \{S_k\} \cup \{T_k\}$, $l = l + 1$.

Passo 2 Se $k = m, l = 0$, FIM

Se $k = m, l \geq 0$, va para Passo 0.

Se $k \leq m$, faça: $k = k + 1$, va para Passo 1.

Segundo dito acima a respeito da escolha que é feita no Passo 1 da rotina CONSTRU a partir de uma seqüência N_1, \dots, N_m qualquer, faz-se-á necessária um critério para a escolha dessa seqüência. Temos então:

Algoritmo KUSFIN

- PASSO 1** Gerar aleatoriamente a seqüência N_1, \dots, N_m
- PASSO 2** Usar CONSTRU para gerar $S = \{S_1, \dots, S_m\}$
- PASSO 3** Usar MUDA para melhorar a escolha feita de S .

Capítulo IV

Seqüenciamento dos Processos

No capítulo III foi apresentado um modelo para a escolha de um plano de processamento para um tipo isolado de peça e para o processamento inter-relacionado de um conjunto de tipos de peças. Seja agora o seguinte problema: obter uma seqüência na execução dos planos já escolhidos, respectivamente, para cada tipo de peça considerada.

IV.1 Problema de seqüenciamento dos Planos de Processamento

Considere-se a produção de m conjuntos de tipos de peças diferentes, sendo que cada tipo de peça “ i ” é produzido, respectivamente, pelo plano de processamento P_i , sendo: $i = 1, \dots, m$.

A mudança de um plano de processamento de uma peça para outro, implica na mudança de algumas ferramentas ou máquinas ou seja em um processo de set-up para a execução do novo plano de processamento. Esse processo de set-up acarreta em um custo que é chamado por alguns autores de *custo de troca*.

IV.1.1 Custo do set-up na mudança dos planos de processamento

Considere os conjuntos de tipos de peças “i” e “j” a serem produzidos, sucessivamente, mediante os planos de processamento P_i e P_j , nessa ordem. O set-up correspondente para a execução do segundo plano tem um custo c_{ij} , que depende das ferramentas e máquinas usadas pelo primeiro plano.

Para definir este custo de set-up, considere-se a matriz $B = [b_{ki}]_{nm}$ onde as n linhas servem para representar as ferramentas ou máquinas disponíveis e as m colunas servem para representar os planos de processamento correspondentes aos tipos de peças a serem produzidas. Os elementos da matriz são definidos a seguir:

$$b_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{se a ferramenta ou máquina } k \text{ for usada em } P_i. \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Define-se também o fator δ que representa a necessidade ou não do uso de uma dada ferramenta para a execução do novo plano de processamento.

$$\delta(b_{ki}, b_{kj}) = \begin{cases} 1 & \text{se } b_{ki} \neq b_{kj}. \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

No caso de $b_{ki} \neq b_{kj}$, sendo que $b_{ki} = 0$ e $b_{kj} = 1$, isto significa que a ferramenta ou máquina k deverá ser instalada, pois não estava sendo usada, quando da transição do plano de processamento P_i para o P_j . Similarmente, no caso de ter $b_{ki} = 1$ e $b_{kj} = 0$, significa que a ferramenta ou máquina k deverá ser retirada logo após ter sido usada no P_i , pois não mais será útil em P_j .

Usando as definições acima, fica também definido o custo de troca ou custo de set-up, que em termos gerais é chamado de “*distância de Hamming*”:

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^n \lambda_k * \delta(b_{ki}, b_{kj}) \quad (\text{IV.1})$$

Onde os λ_k são dados que correspondem aos custos reais de troca de cada ferramenta k .

IV.1.2 O modelo de scheduling

Considere os Planos de Processamento P_i , ($i = 1, \dots, m$.) a serem executados com o critério de minimizar o custo total de set-up. Esses planos serão executados em alguma seqüência a ser determinada. Essa seqüência deverá preencher os seguintes critérios:

- Ter o menor custo total de set-up.
- Cada plano deverá ser executado uma única vez.
- Todos os planos devem ser executados.

Esses requerimentos do problema são exatamente os requerimentos do conhecido *Problema do Caixeiro Viajante (PCV)* no qual tem que se percorrer um conjunto de m cidades (planos de processamento) uma única vez e minimizando a distância total (custo de troca total). A distância entre as cidades i e j corresponde ao custo de troca c_{ij} que representa a mudança do ferramental quando a transição da execução do plano P_i para a execução do plano P_j .

Para a formulação do modelo considere-se a seguinte variável de decisão x_{ij} sendo $i = 0, 1, \dots, m$. e $j = 1, \dots, m, m + 1$.

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se } P_i \text{ e } P_j \text{ são consecutivos.} \\ 0 & \text{senão.} \end{cases}$$

Para garantir que cada cidade será visitada uma única vez (início de execução do plano), temos a seguinte restrição:

$$\sum_{i=0}^m x_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, m+1. \quad i \neq j. \quad (\text{IV.2})$$

Similarmente, para garantir que o viajante sairá uma única vez de cada cidade (termino da execução do plano), temos:

$$\sum_{j=1}^{m+1} x_{ij} = 1, \quad i = 0, 1, \dots, m. \quad i \neq j. \quad (\text{IV.3})$$

O critério de otimalidade de minimizar a distância total, em nosso caso é de minimizar o custo total de set-up dado por:

$$\sum_{i=0}^m \sum_{j=1, j \neq i}^{m+1} c_{ij} * x_{ij} \quad (\text{IV.4})$$

Onde o custo c_{ij} é definido pela equação IV.1.

O modelo é então:

$$\begin{array}{ll} \text{Minimize} & \sum_{i=0}^m \sum_{j=1, j \neq i}^{m+1} c_{ij} * x_{ij} \\ \text{s.a.} & \sum_{i=0}^m x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, m+1, \quad i \neq j \\ & \sum_{j=1}^{m+1} x_{ij} = 1 \quad i = 0, \dots, m, \quad i \neq j \\ & \sum_{i \in U, j \in P \setminus U} x_{ij} \geq 1 \quad U \subseteq P = \{P_1, \dots, P_m\} \quad \Phi \neq U \\ & x_{ij} \in \{0, 1\} \end{array}$$

Esse modelo é muito conhecido na literatura. O PCV, embora seja do tipo NP-completo é um dos problemas mais estudados na literatura afim.

Considerando que no PCV podem ser acrescentadas restrições de precedência na visita das cidades, o que equivale a ter restrições de precedência na execução de algumas tarefas, apresentamos a seguir uma nova formulação baseada no trabalho de WONG [47] que considera de maneira simples as restrições de precedência.

IV.1.3 O Problema do Caixeiro Viajante (PCV) Modelado como um Problema de Fluxo em Rede de dois Produtos

Na formulação do problema de seqüenciamento das tarefas num SMF tem-se que considerar duas características básicas:

1. Dependência dos custos de troca.
2. Restrições de precedência.

A primeira característica tem sido usada para a formulação do problema como sendo um PCV o que já é um problema NP-completo. A segunda característica faria com que o problema ficasse muito mais difícil de ser modelado e difícil de ser resolvido. Essa dificuldade é superada modelando-se o problema como sendo um problema de fluxo numa rede com dois produtos distintos.

Considere dois produtos P e Q distintos. Considere também x_{ij} e y_{ij} como os fluxos de P e Q respectivamente que saem de i e chegam em j . Além das m tarefas, seja também a tarefa fictícia de não fazer nada, representando o set-up vazio ou inicial. Correspondentemente a essa tarefa está dado o plano P_0 que não tem requerimento de ferramentas. Será considerado, então um conjunto de $m + 1$ tarefas.

Considera-se que cada nó demandará uma unidade do produto P e ofertará uma unidade do produto Q, sendo que o produto P terá uma oferta inicial de n unidades e o produto Q terá oferta nula.

Seja s um vértice inicial e arbitrário. Considere p_i e q_i como a quantidade dos produtos P e Q respectivamente em cada nó i , sendo: $i = 1, \dots, m$. As quantidades p_i e q_i são definidas a seguir:

$$p_i = \begin{cases} m & \text{para } i = s. \\ -1 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$q_i = \begin{cases} -m & \text{para } i = s. \\ 1 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Para que se tenha um fluxo de rede viável em cada nó i , é necessário que as restrições abaixo sejam cumpridas:

$$\sum_{j=0}^m x_{ij} - \sum_{j=0}^m x_{ji} = p_i, \quad i = 0, 1, \dots, m \quad (\text{IV.5})$$

$$\sum_{j=0}^m y_{ij} - \sum_{j=0}^m y_{ji} = q_i, \quad i = 0, 1, \dots, m \quad (\text{IV.6})$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad y_{ij} \geq 0 \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 0, 1, \dots, n \quad (\text{IV.7})$$

Com a viabilidade garantida, deve-se determinar que cada nó seja precedente de um único nó e sucessor também de um único nó. Isto é feito pelas seguintes restrições:

$$\sum_{j=0}^m (x_{ij} + y_{ij}) = m \quad i = 0, 1, \dots, m, \quad (\text{IV.8})$$

$$x_{ij} + y_{ij} \in \{0, m\} \quad i = 0, 1, \dots, m, \quad j = 0, 1, \dots, n \quad (\text{IV.9})$$

As restrições (IV.8) obrigam que o somatório dos fluxos de P e Q que saem de cada nó i seja igual a m . Mas as restrições (IV.9) determinam que a soma dos fluxos de P e Q em cada arco seja 0 ou m , o que garante que na solução, apenas um arco que sai de i poderá assumir um fluxo de valor m ; os restantes serão iguais a zero (arcos não considerados na solução). Portanto, fica claro que de cada vértice sai apenas um arco.

Logo, as restrições (IV.5), (IV.6), (IV.7), (IV.8) e (IV.9) definem um caminho hamiltoniano.

Pela restrição (IV.9), $(x_{ij} + y_{ij})/m = 0$ ou 1 , tem-se então a seguinte expressão linear para o custo total, que deve ser minimizado:

$$\min \frac{1}{m} \sum_i \sum_j (x_{ij} + y_{ij}) * c_{ij} \quad (\text{IV.10})$$

Outra análise necessária é com relação à precedência.

No seqüenciamento dos planos de processamento existem relações de precedência, ou seja, um determinado Plano de Processamento P_j só poderá ser realizado após o término de outro Plano P_i .

A relação de precedência será denotada por $P_i \mapsto P_j$.

É necessário, então, que sejam incluídas no PCV restrições de precedência.

Considere, para o produto P a seguinte relação: $P_u \mapsto P_v$. Os fluxos x_{ij} e y_{ij} representam o número de nós que devem ser analisados e o número de nós que já foram analisados, respectivamente.

Isto significa que o fluxo x_{vj} deverá ser pelo menos uma unidade maior que o fluxo x_{uj} , pois o processamento de P_v só poderá ocorrer se P_u já tiver sido realizado.

Tem-se assim as restrições abaixo:

$$\sum_j x_{uj} - \sum_j y_{vj} \geq 1, \quad i = 1, \dots, m \quad (\text{IV.11})$$

Assim, o problema é formado pelas restrições IV.5 até IV.11.

Capítulo V

Designação

Tarefa-máquina-ferramenta

O problema de designação tarefa-máquina-ferramenta ou simplesmente chamado de Problema de Carga das Máquinas, considera a alocação das tarefas numa máquina ou conjunto de máquinas as quais são provistas de magazine com um determinado número de posições para ferramentas e com a possibilidade de usar ferramentas de um conjunto fixo delas.

Em termos das tarefas pode se considerar que elas fazem parte da fabricação de um tipo de peça ou de um conjunto de tipos de peças. Esse conjunto de tipos de peças é geralmente obtido a partir de um processo de seleção como dito no Capítulo VI.

Embora os prazos são fatores importantes para o gerenciamento da fábrica e a manutenção do prestígio empresarial, não foi achado na literatura algum modelo que considere esse fator restritivo ou seja que considere o parâmetro "prazo" como sendo uma restrição em termos matemáticos. Esse parâmetro é basicamente considerado no planejamento da produção a longo prazo.

Este tipo de problema é modelado para cada caso particular pois a designação das tarefas e as ferramentas das máquinas, depende, em geral, do lay-out do sistema e particularmente dos tipos das máquinas.

V.1 Um modelo multi-máquina

Considere-se um SMF que possui um conjunto de m máquinas não necessariamente idênticas, mas com a possibilidade de executar um conjunto de operações comuns. As peças a serem processadas são transportadas, usando um sistema automático de manipulação, entre o *buffer* de armazenamento e cada uma das máquinas, antes e depois de serem executadas as operações em máquinas diferentes. Considera-se também que o deslocamento da peça pode ser feita, mesmo no caso de ter que executar duas operações consecutivas numa mesma máquina, se houver necessidade de uma remontagem (“refixturing”) na respectiva bandeja (“pallets”).

Este modelo é uma generalização de aquele que é apresentado por LASHKARI et.al [33] com quatro MCN de tipo universal, munidas de magazines com 15 até 25 posições para as ferramentas e com um buffer que pode armazenar até 30 peças simultâneamente.

Existem restrições na disponibilidade de algumas ferramentas, e nas quantidades de posições nas máquinas para encaixar as ferramentas. Seja então as seguintes definições:

m número de máquinas no SMF.

r número de peças a serem processadas.

O_i número de operações na peça i .

(i, k) denominativo da operação k na peça i .

U_j distância de retorno desde a máquina j até o armazém.

L_j distância de chegada desde o armazém até a máquina j .

t_j número de posições (furos) para ferramentas na máquina j .

$x_{ijk} = 1$ se a peça i é alocada na máquina j para ser executada a operação k .

$x_{ijk} = 0$ senão.

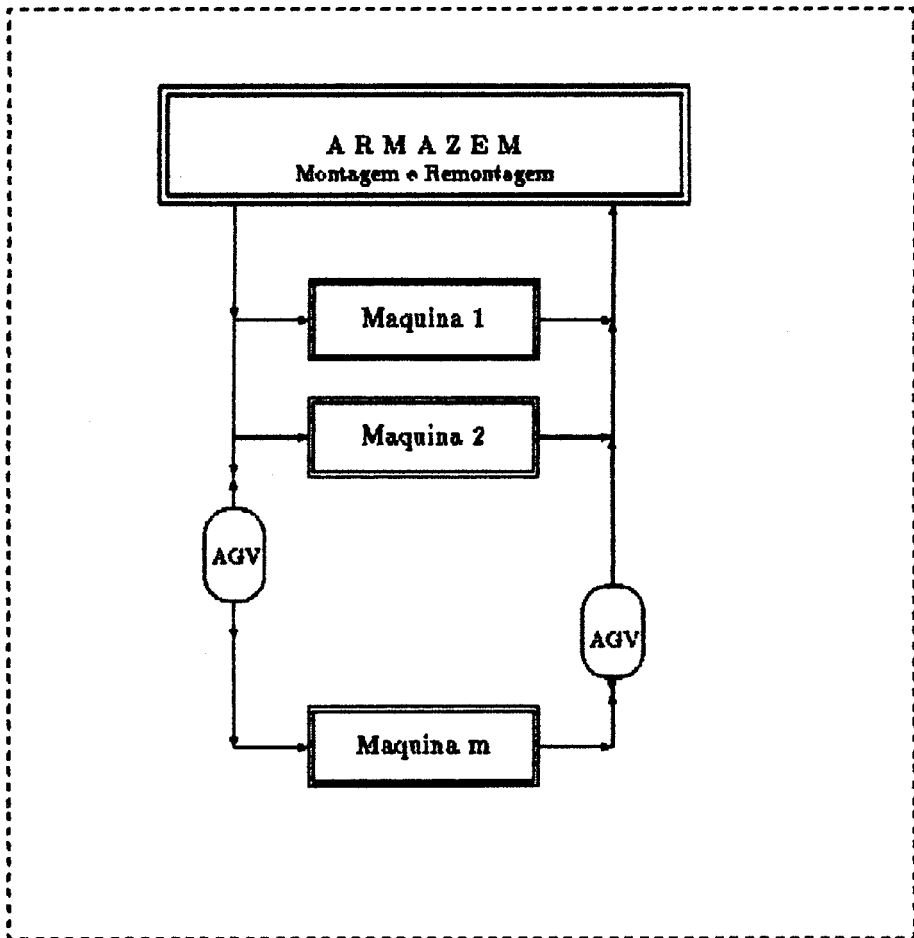


Figura V.1: Lay-out para o problema

$F(i, k, p, q) = 1$ se depois de ser executada a operação $k-1$ na máquina p faz-se necessária uma remontagem da peça i antes de ser executada a operação k na máquina q .

$F(i, k, p, q) = 0$ senão.

Sejam também as seguintes considerações:

- um conjunto finito de ferramentas, é disponível.
- cada operação é designada para uma única máquina.
- não se pode usar duas ferramentas iguais numa mesma máquina.
- não é permitida a transferência de ferramentas entre máquinas.
- para cada peça i , é conhecida uma seqüência de operações e as ferramentas requeridas.

V.1.1 Um critério de otimalidade

Considerando a configuração do SMF definido acima, no qual cada peça tem que se deslocar entre o armazém e as máquinas, o critério de otimalidade escolhido para a designação de tarefas-máquina é a de minimizar o somatório das distâncias percorridas pelas peças.

Seja a máquina j que executa no mínimo uma das operações consecutivas k e $k + 1$ numa peça i , então temos:

$$(x_{ijk} - x_{ij,k+1})^2 = \begin{cases} 1 & \text{se e somente uma das operações } k \text{ ou } k + 1 \text{ é} \\ & \text{executada na máquina } j. \\ 0 & \text{se nenhuma ou as duas operações são executadas} \\ & \text{na máquina } j. \end{cases}$$

Portanto, o número de mudanças de máquina de cada peça i , está dado por:

$$(S1)_i = \sum_{k=1}^{O_i-1} \sum_{j=1}^m (x_{ijk} - x_{ij,k+1})^2.$$

Seja k uma operação que não é a última. A distância total percorrida pela peça i depois de ter sido executada a operação k e antes de voltar para o armazém, é dada por:

$$(S2)_i = \sum_{k=1}^{O_i-1} \sum_{j=1}^m (x_{ijk} - x_{ij,k+1})^2 * (x_{ijk} * U_j + x_{ij,k+1} * L_j).$$

A distância percorrida por cada peça antes de ser executada a primeira operação, é dada por:

$$(S3)_i = \sum_{j=1}^m (L_j * x_{ij1}).$$

A distância percorrida por cada peça depois de executada a última operação é dada por:

$$(S4)_i = \sum_{j=1}^m (U_j * x_{ijO_i})$$

Quando uma determinada peça tiver que sair da máquina para fazer uma remontagem (*refixturing*), mesmo no caso de que a próxima operação seja executada na mesma máquina, a distância adicional percorrida pela peça será dada por:

$$(S5)_i = \sum_{k=1}^{O_i-1} \sum_{j=1}^m x_{ijk} * x_{ij,k+1} * F(i, k+1, j, j) * (L_j + U_j).$$

Então a distância total percorrida por cada peça i , será dada por:

$$D_i = (S2)_i + (S3)_i + (S4)_i + (S5)_i$$

e a função objetivo está dada por:

$$\text{minimize} \quad \sum_{i=1}^r D_i$$

V.1.2 As restrições

Segundo as considerações do problema, da configuração do sistema, e mesmo segundo os critérios tecnológicos, temos as seguintes restrições:

a) Cada operação num determinado tipo de peça tem que ser designada para uma única máquina, temos:

$$\sum_{j=1}^m x_{ijk} = 1, \quad (V.1)$$

para cada par (i,k) .

E no caso de se ter a condição de que um determinado par (i_1, k_1) não pode ser designado na máquina j , temos a condição:

$$x_{i_1 j k_1} = 0. \quad (V.2)$$

b) Determinados pares $(i,k) \in G$ podem ser designados para uma única máquina j , temos então:

$$\sum_{j=1}^m \prod_{(i,k) \in G} x_{ijk} = 1. \quad (V.3)$$

c) Uma consideração importante está relacionada com a limitação das posições (orifícios) no magazine de ferramentas e com o uso em comum de determinadas ferramentas por um conjunto de pares (i,k) de tipos de peça-operação.

Seja n_{ij} o número de pares peça-operação (i, k_s) , $(s = 1, \dots, n_{ij})$ que usam uma determinada ferramenta l montada na máquina j , ($n_{ij} \geq 2$). Define-se a seguir, as variáveis artificiais d_{ljk} de tipo 0-1 :

$$d_{ljk} = \begin{cases} 1 & \text{se no máximo } h+1 \text{ das variáveis } x_{i,jk_s} \text{ são não zeros} \\ 0 & \text{senão} \end{cases}$$

sendo $h = 1, 2, \dots, (n_{ij} - 1)$, o que pode ser representado para cada i e para cada j com a seguinte restrição:

$$n_{ij} \sum_{s=1}^{n_{ij}-1} d_{ljs} - (n_{ij} - 1) \sum_{s=1}^{n_{ij}} x_{i,jk_s} \leq 0. \quad (V.4)$$

Define-se q_{ijk} como sendo o número de ferramentas que são usadas pela máquina j para efetuar a operação k na peça i ou seja se $x_{ijk} = 1$, portanto $\sum_{i,k} q_{ijk} * x_{ijk}$ é o número de ferramentas usadas pela máquina j para desenvolver todas as operações designadas nela.

Considere-se o número inteiro b_{ljk} como sendo o número de posições (orifícios) poupados no magazine de ferramentas por causa do uso da mesma ferramenta em várias operações, ou seja, quando $d_{ljk} = 1$, então $\sum_{h=1}^{n_{lj}-1} d_{ljk} * b_{ljk}$ é o número de posições poupadas no processamento das operações numa máquina j . Considere-se também o conjunto T_j , ($l \in T_j$) dos índices das ferramentas que geram a poupança de posições no magazine, então, considerando que t_j é o número máximo de posições no magazine da máquina j , temos a restrição a seguir:

$$\sum_{i=1}^r \sum_{k=1}^{O_i} q_{ijk} * x_{ijk} - \sum_{l \in T_j} \sum_{h=1}^{n_{lj}-1} d_{ljk} * b_{ljk} \leq t_j. \quad (V.5)$$

d) Suponhamos que para um dado tipo de ferramentas v exista um número restrito delas. Para cada restrição r das ferramentas define-se as variáveis δ_{jr} , ($j = 1, \dots, m$) de tipo 0-1. Considere-se um número v_r de ferramentas de um dado tipo e que lidam com os pares $(i_1, k_1), \dots, (i_n, k_n)$ de peças-operação, então consideremos a restrição:

$$\sum_{l=1}^n x_{i_l, j, k_l} \leq n * \delta_{jr}, \quad \delta_{jr} \in \{0, 1\} \quad (V.6)$$

que permite obter a restrição:

$$\sum_{j=1}^m \delta_{jr} \leq v_r. \quad (V.7)$$

que limitarão o número de máquinas que são usadas pelos pares peça-operação relacionados com a respectiva disponibilidade de ferramentas.

Logo o modelo está dado pela minimização da função objetivo $\sum_{i=1}^r D_i$ sujeito as restrições V.1, V.2, V.3, V.4, V.5, V.6 e V.7.

V.1.3 Resolução do problema

Considerando a existência de pacotes computacionais para a resolução de programas lineares inteiros 0-1 é evidente de que alguma técnica de solução do problema considere estratégias de linearização o que é feito

usando as propostas de WATTERS [46] e GLOVER and WOLSEY [20] apresentada a seguir:

Se o modelo for o seguinte:

$$\begin{aligned} \text{Maximize } f(x) &= \sum_{k=1}^p c_k T_k \\ \text{sujeito a: } \sum_{k=1}^{p_i} a_{ik} T_{ik} &\leq b_i \quad i = 1, \dots, m \\ x &\in \{0, 1\}^n \end{aligned}$$

e onde:

$$\begin{aligned} T_k &= \prod_{j \in N_k} x_j, \quad N_k \subseteq N = \{1, \dots, n\}, \quad k = 1, \dots, p \\ T_{ik} &= \prod_{j \in N_{ik}} x_j, \quad N_{ik} \subseteq N, \quad k = 1, \dots, p_i \quad i = 1, \dots, m \end{aligned}$$

a mudança das variáveis é feita segundo as seguintes regras:

1. Cada produto T_k ou T_{ik} é substituído pela nova variável binária x_{n+k} .
2. Para cada substituição acima, adicionar:
 - $\sum_{j \in N_k} x_j - x_{n+k} \leq |N_k| - 1$
 - $-\sum_{j \in N_k} x_j + |N_k| x_{n+k} \leq 0$.

Além do processo de linearização, existem outros métodos, que são referenciados por HANSEN [25], HANSEN et.al [26] entre os que pode-se mencionar os métodos algébricos, métodos enumerativos, métodos de penalização e métodos de planos de cortes.

V.2 Um Modelo em Redes Generalizadas

O problema a ser modelado agora, considerará um conjunto de tarefas, um conjunto de ferramentas e um conjunto de máquinas. O problema é similar ao da seção anterior mas o nosso enfoque na modelagem é baseado no conceito de Redes Generalizadas. Nesta seção apresentamos um modelo de fluxos em redes generalizadas para a resolução de um problema com as características similares à do modelo de LASHKARI et.al

[33]. Embora o modelo não é do tipo 0-1, indiretamente usa o critério de *sim* ou *não* que pode ser representado pelo uso das variáveis 0-1. As características básicas do problema são a de ter que alocar nas posições dos magazines das máquinas, as ferramentas, e a outra característica é a de obter o roteamento adequado da matéria prima ou das peças em processamento de produção.

V.2.1 Redes Generalizadas

Rede

Se $G = \langle V, E \rangle$ é um grafo e f é um fluxo no grafo, chama-se de *Rede* à terna $G_f = (V, E, f)$.

No caso de que o fluxo f não precisar ser identificado, poderemos usar a notação $G = (V, E)$.

Multiplicador do arco

Considere-se um arco (i, j) numa rede, chama-se de *Multiplicador do arco* ao número real positivo a_{ij} que transforma o fluxo f_{ij} que sai do nó i no fluxo $a_{ij} * f_{ij}$ e que entra no nó j .

É evidente que para um multiplicador $a_{ij} > 1$ o fluxo é “amplificado” quando passa pelo arco; se $a_{ij} < 1$ o fluxo é diminuído e no caso de que $a_{ij} = 1$ o fluxo permanece constante. Considerando que numa rede como antes definida, o fluxo torna-se constante ao passar pelo arco, podemos dizer que nesse caso existe um multiplicador do arco unitário.

Rede Generalizada

Chama-se de *Rede Generalizada* a uma rede $G = (V, E)$ com a condição de ter pelo menos um multiplicador de arco $a_{ij} \neq 1$ e nesse caso usaremos a notação $RG = (V, E)$.

V.2.2 O Problema de Fluxo numa Rede Generalizada

Seja uma rede generalizada RG e dois nós especiais: s e t , chamados respectivamente de *Fonte* e *Poço*. O problema do Fluxo na rede generalizada é aquele de obter os fluxos que saindo da fonte s cheguem ao poço t com o menor custo e considerando os limites de fluxo em cada arco.

Se denotamos com S_i ao conjunto dos nós sucessores do nó i e se denotamos com A_i ao conjunto dos nós antecessores, o modelo do problema é:

$$\text{Minimize } \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} * f_{ij}$$

s.a :

$$\sum_{j \in S_i} f_{ij} - \sum_{j \in A_i} a_{ji} * f_{ji} = 0, \quad \text{para } i \neq s, t$$

$$l_{ij} \leq f_{ij} \leq u_{ij}$$

V.3 Modelo em RG para um problema de designação tarefa-máquina

Consideremos um conjunto de tarefas para a produção de um tipo de peças, sendo que cada tarefa está definida por um conjunto de operações. No nosso modelo as tarefas e as operações são consideradas como sendo operações ou seja se tivermos, por exemplo, duas tarefas que são efetuadas mediante três operações cada, teremos um total de seis operações.

V.3.1 Notações

Usaremos as seguintes notações:

- *Variáveis de decisão*

$x_{kti} = 1$ Se a máquina k munida da ferramenta t é designada para a tarefa i . (=0, caso contrário)

$y_{kt} = 1$ Se para a máquina k for designada a ferramenta t . ($=0$, caso contrário)

t_k Número das ferramentas designadas para a máquina k

P_k Número de posições (orifícios) da máquina k que são utilizadas.

T_k Tempo de operação na máquina k .

F_t Tempo efetivo do uso da ferramenta t .

• *Dados*

c_{kti} Custo de ter designado a máquina k munida da ferramenta t para a tarefa i .

u_{kti} Tempo de uso da máquina k munida da ferramenta t para a tarefa i .

p_t Número das posições usadas pela ferramenta t .

\bar{P}_k Número das posições disponíveis no magazine da máquina k .

\bar{T}_k Tempo disponível para operação da máquina k .

\bar{F}_t Tempo de vida da ferramenta t .

N Número de operações.

NT_k Número das ferramentas compatíveis com a máquina k .

m Número das máquinas.

O_{kt} Número das operações compatíveis com a dupla k - t : máquina-operação.

F Número das ferramentas.

V.3.2 O modelo

O modelo é construído considerando um grafo em camadas (Figura V.2) onde temos:

- A primeira camada está constituída pela fonte que, no nosso caso, é o buffer das ferramentas.

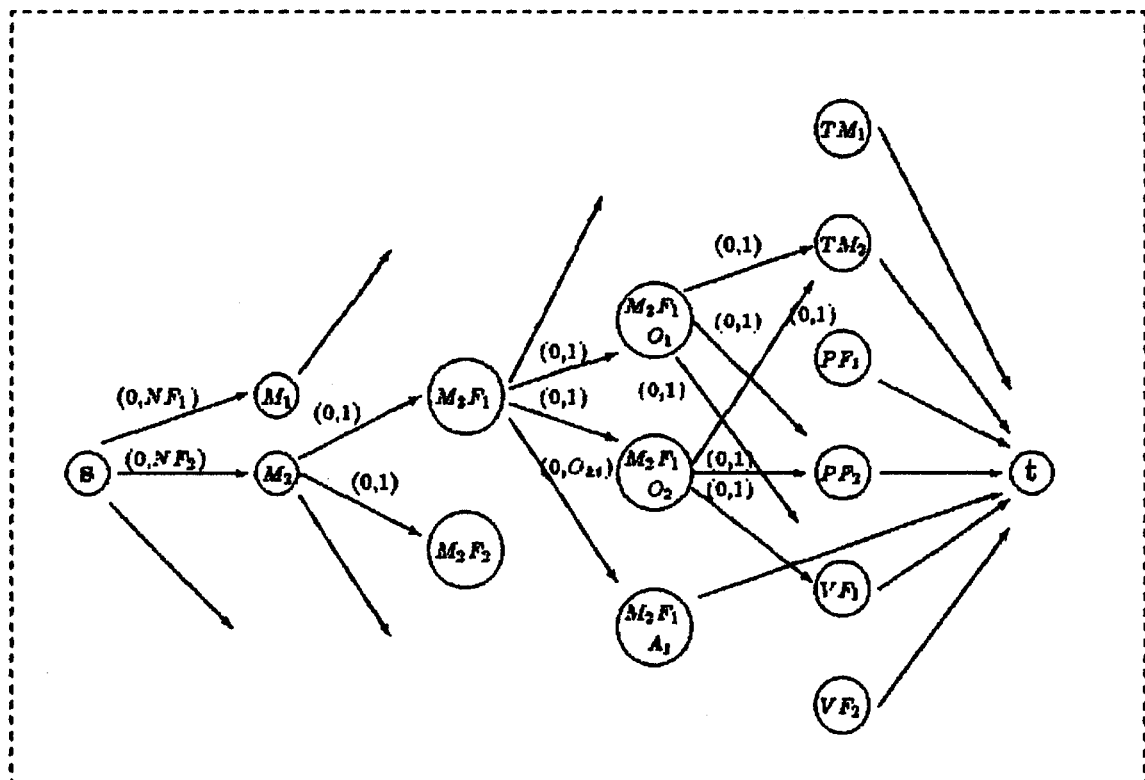


Figura V.2: Modelo em redes generalizadas

- A segunda camada está formada pelas máquinas M_1, \dots, M_m
- Os arcos (s, M_k) tem capacidade limitada com limites 0 e NT_k e o fluxo representa o número das ferramentas alocadas na máquina.
- A seguinte camada de nós está formada pelas combinações (M_k, F_i) , (máquina ferramenta).
- Para cada par $(M_k, (M_k, F_i))$ existe um multiplicador de arco $\alpha = O_{ki}$ e o fluxo do arco saindo de M_k sendo 1 ou 0 assinalando se a ferramenta F_i foi ou não foi instalada na máquina M_k . Se a ferramenta F_k foi instalada, então o fluxo chegando em (M_k, F_i) será O_{ki} ou seja o número das operações designadas na máquina M_k
- A seguinte camada é formada pelas combinações Máquina Ferramenta Operação (M_k, F_i, O_i) e os arcos que a eles chegam determinam se a operação foi (1) ou não (0) designada para ser executada pelo par máquina-ferramenta correspondente.
- Na seguinte camada está formada pelos nós TM_k : tempo máximo disponível para usinagem, PF_k : posições disponíveis para as ferra-

mentas, F_k : tempo de vida da ferramenta.

$$\text{Minimize} \quad \sum_k \sum_t \sum_i c_{kti} x_{kti} \quad (\text{V.8})$$

$$\text{Sujeito a:} \quad N y_{kt} - \sum_i x_{kti} - z_{kt} = 0 \quad \forall k, t \quad (\text{V.9})$$

$$\sum_t \sum_i p_t x_{kti} - P_k = 0 \quad \forall k \quad (\text{V.10})$$

$$\sum_t \sum_i u_{kti} x_{kti} - T_k = 0 \quad \forall k \quad (\text{V.11})$$

$$\sum_k \sum_i u_{kti} x_{kti} - F_t = 0 \quad \forall t \quad (\text{V.12})$$

$$\sum_k y_{kt} \leq 1 \quad \forall t \quad (\text{V.13})$$

$$\sum_k \sum_t x_{kti} = 1 \quad \forall i \quad (\text{V.14})$$

$$t_k - \sum_t y_{kt} = 0 \quad \forall k \quad (\text{V.15})$$

$$0 \leq t_k \leq F \quad t_k \text{ inteiro} \quad (\text{V.16})$$

$$0 \leq y_{kt} \leq 1 \quad y_{kt} \text{ inteiro} \quad (\text{V.17})$$

$$0 \leq x_{kti} \leq 1 \quad x_{kti} \text{ inteiro} \quad (\text{V.18})$$

$$0 \leq z_{kt} \leq N \quad z_{kt} \text{ inteiro} \quad (\text{V.19})$$

$$0 \leq P_k \leq \bar{P}_k \quad P_k \text{ inteiro} \quad (\text{V.20})$$

$$0 \leq T_k \leq \bar{T}_k \quad T_k \text{ inteiro} \quad (\text{V.21})$$

$$0 \leq F_t \leq \bar{F}_t \quad F_t \text{ inteiro} \quad (\text{V.22})$$

Aparentemente o modelo apresentado acima poderia ser de grande porte mas acontece que ele é de pequeno porte pois o número das variáveis e restrições diminui quando são considerados a compatibilidade entre as ferramentas e as operações e entre as ferramentas e as máquinas. São consideradas então, somente aquelas combinações tecnologicamente viáveis.

Capítulo VI

Problemas de Grupamento

Considere-se uma variedade de tipos de peças que usam uma outra variedade de ferramentas, máquinas ou máquinas-ferramentas. É evidente que um grupamento de peças segundo algum critério de familiaridade: forma, tamanho, ferramental requerido, etc., poderá melhorar a produtividade, pois por exemplo, o tempo de set-up diminuirá quando a mudança do ferramental for de um tipo para outro da mesma família.

Por causa dos elevados custos na manutenção e no gerenciamento dos SMF, o planejamento da produção tem que ser feito usando critérios adequados de otimalidade. Neste capítulo é apresentado um critério de minimizar os custos (custos ou tempos) de arrumação do sistema que é atingido basicamente como uma decomposição do conjunto de tipos de peças em subconjuntos, com características de similaridade segundo o tipo de ferramentas (ou máquinas) usadas. Isso é feito a partir da Tecnologia de Grupos.

São apresentados três enfoques para a formulação do Problema de Grupamento e é apresentado um modelo que interpreta o critério de otimalidade como um problema de Corte Mínimo entre dois subgrafos (grupos) o que permite, então, resolver o problema como uma generalização do Problema de Fluxo Máximo, mediante uma heurística baseada no algoritmo de Ford e Fulkerson.

VI.1 Peças, ferramentas e Tecnologia de Grupos

É evidente que diante do processamento consecutivo de dois tipos totalmente diferentes de peças, a arrumação (set-up) do sistema, terá um maior custo do que se os tipos de peças tivessem alguma similaridade. Este critério é conhecido como Tecnologia de Grupos.

A Tecnologia de Grupos, como anteriormente descrita, é uma filosofia de manufatura que tem como objetivo incrementar a produção automatizada de peças, usando vantagens da similitude do desenho das peças e da analogia dos processos de fabricação.

Em termos gerais, as máquinas possuem dispositivos para montar as ferramentas a serem usadas e os sistemas de manipulação de material possuem as bandejas ou palletes com os respectivos fixadores do material ou peças. Essas ferramentas, bandejas ou fixadores, são montados segundo o requerimento na fabricação de um dado tipo de peça.

Então, se temos um conjunto de tipos de peças que usam uma variedade de ferramentas e dispositivos adicionais para o seu processamento, consideremos o Problema de Grupamento das peças e ferramentas segundo o critério de "ferramental comum".

VI.2 Uma interpretação do problema

Seja por exemplo a tabela que representa o requerimento da peça p_i do uso da ferramenta f_j , a seguir:

	p1	p2	p3	p4
f1	1		1	
f2		1		1
f3	1		1	
f4	1			
f5		1		1

Uma reordenação das linhas e colunas da tabela, permite

obter a matriz G apresentada a seguir:

	p1	p3	p2	p4
f1	1	1		
f3	1	1		
f4	1	0		
f2			1	1
f5			1	1

O que representa o fato de se ter formado o grupo $G1 = \{f1, f3, f4\}$ de máquinas ou ferramentas, para a manufatura das peças p1 e p3, e ter sido formado o grupo $G2 = \{f2, f5\}$ para a manufatura das peças p2 e p4.

Esse tipo de resultado seria o ideal em termos de que ambos os grupos são totalmente independentes, mas poderia aparecer um resultado do tipo:

1	1	1				
1	1	1			1	
1	0	1				
			1	1	1	1
	1		1	1	1	0
			1	1	0	1

Esta tabela mostra a necessidade de usar uma ferramenta do primeiro grupo na manufatura de uma peça do segundo grupo; e uma ferramenta do segundo grupo na manufatura de uma peça do primeiro grupo.

VI.3 Um critério de Otimalidade

Considerando o exemplo acima, é evidente que um critério de otimalidade para a formação dos grupos, é de que a *interdependência* entre eles seja mínima. Essa interdependência pode ser medida em termos do simples requerimento (não/sim, ou 0/1) da máquina ou em termos do custo no uso da máquina para a manufatura de peça.

Com a finalidade de facilitar a modelagem do problema considera-se o critério de otimalidade equivalente a seguir: *O somatório*

das interdependências entre os elementos de cada conjunto ou grupo a se formar deve ser máxima.

VI.4 Os modelos

VI.4.1 Coeficientes de semelhança

Um primeiro enfoque apresentado pelo McAULEY [34] para a decomposição do conjunto das ferramentas e/ou máquinas em grupos, foi desenvolvido usando o Coeficiente de Semelhança, que é definido para cada duas máquinas tentando descrever uma semelhança em termos do número das peças que usam ambas as máquinas ou uma delas independentemente da outra. Nenhum critério de otimalidade é usado.

VI.4.2 Problema de Grupamento das Peças e Ferramentas como um problema em grafos

Considere um grafo bipartite $G = (V, E)$ onde $V = P \cup M$, sendo P o conjunto das peças a serem fabricadas e M o conjunto das ferramentas (ou máquinas) do sistema. O conjunto dos arcos (i, j) de E , ($i \in P$ e $j \in M$), está definido pelo requerimento da máquina j para a fabricação da peça i .

O grupamento de peças e máquinas será obtido mediante a decomposição do grafo G em k subgrafos $G_s = (V_s, E_s)$, $s = 1, 2, \dots, k$. Um grupamento ótimo (ou seja uma decomposição ótima), será obtida minimizando a grandeza (taxa de produção, lucro, etc...) correspondente as possíveis interconexões entre os k subgrafos. Desta forma, estaremos minimizando a possibilidade de que algumas peças de um subconjunto V_s tenham que serem processadas com alguma máquina de um subconjunto V_p , ($s \neq p$).

Para formular o modelo matemático do problema, considere-se estabelecido um valor k , e define-se:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se nó } i \text{ está no subgrafo } G_j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Para garantir que cada nó estará num único subgrafo é considerada a seguinte restrição:

$$\sum_{j=1}^k x_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, n.$$

Segundo condições tecnológicas, pode-se impor uma restrição da quantidade de nós em cada subgrafo:

$$l_j \leq \sum_{i=1}^n x_{ij} \leq u_j, \quad j = 1, \dots, k.$$

Se o arco (i, j) pertence ao grafo G , define-se o valor $a_{ij} \neq 0$, que pode representar o volume de peças i a serem processadas na máquina j , ou também o lucro associado, portanto, um valor $a_{ij} = 0$ representa o fato de que a peça i não requer ser processada na máquina j .

Seja a peça i e a máquina j num subgrafo G_s , pode-se dizer que um arco (i, j) pertence ao subgrafo se e somente se $x_{is} = x_{js} = 1$, e $a_{ij} \neq 0$. Podemos então representar cada arco do subgrafo G_s com o produto $x_{is} * x_{js}$ e a condição $a_{ij} \neq 0$.

Para minimizar os somatórios de possíveis valores a_{ij} correspondentes a pares peça-máquina de diferentes subgrafos, pode-se usar o critério de maximizar os valores do somatório dos a_{ij} que correspondem aos subgrafos obtidos. Assim sendo, temos:

$$f = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left(\sum_{s=1}^k a_{ij} * x_{is} * x_{js} \right)$$

O modelo que permite a k -decomposição do grafo G considerado, é:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Maximize} & f \\
 \text{s.a.} & \sum_{j=1}^k x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n \\
 & l_j \leq \sum_{i=1}^n x_{ij} \leq u_j, \quad j = 1, \dots, k \\
 & x_{ij} \in \{0, 1\}
 \end{array}$$

Como é evidente, em termos de metodologias de Otimização, a solução de um problema não-linear poderia acarretar uma grande dificuldade, mesmo que fosse usado algum critério de linearização, vide por exemplo as referências: [2], [6], [24], [25], [26], [42], pois nesse caso o tamanho do problema seria aumentado. A existência de técnicas de tipo Relaxação Lagrangeana [35], por exemplo, é vantajosa, mas a construção de um modelo linear é um dos nossos objetivos.

VI.5 Um modelo Linear para o Problema de Grupamento

Para o mesmo problema modelado na seção anterior, define-se as seguintes variáveis:

$$x_{ijp} = \begin{cases} 1 & \text{se peça } i \text{ e ferramenta } j \text{ são alocadas ao subgrafo } G_p. \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$y_{ip} = \begin{cases} 1 & \text{se peça ou ferramenta } i \text{ são alocadas ao subgrafo } G_p. \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Sendo a_{ij} o custo de processamento da peça i com a ferramenta j , o modelo linear é:

$$\text{Maximize } \sum_{i=1}^m \sum_{j=m+1}^{m+n} \sum_{p=1}^k a_{ij} * x_{ijp} \quad (\text{VI.1})$$

$$x_{ijp} \leq y_{jp} \quad i = 1, \dots, m; \quad j = m + 1, \dots, m + n; \quad p = 1, \dots, k \quad (\text{VI.2})$$

$$x_{ijp} \leq y_{ip} \quad i = 1, \dots, m; \quad j = m + 1, \dots, m + n; \quad p = 1, \dots, k \quad (\text{VI.3})$$

$$\sum_{p=1}^k y_{ip} = 1, \quad i = 1, \dots, m + n \quad (\text{VI.4})$$

$$l \leq \sum_{i=1}^{m+n} y_{ip} \leq u, \quad p = 1, \dots, k; \quad (\text{VI.5})$$

$$x_{ijp} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, m; \quad j = m + 1, \dots, m + n; \quad p = 1, \dots, k; \quad (\text{VI.6})$$

$$y_{ip} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, m + n; \quad p = 1, \dots, k; \quad (\text{VI.7})$$

As restrições VI.2 e VI.3 garantem que a peça i é processada pela ferramenta j somente quando ela pertence ao mesmo subgrafo ou seja a mesma família. A unicidade do subgrafo onde está alocada cada peça e cada ferramenta está garantida pela restrição VI.4 e o número de peças e ferramentas de cada grupo está restrito pela equação VI.5.

VI.6 Um modelo de fluxo em redes

No modelo apresentado na seção VI.4.2, existe a dificuldade de expressar os arcos entre cada ferramenta e cada peça, como sendo um produto de duas variáveis que correspondem ao fato de que ambos os nós estarem ou não no mesmo subgrafo (grupo). O critério de otimalidade que é baseado na menor interdependência entre os grupos diz do fato de se ter um menor inter-relacionamento entre os grafos ou melhor, entre os subgrafos que representam os grupos. Esse fato de se ter arcos que ligam

dois subgrafos de um grafo considerado tem a ver com o conceito de corte no grafo, corte que tem que ter o menor valor. Estamos então diante do conhecido problema de Corte Mínimo no grafo ou melhor, Corte mínimo separando dois nós, sendo que cada nó tem que pertencer a cada um dos dois grupos considerados.

Temos então que o nosso problema de obter, inicialmente, dois grupos com o menor inter-relacionamento torna-se um problema de Corte Mínimo entre dois nós. De outro lado, é conhecido que o problema definido é equivalente ao problema de Fluxo Máximo, o que sustenta a idéia fundamental do algoritmo que apresentamos nesta seção.

A seguir, é apresentado um modelo que interpreta o critério de otimalidade como um problema de Corte Mínimo entre dois subgrafos (grupos), o que permite, então, resolver o problema como uma generalização do Problema de Fluxo Máximo, mediante uma heurística baseada no algoritmo de Ford e Fulkerson.

VI.6.1 O Modelo

Para representar a dependência entre as peças e as correspondentes ferramentas, construímos uma matriz $C_{mn} = [c_{ij}]$, onde:

- $c_{ij} \neq 0$, representa o custo (ou tempo) do processamento da peça tipo j usando a máquina ou ferramenta tipo i .
- $c_{ij} = 0$ se não existir dependência entre a peça j e a ferramenta i .

O nosso problema pode ser modelado como sendo a Rede $G = (V, A)$ onde o grafo associado tem que ser dividido em dois subgrafos separados pelo menor corte. A matriz $A_{mn} = [a_{ij}]$ é a matriz associada à C_{mn} , tal que

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se } c_{ij} \neq 0 \\ 0 & \text{se } c_{ij} = 0 \end{cases}$$

No grafo os nós representam as ferramentas e as peças ($V = P \cup M$) e os arcos representam as operações (dependência peça-ferramenta). Para tanto, cada nó-ferramenta só pode ter ligação com nós-peças e reciprocamente.

VI.6.2 Algoritmo Preliminar

PRELI{ $G = (V, A)$, C_{mn} }

Passo 1 Se grafo G é desconexo, cada subgrafo define um grupo ou célula.
FIM.

Passo 2 Para cada v_i, v_j determine o Fluxo Máximo FM_{ij} .

Passo 3 Se $FM_{i,j'} = \min_{ij} \{FM_{ij}\}$, determine o corte $K_{i,j'}$ associado com $FM_{i,j'}$.

Passo 4 Determine os subgrafos G^i e G^j tais que:

- $v_i \in G^i$
- $v_j \in G^j$
- Se $(v_k, v_k) \in K_{i,j'}$, então ambos os nós não pertencem ao mesmo subgrafo.

Passo 5 Se for preciso, aplicar o algoritmo no subgrafo G^i ou G^j . Caso contrario: FIM.

VI.6.3 Convergência e Complexidade Computacional

Considerando que a matriz C_{mn} possui elementos inteiros, a convergência do algoritmo está garantida em cada iteração do Passo 2 [15], mas pelo fato de se ter que resolver subproblemas de Fluxo Máximo para cada par de nós o algoritmo requer de $(m+n)*(m+n-1)/2$ aplicações do algoritmo de Ford e Fulkerson o que pode ser melhorado na sua complexidade usando-se o critério FIFO na escolha dos nós a serem expandidos, segundo a proposta de EDMONDS and KARP [17].

Para oferecer uma melhora à respeito do número de aplicações do algoritmo de Ford e Fulkerson, apresentamos uma heurística baseada no trabalho de GOMORY-HU [21]. Esse algoritmo gera uma árvore que define um corte na rede associado a cada arco da árvore.

VI.7 O Algoritmo

O uso do algoritmo preliminar acima apresentado poderia acarretar uma complexidade relativamente grande, que pode ser diminuída se usarmos uma modificação do algoritmo de GOMORY-HU [21], o que usa somente $(n + m - 1)$ vezes o algoritmo F-F.

VI.7.1 O Algoritmo

CELULAS

Passo 1 Dada a rede $G = (V, A)$, aplique a rotina GOMODI

Passo 2 Na árvore K gerada, escolha o arco de menor valor $c(\bar{K}_{st})$

Passo 3 Usando o corte \bar{K}_{st} , determine os subgrafos \bar{G}^s e \bar{G}^t que determinam os grupos de peças e os grupos associados de ferramentas, ou seja, as células.

Passo 4 Se convier, aplicar a rotina GOMODI em um ou ambos os subgrafos \bar{G}^s e \bar{G}^t

Passo 5 FIM

A rotina básica é dada a seguir:

GOMODI($G(V, A), C_{mn}$)

Passo 0 .-Define-se:

- $V :=$ Nós

- $K :=$ Árvore dos cortes
- $N = m + n :=$ Número de nós
- $k = 1$

Passo 1 Escolher v_i e $v_j \in V$ tais que

- (fonte) $v_i = s$
- (poço) $v_j = t$

Passo 2 Usar o Algoritmo F-F e determine corte K_{st} associado com FM_{st} .
Sejam G^s e G^t os subgrafos associados ao corte.

Passo 3 Na árvore K adicionar o arco $a = (a_i, a_j)$ com capacidade igual a $c(K_{st})$.

Faça: $V = V - \{v_i\}$

Passo 4 Se $k = m + n - 1$, então, FIM.

Passo 5 • Considere o subgrafo G^s como sendo um único nó.
• Faça $k = k + 1$, vá para Passo 1.

VI.7.2 Observações

- Se o algoritmo proposto fosse somente para a obtenção do Fluxo Máximo, ele poderia ser melhorado em termos de complexidade computacional, usando ao invés do algoritmo F-F, outros algoritmos, alguns deles apresentados em [15]
- A aplicação específica do algoritmo F-F é devido ao fato de que ele gera o Corte Mínimo na rede, o que é o resultado principal para a obtenção das Células de manufatura procuradas.
- Com a finalidade de não aparecer possíveis ciclos na aplicação do algoritmo F-F, segundo o exemplo apresentado em [15], é necessário que os custos c_{ij} na matriz C_{mn} sejam considerados como sendo números inteiros. Por exemplo, usar 50 centavos ao invés de 0.50 cruzeiros.

- A escolha “se convier” do Passo 4 no algoritmo CELULAS, que determina o critério de parada, depende de parâmetros relacionados com o processo de produção e o desenho da fábrica onde estiver sendo aplicado o algoritmo.

Capítulo VII

Conclusões

O gerenciamento dos sistemas automatizados de manufatura com um enfoque de otimização matemática ainda está na fase de difusão e achamos que este trabalho é um bom aporte para esse fim, mais ainda conforme foi apresentado, isto tem sido feito, na pratica, sem serem definidos critérios matemáticos de otimalidade.

Em termos de abrangência consideramos que temos uma grande variedade de temas dentro da otimização e disciplinas afins que tem que ser usadas nesse gerenciamento. As disciplinas afins que tem que se considerar são, por exemplo, a Inteligência Artificial como é relatado por KUSIAK [31], Simulação como é feito por GARZIA [18], etc. O nosso trabalho é feito dentro da área de Otimização com ênfase em Teoria dos grafos, Fluxos em redes e Programação Inteira 0-1.

Alem dos temas específicos ou geraes de otimização que se pode usar no tratamento matemático no gerenciamento dos sistemas de manufatura, é necessário salientar o fato de que esse tratamento tem que se particularizar para o lay-out de cada sistema segundo os critérios gerenciais e critérios de otimalidade que os tomadores de decisão possam escolher. Na maioria dos casos tentamos usar os modelos mais gerais possíveis com a finalidade de que nosso trabalho pudesse ser usado logo na solução de problemas específicos.

No nosso ambiente acadêmico universitário não existe uma

linha de estudo matemático do gerenciamento dos sistemas automáticos de manufatura. Quando foi iniciado este trabalho, ainda na fase de pesquisa, pouco interesse existia sobre assuntos de Otimização aplicados em Manufatura Automatizada, hoje achamos que uns dos nossos primeiros objetivos, o de dar início com esta tese de uma linha de pesquisa está sendo atingida. O interesse de pessoas, depois que assistiram a nossas apresentações em congressos e seminários têm demonstrado, é sem dúvida um bom começo. Esperamos também que possa ser integrada com uma área de engenharia de produção, pois é fácil entender que alguns aspectos do gerenciamento não são considerados neste trabalho, mas adicionando condições e/ou restrições nos modelos, ter-se-à casos muito mais reais.

Para o gerenciamento dos SMF podem se definir alguns problemas de tipo operacional como:

- Planejamento
- Grupamento
- Seqüenciamento
- Designação Tarefa-Máquina

Esses problemas podem ser modelados como sendo Problemas de Otimização Matemática e a solução é em geral a adaptação a problemas clássicos onde a geração dos algoritmos correspondentes torna a manipulação do problema mais simples.

A nível da literatura existe trabalhos feitos em termos de modelagem e os algoritmos correspondentes, sendo que em alguns tipos de problemas os modelos utilizados são de Programação Não-linear, o que nem sempre é simples de ser resolvido.

No que diz respeito a chamada Tecnologia de Grupos, a maioria dos trabalhos são relacionados com critérios de tipo estatístico de dados e informação a respeito do "rendimento" produtivo das ferramentas e máquinas como é o caso dos índices de semelhança. Uns dos primeiros

enfoques usando critérios matemáticos de otimalidade gera um modelo de tipo bi-linear que foi por nós superado. Neste trabalho é apresentado um modelo linear baseado na interpretação do problema como sendo um problema de particionamento em grafos e que foi resolvido, finalmente, como sendo um problema de fluxo em redes.

Os problemas de grupamento aparecem como uma decisão previa de alguns outro problemas como por exemplo o problema de seqüenciamento das tarefas e o problema de carga das máquinas. É evidente que os custos de troca que são usados no problema de seqüenciamento e a designação de tarefas será feita de maneira ótima diante de peças e ferramentas similares. De outro lado é nesse aspecto do gerenciamento dos sistemas automáticos, onde nosso aporte matemático é enfatizado, pois permite se evitar alguns exemplos de não-linearidade usando critérios relacionados com a Teoria dos Grafos e o conceito de Fluxos em Redes.

Referências Bibliográficas

- [1] ABDEL-MALEK, L. and WOLF, C.; Evaluating Flexibility of Alternative FMS Design: A comparative measure. (Pre-print). Sixth Int. Working Seminar on Production Economics, Igls, Austria, February, 1990.
- [2] ADAMS, W.P. and SHERALI, H.D., Linearization Strategies for a Class of 0-1 Integer Programming Problems, Operations Research, 1990, 38(2), 217-226.
- [3] AGOSTINHO, O.L.; Estudo da Flexibilidade dos Sistemas Produtivos, Tese Dr. em Eng., Escola de Engenharia de São Carlos, USP., SP., 1985.
- [4] AGOSTINHO, O.L.; Manufatura Integrada por Computador: Conceitos Fundamentais, Projeto CIM-BRASIL, Abril-1991.
- [5] AZZONE, G. and BERTELE, U.; Measuring the Economic Effectiveness of Flexivel Automation, Int. J. of Prod. Res. 1989, 27(5), 735-746.
- [6] BALAS, E. and MAZZOLA, J.B., Nonlinear 0-1 Programming: Linearization Techniques, Mathematical Programming, 1984(30), 1-45.
- [7] BARNES, E.R., An Algorithm for Particioning the Nodes of a Graph, SIAM J. of Algebraic Discrete Meth., 1982, 3(4), 541-550.
- [8] BERRADA, M. and STECKE, K.E.; A B-B approach for Machine Load Balancing in FMS, Management Science, 1986, 32(10), 1316-1335.

- [9] BRILL, P.H. and MANDELBAUM M.; On Measures of Flexibility in Manufacturing System, *Int. J. of Prod. Res.*, 1989, 27(5), 747-756.
- [10] BROWNE, J. et.al.; Clasificación de Flexible Manufacturing System., *The FMS Magazine*, April 1984, 114-117.
- [11] BROWNE, J., HARHEN, J. and SHIVNON, J.; *Production Management System: A CIM Perspective*, Addison-Wesley Pub. Co., Workingham, England, 1988.
- [12] CAULLIRRAUX, H.M., MARIETTO, M.G.B. and COCA-BALTA, A.G.; New Indices in Measures of Flexibility. (Working Paper), COPPE/UFRJ, 1990. Apresentado no "TIMS XXX - SOBRAPO XXII Joint International Meeting", Rio de Janeiro-Brazil, 1991.
- [13] CHVATAL, V.; A Greedy Heuristic for the Set-Covering Problem, *Mathematics of Operations Research*, 1979, 4(3), 223-235.
- [14] CLEIMAN, D.F. and COCA-BALTA, A.G.; A Generalized-Network Model for the Machine-Loading Problem in a F.M.S., (Working Paper), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1990. Apresentado no "TIMS XXX - SOBRAPO XXIII - Joint International Meeting", Rio de Janeiro, 1991.
- [15] COCA-BALTA, A.G., *Estudo Comparativo de Algoritmos de Fluxo Máximo*, Tese, M.Sc., COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1983.
- [16] COCA-BALTA, A.G. e CLEIMAN, D.F.; Um modelo de Fluxos em Redes na formação de Celas de Manufatura, (Working-Paper), COPPE-UFRJ: Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, 1991. Apresentado no XIV CNMAC-SBMAC, Setembro 1991, Nova Friburgo - Rio de Janeiro.
- [17] EDMONDS, J.E. and KARP, R.M.; Theoretical Improvements in Algorithmic Efficiency for Networks Flows Problems, *J. of A. C. M.*, 1972, 248-264.
- [18] GARZIA, R.F.; Analisis Matemático Moderno de las Plantas de Fabricación de Operaciones Multiples, *Boletin de Informática - UNESCO* 1986, 4(3), 23-32.

- [19] GLOVER, F., HULTZ, J., KLINGMAN, J. and STUTZ, J.; Generalized Networks: a fundamental computer-based planning tool, *Management Science*, 1978, 24(12), 1209-1220.
- [20] GLOVER, F. and WOLSEY, E.; Converting the 0-1 Polynomial Programming Problem to a 0-1 Linear Programming Problem, *Operation Research* 1974(22), 180-182.
- [21] GOMORY, R.E. and HU, T.C.; Multi-Terminal Network Flows, *J. Soc. Indust. Appl. Math.*, 1961, 9(4), 551-570.
- [22] GRINOLD, R.C.; Calculating Maximal Flows in a Network with Positive Gains, *Operations Research*, 1973(21), 528-541.
- [23] GUPTA, Y.A. and GOYAL, S.; Flexibility of manufacturing system: Concepts and measurements, *European J. of Operational Research*, 1989, (43), 119-135.
- [24] HAMMER, P.L. and RUDEANU, S.; Boolean Methods in Operations Research and Related Areas, SPRINGER, Berlin, New York, 1968.
- [25] HANSEN, P., Methods of Nonlinear 0-1 Programming, *Annals of Discrete Math.*, 1979(5), 53-70.
- [26] HANSEN, P. , JAUMAR, P. and MATHON, V.; Constrained Non-linear 0-1 Programming, (Working Paper). GERAD-Université McGill, Montreal, Canada, 1989.
- [27] HARTLEY, John; FMS at work, IFS Ltd. UK., North-Holland, 1984.
- [28] KUMAR, V.; Entropic Measures of Manufacturing Flexibility, *Int. J. of Prod. Res.*, 1987, 25(7), 957-966.
- [29] KUMAR, K.R., KUSIAK, A. and VANELLI, A.; Grouping of Parts and Components in FMS, *European Journal of Operational Research*, 1986(24), 387-397.
- [30] KUSIAK, A.; Flexible Manufacturing System: a structural approach, *Int. J. of Prod. Res.*, 1985, 23(6), 1057-1073.

- [31] KUSIAK, A.; Artificial Intelligence and Operations Research in F.M.S., *INFOR*, 1987, 25(1), 2-12.
- [32] KUSIAK, A. and FINKE, G.; Selection of Process Plans in Automated Manufacturing Systems, *IEEE Journal of Robotics and Automation* 1988, 4(4), 397-402.
- [33] LASHKARI, R.S., DUTTA, S.P. and PADHYE, A.M.; A New Formulation of Operation Allocation problem in FMS, *Int. J. Prod. Res.*, 1987(25), 1267-1283.
- [34] McAULEY, J.; Machine Grouping for Efficient Production, *The Production Engineer*, Feb. 1972, (51), 53-57.
- [35] MACULAN, N., CAMPELO, R.E. e LOPEZ, L.B.R.; Relaxação Lagrangeana em Programação Inteira, COPPE-UFRJ, Relatório Técnico ES40-84, Rio de Janeiro, 1984
- [36] MANDELBAUM, P.H. and BRILL, P.H.; Examples of Measurement of Flexibility and Adaptativity in Manufacturing System, *J. of Operational Research Society*, 1989, 40(6), 603-609.
- [37] MARIOTI, S., CAINARCA, G.C. e COLOMBO, M.G.; Automazione, Flessibilità e Integrazione, *Automazione Industriale e Robótica Ed.*, Milano, 1988.
- [38] MONDEN, Yasuhiro; *Toyota Production System: Practical approach to production management*, Industrial Engineering and Management Press, IIE., Norcross-Georgia, 1983.
- [39] PICARD, J.C. and QUEYRANE, M.; A network flow solution to some nonlinear 0-1 programming problems whit applications to graph theory. *Networks*, 1982(12), 141-159.
- [40] SCHRIBER, T.J. and STECKE, K.E.; Using Mathematical Programming and Simulation to Study FMS Machine Utilization, in *Proceedings of the 1987 Winter Simulation Conference*, THESEN, A. et al. (ed.), The Society for Computer Simulation, San Diego, California

- [41] SETHI, A.K. and SETHI, S.P.; Flexibility in Manufacturing: A survey. *Int. Journal of Flexibility Manufacturing System*, 1990, 2(4), 282,328.
- [42] STECKE, K.E.; Formulation and solution of Nonlinear Integer production planning problems for FMS, *Management Science*, 1983(29), 273-288.
- [43] STECKE, K.E. and TOCZYLOWSKI, E.; Profit-based FMS Dynamic Part Type Selection Over Time for Mid-Term Production Planning. To appear in *European Journal of Operational Research*, 1991.
- [44] SZWARCFITER, J.L.; *Grafos e Algoritmos Computacionais*, Editora Campus Ltda, Rio de Janeiro, 1983.
- [45] TAYMAZ, E.; Types of flexibility in a single-machine production system, *Int. J. of Prod. Res.*, 1989, 27(11), 3-12.
- [46] WATTERS, L.J.; Reduction of Integer Polynomial Programming Problems to 0-1 Linear Programming Problems, *Operations Research* 1967(15), 1171-1174.
- [47] WONG, R.T., Integer Programming Formulations of the Traveling Salesman Problem, *Proc. IEEE Int. Conf. of Circuits and Computers*, 1980, 149-152.
- [48] ZACCARELLI, S.B.; *Programação e Contrôles da Produção*, Livraria Pionera Editôra, São Paulo, 1973.