

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ESTE MATERIAL NÃO CIRCULA
USO EXCLUSIVO PARA CONSULTA

NÃO ESTÁ EM CONFORMIDADE COM O
QUE ~~TES~~ ^{TES} ~~É~~ ^É ~~PO~~ ^É O MANUAL DE NORMAS
PARA PUBLICAÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA
(INPE-5116-MAN/001) POR OPÇÃO DO
AUTOR

MODELO PARA SEQÜENCIAMENTO DE PARTES E
FERRAMENTAS EM UM SISTEMA DE MANUFATURA FLEXÍVEL
COM RESTRIÇÕES ÀS DATAS DE VENCIMENTO E A
CAPACIDADE DO MAGAZINE

SUBMETIDA POR

Arthur Tórgo Gómez

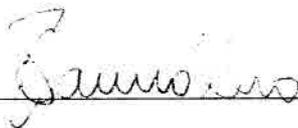


Em cumprimento ao requisito de defesa da tese para obtenção do título de Doutor em
Computação Aplicada.

1996

Aprovada pela Banca Examinadora em
cumprimento a requisito exigido para a
obtenção do Título de Doutor em Computação
Aplicada

Dr. Solon Venâncio de Carvalho



Presidente

Dr. Luiz Antonio Nogueira Lorena



Orientador

Dr. Atair Rios Neto

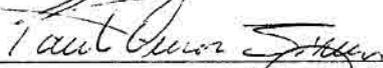
Membro da Banca

Dr. Horáco Hideki Yanasse



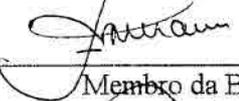
Membro da Banca

Dr. Paulo Ouverá Simoni



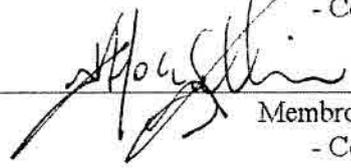
Membro da Banca

Dr. Fernando Augusto Silva Marins



Membro da Banca
- Convidado -

Dr. João Vitor Moccellin



Membro da Banca
- Convidado -

Candidato: Arthur Tórgo Gómez

São José dos Campos, 19 de dezembro de 1996

Dedico esta tese, à minha esposa Maria Luiza e ao meu filho Breno.

Com carinho, Arthur.

Agradeço ao meu orientador , Dr. Luis Antonio Nogueira Lorena pela sua dedicação e ensinamentos que tornaram possível a realização desta tese. Agradeço também , aos meus colegas do Setor de Circuito Impresso do INPE, cuja compreensão e estímulo durante a realização deste trabalho contribuíram para seu sucesso.

RESUMO

Utilizando os conceitos de *Tecnologia de Manufatura Flexível*, aplicados a um “*job shop*”, é proposto um *Modelo* para gerar o seqüenciamento das partes e dos conjuntos de ferramentas, necessários para processá-las. As partes são processadas em uma máquina versátil que possui um magazine com capacidade limitada para armazenar os conjuntos de ferramentas. Na geração das seqüências das partes e dos conjuntos de ferramentas são abordados os problemas de *Seleção de Partes*, *Carregamento de ferramentas* e de “*Scheduling*” com restrições de ferramentas e de datas de vencimento. A capacidade do magazine, assim como as datas de vencimento das partes e os períodos dos turnos de produção são respeitados. As restrições impostas pelas datas de vencimento aparecem como um fator complicador na geração do Modelo. O seqüenciamento das partes deve considerar tanto as restrições das ferramentas, quanto ao tipo e capacidade do magazine, como o tempo de *atraso* no processamento das partes. O problema de Carregamento de Ferramentas é tratado em duas abordagens: minimização do número de trocas de ferramentas e minimização do número de instantes de parada para a troca de ferramentas. No problema de “*Scheduling*” é dado ênfase ao problema do *Atraso* que trata do conflito entre atender às datas de vencimento das partes e ao agrupamento de partes existente em relação ao conjunto de ferramentas. O objetivo é gerar um Modelo de otimização que permita, a partir da mesma solução inicial, obter diferentes seqüências de partes e de conjuntos de ferramentas que contemplem diferentes estratégias de otimização. As estratégias de otimização são definidas conforme os valores atribuídos aos pesos das parcelas da função objetivo. As parcelas consideradas na função objetivo são os tempos totais de produção, de atraso, de “*setup*” correspondente ao número de trocas de ferramentas, de “*setup*” correspondente ao número de instantes de parada para a troca de ferramentas e dos períodos ociosos dos turnos de produção. Para isto foram desenvolvidos dois algoritmos para gerar os agrupamentos iniciais das partes e ferramentas e o “*scheduling*” inicial das partes. Utilizando-se técnicas da pesquisa Tabu são obtidas as seqüências desejadas que refletem a estratégia definida pelo conjunto de valores atribuídos aos pesos da função objetivo. Testes e comparações de resultados e da performance do Modelo são apresentados ao final do trabalho.

A MODEL FOR SEQUENCING OF PARTS AND TOOLS IN FLEXIBLE
MANUFACTURING SYSTEMS WITH DUE DATES AND TOOLING
CONSTRAINTS

Abstract

A model is proposed to make the scheduling of parts and tools in a job shop, using concepts of Flexible Manufacturing Technology. The parts are processed on a flexible machine that has one magazine with limited tool capacity. The problems of parts selection, loading tools, and scheduling with due dates and tooling constraints are studied in this work. The due dates and the turns of the production are respected. The scheduling of parts must consider the due dates and tooling constraints. The problem of loading tools is considered in two approaches: minimizing the number of tool switching and the number of stops for tool switching. The goal is to obtain an optimization model that provides different schedulings of tools and parts. The optimization strategies are defined using objective function weights. The parcels considered in the objective function are: the maximum flow time (makespan), the delay time, the number of stops for tool switching, the number of tool switching and the idle period at the turns of production. Two algorithms have been developed to give the initial grouping of parts and tools and the initial scheduling of the system. Using Tabu search techniques, the parts and tools scheduling are obtained in accordance to the weights of the objective function.

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| LISTA DE FIGURAS | vii |
| LISTA DE TABELAS | viii |
| <u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u> | 1 |
| <u>CAPÍTULO 2 - SISTEMA DE MANUFATURA FLEXÍVEL</u> | 3 |
| 2.1 - Definição de um Sistema de Manufatura Flexível | 3 |
| 2.2 - Classificação de um Sistema de Manufatura Flexível | 4 |
| 2.3 - Flexibilidade | 5 |
| 2.4 - Fases de um Sistema de Manufatura Flexível | 7 |
| 2.4.1 - Problemas da fase de pré-operacional | 10 |
| 2.4.2 - Problemas da fase operacional | 11 |
| <u>CAPÍTULO 3 - PROBLEMAS DE INTERESSE AO MSPF</u> | 15 |
| 3.1 - Seleção de partes | 14 |
| 3.2 - Carregamento de ferramentas | 15 |
| 3.2.1 - Minimização do número de trocas de ferramentas | 16 |
| 3.2.2 - Minimização do número de instantes de parada para a troca de ferramentas .. | 17 |
| 3.3 - O problema do “scheduling” com restrições | 17 |
| <u>CAPÍTULO 4 - APLICAÇÃO DO MODELO DE SELEÇÃO DE PARTES E FERRAMENTAS EM UM “JOB SHOP”</u> | 19 |
| 4.1 - Definições | 19 |
| 4.2 - Suposições | 20 |
| 4.3 - Formulação do problema de “scheduling” em um “job shop” com restrições .. | 21 |
| 4.4 - Descrição do MSPF | 23 |
| 4.5 - Solução inicial | 26 |
| 4.5.1 - Seleção inicial de partes | 26 |
| 4.5.1.1 - Algoritmo modificado de identificação de grupos | 27 |
| 4.5.2 - “Scheduling” inicial | 31 |
| <u>CAPÍTULO 5 - ALGORITMO TABU PARA SELEÇÃO E “SCHEDULING”</u> ... | 35 |
| 5.1 - Princípios básicos da pesquisa tabu | 35 |
| 5.2 - Aplicações da pesquisa tabu | 37 |
| 5.3 - Aplicação da pesquisa tabu ao MSPF | 40 |
| 5.3.1 - Determinação das vizinhanças | 43 |
| 5.3.2 - Listas tabus | 44 |

| | |
|--|------------|
| 5.3.3 - Movimento de troca de lotes | 45 |
| 5.3.4 - Movimento de retirada e inserção de uma parte | 50 |
| <u>CAPÍTULO 6 - IMPLEMENTAÇÃO DO MSPF</u> | 59 |
| 6.1 - Estrutura Modular | 59 |
| 6.2 - Aplicação de Tang e Denardo : minimização do número de trocas de ferramentas | 62 |
| 6.2.1 - Seleção inicial de partes e de ferramentas | 65 |
| 6.2.2 - “Scheduling” inicial | 66 |
| 6.2.3 - Resultados Obtidos | 70 |
| 6.2.3.1 - Minimização do número de trocas de ferramentas | 72 |
| 6.2.3.1.a - Desconsiderando o atraso | 79 |
| 6.2.3.1.b - Comparação de resultados | 82 |
| 6.2.3.2 - Minimização do número de instantes de parada | 83 |
| 6.2.3.3 - Minimização do atraso | 87 |
| 6.2.3.3.a - Desconsiderando os tempos de “setup” | 89 |
| 6.2.3.4 - Minimização dos períodos ociosos dos turnos de produção | 91 |
| 6.2.3.5 - Uma aplicação em maior escala | 95 |
| 6.2.3.5.a - Minimização do número de trocas de ferramentas | 96 |
| 6.2.3.5.b - Minimização do número de instantes de parada | 98 |
| 6.2.3.5.c - Minimização do atraso | 100 |
| 6.2.3.5.d - Minimização dos períodos ociosos dos turnos de produção | 101 |
| <u>CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES</u> | 103 |
| 7.1 - Problemas abordados | 103 |
| 7.2 - Modelagem e aplicação do MSPF | 104 |
| 7.3 - Resultados obtidos | 105 |
| 7.3.1 - Política de minimização do número de trocas de ferramentas | 105 |
| 7.3.2 - Política de minimização do número de instantes de parada para a troca de ferramentas | 105 |
| 7.3.3 - Política de minimização do atraso | 106 |
| 7.3.4 - Política de minimização dos períodos ociosos dos turnos de produção | 106 |
| 7.4 - Recomendações | 106 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 109 |

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 2.1 - Modelo hierárquico aplicado a um S.M.F | 9 |
| 5.1 - Movimento A de troca de lotes | 47 |
| 5.2 - Movimento B de troca de lotes | 49 |
| 5.3 - Movimento C de troca de lotes | 50 |
| 5.4 - Movimento A de retirada e inserção de uma parte | 53 |
| 5.5 - Movimento B de retirada e inserção de uma parte | 54 |
| 5.6 - Movimento C de retirada e inserção de uma parte | 56 |
| 6.1 - Estrutura dos programas do MSPF | 62 |
| 6.2 - Gráfico comparativo entre o comportamento médio do MSPF e a solução não tendenciosa | 71 |
| 6.3 - Comparação da solução de menor Sf com a solução não tendenciosa | 73 |
| 6.4 - Comportamento do tempo de atraso | 74 |
| 6.5 - Comportamento dos tempos de “setups” | 75 |
| 6.6 - Comparação da solução de menor Sf desconsiderando o atraso com a solução não tendenciosa | 80 |
| 6.7 - Comportamento do tempo de atraso com P_2 igual a zero | 81 |
| 6.8 - Comportamento dos tempos de “setup” com P_2 igual a zero | 82 |
| 6.9 - Comportamento dos tempos de “setup” | 85 |
| 6.10 - Comportamento do tempo de atraso | 85 |
| 6.11 - Comparação entre a segunda e a terceira estratégias | 87 |
| 6.12 - Comportamento dos tempos de “setup” | 88 |
| 6.13 - Comportamento do tempo de atraso | 89 |
| 6.14 - Comparação entre os comportamentos dos tempos de “setup” | 91 |
| 6.15 - Comportamento dos tempos de “setup” em relação ao tempo ocioso dos turnos | 93 |
| 6.16 - Comportamento do tempo ocioso dos turnos em relação ao número de trocas de ferramentas quando o número de “setups” é desconsiderado | 94 |
| 6.17 - Gráfico comparativo entre a solução não tendenciosa obtida do exemplo de Tang e Denardo e a do exemplo de grande escala | 96 |
| 6.18 - Comparação entre as minimizações de Sf e Sp quando somente Tp é considerado além dos respectivos “setups” | 99 |
| 6.19 - Comparação entre as minimizações de Tr quando utiliza-se a estratégia da solução não tendenciosa e quando, com exceção de P_1 e do peso de Tr, os demais pesos são zerados | 102 |

LISTA DE TABELAS

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 3.1 - Estrutura e codificação do sistema OPTIZ | 4 |
| 6.1 - “Scheduling” inicial | 67 |
| 6.2 - Seqüência de partes e lotes por turnos..... | 68 |
| 6.3 - Seqüência de carregamento de ferramentas no magazine | 69 |
| 6.4 - Minimização do número de trocas de ferramentas | 72 |
| 6.5 - Seqüência de partes por turnos ($P_4 = 10$) | 75 |
| 6.6 - Seqüência de carregamento de ferramentas no magazine ($P_4 = 10$) | 76 |
| 6.7 - Seqüência de carregamento de ferramentas no magazine ($P_4 = 60$) | 77 |
| 6.8 - Seqüência de carregamento de ferramentas no magazine ($P_4 = 110$) | 78 |
| 6.9 - Diferentes seqüências de carregamento de ferramentas no magazine com a mesma seqüência de partes | 79 |
| 6.10 - Minimização do número de trocas de ferramentas desconsiderando o atraso .. | 80 |
| 6.11 - Comparação dos resultados | 83 |
| 6.12 - Minimização do número de instantes de parada | 84 |
| 6.13 - Minimização do número de instantes de parada desconsiderando o atraso | 86 |
| 6.14 - Minimização do tempo de atraso | 88 |
| 6.15 - Minimização do tempo de atraso desconsiderando os tempos de “setup” | 90 |
| 6.16 - Minimização do tempo ocioso dos turnos de produção | 92 |
| 6.17 - Minimização do tempo ocioso dos turnos de produção sem a influência do “setup” | 94 |
| 6.18 - Minimização do número de troca de ferramentas | 97 |
| 6.19 - Minimização do número de instantes de parada | 98 |
| 6.20 - Minimização do atraso | 100 |
| 6.21 - Minimização do tempo ocioso dos turnos de produção | 101 |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Neste estudo é proposto um modelo de otimização para gerar o seqüenciamento de partes e ferramentas, em um ambiente de manufatura flexível formado por uma máquina, em que são consideradas as restrições das datas de vencimento das partes e da capacidade do magazine de ferramentas da máquina. O modelo permite que a partir de uma mesma solução inicial sejam obtidas diferentes seqüências de partes e ferramentas que contemplam diferentes estratégias de otimização que são definidas pelos valores atribuídos aos pesos das parcelas da função objetivo. O interesse para a geração deste modelo surgiu após a constatação que os problemas de Seleção de Partes e de Carregamento de Ferramentas com restrições, em um Sistema de Manufatura Flexível, são de difícil solução e que nunca haviam sido abordados juntos considerando restrições de tempo. A importância deste modelo está em oferecer uma abordagem mais flexível para tratar estes problemas. Utilizando o conceito de famílias de partes é feita a associação da seqüência de partes aos conjuntos de ferramentas que podem processá-las e as ferramentas que são carregadas no magazine. De modo a tornar o modelo mais realístico, além da capacidade limitada do magazine, também são consideradas as datas de vencimento das partes e os períodos dos turnos de produção na formação das seqüências.

No capítulo dois são apresentados os conceitos básicos de um Sistema de Manufatura Flexível. São descritos seus componentes e as classificações adotadas no estudo quanto a seus tipos e fases, dadas as características de como o sistema produz e das decisões tomadas. Também é apresentada uma discussão sobre o significado e a importância da flexibilidade em um Sistema de Manufatura Flexível.

No capítulo três são abordados os problemas de interesse para a formulação do Modelo de Seqüenciamento de Partes e de Ferramentas, que passa a ser denominado pela sigla MSPF. São apresentados e discutidos os problemas de Seleção de Partes, Carregamento de Ferramentas e de “Scheduling” com restrições em um “job shop”. No problema de “scheduling” com restrições é dada ênfase ao conflito que surge na geração da seqüência de partes, entre atender as datas de vencimento e respeitar o agrupamento de partes existente em relação aos conjunto de ferramentas. Este conflito é denominado no modelo como o problema de Atraso em um “scheduling”.

No capítulo quatro são feitas as descrições do MSPF em um “job shop”, da geração dos agrupamentos iniciais de partes e ferramentas e da obtenção do “scheduling” inicial. São apresentadas as definições e suposições feitas ao problema de um “job shop” que é formulado ao MSPF. A descrição do MSPF é apresentada através de suas entidades e atributos, suas relações e a função objetivo a ser otimizada. Na geração dos agrupamentos iniciais de partes e de ferramentas é proposto um algoritmo

inédito que agrupa as partes com relação aos conjuntos de ferramentas que podem processá-las, respeitando a capacidade do magazine. São apresentadas as suposições e o procedimento utilizado para a geração do “scheduling” inicial.

No capítulo 5 é apresentado o Algoritmo Tabu para Seleção e “Scheduling” de partes e ferramentas, o algoritmo TSS. Este algoritmo foi desenvolvido utilizando técnicas da pesquisa Tabu (Glover e Laguna, 1992). São apresentados os princípios básicos da pesquisa Tabu e algumas de suas aplicações de interesse ao MSPF. O algoritmo TSS é descrito e são feitos comentários específicos de suas características quanto a determinação de vizinhanças, formação das listas tabus e dos tipos de movimentos realizados.

No capítulo seis são apresentadas as estruturas dos programas utilizados e a aplicação do MSPF ao problema proposto por Tang e Denardo (1987) com o objetivo de estudar o comportamento do MSPF com relação a influência dos pesos da função objetivo que determinam as políticas adotadas na otimização do modelo. Utilizando a política de minimização do número de trocas de ferramentas no MSPF os resultados obtidos são comparados com os trabalhos de Tang e Denardo (1987), Widmer (1991) e Yanasse, Vijaykumar e Olivo (1996). São exibidos, também, resultados de experimentos que visam estudar o comportamento do modelo frente a adoção de novas políticas e uma aplicação a um problema de grande escala.

Finalizando, no último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas e recomendações para novas pesquisas dentro do escopo deste estudo.

CAPÍTULO 2

SISTEMA DE MANUFATURA FLEXÍVEL

Tradicionalmente, no planejamento e no gerenciamento de uma linha de produção convive-se com dois objetivos conflitivos: a *produtividade* e a *flexibilidade* do sistema. A *flexibilidade*, no esforço de produzir um grande número de produtos distintos, que é uma característica de um “job shop”, e a *produtividade*, na busca de uma maior velocidade na produção, que é uma característica de uma linha de montagem.

A utilização de um Sistema de Manufatura Flexível permite explorar a versatilidade dos componentes do sistema utilizando suas flexibilidades , sendo especialmente interessante para sistemas de manufatura que produzem vários tipos de partes em pequenas e médias quantidades.

Dado que a flexibilidade busca viabilizar a produção de um grande número de produtos distintos e a produtividade visa obter uma alta velocidade na produção busca-se uma modelagem que contemple estes dois objetivos.

No caso de um “job shop”, em que a produtividade geralmente é muito baixa, a busca do aumento da produtividade mantendo a flexibilidade do sistema é um problema ainda de difícil equacionamento.

2.1 - DEFINIÇÃO DE UM SISTEMA DE MANUFATURA FLEXÍVEL

Um *Sistema de Manufatura Flexível* é formado por um conjunto de *máquinas versáteis* e um *Sistema Automático de Manejo de Materiais*, capazes de processar simultaneamente médios e baixos volumes de uma variedade de *tipos de partes*, controlados por um *Sistema Computacional* e operadores.

O conceito de *máquina versátil* é o ponto de partida para o entendimento de um Sistema de Manufatura Flexível. Na década de 50, começaram a ser utilizadas máquinas de controle numérico nas linhas de produção. A utilização da tecnologia de Controle Numérico passou então a permitir a fabricação, de maneira rápida e precisa, de partes com formas complexas utilizando máquinas automatizadas. Logo em seguida, ocorreu a introdução do Controle Numérico por Computador (CNC), que viabilizou o uso de computadores para controlar a operação das máquinas. É deste pacote tecnológico que emerge o conceito de *máquina versátil*, ou seja, uma única máquina é capaz de processar vários tipos de partes conforme a programação de controle numérico e as ferramentas que lhe são carregadas.

Assim, nos primeiros Sistemas de Manufatura Flexível as máquinas não eram muito versáteis. Havendo casos em que era necessário mais de uma máquina para o processamento de uma parte. Atualmente, com a evolução do “hardware”, na maioria dos casos, somente uma máquina é capaz de produzir todos os tipos de partes. As ferramentas necessárias para o processamento das partes são armazenadas nas máquinas em magazines que possuem capacidade limitada de estoque.

O *Sistema Automático de Manejo de Materiais* realiza o transporte das partes e ferramentas entre as máquinas e almoxarifados. As partes se movimentam pelo sistema em conjuntos denominados de *lotes*. Finalmente, o *Sistema Computacional* faz o controle das ferramentas, das partes, das máquinas e do Sistema Automático de Manejo de Materiais.

O termo Sistema de Manufatura Flexível não significa que o sistema de manufatura é totalmente automatizado. Uma das expectativas de um Sistema de Manufatura Flexível é dotar a manufatura com algum grau de automação através do progresso obtido no desenvolvimento de seus componentes tecnológicos (máquinas, robôs, sistemas de armazenamento, etc..). Observa-se que o grau de automação tende a se expandir de maneira uniforme entre os componentes tecnológicos do Sistema de Manufatura Flexível. Entretanto, podem ser encontrados sistemas que possuem componentes com diferentes graus de automação.

2.2 - CLASSIFICAÇÃO DE UM SISTEMA DE MANUFATURA FLEXÍVEL

Jaikumar e Van Wassenhove (1989), Stecke (1989), Stecke e Toczyłowski (1992), Kouvelis (1992) e Oerlemans (1994) apresentam abordagens para classificar um Sistema de Manufatura Flexível. Neste estudo será adotada a classificação de Stecke e Toczyłowski (1992). Eles classificaram os Sistemas de Manufatura Flexível em dois tipos, conforme as características da linha de manufatura: *tipo dedicado e não dedicado*.

No *tipo dedicado*, tal como em uma linha de montagem, o Sistema de Manufatura Flexível produz um conjunto específico de tipos de partes através de um processo de manufatura em série.

No *tipo não dedicado*, que é o caso de um “job shop”, o Sistema de Manufatura Flexível procura satisfazer as especificações do produto fornecidas pelo usuário respeitando as limitações tecnológicas e organizacionais do sistema. Cada parte possui uma ordem de produção associada que define a seqüência dos processos que devem ser realizados e as datas de vencimento conforme o plano de produção.

Observa-se que no tipo não dedicado é exigida uma maior flexibilidade do sistema na definição do produto, tanto no esforço em atender as especificações do

cliente como em respeitar as capacidades e recursos da manufatura. A princípio, tem-se a idéia de adaptabilidade associada à flexibilidade. No item a seguir, veremos que a palavra mais apropriada é sobrevivência .

2.3 - FLEXIBILIDADE

A flexibilidade é um dos objetivos chaves de qualquer Sistema de Manufatura Flexível , sendo um indicador de como o sistema reage frente a ocorrência de mudanças. Ela permite que a manufatura possa sofrer alterações, sem colocar em risco sua sobrevivência.

A *flexibilidade*, em um Sistema de Manufatura Flexível, pode ser definida como a habilidade do sistema em suportar mudanças circunstanciais ou instabilidades geradas por fatores internos e/ou externos ao sistema.

Os distúrbios internos se manifestam através de quebra de máquinas, de tarefas com tempo de processamento variável, de filas de espera, de retrabalho e da ocorrência de material rejeitado entre outros. Já os distúrbios externos se manifestam devido as incertezas do mercado. Como por exemplo, mudanças ou flutuações de demanda, preços dos produtos, composição dos produtos e concorrência.

O sistema deve ser capaz de reconfigurar seus recursos de manufatura frente a uma situação de mudança e ofertar os produtos exigidos pelo mercado com qualidade aceitável.

Sistemas automatizados de manufatura manifestam flexibilidade de várias maneiras em relação a processos, equipamentos, produtos, volumes de produção etc.

Gupta e Goyal (1989) apresentaram uma classificação e métodos de medida para flexibilidade através de um levantamento da literatura existente. Sethi e Sethi (1990) fizeram um vasto estudo sobre flexibilidade após levantamento bibliográfico nos últimos 20 anos sobre o assunto. São enumerados 50 tipos de flexibilidade e sugeridas formas para medi-las e avaliá-las. A seguir , são citados alguns dos mais significativos:

- flexibilidade da operação de uma parte: é a habilidade de produzir uma parte de maneiras diferentes;
- flexibilidade da máquina: é a habilidade de fabricar vários tipos de partes, em uma máquina, sem necessitar de grandes esforços para passar de uma operação para outra;

- flexibilidade do processo : está relacionada a um conjunto de tipos de partes que o sistema pode produzir com o menor número de “setups”;
- flexibilidade do produto: é a habilidade do sistema em se modificar de maneira rápida e econômica para fabricar um novo produto, respeitando uma lista definida de partes;
- flexibilidade de roteamento: é a habilidade do sistema de manufatura em produzir uma parte por rotas alternativas através do sistema;
- flexibilidade no manejo de material: é a habilidade do Sistema Automático de Manejo de Material em mover diferentes partes eficientemente para posições apropriadas e conduzi-las pelo sistema;
- flexibilidade de volume: é a habilidade de gerenciar um Sistema de Manufatura Flexível de maneira lucrativa para diferentes volumes de produção;
- flexibilidade de expansão: é a capacidade de construir um Sistema de Manufatura Flexível e expandi-lo, se necessário, de maneira fácil e modular;
- flexibilidade de produção: é a habilidade de mudar rápida e economicamente uma variedade de partes de qualquer produto que o Sistema de Manufatura Flexível possa produzir. Um Sistema de Manufatura Flexível não atinge a flexibilidade de produção até que as demais flexibilidades sejam alcançadas; e
- flexibilidade de mercado: é a habilidade do sistema, em se adaptar às mudanças e flutuações do mercado. Ela permite a organização responder às mudanças sem comprometer seus negócios e se firmar sobre competidores com menos flexibilidade na exploração de novas oportunidades de negócios.

Ao final do estudo é salientada a necessidade de ser feita uma classificação mais detalhada dos tipos de flexibilidade.

A flexibilidade, portanto, deve assegurar ao sistema a capacidade de responder rapidamente frente ao acontecimento de um fato indesejável previsível ou de formular uma estratégia ofensiva ou defensiva diante de uma mudança inesperada. Quando, por exemplo, o tempo de produção estabelecido diminui, a estratégia de fabricar utilizando pequenos lotes pode ser mais econômica para sistemas de manufatura de larga escala.

Gupta e Somers (1992) citaram que a flexibilidade pode ser utilizada tanto para propósitos estratégicos defensivos como ofensivos. Uma estratégia ofensiva é uma ação proativa de risco. Ela utiliza a flexibilidade continuamente para buscar uma situação mais próspera para o sistema, propondo mudanças que devem conduzi-lo a uma situação mais competitiva no mercado. Já a estratégia defensiva é uma ação reativa. A flexibilidade é utilizada para suportar mudanças ou fatos imprevistos na rotina do sistema. A flexibilidade portanto, deve ser uma preocupação permanente e não uma improvisação. A idéia de que a flexibilidade não pode ser comprada, mas sim planejada e gerenciada é crucial para a sobrevivência do sistema.

Dixon (1992), tentando fugir de discussões de medida de flexibilidade de manufatura que ele considerava “muito teóricas”, abordou o problema de definição de medidas de flexibilidade através da coleta de dados e aplicando um fator de análise. Ele propôs que a definição de medida de flexibilidade fosse feita de três formas:

- flexibilidade do “mix”: produtos com características diferentes que são fabricados conjuntamente em um dado intervalo de tempo;
- flexibilidade de novos produtos: produtos com características funcionais diferentes de outros, ou seja, a utilização do produto não é mais a mesma; e
- flexibilidade de produtos modificados: produtos modificados, mas com as características funcionais mantidas.

Bernardo e Mohamed (1992), preocupados em como um Sistema de Manufatura Flexível responde a distúrbios internos e externos, apresentaram medidas de flexibilidade para avaliar decisões de carregamento de ferramentas e de roteamento de partes no sistema. Gupta e Somers (1992), apresentam um método para medida e análise de flexibilidade. A partir da identificação de 34 itens, que afetam a flexibilidade, foi desenvolvido um método para medi-los. Após um estudo envolvendo 269 firmas e empregando técnicas analíticas, eles chegaram a 21 itens que representam nove tipos de flexibilidades e seus métodos de medida. Eles, contudo, concluíram que o conceito de flexibilidade na manufatura ainda é de difícil síntese e que seus termos ainda não estão bem definidos.

2.4 - FASES DE UM SISTEMA DE MANUFATURA FLEXÍVEL

O sucesso no gerenciamento de um Sistema de Manufatura Flexível está ligado à solução eficaz de muitos problemas de natureza técnica, organizacional e de planejamento que surgem quando é introduzida à linha de fabricação a Tecnologia de Manufatura Flexível. Estes problemas devem ser resolvidos, mas os benefícios que um Sistema de Manufatura Flexível oferece somente serão alcançados se o sistema for

planejado e controlado de maneira eficiente. Oerlemans (1994) fornece referências bibliográficas e faz comentários sobre diversas metodologias que utilizam algum tipo de estrutura de decisão hierárquica para descrever a estrutura de um Sistema de Manufatura Flexível. A maioria delas faz referência a problemas de projeto, planejamento, seqüenciamento e controle em um S.M.F..

Optou-se , neste trabalho, pelo modelo apresentado por Stecke (1986), segundo o qual um Sistema de Manufatura Flexível pode ser agrupado em quatro fases de decisão:

1 - Projeto (Planejamento Estratégico).

Os assuntos abordados são de caráter quantitativo ou organizacional ; como seleção de partes a serem produzidas, escolha de máquinas e ferramentas, "layout" das máquinas e tipo de sistema de transporte entre outros.

2 - Planejamento do Processo (Planejamento Tático).

Consiste na organização da produção, tal que o plano de produção seja atendido. O objetivo é obter um uso eficiente dos recursos do sistema: máquinas, instalações, ferramentas, etc.

3 - “Scheduling” da Produção.

Definição de uma seqüência de trabalhos para as máquinas que, usando um certo critério, otimize suas operações.

4 - Controle e Monitoramento.

Gerenciamento em tempo real e controle do dia-a-dia da produção.

Sodhi, Askin e Sen (1994) apresentaram uma utilização do modelo proposto por Stecke (1986) para o controle de um Sistema de Manufatura Flexível que é ilustrado na figura 2.1. Eles propõem a divisão do modelo em duas fases devido aos requisitos tecnológicos e computacionais de um Sistema de Manufatura Flexível:

- *fase pré-operacional* : ligada a atividades características anteriores ao início da produção, ou seja, "setup", carregamento de ferramentas, etc...

- *fase operacional* : ligada a atividades características posteriores ao início da produção: tempo real, controle "on-line", movimento de partes, etc..

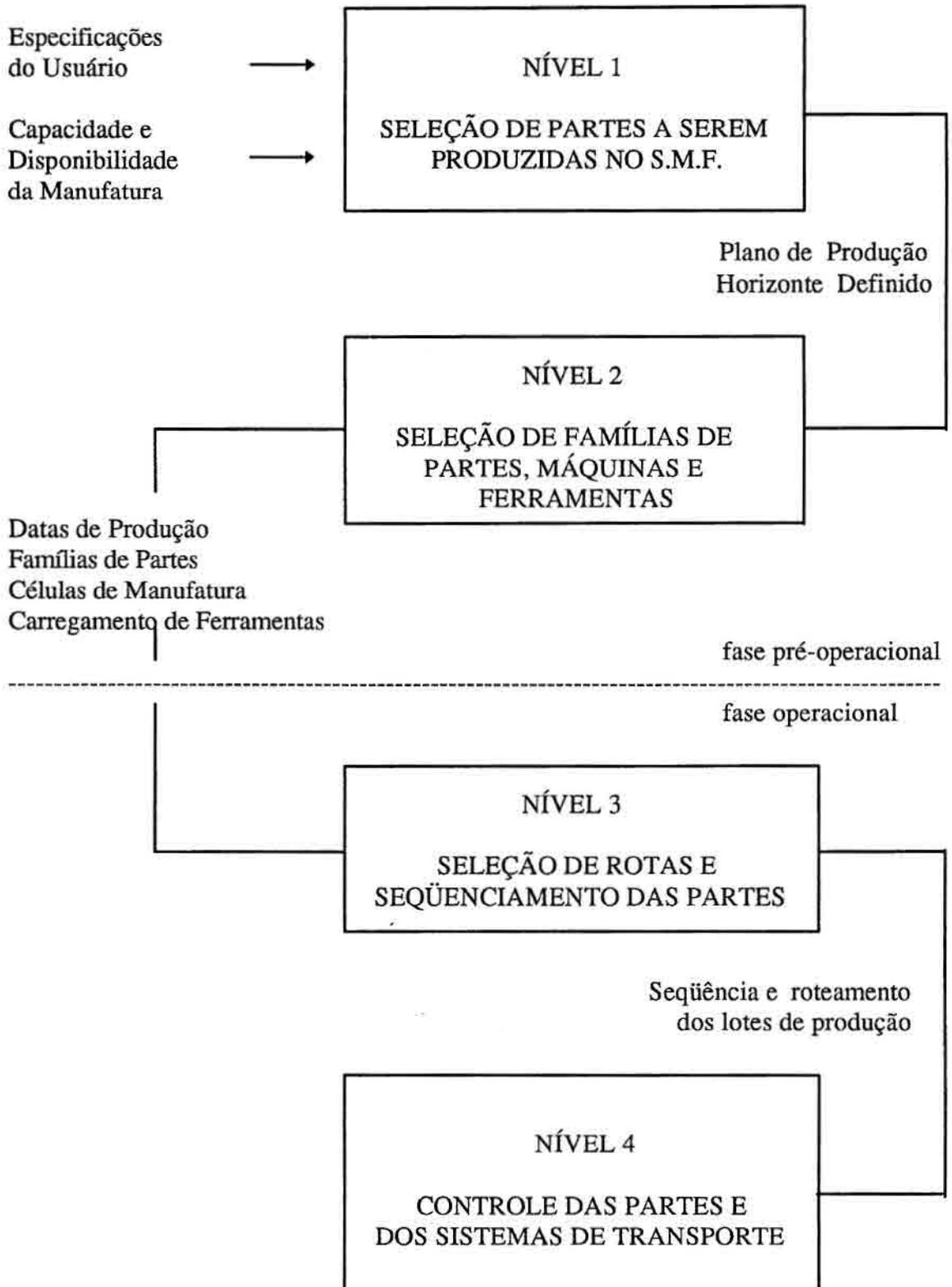


Fig. 2.1 - Modelo Hierárquico aplicado a um S.M.F.
 FONTE: Sodhi, Askin e Sen (1994) p.1186.

As decisões da fase pré-operacional estão relacionadas ao problema de Planejamento de um Sistema de Manufatura Flexível. Consideram o pré-arranjo das partes e ferramentas, antes do sistema iniciar a operar.

As decisões da fase operacional estão ligadas aos problemas de “Scheduling” e de Controle em um Sistema de Manufatura Flexível (Hwan e Shogan, 1989). Tratam do seqüenciamento e roteamento das partes quando o sistema está em operação e de seu monitoramento de forma a assegurar que sejam respeitadas as datas de vencimento e demais requisitos que estejam sendo considerados.

Na fase de planejamento são definidos todos os requisitos dos produtos. Estes requisitos são determinados através das especificações do usuário e da previsão de demanda das partes.

2.4.1 - PROBLEMAS DA FASE PRÉ-OPERACIONAL

A situação mais comum, em um Sistema de Manufatura Flexível, é aquela em que todas as partes requeridas não podem ser produzidas simultaneamente pelo sistema e não existe espaço suficiente nos magazines para alocar todas as ferramentas. Portanto, as partes devem ser agrupadas em lotes.

Os problemas da fase pré-operacional ou de planejamento são de difícil resolução. Stecke (1986), sugeriu que o problema de Planejamento fosse subdividido em 5 subproblemas:

- Seleção de partes: fazer a seleção de um subconjunto de partes para processamento imediato e simultâneo.
- Agrupamento de máquinas: fazer a partição das máquinas em grupos, tal que cada máquina de um grupo seja capaz de realizar o mesmo conjunto de operações.
- Proporção de produção: determinar as proporções dos tipos de partes a serem fabricadas.
- Alocação de recursos: alocar um número limitado de ferramentas e dispositivos, para a manufatura das partes selecionadas.
- Carregamento: designar operações e ferramentas a conjuntos de partes e máquinas sujeitos as restrições tecnológicas e de capacidade do Sistema de Manufatura Flexível.

Hwang e Shanthikumar (1987) abordaram o problema de Planejamento levando em conta que a maioria dos Sistemas de Manufatura Flexível não possuem sistemas automáticos para troca de ferramentas. Caso isto fosse verdade, poder-se-ia considerar o magazine com capacidade infinita e as decisões pré-operacionais seriam desnecessárias. A partir desta consideração, eles mostraram que o problema de Planejamento pode ser subdividido em dois subproblemas: Seleção de Partes e Carregamento.

Eles propuseram um sistema composto por quatro módulos: planejamento, balanceamento de máquinas, ferramentas e “scheduling”. No módulo de planejamento são formados os lotes e designadas as ferramentas para processá-los. No módulo de balanceamento de máquinas, as ferramentas são designadas às máquinas de acordo com seus tempos de processamento. O módulo de “scheduling” simula o movimento de cada parte entre as máquinas e calcula os tempos de finalização de cada máquina. Se a distribuição do tempo das máquinas estiver desbalanceada, um outro conjunto de ferramentas com maior tempo de processamento que o anterior é escolhido no módulo de ferramentas. Quando as máquinas estiverem bem balanceadas é escolhido um novo lote para a produção. As partes rejeitadas na formação de lotes, ficam a espera da chegada de novas partes que possibilitem a formação de novos lotes. Neste sistema as partes são selecionadas em lotes para processamento. A capacidade do magazine é respeitada e não há restrições as datas de vencimento, ao número de partes nos lotes e ao número de máquinas.

Dado que é impraticável resolver os problemas de Seleção de Partes e de Carregamento otimamente quando o tamanho do problema é grande, novas heurísticas devem ser propostas (Moreno e Ding, 1993). Tem-se observado um aumento de interesse no problema de Carregamento, especialmente no carregamento de ferramentas (Oerlemans, 1994).

2.4.2 - PROBLEMAS DA FASE OPERACIONAL

A fase operacional está ligada a decisões de curto prazo e ao “scheduling” do sistema. Como já foi visto no item 2.4, Stecke (1986) dividiu os problemas desta fase em dois tipos: problemas de “scheduling” e de controle.

Devido ao alto número de interações e a possibilidade da ocorrência de distúrbios, os problemas operacionais são complexos e de difícil resolução (Oerlemans, 1994). Técnicas de simulação são frequentemente utilizadas para determinar a performance dos procedimentos adotados para a resolução dos problemas de “scheduling” e de controle.

Os problemas de “scheduling” frequentemente são resolvidos por heurísticas. O propósito destas heurísticas é gerar “schedules” viáveis, que não precisam

necessariamente ser ótimos (Jaikumar e Van Wassenhove (1989), Blazewicz, Eiselt, Finke, Laporte e Weglarz (1991), Kusiak e He (1992) e Blazewicz e Finke (1994)).

Existe uma forte interdependência entre os problemas da fase Pré-operacional com os da fase Operacional. Jaikumar e Van Wassenhove (1989) apresentaram o problema de “scheduling” de famílias de partes como um pré-requisito para se obter um “scheduling” viável na fase Operacional. Follonier (1994) apresenta o problema de “scheduling” como um subproblema do problema de minimização de troca de ferramentas.

CAPÍTULO 3

PROBLEMAS DE INTERESSE AO MSPF

Neste capítulo serão discutidos os problemas de *Seleção de Partes*, de *Carregamento de Ferramentas* e de “*Scheduling*” com restrições em um “job shop” que são de interesse ao Modelo de Seleção de Partes e Ferramentas (MSPF).

O problema de *Seleção de Partes* é o primeiro que surge no planejamento, devido as características das máquinas e dos componentes tecnológicos que restringem as formas das partes a serem manufaturadas e a performance do sistema. Na prática, se existir um grande número de tipos de partes e/ou um grande número de operações para o processamento de cada parte, obter uma melhoria na performance do sistema é uma tarefa difícil. Esta situação é gerada devido as restrições de projeto do sistema tais como, número de ferramentas disponíveis de um dado tipo ou a capacidade do magazine não ser suficiente para processar todas as partes em conjunto.

O problema de *Carregamento de Ferramentas* surge quando deve ser escolhido um conjunto de ferramentas para o processamento de um novo lote. A maneira ou o critério de como serão carregadas as ferramentas no magazine pode refletir várias estratégias (Crama, 1995): maximizar o número de partes que podem ser produzidas sem ocorrer a troca de ferramentas, maximizar o uso do magazine, minimizar o número de trocas de ferramentas, minimizar o número de “setups” ou otimizar outras medidas de performance do sistema. O problema está em como se definir quais serão as ferramentas selecionadas.

Finalizando, na fase operacional tem-se o problema de “*Scheduling*” com restrições em um “job shop”. Devem ser propostas seqüências, para o processamento das partes e para o carregamento das ferramentas, que considerem as restrições das ferramentas, das datas de vencimento e dos períodos dos turnos de produção. Surge então a dificuldade de como reduzir o número de conflitos entre a designação corrente das partes aos lotes, agrupadas para serem processadas pelo mesmo conjunto de ferramentas, e a observância de suas datas de vencimento e dos períodos de produção dos turnos. Ou seja, dado que as datas de vencimento e os tempos de processamento dos turnos de produção devem ser respeitados, os lotes devem ser formados também levando em conta estas restrições temporais. Este problema será aqui denominado como o problema de *Atraso*.

3.1 - SELEÇÃO DE PARTES

O problema de Seleção de Partes é de difícil solução (Hwan e Shogan, 1989), sendo Np-árduo (Carter, 1995). Este problema, pode ser resolvido pelo agrupamento das partes em grupos, denominados de famílias de partes, tal que, cada família é processada pelo mesmo conjunto de ferramentas.

Tradicionalmente, a maioria dos métodos de seleção de partes buscava agrupá-las através de similaridades. Este enfoque é uma das ferramentas básicas da Tecnologia de Grupo (Kusiak e Chow (1986), Nakornchai e King (1982) e Heragu(1994)) ; agrupar por similaridades partes, máquinas ou ferramentas de modo a definir o planejamento e os processos da produção. A descrição das partes é feita através de suas formas geométricas, precisão dimensional, etc.. Existe , atualmente, um grande número de sistemas para classificação e codificação de partes disponíveis (Kusiak (1985) e Singh (1993)). Como exemplo, é ilustrado na tabela 3.1 o sistema OPTIZ (Alemanha Ocidental). Estes sistemas descrevem as partes através de seus atributos. Os atributos representam as características das partes através das quais é possível identificá-las e avaliar sua condição no sistema.

TABELA 3.1 - ESTRUTURA E CODIFICAÇÃO DO SISTEMA OPTIZ

| NÚMERO DO CARACTER | NOME DO ATRIBUTO | VALOR DO ATRIBUTO | | | |
|-----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|-----|-----------------|
| | | INTERVALO | | | |
| | | 1 | 2 | ... | n |
| 1 | Classe da parte | X ₁₁ | X ₁₂ | ... | X _{1n} |
| 2 | Forma principal | X ₂₁ | X ₂₂ | ... | X _{2n} |
| 3 | Superfície de Rotação | . | . | ... | . |
| 4 | Plano de Superfície | . | . | ... | . |
| 5 | Dimensões | . | . | ... | . |
| . | | . | . | ... | . |
| . | | . | . | ... | . |
| z | ..... | X _{z1} | X _{z2} | ... | X _{zn} |

FONTE: Kusiak (1985), p. 281.

Muitos outros métodos (Nakornchai e King (1982), Kusiak e Chow (1986), Gunasekaran , Martikainen e Yli-Olli (1993), Chang e Ben-Arieh (1993), Singh

(1993) e Heragu (1994)) baseados em medidas de similaridades entre as partes e a seus agrupamentos associados foram apresentados. Estes métodos, no entanto, não consideram de maneira realística algumas restrições que interessam ao MSPF como: capacidade do magazine, ferramentas disponíveis, datas de vencimento das partes e os períodos dos turnos de produção. Além disto, as medidas de similaridade são freqüentemente muito subjetivas.

Kumar, Kusiak e Vannelli (1986), abordaram o problema de agrupamento de partes em um Sistema de Manufatura Flexível. O agrupamento é obtido modelando o problema como uma k-decomposição de grafos orientados.

Stecke e Kim (1988 e 1991), propuseram duas abordagens para o problema de Seleção de Partes: *abordagem flexível* e *abordagem em lotes*. Na abordagem de lotes, as partes são agrupadas em lotes que serão produzidos continuamente até que todos os requisitos do plano de produção sejam atendidos. O carregamento das ferramentas no magazine é realizado antes do início de processamento dos lotes. O período de tempo gasto no descarregamento das ferramentas que não serão utilizadas no próximo processamento e no carregamento das novas ferramentas é denominado de “setup”.

Na abordagem flexível, quando o processamento de uma parte é finalizado, deve ser analisado que ferramentas devem permanecer no magazine e que novas ferramentas devem ser carregadas, de modo que um novo tipo de parte possa ser introduzido no sistema para processamento imediato.

Gyampah (1994) apresentou um estudo considerando os trabalhos de Steck e Kim (1988 e 1991). Ele analisou procedimentos para a seleção de partes considerando três abordagens: lotes, flexível e a residente. Em relação aos estudos de Steck e Kim é acrescentada a estratégia de ferramentas residentes. Este enfoque é uma extensão da estratégia de lotes, considerando a definição de rotas de processamento no sistema. Baseando-se no uso comum de ferramentas pelas partes são definidos conjuntos de ferramentas para os vários tipos de máquinas. Conforme a designação dos conjuntos de ferramentas às máquinas é definido o roteamento das partes.

3.2 - CARREGAMENTO DE FERRAMENTAS

Segundo vários autores (Hirabayashi et al. (1984), Tang e Denardo (1987 e 1988), Bard (1988), Stecke e Kim (1988), Stecke (1989), Jaikumar e Van Wassenhove (1989), Hwang e Shogan (1989), Stecke e Toczyłowski (1990), Follonier (1994), Moreno e Ding (1993), Crama, Kolen, Oerlemans e Spijksma (1994), Gyampah (1994) e Sodhi (1994)) as estratégias adotadas para o carregamento de ferramentas seguem duas abordagens principais: minimizar o número de trocas de

ferramentas ou minimizar o *número de instantes de parada para a troca de ferramentas*.

3.2.1 - MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE TROCAS DE FERRAMENTAS

No enfoque da *minimização do número de trocas de ferramentas*, o problema pode ser definido em como escolher uma seqüência de partes a ser processada e como as ferramentas devem ser carregadas no magazine de uma máquina tal que o número de trocas de ferramentas seja minimizado. Este problema torna-se complicado quando o tempo necessário para troca de ferramentas é significativo quando comparado aos tempos de processamento das partes ou quando muitos lotes pequenos de diferentes partes devem ser processados em série.

Tang e Denardo (1987) e Bard (1988) foram os primeiros a descrever este problema. Crama, Kolen, Oerlemans e Spijksma (1994) mostraram que este problema é NP-árduo e que o problema de decidir se existe uma seqüência de partes que requer exatamente um número fixo de “setups” de ferramentas é NP-completo. Follonier (1994) apresentou duas heurísticas para a solução do problema: uma baseada em um método de inserção e outra utilizando técnicas de pesquisa Tabu.

Tang e Denardo (1987) propuseram a resolução do problema de minimização do número de trocas de ferramentas, considerando como limitada a capacidade do magazine, utilizando a política “Keep Tool Needed Soonest” (KTNS). Dada uma seqüência inicial de partes e um conjunto de ferramentas necessárias para processá-las, cujo número é maior que a capacidade do magazine, no instante em que ferramentas devem ser removidas do magazine para dar lugar a outras necessárias ao processamento da próxima parte, devem permanecer no magazine as ferramentas que serão necessárias em um futuro próximo.

O problema de minimização do número de trocas de ferramentas tem se mostrado de difícil resolução. Muitas heurísticas tem sido propostas para sua resolução seguindo duas tendências:

- heurísticas construtoras que progressivamente constroem uma boa seqüência para as partes; e
- heurísticas de busca local que de maneira iterativa modificam uma seqüência inicial de partes.

As abordagens das heurísticas construtoras são baseadas em formulações similares as do problema do Caixeiro Viajante, onde a distância entre duas partes é uma estimativa do número de trocas de ferramentas necessárias entre elas. Outros tipos de heurísticas construtoras caem na categoria de heurísticas gulosas: partes

são sucessivamente inseridas a uma seqüência vigente segundo algum critério de prioridade.

Várias estratégias de pesquisa local tem sido formuladas para o problema de troca de ferramentas (Crama et al. (1994), Follonier (1994), Tang e Denardo (1988) e Widmer (1991)).

3.2.2 - MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE INSTANTES DE PARADA PARA A TROCA DE FERRAMENTAS

No enfoque de *minimização do número de instantes de parada*, o problema de Carregamento de Ferramentas pode ser definido como : dada uma seqüência fixa de partes como carregar as ferramentas no magazine tal que sejam minimizados o número de instantes de parada para a troca de ferramentas. Este problema é NP-árduo (Crama, 1995).

Hirabayashi, Suzuki e Tsuchiya (1984) formularam o problema como uma problema de cobertura de conjuntos de grande porte. Eles comentaram a possibilidade de resolver o problema de cobertura de conjuntos utilizando uma abordagem de geração de colunas.

Tang e Denardo (1987) mostraram que o problema de minimização do número de instantes de parada para a troca de ferramentas pode ser formulado como um problema de agrupamento de partes. Ou seja, minimizar o número de lotes é análogo a minimizar o número de instantes de parada para a troca de ferramentas. Eles propõem um procedimento “branch-and-bound” para encontrar uma partição ótima para o problema de agrupamento de partes.

Crama e Oerlemans (1994), seguindo o mesmo enfoque de Tang e Denardo (1987) de formular o problema como um problema de agrupamento de partes, formulam o problema como um problema de cobertura de conjuntos. Eles implementam o enfoque de geração de colunas para resolver a relaxação linear do problema de cobertura de conjuntos referente ao problema de agrupamento de partes.

3.3 - O PROBLEMA DE “SCHEDULING” COM RESTRICÇÕES

“Scheduling” considerando restrições é uma extensão da Teoria Clássica de “Scheduling”, estando atualmente bem desenvolvida (Blazewicz e Finke, 1994). Uma das mais importantes e complexas áreas de aplicação da teoria de “scheduling” ocorre em Sistemas de Manufatura Flexíveis. Neste contexto, as tarefas correspondem às partes a serem manufaturadas e os processadores a máquinas CNC. As

restrições podem dizer respeito as ferramentas, as partes, as máquinas ou ao Sistema Automático de Manuseio de Materiais. Alguns artigos já foram publicados sobre o assunto dentre os quais cita-se como de interesse Blazewicz, Finke, Haupt e Schmidt (1988), Blazewicz, Eiselt, Finke, Laporte e Weglarz (1991), He e Kusiak (1992) e Blazewicz e Finke (1993).

A maioria dos problemas de “scheduling” em Sistemas de Manufatura Flexível que consideram restrições são NP-árduos (Blazewicz et al., 1988). No MSPF, será feito o “scheduling” das partes e das ferramentas em um Sistema de Manufatura Flexível não dedicado, ou seja, um “job shop”. São consideradas as restrições físicas das ferramentas, quanto ao tipo e a capacidade do magazine, e as restrições temporais das datas de vencimento das partes e dos períodos de trabalho dos turnos de produção.

Como foi citado no capítulo um, no problema de “scheduling” com restrições é dado ênfase ao conflito que surge na geração da seqüência de partes, entre atender as datas de vencimento e respeitar o agrupamento de partes existente em relação aos conjunto de ferramentas. Este conflito é denominado no MSPF como o problema de Atraso em um “scheduling”.

O tratamento do *Problema do Atraso* junto ao problema de “Scheduling” se mostrou uma tarefa bem difícil, por envolver questões de problemas da fase pré-operacional do Sistema de Manufatura Flexível e por não ter seu escopo bem definido na literatura. Partiu-se de conceitos aplicados a problemas de “timetable” (Roy e Ferland (1983), Werra (1985), Carter (1986), Ferland e Aubin (1989), Werra e Chahal (1989), Hertz (1991), Kingston e Cooper (1993) e Costa (1994)) em um primeiro estudo do problema, passando-se após para o estudo de problemas de “scheduling” com restrições. Sendo que a principal dificuldade encontrada na resolução do problema de Atraso foi a de respeitar datas de vencimento iguais ou muito próximas de partes que não podiam ser processadas no mesmo lote.

CAPÍTULO 4

APLICAÇÃO DO MODELO DE SELEÇÃO DE PARTES E FERRAMENTAS - MSPF EM UM “JOB SHOP”

O meio ambiente de manufatura flexível considerado neste estudo é um “job shop” formado por uma única máquina versátil. Os parâmetros definidos para os tempos de processamento e algumas suposições do MSPF foram feitas a partir de consulta a minha dissertação de mestrado (Gómez, 1988) e pela realização de coleta de dados e estudos da dinâmica de produção da Seção de Furação por Controle Numérico do Setor de Circuito Impresso do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE.

A Seção de Furação por Controle Numérico possui uma máquina de furação C.N.C. com três cabeçotes e um magazine com capacidade total para 24 ferramentas. Quando a máquina está em operação, o magazine é compartilhado pelos cabeçotes que estiverem ligados, conforme a programação de controle numérico vigente. Como um exemplo, pode-se imaginar a situação em que é executado um processamento que tem demanda para os três cabeçotes. Neste caso, seria possível alocar no máximo até oito ferramentas por cabeçote. Ou seja, existiriam três seqüências iguais de até no máximo oito ferramentas armazenadas no magazine. Ou de outra forma, é como se existissem três máquinas com magazines de capacidade limitada a oito ferramentas.

São processados, em média, 200 diferentes modelos de circuitos impressos por ano. A quantidade média de partes por modelo é de 5 placas. Esta característica de baixos volumes por modelo é própria de projetos voltados para o desenvolvimento de protótipos para experimentos. Atualmente, há cadastrados em torno de 3.000 modelos diferentes de circuitos impressos a disposição para fabricação.

4.1 - DEFINIÇÕES

O “job shop” aqui considerado é formado por uma única máquina versátil. Ou seja, uma única máquina é capaz de processar qualquer parte que lhe seja destinada. Neste aspecto, cabe salientar que no caso de um “job shop” formado por várias máquinas são as ferramentas designadas à elas que determinam suas diferenças funcionais. Dado que todas as máquinas possuem a mesma flexibilidade é possível tratar o sistema inteiro como uma única máquina.

As partes são descritas através de seus atributos tais como: tipo, quantidade, data de vencimento, ferramentas utilizadas, etc.. Cada tipo de parte, a ser fabricado, tem associado uma ordem de produção. Sendo denominado *lote*, um conjunto de ordens de produção que podem ser processadas *continuamente* sem exceder ao

período do turno de produção a que pertencem. A palavra *continuamente* significa que todas as partes do lote são processadas por um mesmo conjunto de ferramentas e que durante todo o processamento não são realizadas trocas de ferramentas. A condição de que o processamento do lote não pode exceder ao período do turno significa que, quando o turno finaliza, não pode haver nenhuma parte em processamento.

Quando uma parte é selecionada, para processamento, tem-se associado o conjunto de ferramentas necessário para processá-la. Este conjunto de ferramentas necessita de um certo número de posições, que deve ser obrigatoriamente menor ou igual a capacidade do magazine. Pois, caso contrário, é impossível realizar o carregamento do magazine.

Toda vez que termina o processamento de um lote, dispositivos de transporte são acionados, a área de trabalho é limpa, manutenções são realizadas, ferramentas são descarregadas e carregadas no magazine e a máquina e dispositivos são preparados para o reinício de processamento. Este tempo de preparação entre o fim e início do processamento de dois lotes é chamado tempo de “*setup*”.

As ferramentas e as partes são transportadas por um Sistema Automático de Manejo de Materiais do almoxarifado até a área de trabalho. Tanto a máquina como o Sistema Automático de Manejo de Material são controlados por um Sistema Computacional.

4.2 - SUPOSIÇÕES

A seguir são comentadas as suposições feitas ao problema de “*scheduling*” com restrições em um “*job shop*” para aplicação do MSPF.

O “*job shop*” é formado por uma máquina versátil. Dado que são as ferramentas que determinam as diferenças funcionais entre as máquinas e que a máquina existente é capaz de operar todos os tipos de ferramentas necessárias para o processamento das partes é possível considerar o sistema como formado por uma única máquina.

Cada parte requer um conjunto de ferramentas que deve estar no magazine antes do início do processamento.

A máquina possui um magazine com capacidade limitada para armazenar as ferramentas. A capacidade do magazine é uma limitação crítica. Ela restringe o número de ferramentas que podem ser carregadas e, conseqüentemente, o número de partes que podem ser produzidas continuamente. Neste particular observa-se que se a capacidade do magazine fosse suficiente para conter todas as ferramentas necessárias para processar todas as partes, a seleção de partes não seria necessária.

Igualmente, se o Sistema de Manufatura Flexível possuisse um sistema de transporte que possibilitasse a substituição das ferramentas entre a máquina e almoxarifado de maneira instantânea, o magazine de ferramentas virtualmente teria capacidade ilimitada.

Não existe laço na produção. Ou seja, uma parte que começa a ser processada pelo sistema é finalizada e não retorna. Isto significa que todas as partes são necessariamente processadas e que as ferramentas correspondentes a cada lote devem estar nos magazines antes do início do processamento.

Os tempos de “setup” são considerados separadamente dos tempos de processamento das partes. Sendo constituídos por dois períodos: período de preparação do sistema para reinício de processamento (preparação da máquina e de dispositivos, limpeza da área de trabalho e manutenções) e o período de tempo gasto na troca das ferramentas. O tempo de preparação do sistema para reinício de processamento é considerado como fixo. O tempo de troca de ferramentas é considerado proporcional ao número de ferramentas trocadas.

Os turnos de produção são respeitados. Ou seja, no momento de término de um turno, nenhum lote pode estar em processamento ou vir a ser processado.

Deve-se buscar melhorar a flexibilidade do sistema tanto pela maneira de como os lotes são formados atendendo a seleção de partes com relação aos conjuntos de ferramentas, como pela diminuição do tempo de atraso atendendo ao plano de produção.

4.3 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE “SCHEDULING” EM UM “JOB SHOP” COM RESTRIÇÕES

Seja um conjunto de partes a serem processadas em uma máquina versátil e um conjunto de ferramentas disponíveis para processar as partes. Para cada parte são definidos pelo plano de produção: seu tempo de processamento, sua data de vencimento e o conjunto de ferramentas necessário para processá-la. O problema é designar o processamento das partes a intervalos de tempo tal que:

- nenhuma peça tenha sido pré-processada;
- a máquina pode processar somente uma parte por vez;
- a máquina está continuamente disponível (não são considerados tempos de parada e de manutenção);
- a capacidade do magazine é respeitada;

- os períodos dos turnos de produção são respeitados;
- as datas de vencimento são respeitadas;
- o plano de produção é conhecido antecipadamente ;
- os tempos de "setup" são considerados em separado dos tempos de processamento das partes.

O objetivo é obter seqüências para o processamento das partes e para o carregamento de ferramentas, que reflitam políticas que minimizem individualmente ou em conjunto os seguintes tempos do sistema:

- tempo de produção: tempo em que a última parte da seqüência tem seu processamento finalizado ;
- tempo de atraso: tempo referente ao somatório das diferenças positivas entre as datas de saída de produção de cada parte e suas respectivas datas de vencimento previstas no plano de produção;
- tempo gasto na preparação do sistema, cada vez que o processamento é parado para a troca de ferramentas: tempo referente a limpeza da área de trabalho, a realização de manutenções, ao acionamento de dispositivos de transporte e de procedimentos necessários para o reinício de processamento.
- tempo utilizado para a troca de ferramentas: tempo gasto na retirada e inserção de ferramentas no magazine. Este tempo é proporcional ao número de ferramentas trocadas;
- tempo ocioso dos turnos de produção: já que os períodos dos turnos de produção são respeitados, nenhuma parte pode estar em processamento ao final de um turno. O tempo ocioso dos turnos de produção é o somatório das diferenças entre as datas de finalização dos turnos e as datas de saída de suas últimas partes processadas.

4.4 - DESCRIÇÃO DO MSPF

Sejam, N o número de partes a serem processadas em uma máquina versátil conectada a um Sistema Automático de Manejo de Materiais, M o número de atributos que descrevem as características das partes e F o número total de ferramentas necessárias para o processamento das partes. O Sistema Automático de Manejo de Materiais conduz as partes para processamento em unidades denominadas de lotes e fornece os conjuntos de ferramentas para carregar o magazine. Um lote é considerado viável se pode ser processado sem a troca de ferramentas e dentro do período do turno de produção. O número de instantes de parada para a troca de ferramentas é K e o número de turnos é W .

Seja $A = [a_{ij}]$ uma matriz $N \times M$ de partes-atributos

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1M} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2M} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{NM} \end{vmatrix}$$

Onde a_{ij} , é o valor do atributo j da parte i . Cada linha da matriz representa um vetor de atributos correspondente a uma parte. No modelo são considerados 24 atributos em relação as partes, listados a seguir:

- 1 - número da parte;
- 2 - família de partes - origem;
- 3 - família de partes - destino;
- 4 - valor da função objetivo;
- 5 - tempo de atraso da parte - origem;
- 6 - data de saída de processamento da parte - origem;
- 7 - data de vencimento da parte;
- 8 - tempo de processamento da parte;
- 9 - turno da parte - origem;
- 10 - turno da parte - destino;
- 11 - lote da parte - origem;
- 12 - lote da parte - destino;
- 13 - data de saída de processamento da parte - destino;
- 14 - tempo de atraso da parte - destino ; e
- 15 a $(15 + F - 1)$ - tipos de ferramentas utilizadas pela parte.

Os termos origem e destino, citados nos atributos, se referem aos valores dos atributos antes e depois de ocorrer uma alteração no seqüenciamento das partes.

Para cada parte, caso nada seja definido em contrário, o número e os tipos de ferramentas requeridos são números inteiros gerados randomicamente. Para a geração do número de ferramentas utiliza-se uma distribuição uniforme no intervalo [1, ..., capacidade do magazine]. Para a determinação dos tipos de ferramentas, dado o número de tipos existentes, a escolha é feita no conjunto {0,1}; se “1” utiliza a ferramenta, caso contrário não utiliza.

A troca de uma ferramenta é definida como a remoção de uma ferramenta do magazine e a colocação de outra. No MSPF as ferramentas estão dispostas no magazine em ordem crescente segundo seu diâmetro.

A cada parte i estão associados os seguintes marcos temporais:

- tempo de processamento, a_{i8} ;
- data de vencimento, a_{i7}
- datas de saída da produção - origem e destino, a_{i6} e a_{i13} ;
- tempos de atraso - origem e destino, a_{i5} e a_{i14} ;

Os tempos de processamento das partes (a_{i8}) são números inteiros, gerados randomicamente e uniformemente distribuídos em um intervalo que não excede a metade do tempo de um turno de produção. Os turnos de produção são considerados no MSPF como períodos de 4 horas.

As datas de saída da produção das partes (a_{i6} ou a_{i13}) são números inteiros calculados a partir de seus tempos de processamento, de suas posições na seqüência de partes e dos tempos de “setup” do lote a que pertencem.

As datas de vencimento (a_{i7}) são números inteiros, gerados randomicamente e uniformemente distribuídos no tempo de produção. Os tempos de atraso (a_{i5} ou a_{i14}) são obtidos considerando os valores positivos da diferença entre as datas de saída (a_{i6} ou a_{i13}) e a data de vencimento (a_{i7}).

O tempo total de produção corresponde a data de saída (a_{i6} ou a_{i13}) da última parte da seqüência. O número de turnos (W) é obtido pela divisão do tempo total de produção pelo tempo do período de um turno de produção.

Os tempos de “setup” são números inteiros associados aos lotes. O “setup” é formado por uma parcela de tempo fixo (“setup” de preparação, S_p) mais uma parcela variável (“setup” de ferramenta, S_f) que é proporcional ao número de

ferramentas trocadas. Considerou-se no MSPF um tempo fixo de 5 minutos para Sp e um tempo proporcional a 4 minutos por troca de ferramenta para Sf.

A função objetivo a ser minimizada é definida pela soma dos seguintes tempos:

- tempo total de produção (“makespan”), representado por Tp;
- tempo total de atraso, representado por At;
- tempo total de “setup” de preparação para reinício de operação do sistema, representado por Sp;
- tempo total de “setup” referente a troca de ferramentas, representado por Sf;
- tempo total ocioso dos turnos, representado por Tr.

A cada parcela da função objetivo é associado um peso. Com relação as parcelas definidas acima respectivamente P₁, P₂, P₃, P₄ e P₅.

Seja então a função objetivo expressa em função de um horário “h” e de uma seleção de partes “p” definida por:

Minimize

$$f(h,p) = P_1 \cdot Tp(h,p) + P_2 \cdot At(h,p) + P_3 \cdot Sp(h,p) + P_4 \cdot Sf(h,p) + P_5 \cdot Tr(h,p)$$

onde,

$$Tp(h,p) = a_{i6}, \text{ tal que } i \text{ corresponde ao índice da última parte a ser processada no sistema, } i \in \{1, \dots, N\};$$

$$At(h,p) = \sum_{i=1}^N (a_{i6} - a_{i7}), \text{ tal que } (a_{i6} - a_{i7}) > 0, i \in \{1, \dots, N\};$$

$$Sp(h,p) = \sum_{i=1}^K Sp_i, \text{ tal que } Sp_i > 0, i \in \{1, \dots, K\};$$

$$Sf(h,p) = \sum_{i=1}^K Sf_i, \text{ tal que } Sf_i > 0, i \in \{1, \dots, K\};$$

$$\text{Tr}(h,p) = \sum_{i=1}^W \text{Tr}_i, \text{ tal que } \text{Tr}_i > 0, \quad i \in \{1, \dots, W\};$$

e

$$P_1 \geq 0, P_2 \geq P_3 \geq 0, P_4 \geq 0 \text{ e } P_5 \geq 0.$$

A função objetivo, conforme os valores definidos para os pesos, poderá refletir várias estratégias como por exemplo:

- minimizar o número de instantes de parada para a troca de ferramentas, ou seja, minimizar o número de lotes.
- minimizar o número de trocas de ferramentas.
- minimizar o tempo de produção.
- minimizar o tempo ocioso no final dos turnos.
- minimizar o tempo de atraso.

No capítulo seis, quando é implementado o MSPF, são exploradas as relações entre os pesos e as estratégias.

4.5 - SOLUÇÃO INICIAL

Dada a complexidade dos problemas envolvidos optou-se por gerar a solução inicial em duas fases. Na primeira, contemplam-se os problemas de Seleção de Partes e de Carregamento de Ferramentas pela obtenção dos agrupamentos de partes e dos respectivos conjuntos de ferramentas necessários para processá-las. A partir dos agrupamentos obtidos são definidos os lotes de produção respeitando as datas de vencimento das partes e os períodos dos turnos de produção, através de um algoritmo de “scheduling” especialmente desenvolvido para esta aplicação.

4.5.1 - SELEÇÃO INICIAL DE PARTES

Para gerar as famílias iniciais de partes utilizou-se os conceitos da Tecnologia de Grupo (Kusiak e Chow (1986), Nakornchai e King (1982) e Heragu(1994)) para obter um algoritmo de identificação de agrupamentos que considerasse a restrição no número de ferramentas.

4.5.1.1 - ALGORITMO MODIFICADO DE IDENTIFICAÇÃO DE GRUPOS

Kusiak e Chow (1986), propuseram duas formulações para o problema de Tecnologia de Grupo (Kusiak e Chow (1986), Nakornchai e King (1982) e Heragu(1994)): uma para o problema padrão e outra denominada de “formulação estendida” que leva em conta os custos associados a cada parte. Para resolver estas formulações foram propostos dois algoritmos. Um para identificação de agrupamentos e outro para resolver o problema da “formulação estendida” denominado de Algoritmo para Análise de Custos.

O *Problema Padrão da Tecnologia de Grupo* pode ser formulado como segue, em termos de partes e ferramentas.

Dada uma matriz de incidência binária de *partes x ferramentas* $B = [b_{ij}]_{N \times F}$ onde,

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a ferramenta } j \text{ é utilizada para o processamento da} \\ & \text{parte } i. \\ \\ & \text{e } 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$$

A matriz B é decomposta em submatrizes B_1, B_2, \dots, B_k , onde cada submatriz corresponde a um conjunto de ferramentas denominado de Família de Ferramentas e um conjunto de partes denominado de Família de Partes. O exemplo a seguir, ilustra o resultado obtido pela aplicação da Tecnologia de Grupo (T.G.) em uma dada matriz B.

| | | Ferramentas | | | | | | |
|--------|---|-------------|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Partes | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 4 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Aplicando o algoritmo de Kusiak e Chow (1986), obtém-se:

| | | Família de Ferramentas | | | | | | | |
|--------------------|---|------------------------|---|---|-----|---|---|---|---|
| | | FF1 | | | FF2 | | | | |
| Famílias de Partes | | 2 | 6 | 7 | 1 | 3 | 4 | 5 | |
| B = | 1 | FP1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | FP2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | 4 | | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |

Da decomposição, obtém-se duas submatrizes B_1 e B_2 .

A matriz B_1 corresponde a Família de Partes 1 que é formada pelas partes 1 e 3 que utilizam as ferramentas 2, 6 e 7, ou seja, $FP_1 = \{1,3\}$ e $FF_1 = \{2,6,7\}$.

A matriz B_2 corresponde a Família de Partes 2 que é formada pelas partes 2 e 4 que utilizam as ferramentas 1, 3, 4 e 5 ou seja, $FP_2 = \{2,4\}$ e $FF_2 = \{1,3,4,5\}$.

Caso não fosse possível “diagonalizar” a matriz, a utilização do algoritmo não levaria a identificação de novos agrupamentos além do inicial. O algoritmo de Identificação de Grupos proposto por Kusiak e Chow (1986) é descrito a seguir:

ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO DE GRUPOS (KUSIAK E CHOW, 1986)

Passo 0. Atualize iteração $k = 1$.

Passo 1. Selecione qualquer linha i da matriz incidente $B(k)$ ($B(k)$ representa a matriz na iteração k) e trace uma linha horizontal h_i sobre ela.

Passo 2. Para cada j , tal que $b_{ij} = 1$, cruzado pela linha horizontal h_i , trace uma linha vertical v_j .

Passo 3. Para cada i , tal que $b_{ij} = 1$, cruzado pela linha vertical v_j , trace uma linha horizontal h_i .

Passo 4. Repita os passos 2 e 3 até que não fique nenhum $b_{ij} = 1$ sem ser cruzado.

Passo 5. Transforme a matriz incidente $B(k)$ em $B(k+1)$ pela remoção das linhas e colunas traçadas nos passos 1 a 4.

Passo 6. Se a matriz $B(k+1)$ for nula pare; caso contrário faça $k = k+1$ e volte ao passo 1.

O problema da utilização deste algoritmo no MSPF é que a capacidade do magazine não é levada em conta. As partes que podem ser processadas por um mesmo conjunto de ferramentas são agrupadas. Mas, não existe restrição quanto ao número de componentes, tanto em relação ao número de ferramentas como em relação ao número de partes em cada agrupamento.

De maneira a viabilizar a utilização deste algoritmo foi adicionada uma restrição que impõe um limite superior somente ao número de ferramentas. A seguir, é descrito o novo algoritmo proposto, agora denominado de Algoritmo Modificado de Identificação de Grupos.

ALGORITMO MODIFICADO DE IDENTIFICAÇÃO DE GRUPOS

Passo 0. Atualize iteração $k = 1$.

Passo 1. Selecione a linha i , da matriz incidente $B(k)$, que possui o menor número de $b_{ij} = 1$ ($B(k)$ representa a matriz na iteração k) e trace uma linha horizontal h_i sobre ela.

Passo 2. Para cada j , tal que $b_{ij} = 1$, cruzado pela linha horizontal h_i , trace uma linha vertical v_j .

Passo 3. Verificar se o número de linhas verticais traçadas supera o limite estipulado do número de ferramentas.

SE superar ENTÃO

Selecionar de maneira crescente em relação ao número de linhas verticais v_j traçadas todas as linhas horizontais h_i traçadas tal que o limite do número de ferramentas seja respeitado (número de linhas verticais traçadas).

Vá ao passo 5.

SE_NÃO

- Passo 4. Para cada i , tal que $b_{ij} = 1$, cruzado pela linha vertical v_j , trace uma linha horizontal h_i . Volte ao passo 2.
- Passo 5. Transforme a matriz incidente $B(k)$ em $B(k+1)$ pela remoção das linhas e colunas traçadas nos passos 1 a 4. As colunas da matriz incidente $B(k)$ onde $b_{ij} = 1$, devem continuar aparecendo na matriz $B(k)$.
- Passo 6. Se a matriz $B(k+1)$ for nula, pare; caso contrário faça $k = k+1$ e volte ao passo 1.

Aplicando o algoritmo proposto ao exemplo anterior e considerando como três o limite do número de ferramentas no magazine obtém-se:

| | | Família de Ferramentas | | | | | | | |
|-------------------|---|------------------------|-----------------|-----------------|---|-----------------|---|---|---|
| | | FF ₁ | | FF ₂ | | FF ₃ | | | |
| Família de Partes | | 2 | 6 | 7 | 5 | 1 | 3 | 4 | |
| B = | 1 | FP ₁ | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | | | | | | | | |
| | 2 | FP ₂ | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| | 4 | | FP ₃ | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |

Da decomposição obtém-se três submatrizes B_1 , B_2 e B_3 .

A matriz B_1 corresponde a Família de Partes formada pelas Partes 1 e 3 que utiliza as ferramentas 2, 6 e 7, ou seja, $FP_1 = \{1,3\}$ e $FF_1 = \{2,6,7\}$.

A matriz B_2 corresponde a Família de Partes 2 formada pela parte 2 e utiliza as ferramentas 1 e 5, ou seja, $FP_2 = \{2\}$ e $FF_2 = \{1,5\}$.

A matriz B_3 corresponde a Família de Partes 3 formada pela parte 4 e utiliza as ferramentas 1, 3 e 4, ou seja, $FP_3 = \{4\}$ e $FF_3 = \{1,3,4\}$.

O algoritmo original buscava atingir uma matriz com blocagem na diagonal. Com o novo algoritmo, a blocagem deixa de existir e observa-se que uma mesma ferramenta pode ser utilizada por diferentes famílias de partes; a ferramenta 1 é compartilhada pelas famílias de partes dois e três. Esta situação, de compartilhamento de ferramentas, é compatível com as abordagens de lotes e de ferramenta flexível utilizadas para a resolução do problema de Seleção de Partes.

4.5.2 - “SCHEDULING” INICIAL

A partir dos agrupamentos iniciais, fornecidos pelo Algoritmo Modificado de Identificação de Grupos são gerados: o seqüenciamento das partes e das ferramentas, os turnos, os lotes, as datas de saída de produção e os tempos de processamento e de atraso de cada parte.

Abaixo, estão listadas, as suposições feitas na geração do “scheduling” inicial:

- a capacidade do magazine é respeitada;
- os tempos dos turnos de produção são respeitados. O tempo de um turno corresponde a quatro horas;
- cada vez que uma ferramenta é retirada do magazine e outra colocada em seu lugar é considerado que ocorreu uma troca de ferramenta;
- as ferramentas estão dispostas no magazine em ordem crescente com relação ao seu diâmetro;
- para determinar quais ferramentas serão trocadas em um instante de parada é realizada uma comparação, ferramenta a ferramenta, entre o conjunto de ferramentas que está sendo carregado e o existente no magazine;
- os tempos de “setup” são considerados separados dos tempos de processamento e formados por dois períodos;
 - a - período de “setup” referente a troca de ferramentas que é proporcional ao número de trocas. O tempo para troca de uma ferramenta corresponde a 4 minutos;

b - período de “setup”, referente ao instante de parada e reinício de processamento, é considerado fixo com o duração de 5 minutos ;

- nenhuma parte é processada em menos de 10 minutos;
- nenhuma parte gasta mais da metade do tempo de um turno de produção para ser processada. Mesmo com o pior tempo de “setup”, (tempo referente a troca do número máximo de ferramentas mais o tempo do “setup”de preparação), o tempo de processamento da parte mais o tempo de “setup” não podem ultrapassar ao tempo de meio turno;
- em cada turno, as partes vizinhas que pertencerem a mesma família de partes formarão um lote;
- as partes estão sequenciadas em ordem crescente com relação as datas de vencimento nos lotes.

A seguir é descrito o procedimento desenvolvido para gerar o “scheduling” inicial.

PROCEDIMENTO PARA GERAR O “SCHEDULING” INICIAL

- Passo 1. Gerar os tempos de processamento, para cada parte, de modo randômico e uniformemente distribuído no intervalo de 10 a 99 minutos;
- Passo 2. Obter o tempo total da produção das partes com o pior tempo de “setup” que depende da capacidade do magazine;
- Passo 3. Calcular o número de turnos, a partir do tempo total de produção obtido no passo 2;
- Passo 4. Gerar as datas de vencimento das partes, atributo 7, de modo randômico e uniformemente distribuído no intervalo de 10 minutos até o valor do tempo total de produção;
- Passo 5. Designar as partes aos turnos de produção, atributo 9, de modo randômico e uniformemente distribuído no intervalo que varia de 1 até o número máximo de turnos obtido no passo 3;
- Passo 6. Formar os lotes em cada turno agrupando as partes vizinhas que podem ser processadas pelo mesmo conjunto de ferramentas, atributo 11;

Passo 7. Sequenciar as partes, dentro de cada lote, com as datas de vencimento ordenadas em ordem crescente;

Passo 8. Calcular as datas de saída da produção das partes, atributo 6; e

Passo 9. Calcular os tempos de atraso das partes, atributo 5.

CAPÍTULO 5

ALGORITMO TABU PARA SELEÇÃO E “SCHEDULING”

A solução inicial fornece as famílias de partes e os conjuntos de ferramentas a elas associados observando a capacidade do magazine e um “scheduling” viável das partes e das ferramentas observando as restrições temporais (datas de vencimento das partes e os períodos dos turnos de produção). A próxima fase do MSPF consiste na utilização do Algoritmo TSS (Algoritmo para Seleção e “Scheduling” de Partes e de Ferramentas). Este algoritmo foi desenvolvido utilizando técnicas de Pesquisa Tabu. No item a seguir, são apresentados os princípios básicos da pesquisa Tabu e algumas de suas aplicações.

5.1 - PRINCÍPIOS BÁSICOS DA PESQUISA TABU

A *pesquisa Tabu* é uma metaheurística utilizada em problemas de otimização combinatória para procurar, em um conjunto de soluções viáveis S , um mínimo global de uma dada função F .

A partir de uma *solução* s , é considerada uma *vizinhança* $N(s)$ que consiste de todas as soluções possíveis que podem ser obtidas por uma modificação pré-definida de s chamada de *movimento*. O procedimento começa com uma solução inicial viável gerada independentemente e tenta alcançar um ótimo global do problema por movimentos passo a passo. Sempre que uma solução s é obtida é gerado um subconjunto V^* de $N(s)$ e é realizado o movimento para a melhor solução s^* em V^* . Se $N(s)$ não é muito grande é possível fazer $V^* = N(s)$.

A utilização do critério de melhor movimento na pesquisa Tabu é baseado na suposição de que movimentos bem avaliados tem grande probabilidade de conduzir a uma solução ótima (ou próxima do ótimo). De maneira a evitar ciclos e mínimos locais, não é permitido voltar às soluções que foram visitadas em um número k de movimentos anteriores. Esta estratégia é chamada de *lista tabu* ou memória de curto prazo da pesquisa Tabu. Esta lista, de comprimento k , é interpretada como uma fila. Sempre que um movimento de s para s^* é executado, o movimento é introduzido no fim da lista e o movimento mais antigo é removido. No momento em que um movimento que conduz a solução s entra na lista, todos os movimentos que retornam a s ficam proibidos nas próximas k iterações. Ou seja, s tornou-se uma solução tabu e qualquer movimento que leve a s é considerado um movimento tabu.

Dado que alguns movimentos considerados tabu podem não ser absolutos é introduzido um procedimento para cancelar a situação tabu de um

movimento quando este leva a uma melhoria. Uma função de critério de aspiração $A(z)$ é definida para cada valor z da função objetivo. Se um movimento para a solução vizinha s^* é um movimento tabu, mas $f(s^*) < A(z = F(s))$, então a situação tabu deste movimento é trocada e s^* é considerada como um membro normal de V^* .

Duas regras podem ser definidas como critério de parada na pesquisa tabu. A primeira é pela definição de um número máximo de iterações (nbmax) que serão realizadas sem se obter uma melhoria na melhor solução obtida. A segunda regra condiciona o critério de parada quando a melhor solução obtida é considerada muito próxima do limite inferior de F . O problema é que, geralmente, este limite não é conhecido com suficiente precisão.

Principalmente para problemas de larga escala, devido ao tempo de processamento ou mesmo ao uso de memória é inconveniente trabalhar-se com $V^* = N(s)$. Nestes casos, estratégias de diversificação e intensificação podem ser utilizadas (Glover e Laguna, 1992) de modo a limitar as estruturas de memória utilizadas na geração das vizinhanças. A estratégia de intensificação busca obter soluções privilegiando agressivamente as soluções que atendem a uma certa estratégia pré-estabelecida que é considerada boa para a pesquisa. Já a estratégia de diversificação busca obter soluções cujas composições sejam significativamente diferentes das obtidas anteriormente durante a pesquisa.

Uma descrição geral do algoritmo básico da pesquisa tabu para um problema de minimização (sem diversificação ou intensificação) é mostrada a seguir:

ALGORITMO GERAL DA PESQUISA TABU

s = solução inicial pertencente a S ;

niter = 0 (número de iterações);

melhiter = 0 (número da iteração correspondente a melhor solução encontrada);

nbmax = número máximo de iterações sem obter melhoria na melhor solução obtida;

melhsol = s (melhor solução);

$F_{\text{melhor}} = F(s)$ (valor da melhor solução);

F_{min} = valor mínimo estimado da função;

Inicializar a lista Tabu;

Inicializar a função do critério de aspiração $A(z = F(s))$;

ENQUANTO $(F(s) > F_{\min})$ OU $(\text{niter} - \text{melhiter} < \text{nbmax})$ FAÇA

$\text{niter} = \text{niter} + 1$;

 Gere um conjunto V^* de soluções s_i em $N(s)$;

 Escolha a melhor solução s^* em V^* que não seja tabu ou $F(s^*) < A(F(s))$;

 Atualize a função do critério de aspiração $A(z = F(s))$ e a lista tabu retirando o movimento mais antigo;

SE $F(s^*) < F(\text{melhsol})$ ENTÃO

$\text{melhsol} = s^*$;

$\text{melhiter} = \text{niter}$;

$F_{\text{melhor}} = F(s^*)$;

FIM_SE

$s = s^*$;

FIM_ENQUANTO

5.2 - APLICAÇÕES DA PESQUISA TABU

A Pesquisa Tabu, atualmente, já conta com inúmeras aplicações com sucesso nas áreas de “scheduling” (”flow shop”, ”job shop”, ...), transporte (problema do caixeiro viajante, roteamento, ...), “layout” e projeto de circuito impresso, telecomunicações (designação de caminhos, empacotamento, ...), grafos (agrupamento, coloração, máximo clique, ...), redes neurais e “timetabling”, dentre outras (Glover e Laguna, 1992).

Laguna, Barnes e Glover (1991) apresentaram um estudo de métodos de pesquisa tabu onde são apresentadas três estratégias de pesquisa local aplicáveis ao problema de “Scheduling” de uma Máquina. O objetivo do estudo era de investigar o efeito de diferentes tipos de movimentos na pesquisa tabu. O problema analisado consistia na minimização da soma dos custos de “setup” e das penalidades de atraso

quando vários trabalhos, que chegavam no tempo zero, deviam ser ordenados para processamento contínuo em uma máquina. Os tempos de processamento, as penalidades de atraso e os tempos de “setup” foram gerados randomicamente a partir de distribuições uniformemente distribuídas em intervalos definidos. As estratégias apresentadas, tinham como foco, o tipo de movimento escolhido para a pesquisa: troca de posição de dois trabalhos, transferência de posição de um trabalho (inserção) e um movimento híbrido que utilizava tanto movimentos de inserção como de troca.

Eles chegaram a conclusão que o movimento de inserção apresenta uma performance melhor que movimento de troca. Segundo os resultados obtidos, a pesquisa tabu com movimentos de troca requer um maior número de passos para melhorar um mínimo local encontrado ou chega ao fim da pesquisa sem encontrar a melhor solução.

Um dos motivos levantados para explicar este desempenho foi de que os movimentos de inserção são mais flexíveis que os de troca. Ou seja, qualquer movimento de troca pode ser obtido por dois movimentos de inserção, mas não é tão simples chegar-se por movimentos de troca a uma dada configuração obtida por um movimento de inserção. O método híbrido teve performance similar ao método que utiliza movimentos de inserção para problemas com até 30 trabalhos. Para problemas maiores o método híbrido apresentou resultados melhores. O método híbrido, utilizou movimentos de inserção em cerca de 90% do número de iterações.

Dell’Amico e Trubian (1992) apresentaram uma aplicação da pesquisa tabu ao problema de “scheduling” em um job shop. Eles propuseram um procedimento randômico para gerar soluções iniciais e um algoritmo randômico de pesquisa local, baseado nas técnicas de pesquisa tabu, para resolver o problema. Eles desenvolveram dois tipos de estruturas de vizinhanças, para provar que dada qualquer solução viável sempre existe uma seqüência de movimentos dentro da vizinhança que leva a um mínimo global. O algoritmo foi rodado para 53 exemplos. Na maioria dos casos, foi encontrada a solução ótima e nos demais a distância da solução encontrada em relação a ótima era muito pequena.

Widmer (1991) publicou um artigo sobre o “scheduling” em um “job shop” utilizando técnicas da pesquisa tabu em que as restrições referentes as ferramentas eram consideradas. O problema consistia em dado um conjunto de partes a serem processadas em uma máquina, encontrar a melhor seqüência para o carregamento das partes à máquina tal que o tempo total de produção (“makespan”) fosse minimizado.

Na formulação da função objetivo quatro componentes foram considerados:

- tempo total de produção;
- o número de mudanças de ferramentas;

- o número de partes atrasadas;
- o número de máquinas que não conseguiram encerrar suas atividades dentro do período de produção.

Sendo atribuídos pesos de valores 2 ou 1 a cada um dos componentes. A capacidade do magazine foi fixada em quatro.

Dada uma seqüência s , de partes a serem processadas em uma máquina, a vizinhança $N(s)$ foi definida como formada por todos os conjuntos de “schedules” viáveis que poderiam ser obtidos a partir de s pela alteração da posição de uma parte na seqüência. A melhor solução s^* , seria a seqüência que minimizaria a função objetivo em relação a todas as seqüências viáveis que poderiam ser obtidas a partir de s e que não conduzissem a um movimento tabu. O procedimento seria finalizado quando $nbmax$ iterações ocorressem sem melhorar a melhor solução vigente. Parte do artigo é dedicada a implementação do exemplo proposto por Tang e Denardo (1987) que busca a minimização do número de trocas de ferramentas no processamento de dez trabalhos utilizando nove tipos de ferramentas.

Widmer utilizou a abordagem de minimização do número de instantes de parada para a troca de ferramentas, ao contrário de Tang e Denardo que utilizam a estratégia de ferramenta flexível. Aplicando a política KTNS a seus resultados, Widmer em dez experimentos obteve os seguintes resultados: uma rodada com oito trocas de ferramentas, quatro com nove e dez trocas de ferramentas e uma com onze trocas de ferramentas. Utilizando a abordagem de minimização do número de instantes de parada para a troca de ferramentas o número mínimo de “setups” obtido foi de quatro. Widmer considerou os resultados obtidos utilizando a política KTNS bons. Segundo o autor, seu método foi desenvolvido para minimizar o número de paradas para mudanças de ferramentas e não o número de trocas de ferramentas.

Com relação a comparação dos resultados obtidos, Widmer declarou ser muito difícil, pois após pesquisa na literatura ele não encontrou nenhum método ou algoritmo que resolvesse o problema de um “job shop” considerando as mesmas restrições às ferramentas que ele definiu.

Widmer perseguia a obtenção de uma seqüência de partes que minimizasse o tempo total de produção, sendo que cada parte era considerada como um lote. O fato da ocorrência do seqüenciamento de uma ou mais partes que utilizassem um mesmo conjunto de ferramentas ficava a cargo da qualidade e do número de movimentos realizados ao longo da pesquisa tabu. Não foi feito um tratamento que conduzisse a solução pela formação de famílias de partes.

Hertz (1991) adaptou técnicas da pesquisa tabu para problemas de “timetabling”. O objetivo era reduzir o número de conflitos de cursos que ocorriam

simultaneamente envolvendo alunos ou professores em comum, ou que deviam ser ministrados no mesmo local. O autor utilizou uma abordagem de Aubin e Ferland (1989) que propõe que o problema seja atacado em duas fases: na primeira, busca-se definir um horário viável para os cursos e após tenta-se resolver o problema de agrupamento dos estudantes nos cursos. A idéia é atacar cada subproblema como um problema de designação ; a cada curso é designada uma data de início e estudantes são designados a determinados cursos. Após a designação deve-se utilizar um procedimento que modifique o horário de início dos cursos e o agrupamento de alunos sucessivamente até que não se consiga mais melhorias no valor da função objetivo.

Hertz propôs duas pesquisas tabu, uma para o horário, TATI (“Tabu Search for Timetabling”), e outra para o agrupamento, TAG (“Tabu Search for Grouping”). Foram obtidos bons resultados rodando somente o TATI no caso em que cada curso era ministrado somente uma vez. Hertz salienta que, em alguns problemas de “timetabling”, pode ser impossível obter um “timetabling” viável que satisfaça todas as restrições do sistema considerado.

Costa (1990) apresentou uma aplicação da pesquisa tabu em “timetabling”, onde o foco de sua preocupação estava na variedade de tipos de restrições, que deviam obrigatoriamente ser levadas em conta, e o volume de dados que tornavam o problema de difícil resolução. Seu objetivo era apresentar um algoritmo geral que pudesse ser facilmente adaptado e utilizado em várias universidades e escolas secundárias. Foi feita uma modelagem detalhada de um “timetabling” aplicado a uma escola com aproximadamente 13 conjuntos de elementos para definir os dados do problema (conjuntos de professores, de classes, de salas, de períodos,...) e levou em conta quinze restrições. Segundo Costa, dados os resultados obtidos, o método é bom. Em verdade, a maior contribuição observada é a prova de que utilizando a pesquisa tabu é possível facilmente levar-se em conta, sem maiores problemas, uma grande variedade de restrições que é uma das características do problema do MSPF.

5.3 - APLICAÇÃO DA PESQUISA TABU AO MSPF

Utilizou-se no MSPF técnicas da pesquisa tabu para obtenção das seqüências de tipos de partes e de ferramentas que refletissem a política de otimização determinada pelos valores dos pesos da função objetivo.

Foram adaptadas técnicas da pesquisa tabu visando reduzir o número de conflitos entre atender as datas de vencimento das partes e respeitar a designação das partes às famílias de partes. O conflito pode ser mais precisamente descrito pela seguinte situação. Uma parte ocupa uma dada posição, na seqüência de processamento, de tal forma que não gerará atraso. Porém, seu posicionamento na seqüência, irá gerar duas paradas para troca de ferramentas. O conjunto de ferramentas existente no magazine não

é capaz de processá-la e, após seu processamento, a nova configuração do magazine não permite processar a próxima parte.

Esta situação deve ser analisada no contexto do sistema tendo-se bem definido o que se quer otimizar. O que é explorado no MSPF, pela aplicação da pesquisa Tabu, é a flexibilidade do sistema de a partir da mesma solução inicial gerar diferentes seqüências de partes e ferramentas que retratam as estratégias de otimização adotadas no gerenciamento do sistema.

Foi desenvolvida uma estrutura modular, aplicada à pesquisa tabu, que permite que sejam feitas duas pesquisas de vizinhança em cada iteração: uma pesquisa que realiza movimentos de troca de posição de dois lotes e outra que realiza movimentos de retirada e inserção de uma parte em lotes.

É importante observar que as datas de vencimento e os tempos de processamento das partes gerados inicialmente não são mais alterados durante a pesquisa. Além do tipo de movimento realizado, um de troca de lotes e outro de retirada e inserção de partes, deve ser observada a diferença entre o que está sendo movimentado em cada movimento. No primeiro movimento são trocados conjuntos de partes, já anteriormente denominados de lotes. As seqüências das partes dos lotes movimentados se mantêm inalterada durante o movimento. É como se o lote fosse uma única parte. Na segunda pesquisa, uma parte é movimentada de um lote para outro. Este movimento ocorre independentemente de qual é a família de partes do lote destino.

Caso, após a realização de qualquer movimento, existir algum ou alguns lotes que não couberem nos turnos a que foram designados, eles serão partidos da melhor maneira possível. Este procedimento de partir lotes é aqui denominado de *reescalamento*. As partes do lote, cujo processamento iria acontecer além do período do turno, formarão um novo lote. Este novo lote irá ocupar a primeira posição no turno posterior. Este procedimento é realizado de maneira iterativa em todo o sistema até que se assegure que os tempos de processamento de todos os turnos estão sendo respeitados. Deve ser notado que o procedimento de reescalamento não aumenta o número de “setups”.

A seguir, é descrito o algoritmo principal utilizado denominado de Algoritmo TSS (Algoritmo Tabu para Seleção e “Scheduling” de Partes e Ferramentas):

ALGORITMO TSS

h = horário inicial;

p = seleção inicial de partes;

f_melhor = f(h,p);

niter = 0(número de iterações);

melhiter = 0 (número da iteração referente a melhor solução encontrada);

nbmax = número máximo de iterações sem obter uma melhora na solução;

Inicializar as listas Tabu para as duas pesquisas, L_1 e L_2 ;

Inicializar a função do Critério de Aspiração, $A(z = f(h,p))$

ENQUANTO

(niter - melhiter < nbmax) FAZER

f' = f_melhor;

niter = niter + 1;

// Primeira pesquisa de vizinhança, a designação das famílias de
// partes se mantem inalterada $p = p^*$;

Gerar um conjunto V_1^* de soluções $(h,p^*)_i$ em $N_1(h,p^*)$;

Escolha a melhor solução (h',p^*) em V_1^* ; que não é tabu
ou $f((h',p^*)_i) < A(f(h,p^*))$;

Atualize a lista tabu L_1 e a função do critério de aspiração
 $A(z)$;

SE $f(h',p^*) < f_melhor$

ENTÃO $f_melhor = f(h',p^*)$;

FIM_SE

```

h = h';

// Segunda Pesquisa de vizinhança;

Gerar um conjunto  $V_2^*$  de soluções  $(h,p)_i$  em  $N_2(h,p)$ ;

Escolha a melhor solução  $(h',p')$  em  $V_2^*$ ; que não é tabu ou
 $f((h,p)_i) < A(f(h,p))$ ;

Atualize a lista tabu  $L_2$ , e a função do critério de aspiração
 $A(z)$ ;

SE  $f(h',p') < f_{\text{melhor}}$ 

    ENTÃO  $f_{\text{melhor}} = f(h',p')$ ;

FIM_SE

p = p';
h = h';

SE  $f_{\text{melhor}} < f'$ 

    ENTÃO  $\text{melhiter} = \text{niter}$ ;

FIM_SE

FIM_ENQUANTO

```

Os detalhes do algoritmo TSS são descritos a seguir.

5.3.1 - DETERMINAÇÃO DAS VIZINHANÇAS

Como já foi visto, na descrição da técnica de aplicação de pesquisa tabu, a cada iteração do algoritmo TSS duas pesquisas de vizinhança são realizadas.

Na primeira pesquisa, dado o seqüenciamento de partes vigente na iteração precedente, o posicionamento de dois lotes é alterado por um movimento de troca. Nesta pesquisa, a vizinhança $N_1(h,p^*)$ é formada por todas as seqüências que podem ser obtidas pela troca de posição de dois lotes pertencentes a turnos de produção diferentes ou não. O conjunto V_1^* de soluções $(h,p^*)_i$ é considerado igual a $N_1(h,p^*)$, ou seja, toda a vizinhança é considerada, $N_1(h,p^*)=V_1^*$. Melhorando a definição de lote,

pode-se agora defini-lo como um conjunto de partes que estão sequencialmente encadeadas em um mesmo turno e que são processadas por um mesmo conjunto de ferramentas. Na realização desta primeira pesquisa, a designação das partes às famílias de partes permanece constante (p^*).

Na segunda pesquisa, a partir do seqüenciamento de partes gerado na pesquisa anterior, uma parte passa a ser processada em outro lote por movimentos de retirada e inserção. Neste caso, a vizinhança $N_2(h,p)$ é formada por seqüências obtidas pela retirada de uma parte pertencente a um lote e por sua inserção em outro lote. São consideradas três estratégias na geração da vizinhança $N_2(h,p)$:

- a parte poderá ser inserida em um lote que pertença a mesma família de partes (correspondendo a uma solução);
- a parte poderá ser inserida em um lote que pertença a uma família de partes diferente, mas que o conjunto de ferramentas associado é capaz de processá-la (correspondendo a uma solução);
- a parte poderá ser inserida em um lote que pertença a uma família de partes diferente e que o conjunto de ferramentas associado não é capaz de processá-la. Neste caso, excluindo o primeiro e o último lotes destino, tem-se três possíveis soluções associadas ao movimento. A parte poderá ser inserida no início, dentro ou no fim dos lotes destino. Para o primeiro e o último lotes destino a inserção ocorrerá dentro e no fim e no início e dentro respectivamente.

Na última estratégia, conforme a posição de inserção da parte no lote será designado um conjunto específico de ferramentas para processá-la.

5.3.2 - LISTAS TABUS

Cada uma das pesquisas de vizinhança possui uma lista tabu própria. O tamanho das listas foi definido de modo a evitar que a pesquisa ficasse presa a mínimos locais. Na primeira pesquisa são escolhidos os cinco melhores movimentos obtidos na vizinhança $N_1(h,p^*)$, para serem comparados com a lista Tabu da pesquisa 1.

A lista tabu é formada pelos últimos cinco movimentos realizados. Como a composição e o número de lotes varia de uma iteração para outra são guardados na lista tabu as partes que compõem os lotes. Um movimento de troca de lotes é considerado tabu se houver na lista um movimento que corresponda a troca das mesmas partes agrupadas da mesma maneira.

Caso o movimento não pertença à lista tabu ou se for aceito pelo critério do nível de aspiração o movimento é realizado. Caso contrário, é verificado o próximo movimento da lista dos cinco melhores movimentos da vizinhança $N_1(h,p^*)$.

O critério do nível de aspiração utilizado é o mais comum: caso o movimento escolhido estiver na lista tabu, mas o valor de sua solução for menor que a melhor solução vigente na pesquisa tabu (f_{melhor}) o movimento é aceito.

Na segunda pesquisa são também escolhidos os cinco melhores movimentos da vizinhança $N_2(h,p)$, para serem comparados com a lista tabu de partes da segunda pesquisa. O tamanho da lista considerado também é de 5, sendo guardado o movimento reverso referente ao número da parte movimentada e sua família de origem. Ou seja, um movimento é considerado tabu se houver na lista tabu um movimento que retorne a parte à sua família de partes de origem.

Caso o movimento não for tabu, ou mesmo sendo, se for aceito pelo critério do nível de aspiração o movimento é realizado. Caso contrário, é verificado o próximo movimento da lista dos cinco melhores movimentos da vizinhança $N_2(h,p)$.

O critério do nível de aspiração utilizado é o mesmo da primeira pesquisa de vizinhança: se o movimento estiver na lista tabu, mas o valor de sua solução for menor que a melhor solução vigente na pesquisa tabu (f_{melhor}) o movimento é aceito.

5.3.3 - MOVIMENTO DE TROCA DE LOTES

A realização do movimento pela troca de posição de dois lotes, além de provocar alterações nas datas de saída de processamento e nos tempos de atraso das partes, também altera a formação dos lotes. As considerações a seguir, dizem respeito às alterações que podem ocorrer na constituição dos lotes devido a realização do movimento de troca de dois lotes.

O movimento de troca de lotes acontece em três etapas:

- retirada dos dois lotes da seqüência;
- inserção dos lotes em posições trocadas;
- redefinição dos lotes.

No procedimento de retirada dos lotes, a seqüência dos demais lotes não é alterada. Os lotes retirados deixam de existir na seqüência e a ordenação dos

tempos de início de processamento das demais partes dos lotes que permaneceram não é realizada.

No procedimento de inserção, os dois lotes anteriormente retirados voltam a aparecer na seqüência em posições trocadas sem a preocupação de respeitar os tempos de processamento dos turnos de produção.

Na etapa final de redefinição dos lotes, os novos lotes serão formados respeitando os períodos de processamento dos turnos de produção e as famílias de partes.

Caso os lotes vizinhos pertençam a famílias diferentes do lote inserido a constituição dos lotes a princípio permanecerá inalterada. A ressalva, de a princípio não haver alteração na constituição dos lotes, considera que o movimento não provocou desrespeito ao tempo de processamento do turno que contém os lotes.

Se o tempo de processamento do lote inserido juntamente com o tempo de processamento dos demais lotes ultrapassar o tempo de processamento do turno, ocorrerá um reescalonamento das partes. As partes, cujos tempos de saída vão além do tempo de processamento do turno, formarão um novo ou novos lotes que ocuparão, mantendo a seqüência, as primeiras posições do turno posterior. Este procedimento poderá gerar um reescalonamento em todos os turnos posteriores.

Caso um dos lotes vizinhos, ou ambos, pertençam a mesma família de partes do lote inserido será formado um novo lote que conterà todas as partes da mesma família, admitindo que o período de processamento do turno seja respeitado. Como na consideração anterior, se estourar o tempo de processamento do turno será feito um reescalonamento das partes visando respeitar os tempos de processamento dos turnos.

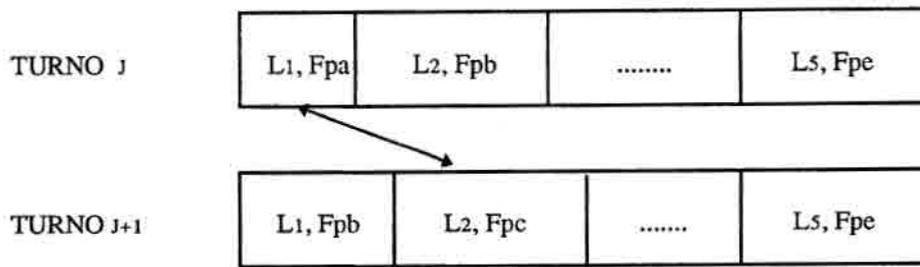
Lotes são considerados vizinhos quando suas datas de início ou de término de processamento estão encadeadas.

Novamente, salienta-se que as famílias de partes quanto a designação de seus componentes continuam inalteradas. Olhando-se pelo enfoque do problema do atraso, vê-se que os lotes são usados como um artifício que permite diminuir o número de conflitos entre a definição de uma seqüência de partes que busca minimizar o tempo de produção e as designações de famílias de partes vigentes que tem uma influência direta nos tempos de “setup”.

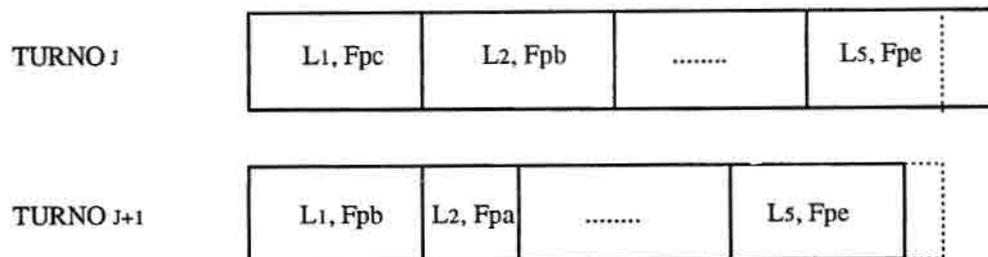
O movimento de troca de lotes pode diminuir o valor da função objetivo pela diminuição dos tempos de produção, de atraso e do tempo ocioso dos turnos pelo melhor seqüenciamento dos lotes. A minimização do tempo de “setup” somente acontece quando ocorre a junção de dois ou mais lotes em um só, ou quando os lotes de final e início (ou vice-versa) de turnos consecutivos pertencem a mesma família.

A seguir, é ilustrada uma seqüência de possíveis movimentos. Nos movimentos abaixo, os turnos aparecem como consecutivos somente para efeito de ilustração.

* RETIRADA DOS LOTES



* INSERÇÃO DOS LOTES



* REDEFINIÇÃO DOS LOTES

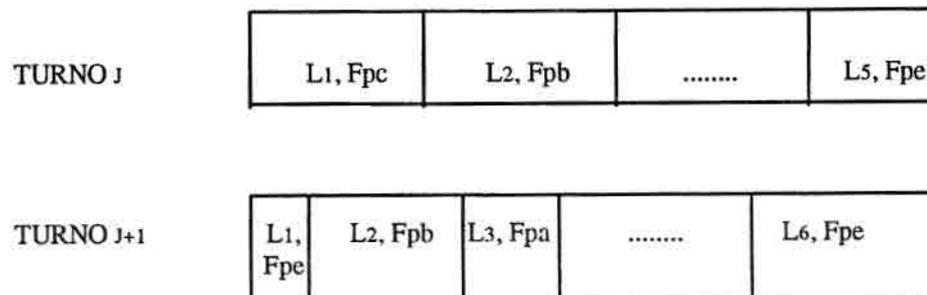


Fig. 5.1 - Movimento A de troca de lotes .

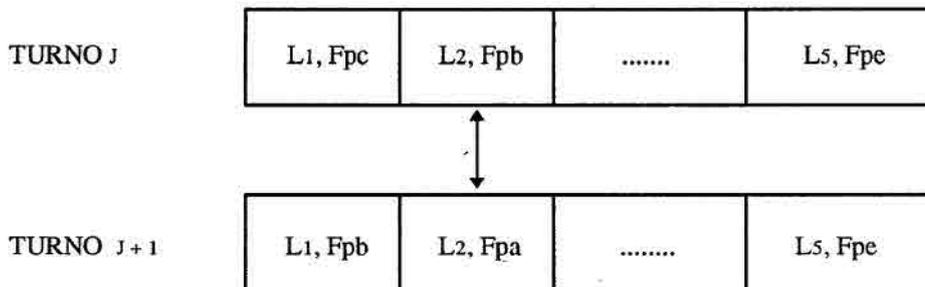
No início do movimento A, ilustrado na figura 5.1 acima, os turnos J e J+1 possuem, cada um, cinco lotes e não há tempo ocioso ao final dos turnos. O movimento a ser realizado consiste da troca do lote 1 do turno J com o lote 2 do turno J+1.

Após a inserção, observa-se que o período de processamento do turno J foi ultrapassado e surge um período de tempo ocioso no turno J+1. Observa-se e admite-se que nenhum dos lotes vizinhos, após o movimento, pertencem a mesma família de partes dos lotes inseridos e portanto, a constituição dos lotes se mantém inalterada.

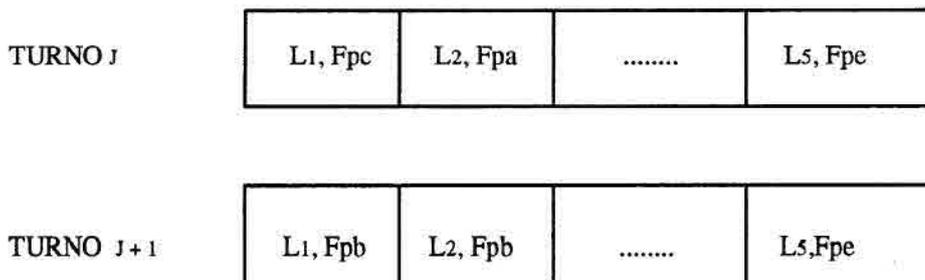
Como o período de processamento do turno J foi desrespeitado, o último lote, o lote 5 é partido. As partes, deste lote, cujos tempos de processamento ultrapassam o período do turno J são incluídas no turno J+1 formando um novo lote 1. Os demais lotes, do turno J+1, sofrem um processo de reescalonamento, tal que o lote que anteriormente ocupava a primeira posição passa a ocupar a segunda posição e assim por diante. Admite-se que após o reescalonamento o período do turno J+1 não é desrespeitado e que os tempos de “setup” entre os lotes são aproximadamente iguais.

No movimento B, ilustrado na figura 5.2, são trocados os segundos lotes dos turnos J e J+1.

* RETIRADA DOS LOTES



* INSERÇÃO DOS LOTES



* REDEFINIÇÃO DOS LOTES

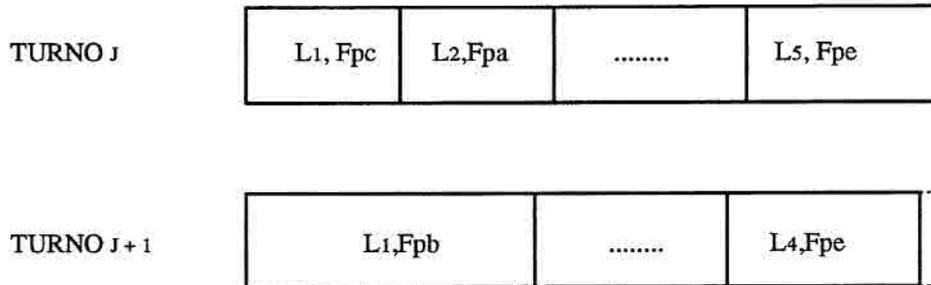


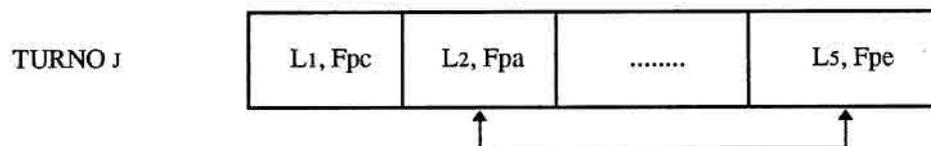
Fig. 5.2 - Movimento B de troca de lotes.

Após a inserção dos lotes, observa-se que os períodos dos turnos são respeitados e que no turno J+1 o lote 1 pertence a mesma família de partes que o lote inserido. Admite-se que os demais lotes vizinhos não definidos pertencem a famílias de partes diferentes.

Na redefinição dos lotes, no turno J+1, ocorre a diminuição de um lote pela junção das partes dos lotes 1 e 2 para formar o novo lote 1 e o surgimento de um período ocioso ao final do turno. Este período ocioso, corresponde ao tempo de "setup" suprimido, devido a formação do novo lote 1. Admite-se que a primeira parte do primeiro lote do turno J+2 não tenha tempo de processamento igual ou menor que o tempo ocioso existente no turno J+1. Caso, o período de tempo ocioso suportasse o processamento de partes do primeiro lote do turno J+2 elas seriam reescaladas formando um novo lote ao final do turno J+1.

No movimento C, ilustrado na figura 5.3, são trocados dois lotes pertencentes ao mesmo turno J. O lote 2 é trocado com o lote 5.

* RETIRADA DOS LOTES



* INSERÇÃO DOS LOTES

| | | | | |
|---------|---------|---------|-------|---------|
| TURNO J | L1, Fpc | L2, Fpe | | L5, Fpa |
|---------|---------|---------|-------|---------|

* REDEFINIÇÃO DOS LOTES

| | | | | |
|---------|---------|---------|-------|---------|
| TURNO J | L1, Fpc | L2, Fpe | | L5, Fpa |
|---------|---------|---------|-------|---------|

Fig. 5.3 - Movimento C de troca de lotes.

Após a inserção, admite-se que o período do turno é respeitado, ou seja, supõe-se que os novos tempos de “setup” são similares aos anteriores. Observa-se e admite-se que os lotes vizinhos aos lotes inseridos pertencem a famílias de partes diferentes. Na redefinição dos lotes o número de lotes permanece igual.

5.3.4 - MOVIMENTO DE RETIRADA E INSERÇÃO DE UMA PARTE

A vizinhança, nesta pesquisa, consiste de agrupamentos que podem ser obtidos pela retirada de uma parte de um lote e sua inserção em outro lote qualquer. Após a realização do movimento, a parte irá pertencer a um lote diferente, podendo ou não mudar de família de partes.

Diferente do movimento de troca de lotes, em que as partes se moviam em lotes sempre pertencendo a mesma família, na segunda pesquisa é realizado o movimento de uma só parte a qual, após o movimento, pode ou não continuar a pertencer a mesma família de partes.

Esta pesquisa se mostra muito interessante, pois pode alterar a configuração do sistema pela alteração do número e do tipo de família de partes consideradas. Ela também se mostra mais eficaz do que a primeira pesquisa na redução dos tempos ociosos ao final dos turnos pelo ajuste fino que é proporcionado pela movimentação de somente uma parte.

O movimento de retirada e inserção de uma parte em lotes ocorre em três etapas:

- retirada da parte do lote origem;
- inserção da parte no lote destino;
- redefinição dos lotes;

Na etapa de retirada da parte a seqüência das demais partes não é alterada.

Na etapa de inserção é feita uma restrição na vizinhança. Os lotes vizinhos, pertencentes a turnos diferentes do lote de origem, que são da mesma família da parte são excluídos. O motivo desta inclusão é que no procedimento de redefinição dos lotes a parte tem grande probabilidade de voltar a pertencer ao lote de origem.

A etapa de inserção não é trivial, já que a parte pode ser inserida em qualquer lote. Se o lote destino pertencer a mesma família de partes ou a uma outra família cujo conjunto de ferramentas também é capaz de processar a parte, a redefinição dos lotes leva somente em conta o respeito aos tempos de processamento dos turnos. Não será criada nenhuma nova família de partes. Se o lote destino pertencer a uma família de partes diferente do lote de origem e o conjunto de ferramentas que o processa não é capaz de processar a parte a ser inserida uma nova família de partes e um novo lote serão criados.

A geração da nova família de partes ocorre segundo as seguintes regras:

- as ferramentas da parte a ser inserida sempre farão parte da nova família;
- o número de ferramentas da nova família sempre será igual a capacidade do magazine;
- as demais ferramentas, excluindo as já designadas, serão escolhidas em ordem crescente com relação ao diâmetro segundo os critérios e prioridades abaixo até que o magazine esteja completo:
 - . ferramentas comuns entre as que processaram o lote anterior e as que irão processar o lote seguinte;
 - . ferramentas que irão processar o(s) lote(s) seguinte(s);

No caso dos primeiro e último lotes não são analisadas as ferramentas dos lotes anterior e seguinte respectivamente. Vê-se que a vizinhança na segunda pesquisa é bem maior do que na primeira. Para um movimento pode-se ter associadas uma, duas ou três soluções, conforme as características do conjunto de ferramentas associado ao lote destino. Como ilustração cita-se que para exemplos considerando 10 partes, 9 ferramentas com capacidade do gabarito limitada a quatro ferramentas o número médio de soluções da primeira vizinhança ficou em torno de 80 e da segunda vizinhança em torno de 220. Para exemplos considerando 50 partes, 10 ferramentas com capacidade do gabarito também limitada a quatro ferramentas, o número médio de soluções da primeira vizinhança passou para 1150 e da segunda para 4500.

Dado o novo seqüenciamento das partes após o movimento, caso um lote ultrapassar o tempo de processamento do turno ele será partido ou carregado inteiro para o lote anterior seguindo o processo de reescalonamento. Caso aumentem os tempos ociosos no final dos turnos os primeiros lotes dos turnos serão partidos, se possível, ou carregados inteiros para formar um novo último lote nos turnos antecessores seguindo o processo de reescalonamento.

A seguir, é ilustrada uma seqüência de possíveis movimentos:

* RETIRADA DA PARTE

| | | | | |
|---------------|---------|---------|---------|---------|
| TURNO ORIGEM | L1, Fpa | L2, Fpb | L3, Fpe | |
| | p1, p5 | p2 | p10 | |
| ↓ | | | | |
| TURNO DESTINO | L1, Fpb | L2, Fpc | ..... | L5, Fpe |
| | p3 | p11, p4 | | p8 |

* INSERÇÃO DA PARTE

| | | | |
|--------------|---------|---------|--|
| TURNO ORIGEM | L1, Fpa | L2, Fpe | |
| | p1, p5 | p10 | |

| | | | | |
|---------------|---------|-------------|-------|---------|
| TURNO DESTINO | L1, Fpb | L2, Fpc | ..... | L5, Fpe |
| | p3 | p11, p4, p2 | | p8 |

* REDEFINIÇÃO DOS LOTES

| | | | |
|--------------|--------|--------|--------------------|
| TURNO ORIGEM | L1,Fpa | L2,Fpe | L3,Fpb |
| | p1, p5 | p10 | p21, p22, p24, p25 |

| | | | | | |
|---------------|--------|-------------|-------|--------|-------|
| TURNO DESTINO | L1,Fpb | L2,Fpc | ..... | L4,Fpa | ..... |
| | p3 | p11, p4, p2 | | p12 | |

Fig. 5.4 - Movimento A de retirada e inserção de uma Parte

No início do movimento A, ilustrado na figura 5.4, o turno de origem contém três lotes e um período de tempo ocioso e o turno destino contém cinco lotes. O movimento a ser realizado, consiste da retirada da parte p2 do segundo lote do turno de origem e sua inserção no segundo lote do turno definido como destino. Admite-se que, a parte p2 pode ser processada pelo conjunto de ferramentas associado a família de partes c.

Como o segundo lote, do turno de origem, era formado somente pela parte p2, o procedimento de retirada elimina um lote do turno aumentando o período de tempo ocioso.

Devido a inserção da parte p2 o período do turno destino é desrespeitado pelo lote 5. Salienta-se que, no procedimento de inserção de partes é

realizado o reescalonamento das partes no lote tendo como base a data de vencimento das partes em ordem crescente.

Na etapa final de redefinição dos lotes é realizado o reescalonamento das partes, de modo a respeitar os períodos de produção dos turnos. No turno de origem, o período de tempo ocioso existente é ocupado por um novo lote oriundo de seu turno posterior. No turno destino ocorre a diminuição de um lote, pelo reescalonamento do lote 5 para o turno posterior.

* RETIRADA DA PARTE

| | | | | |
|---------------------------|---------|---------|-------|---------|
| TURNO ORIGEM E DESTINO | L1, Fpa | L2, Fpe | ..... | L5, Fpc |
| | p1, p5 | p10 | | p15, p8 |

↑

* INSERÇÃO DA PARTE

| | | | | |
|---------------------------|------------|---------|-------|---------|
| TURNO ORIGEM E DESTINO | L1, Fpa | L2, Fpe | ..... | L5, Fpc |
| | p1, p8, p5 | p10 | | p15 |

* REDEFINIÇÃO DOS LOTES

| | | | | |
|---------------------------|------------|---------|-------|---------|
| TURNO ORIGEM E DESTINO | L1, Fpa | L2, Fpe | ..... | L5, Fpc |
| | p1, p8, p5 | p10 | | p15 |

Fig. 5.5 - Movimento B de retirada e inserção de uma Parte

No início do movimento B, ilustrado na figura 5.5, o turno de origem contém cinco lotes. O movimento a ser realizado, consiste da retirada da parte p8 do

quinto lote e sua inserção no primeiro lote do mesmo turno. Deste modo, o turno destino é igual ao turno origem. Admite-se que, a parte p8 pode ser processada simultaneamente pelo conjunto de ferramentas associado a família de partes *a*.

No procedimento de retirada, o lote 5 diminui seu tempo de processamento.

Devido a inserção da parte p8, o período de processamento do lote 1 aumenta. O período de processamento do turno se mantém inalterado, pois os tempos de processamento das partes e de “setup” não foram modificados. Dado que o movimento foi realizado, a minimização da função objetivo deu-se pela diminuição do atraso dada a nova seqüência de partes obtida. Admite-se que não havia tempo ocioso no turno em que ocorreu o movimento.

* RETIRADA DA PARTE

| | | | | |
|--------------|---------|---------|---------|--|
| TURNO ORIGEM | L1, Fpa | L2, Fpb | L3, Fpe | |
| | p1, p5 | p2 | p10 | |

↓

| | | | | |
|---------------|---------|---------|-------|---------|
| TURNO DESTINO | L1, Fpb | L2, Fpc | ..... | L5, Fpe |
| | p3 | p11, p4 | | p8 |

* INSERÇÃO DA PARTE

| | | | | |
|--------------|---------|---------|--|--|
| TURNO ORIGEM | L1, Fpa | L2, Fpe | | |
| | p1, p5 | p10 | | |

| | | | | | |
|---------------------------|---------|---------|---------|-------|---------|
| TURNO DESTINO (início) | L1, Fpb | L2, Fpg | L3, Fpc | ..... | L6, Fpe |
| | p3 | p2 | p11, p4 | | p8 |

ou

ou

| | | | | | | |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|-------|---------|
| TURNO DESTINO (dentro) | L1, Fpb | L2, Fpc | L3, Fpm | L4, Fpc | ..... | L7, Fpe |
| | p3 | p11 | p2 | p4 | | p8 |

ou

| | | | | | |
|------------------------|---------|---------|---------|-------|---------|
| TURNO DESTINO (fim) | L1, Fpb | L2, Fpc | L3, Fpn | ..... | L6, Fpe |
| | p3 | p11, p4 | p2 | | p8 |

* REDEFINIÇÃO DOS LOTES

| | | | |
|--------------|---------|---------|--------------------|
| TURNO ORIGEM | L1, Fpa | L2, Fpe | L3, Fpb |
| | p1, p5 | p10 | p21, p22, p24, p25 |

| | | | | | |
|---------------------------|---------|---------|-------|---------|-----|
| TURNO DESTINO (início) | L1, Fpb | L2, Fpg | ..... | L5, Fpa | ... |
| | p3 | p2 | | p12 | |

ou

| | | | | | |
|---------------------------|---------|---------|-------|---------|----|
| TURNO DESTINO (dentro) | L1, Fpb | L2, Fpc | ..... | L6, Fpa | .. |
| | p3 | p11 | | p12 | |

ou

| | | | | | |
|------------------------|---------|---------|-------|---------|------|
| TURNO DESTINO (fim) | L1, Fpb | L2, Fpc | ..... | L5, Fpa | .... |
| | p3 | p11, p4 | | p12 | |

Fig. 5.6 - Movimento C de retirada e inserção de uma Parte

No início do movimento C, ilustrado na figura 5.6, o turno de origem contém três lotes e um período de tempo ocioso e o lote destino contém cinco lotes. O movimento a ser realizado, consiste da retirada da parte p_2 do segundo lote do turno de origem e sua inserção no segundo lote do turno definido como destino. Admite-se que, a parte p_2 não pode ser processada pelo conjunto de ferramentas associado a família de partes c .

Como o segundo lote, do turno de origem, era formado somente pela parte p_2 , o procedimento de retirada elimina um lote do turno aumentando o período de tempo ocioso.

A inserção da parte p_2 pode ocorrer em três posições no lote 2 do turno destino: no início, dentro e no fim. Devido a inserção da parte p_2 o período do turno destino é desrespeitado pelo lote que contém a parte 8.

Caso a inserção se dê no início do lote 2 é criado um novo lote 2 e uma nova família de partes g no turno destino. A parte p_2 passa a pertencer ao segundo lote do turno destino e o conjunto de ferramentas associado a família de partes g é capaz de processar a parte dois. O lote 3 é agora formado pelas partes p_{11} e p_4 da família de partes c e a parte p_8 da família de partes e passa a pertencer ao sexto lote.

Caso a inserção se dê dentro do lote 2 e admitindo que a data de vencimento da parte 11 seja menor que a a parte 4 observa-se que: o lote 2 do turno destino diminuiu de tamanho por ter perdido p_4 , foi criado um novo lote 3 correspondente a nova família de partes m que contém p_2 , foi criado um novo lote 4 correspondente a família de partes c que contém p_4 e, finalmente, p_8 da família de partes e passa a pertencer ao sétimo lote.

Caso a inserção se dê no fim do lote 2 é criado um novo lote 3 e uma nova família de partes n no turno destino. A p_8 passa a pertencer agora ao sexto lote que corresponde a família de partes e .

Na etapa final de redefinição dos lotes é realizado o reescalamento das partes, de modo a respeitar os períodos de produção dos turnos. No turno de origem, o período de tempo ocioso existente é ocupado por um novo lote oriundo de seu turno posterior. No turno destino ocorre a diminuição de um lote, pelo reescalamento do último lote para o turno posterior. Observar que o período de tempo ocioso no turno destino gerado quando a inserção ocorre dentro do lote é menor que nas duas outras possibilidades devido ao “setup”.

CAPÍTULO 6

IMPLEMENTAÇÃO DO MSPF

De maneira a promover um melhor entendimento e aprendizado do Modelo de Seqüenciamento de Partes e de Ferramentas (MSPF) a implementação foi realizada em duas etapas. Na primeira, a implementação baseou-se nos resultados obtidos por Tang e Denardo (1987) onde é abordada a minimização do número de trocas de ferramentas. Após a realização de uma série de testes, visando a correção e o aperfeiçoamento do MSPF, passou-se para o estudo de seu comportamento quando privilegia-se, através dos pesos, cada uma das parcelas da função objetivo. Nesta última etapa, a partir dos resultados obtidos foram analisadas as relações entre as parcelas e verificada a consistência com o MSPF. Deve ser salientado que não há dados para comparar o MSPF em toda sua abrangência.

A heurística proposta por Tang e Denardo (1987), por exemplo, tem por objetivo a resolução do problema de minimização do número de trocas de ferramentas considerando a capacidade limitada do magazine. A seqüência de partes é considerada fixa e aspectos temporais não são levados em conta. Widmer (1991) considerou o problema de troca de ferramentas pela abordagem de minimização dos instantes de parada para troca de ferramentas. Utilizando a pesquisa tabu, a partir de uma seqüência inicial de partes, é procurada uma seqüência de partes que minimize o número de instantes de parada. As novas seqüências são obtidas no decorrer da pesquisa pela troca de posição de uma parte na seqüência. A capacidade do magazine também foi considerada como limitada. Yanasse, Vijaykumar e Olivo (1996) propuseram uma heurística para minimização do número de trocas de ferramentas em que a partir da obtenção de uma configuração inicial do magazine que contém as ferramentas menos utilizadas são propostas as seqüências de partes a serem processadas de tal sorte que as ferramentas iniciais depois de descarregadas não voltem mais ao magazine. A idéia é que, iniciando com o magazine carregado com as ferramentas menos utilizadas uma vez que elas sejam descarregadas existe pouca chance de que elas voltem ao magazine.

6.1 - ESTRUTURA MODULAR

A estrutura do MSPF está pautada em três programas. O primeiro programa, denominado de *Solini*, é uma implementação do algoritmo Modificado de Identificação de Grupos (ver item 4.5.1.1). A função de *Solini* é gerar as famílias de partes iniciais, respeitando a restrição imposta pela capacidade limitada do magazine. Ele tem como entradas a matriz *Par* do tipo *partes x ferramentas* e o valor da capacidade do magazine. Como saídas ele fornece uma matriz *partes x atributos* denominada de *Partes_i* e a matriz *Ferra_i* do tipo família de *partes x ferramentas*. Na matriz *Partes_i* são

definidos para cada parte os seguintes atributos: número da parte (a_1), família de partes na origem (a_2) e tipos de ferramentas (a_{15} em diante). Na matriz $Ferra_i$ estão definidas para cada família de partes as ferramentas que as compõem.

O segundo programa, denominado de *Alsi* implementa o procedimento para gerar o “scheduling” inicial (ver item 4.5.2). A função de *Alsi* é de a partir do agrupamento de partes fornecido por Solini ($Partes_i$), gerar um “scheduling” viável para o Sistema de Manufatura Flexível respeitando as restrições da capacidade limitada do magazine e do período de trabalho dos turnos. Ele tem como entrada as matrizes $Partes_i$ e $Ferra_i$ e a capacidade do magazine. Como saídas ele fornece:

- a matriz $Partes_i$, com os seguintes atributos definidos: número da parte (a_1), família de partes na origem (a_2), tempo de atraso na origem (a_5), data de saída na origem (a_6), data de vencimento $a(7)$, tempo de processamento $a(8)$, turno de origem (a_9), tipos de ferramentas (a_{15} em diante) e o lote origem $a(11)$;
- a matriz $Partur_i$ é uma matriz do tipo número de partes \times turnos, fornece por turno a ordem de processamento das partes identificadas pelo atributo de número um;
- a matriz $Lotur_i$ é uma matriz do tipo atributos dos lotes \times lotes. Os atributos que descrevem os lotes são o número do lote e a família de partes a que eles estão associados. O número dos lotes é designado em relação aos turnos conforme a seguinte notação de quatro dígitos: os dois primeiros dígitos indicam o número do turno e os dois últimos dígitos indicam a posição ocupada pelo lote no turno. Assim, por exemplo, o lote número 207 pertence ao turno 2 estando sequenciado na sétima posição e o lote 1903 pertence ao turno 19 sendo o terceiro lote do turno.

O terceiro programa, denominado de *Althp*, realiza a implementação do Algoritmo Tabu para Sequência e “Scheduling” de Partes e Ferramentas (ver item 5.3, algoritmo TSS). A função de *Althp* é de gerar sequências de partes e de conjuntos de ferramentas que atendam a estratégia definida pelos valores atribuídos aos pesos da função objetivo. Ele tem como entrada:

- as três matrizes citadas anteriormente como saída de *Alsi*;
- a capacidade do magazine;
- o número máximo de iterações que podem ocorrer sem melhora da solução vigente na pesquisa tabu ($nbmax$);

- o valor dos pesos a serem atribuídos às parcelas da função objetivo, P_1, P_2, P_3, P_4 e P_5 .

Como saídas principais, Althp fornece as matrizes *Soluc* e *Mrf* e as médias de cada movimento realizado pelas duas pesquisas de vizinhança dos tempos de: produção, atraso, “setup” de ferramentas, “setup” de instantes de parada para troca de ferramentas e dos períodos ociosos dos turnos. A matriz *Soluc* guarda todos os dados da matriz *partes x atributos* da melhor solução vigente. A matriz *Mrf* guarda para cada iteração da pesquisa tabu os seguintes dados:

- número da iteração;
- para cada pesquisa de vizinhança: tempo de produção, tempo de atraso, tempos de “setup”, tempo ocioso dos turnos e o valor da função objetivo;
- valor vigente de *f_melhor*.

A figura 6.1 mostra a estrutura dos programas do MSPF com suas entradas e saídas. Todos os programas foram desenvolvidos na linguagem C++ e os experimentos foram rodados em um computador tipo pentium de 133 Mhz.

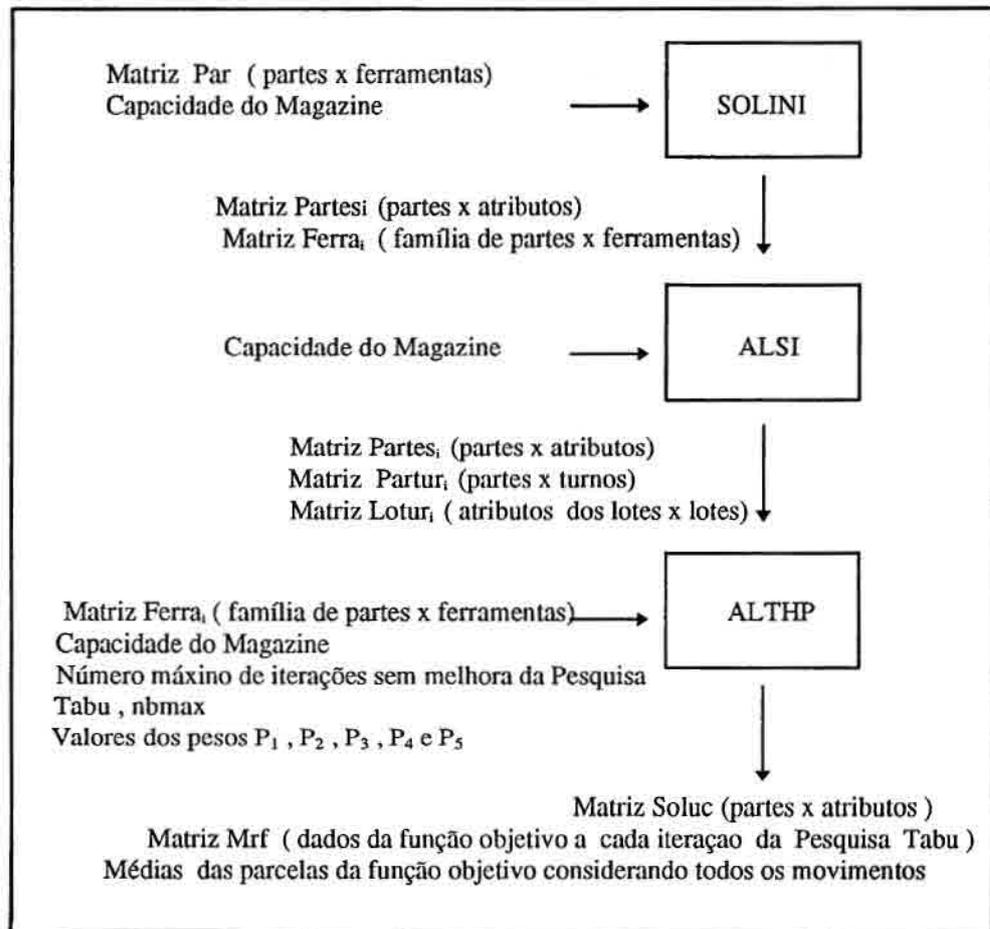


Fig. 6.1 - Estrutura dos programas do MSPF

6.2 - APLICAÇÃO DE TANG E DENARDO : MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE TROCAS DE FERRAMENTAS

Tang e Denardo (1987) consideram o problema de “scheduling” de trabalhos em uma máquina versátil com um magazine de capacidade limitada. De modo a uniformizar a nomenclatura utilizada, os trabalhos a serem processados serão aqui denominados de partes. O problema consiste em selecionar uma seqüência de partes e os conjuntos de ferramentas a serem carregados na máquina antes do início do processamento tal que o número de trocas de ferramentas seja minimizado. Tem-se portanto duas variáveis de decisão a serem consideradas : o conjunto de ferramentas a ser carregado antes de cada processamento e a seqüência de processamento das partes. É admitido que o tempo de troca de ferramentas é proporcional ao número de trocas de

ferramentas. Uma troca de ferramenta ocorre quando uma ferramenta é removida do magazine e uma ferramenta diferente é colocada.

O primeiro exemplo considerado, consistia de 10 partes a serem processadas em uma máquina com a capacidade do magazine limitada a 4. Sendo que para o processamento das 10 partes eram necessários 9 tipos de ferramentas. A matriz no formato *partes x ferramentas* (matriz *Par*) correspondente é apresentada a seguir.

| | | FERRAMENTAS | | | | | | | | |
|--------|----|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| PARTES | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 6 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 7 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| | 8 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| | 10 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Inicialmente, os autores usaram programação inteira obtendo várias soluções viáveis consideradas desapontadoras para este exemplo. A melhor solução obtida foi de 8 trocas de ferramentas. Dado o tamanho do problema, o tempo de 10 minutos em um IBM 370 foi considerado excessivo.

Eles se propuseram então, a estudar somente o caso de troca de ferramentas. Neste particular, a seqüência das partes é fixada e somente as decisões referente a troca de ferramentas são consideradas. Ou seja, não é mais necessário determinar qual a seqüência em que as partes serão processadas. O objetivo fica restrito

a determinação do conjunto de ferramentas a ser carregado na máquina tal que o número de trocas de ferramentas seja minimizado.

Foi proposta uma heurística para a solução do problema de “scheduling” de partes, conforme a descrição do parágrafo anterior, que se desenvolve em três fases:

- na primeira fase é obtida uma boa seqüência de partes, através de uma heurística para obter menor caminho Hamiltoniano;
- na segunda, é empregada a política “Keep Tool Needed Soonest” (KTNS) para otimizar o número de trocas de ferramentas correspondente a seqüência de partes obtida na primeira fase. A política KTNS que tem as seguintes propriedades:
 - . nenhuma ferramenta é inserida a menos que seja necessária para o processamento da próxima parte;
 - . se uma ferramenta for inserida, as ferramentas que permanecerem devem ser necessárias em breve.
- na última, é escolhida a melhor seqüência de partes através de um procedimento denominado de “Greedy Perturbation”. Este procedimento busca achar uma seqüência de partes que leve a um menor número de trocas de ferramentas que a melhor seqüência de partes vigente.

Através da resolução do menor caminho hamiltoniano são obtidas 5 seqüências viáveis que correspondem a sete trocas de ferramentas. Outros resultados computacionais que são obtidos serão comparados ao MSPF no item 6.2.3.1.b.

A seguir é mostrada a implementação do MSPF utilizando a mesma matriz utilizada por Tang e Denardo (1987).

6.2.1 - SELEÇÃO INICIAL DE PARTES E DE FERRAMENTAS

Aplicando o Algoritmo Modificado de Identificação de Grupos, através de Solini, são obtidas cinco famílias de partes como é mostrado, a seguir:

| | | FERRAMENTAS | | | | | | | | |
|--------|----|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 3 | 5 | 1 | 8 | 2 | 6 | 7 | 4 | 9 |
| PARTES | 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 6 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 8 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 7 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| | 9 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| | 10 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |

A primeira família de partes é formada pelas partes 2, 6 e 8 e utiliza as ferramentas 1, 3, 5 e 8. Portanto, $FP_1 = \{2, 6, 8\}$ e $FF_1 = \{1, 3, 5, 8\}$.

A segunda família de partes é formada pelas partes 3, 4 e 5 e utiliza as ferramentas 2, 6, 7 e 8. Portanto, $FP_2 = \{3, 4, 5\}$ e $FF_2 = \{2, 6, 7, 8\}$.

A terceira família de partes é formada pelas partes 7 e 9 e utiliza as ferramentas 5, 1, 7 e 9. Portanto, $FP_3 = \{7, 9\}$ e $FF_3 = \{1, 5, 7, 9\}$.

A quarta família de partes é formada pela parte 10 e utiliza as ferramentas 1, 2, 4. Portanto, $FP_4 = \{10\}$ e $FF_4 = \{1,2,4\}$.

A quinta família de partes é formada pela parte 1 e utiliza as ferramentas 1, 4, 8 e 9. Portanto, $FF_5 = \{1\}$ e $FF_5 = \{1,4,8,9\}$.

Os agrupamentos formados respeitam a capacidade do magazine de quatro ferramentas.

A matrizes $Partes_i$ e $Ferra_i$ estão representadas abaixo:

$$Partes_i = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 4 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 9 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$Ferra_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Esta solução inicial não define a sequência das partes para processamento. Ela propõe uma partição para a formação dos lotes, levando em conta somente a restrição das ferramentas. As restrições temporais serão consideradas na solução inicial gerada para o “scheduling”.

6.2.2 - ”SCHEDULING” INICIAL

Cada vez que é rodado Alsi, para a geração do “scheduling” inicial, as famílias de partes são mantidas, mas os tempos que são gerados de maneira randômica produzem variações no tempo de produção, no número de lotes, no número de turnos, nos tempos de atraso, nas datas de saída da produção das partes e nos períodos de tempo ociosos nos turnos.

A tabela 6.1 mostra uma solução inicial, extraída da matriz Partes, omitindo os atributos dos tipos de ferramentas e demais atributos que ainda não estão designados.

TABELA 6.1 - "SCHEDULING" INICIAL

| ATRIBUTOS | VALORES |
|--|---|
| a1 - número da parte | 2 6 8 3 4 5 7 9 10 1 |
| a2 - número da família de partes na origem | 1 1 1 2 2 2 3 3 4 5 |
| a5 - tempo de atraso | 0 0 6 0 0 0 114 366 230 541 |
| a6 - data de saída | 317 29 378 71 97 171 550 405 627 661 |
| a7 - data de vencimento | 368 37 372 118 127 468 436 39 397 25 |
| a8 - tempo de processamento | 60 13 61 25 26 74 70 14 64 25 |
| a9 - número do turno de origem | 2 1 2 1 1 1 3 2 3 3 |
| a11 - lote de origem | 201 101 201 102 102 102 301 202 302 303 |

Da tabela 6.1 obtém-se a tabela 6.2 que mostra a seqüência das partes e dos lotes nos turnos.

TABELA 6.2 - SEQÜÊNCIA DE PARTES E LOTES POR TURNOS

| Turno 1 | | | Turno 2 | | | Turno 3 | | |
|---------|------|----|---------|------|----|---------|------|----|
| Parte | Lote | FP | Parte | Lote | FP | Parte | Lote | FP |
| 6 | 101 | 1 | 2 | 201 | 1 | 7 | 301 | 3 |
| 3 | 102 | 2 | 8 | 201 | 1 | 10 | 302 | 4 |
| 4 | 102 | 2 | 9 | 202 | 3 | 1 | 303 | 5 |
| 5 | 102 | 2 | | | | | | |

Na tabela 6.2 observa-se a influência do período do turno na definição do tamanho do lote. As partes 9 e 7 pertencem a mesma família de partes e a princípio poderiam estar em um mesmo lote. Dado o “scheduling” gerado, o tempo necessário para o processamento da parte 7 excede o período de tempo do turno 2. Portanto, a parte 7 irá formar o lote 301 no turno 3. Logicamente, não há tempo de “setup” entre os lotes 202 e 301, já que a máquina não é parada para a troca de ferramentas.

A tabela 6.3 mostra a seqüência de carregamento das ferramentas do magazine, onde os conjuntos de ferramentas correspondem a matriz $Ferra_i$. A definição dos conjuntos de ferramentas a serem carregados no magazine correspondentes a solução inicial é realizada na fase de inicialização de Althp quando é calculado o valor da função objetivo inicial.

TABELA 6.3 - SEQUÊNCIA DE CARREGAMENTO DE FERRAMENTAS NO MAGAZINE

| PARTES | FP | MAGAZINE | | | | Nº DE TROCAS |
|--------------|----|----------------------|----------|----------|----------|--------------|
| | | TIPOS DE FERRAMENTAS | | | | |
| 6 | 1 | 1 | 3 | 5 | 8 | - |
| 3, 4, 5 | 2 | <u>2</u> | <u>6</u> | <u>7</u> | 8 | 3 |
| 2, 8 | 1 | <u>1</u> | <u>3</u> | <u>5</u> | 8 | 3 |
| 9, 7 | 3 | 1 | 5 | <u>7</u> | <u>9</u> | 2 |
| 10 | 4 | 1 | <u>2</u> | <u>4</u> | 9 | 2 |
| 1 | 5 | 1 | 4 | <u>8</u> | 9 | 1 |
| Nº de Sp = 5 | | Nº de Sf = 11 | | | | |

A seqüência das famílias de partes carregadas no magazine obtida foi : 1 , 2 , 1 , 3, 4 e 5. Foram observados 5 instantes de parada para troca de ferramentas (Sp) e 11 trocas de ferramentas (Sf).

É interessante observar como ocorreu a definição do conjunto de ferramentas para o processamento da parte 10 que segue as mesmas regras citadas no item 5.3.4. Dado que o conjunto de ferramentas associado à família de partes da parte 10 possui menos de 4 ferramentas deve ser decidido que ferramenta do magazine anterior deve permanecer. Atendendo as regras é observado que a ferramenta 9 pertence ao magazine anterior, pertencerá ao magazine futuro e não pertence a família de partes do magazine atual. Portanto a ferramenta 9 deve permanecer. A aplicação destas regras só é possível pela existência das famílias de partes; associação de conjuntos de ferramentas às partes. Ou seja, sabe-se de antemão que conjunto de ferramentas deverá estar no magazine para processar qualquer lote. Portanto, pode-se definir de maneira precisa, nos casos em que o magazine não está completo, que ferramentas devem permanecer no magazine dado que elas serão utilizadas no lote ou nos lotes futuros. Este fato, tornou o modelo bastante poderoso quando se deseja minimizar o número de trocas de ferramentas. Não há incerteza em se determinar quais as ferramentas que deverão permanecer no magazine.

6.2.3 - RESULTADOS OBTIDOS

O cálculo da função objetivo da solução inicial em Althp referente a tabela 6.1 forneceu os seguintes resultados:

- T_p , tempo de produção: 661 min.;
- A_t , tempo de atraso : 1257 min.;
- S_p , número de paradas para troca de ferramentas : 5 paradas;
- S_f , número de trocas de ferramentas : 11 trocas;
- T_r , tempo restante dos turnos: 203 min.

Durante o desenvolvimento do MSPF foram escolhidas 100 aplicações, onde os pesos representavam diferentes políticas. Ou seja, os conjuntos dos pesos associados as funções objetivo de cada uma das pesquisas eram diferentes entre si. Dada esta característica foram obtidos resultados referentes a 100 tipos de políticas diferentes. Não houve a preocupação em analisar o comportamento dos resultados obtidos dada a política associada. O objetivo foi gerar resultados que refletissem o comportamento do modelo frente a diferentes situações, de modo a obter os valores médios associados a cada parcela da função objetivo. Dos valores obtidos das parcelas da função objetivo para cada movimento (considerando nbmax igual a 100), foram obtidas as seguintes médias com os respectivos desvios padrões amostrais (σ):

- T_p , tempo de produção: 554,27 min e $\sigma = 3,87$;
- A_t , tempo de atraso : 412,91 min. e $\sigma = 17,51$;
- número de paradas para troca de ferramentas : 5,74 paradas (28,73 min.) e $\sigma = 0,56$ (2,78);
- número de trocas de ferramentas : 11,45 ferramentas (61,82 min.) e $\sigma = 0,96$ (3,89) ;
- T_r , tempo restante dos turnos: 196,55 min e $\sigma = 4,32$.

Foi observado que no pior caso na décima oitava iteração foi obtida a melhor solução. Sendo o número médio de iterações para obter a melhor solução igual a 7,5 iterações.

De modo a obter uma solução em que nenhum dos tempos fosse privilegiado dividiu-se o tempo médio de produção pelos demais tempos médios. Foram obtidas as seguintes relações para os pesos:

$$P_1 \propto P_2 \cdot 1,34 \propto P_3 \cdot 8,97 \propto P_4 \cdot 19,29 \propto P_5 \cdot 2,82$$

Os valores obtidos utilizando-se os pesos proporcionais, a partir da mesma solução inicial, foram:

- T_p , tempo de produção: 544 min.;
- A_t , tempo de atraso : 273 min.;
- número de trocas de ferramentas : 11 trocas (60 min.);
- número de paradas para troca de ferramentas : 5 paradas (25 min.);
- T_r , tempo restante dos turnos: 203 min

A figura 6.2 compara o comportamento do modelo pelos valores médios e pelos valores obtidos utilizando-se os pesos proporcionais. A melhor solução obtida com os pesos proporcionais é denominada de *solução não tendenciosa*.

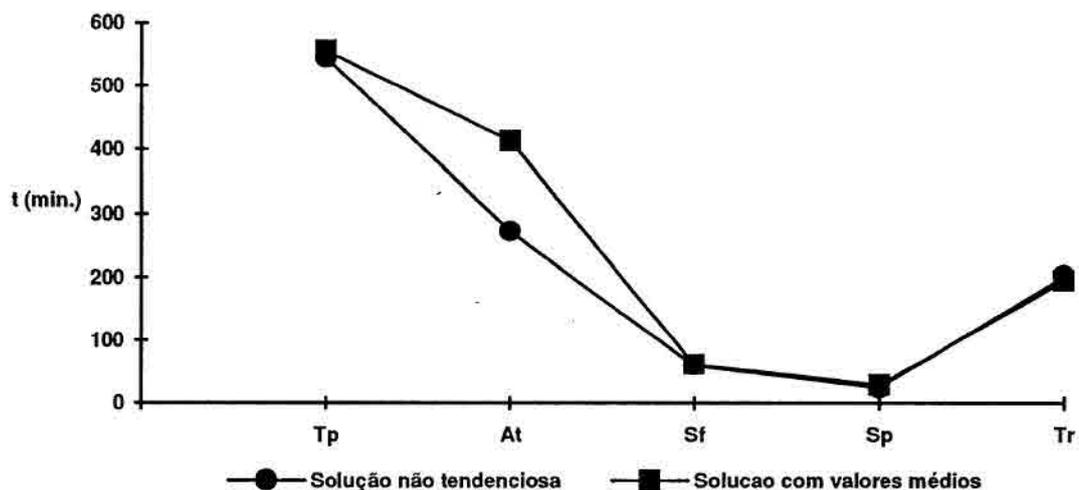


Fig 6.2 - Gráfico comparativo entre o comportamento médio do MSPF e a solução não tendenciosa

A partir da solução não tendenciosa serão agora analisados os problemas de seleção partes, carregamento de ferramentas e de atraso, de maneira geral, pelo gerenciamento dos pesos.

6.2.3.1 - MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE TROCAS DE FERRAMENTAS

Dado que o objetivo é somente minimizar o número de trocas de ferramentas será privilegiado P_4 . O MSPF deve definir em que seqüência as partes devem ser processadas e que conjunto de ferramentas deve estar no magazine antes do processamento de cada parte de modo que o número de trocas de ferramentas seja minimizado. A tabela 6.4 mostra alguns resultados fornecidos pelo MSPF em que os pesos P_1 , P_2 , P_3 e P_5 são mantidos constantes com os valores utilizados na geração da solução não tendenciosa e P_4 tem seu valor aumentado. Com exceção de S_f e S_p , cujos valores na tabela 6.4 representam o número de trocas (ferramentas e magazines respectivamente), a unidade dimensional das demais parcelas representativas da função objetivo é o minuto. Os resultados abaixo correspondem a 16 pesquisas tabu com $n_{b\max}$ igual a 100.

TABELA 6.4 - MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE TROCAS DE FERRAMENTAS

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| P_4 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 200 | 300 | 400 | 500 | 1000 |
| T_p | 544 | 554 | 505 | 505 | 554 | 554 | 554 | 554 | 554 | 554 | 514 | 514 | 514 | 514 | 514 | 514 |
| A_t | 273 | 276 | 641 | 641 | 685 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 895 | 895 | 895 | 895 | 895 | 895 |
| S_p | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| S_f | 11 | 11 | 8 | 8 | 8 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| T_r | 203 | 203 | 220 | 220 | 220 | 224 | 224 | 224 | 224 | 224 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 |

A figura 6.3 compara a solução com o menor número de “setups” de ferramentas ($60 \leq P_4 \leq 100$) com a solução não tendenciosa. As figuras 6.4 e 6.5 mostram o comportamento do atraso e do “setup” respectivamente.

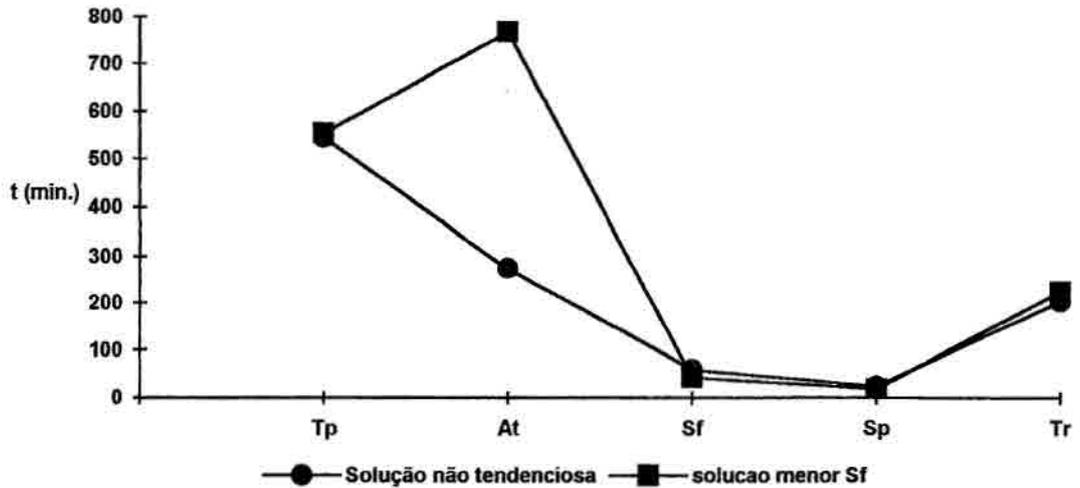


Fig. 6.3 - Comparação da solução de menor Sf com a solução não tendenciosa

Na figura 6.3, observa-se que a melhor solução obtida quando privilegia-se a minimização do número de trocas de ferramentas, se manteve consistente em relação a solução não tendenciosa. O número de trocas de ferramentas caiu de 11 para 7. Era esperado um aumento do tempo de atraso a medida que se fosse privilegiando a minimização do número de trocas de ferramentas, o que aconteceu. Este fato é devido a restrição imposta pelo atraso ter pouca influência no seqüenciamento das partes durante a pesquisa tabu dada a proporção do peso atribuído ao tempo de atraso em relação a P_4 . Este aumento significativo do tempo de atraso (de 273 para 895 minutos) confirma o conflito existente entre atender as datas de vencimento definidas no plano de produção e procurar minimizar no caso o número de trocas de ferramentas na definição das seqüências das partes e dos conjuntos de ferramentas a serem carregados na máquina para os dados considerados e para o modelo desenvolvido.

Na figura 6.4 observa-se como ocorreu o aumento do atraso. A medida que P_4 aumentava, o atraso também aumentou em uma dada proporção até um limite. A partir deste limite, o valor do atraso se manteve constante assim como todas as demais parcelas da função objetivo. Mesmo aumentando-se o valor de P_4 o MSPF não produziu soluções diferentes. Isto ocorreu pelo fato de o peso privilegiado influenciar tanto no valor da função objetivo que as demais parcelas quase não contribuem mais na escolha dos movimentos nas pesquisas locais. Ocorre, na verdade, um direcionamento para a escolha dos melhores movimentos.

Dado que P_4 vai assumindo valores cada vez maiores a influência dos valores das demais parcelas da função objetivo vai se tornando cada vez mais

insignificantes. Deve ficar claro que cada vez que se altera o valor de um peso tem-se em verdade um novo contexto na função objetivo. O aumento de um peso significa que a parcela a que ele está designado vai ter maior influência na otimização desejada, seja minimizar ou maximizar a função objetivo.

Uma situação extrema seria aquela em que a magnitude do valor de P_4 fosse tão grande em relação aos demais pesos, que o somatório obtido pelas demais parcelas da função objetivo não influenciasse mais na escolha dos melhores movimentos.

Dado que P_4 possui um valor alto em relação aos demais pesos e o objetivo é minimizar o número de trocas de ferramentas, os movimentos em que o número de trocas de ferramentas é alto terão atribuídos, nas funções objetivo correspondentes valores altos e dificilmente serão escolhidos. Em compensação, aqueles movimentos em que o número de troca de ferramentas é baixo terão valores associados a função objetivo não tão altos e portanto com chance de serem escolhidos. Consta-se, portanto, que através do gerenciamento dos pesos pode-se restringir o tamanho da vizinhança nas pesquisas locais. Neste caso em particular, a medida que movimentos os conduzem a um maior número de troca de ferramentas diminui a chance de serem escolhidos.

Finalizando, a diminuição do número de paradas para a troca de ferramentas (S_p) surge como decorrência natural. Observa-se também, que os tempos de produção e de períodos ociosos nos turnos não apresentaram grandes variações.

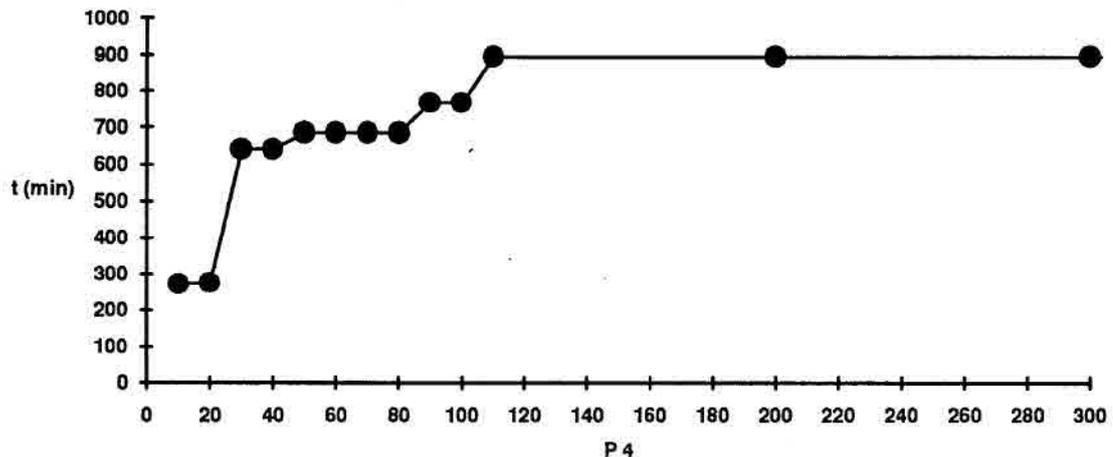


Fig. 6.4 - Comportamento do tempo de atraso

A figura 6.5 permite que seja feita uma análise mais detalhada voltada ao problema de minimização do número de ferramentas.

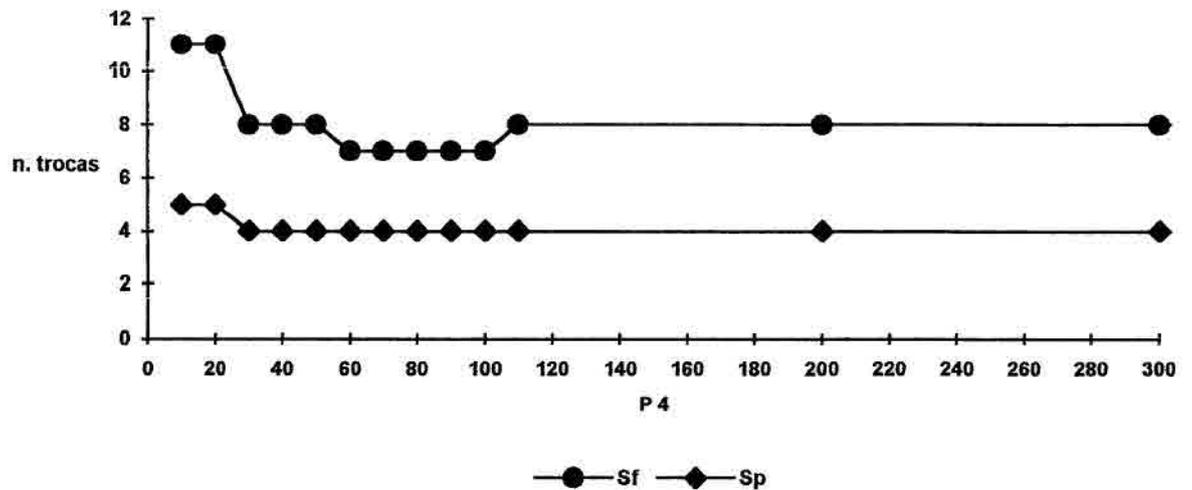


Fig. 6.5 - Comportamento dos tempos de "setup"

Escolheu-se para análise, os pontos onde P_4 assume os valores de 10, 60 e 110. Para P_4 igual a 10 são mostradas na tabela 6.5 a seqüência das partes nos turnos e as famílias de partes (FP) associadas.

TABELA 6.5 - SEQÜÊNCIA DE PARTES POR TURNOS ($P_4 = 10$)

| Turno 1 | | Turno 2 | | Turno 3 | |
|---------|----|---------|----|---------|----|
| Parte | FP | Parte | FP | Parte | FP |
| 6 | 7 | 2 | 1 | 10 | 8 |
| 3 | 2 | 8 | 1 | | |
| 1 | 5 | 5 | 8 | | |
| 7 | 3 | | | | |
| 9 | 3 | | | | |
| 4 | 3 | | | | |

A matriz de Ferra (n. da família de partes x ferramentas) ao final da pesquisa continha 9 famílias de partes. O fato de existirem 9 famílias de partes no MSPF, não quer dizer que todas devam estar designadas às partes. Na solução inicial foram propostos cinco conjuntos de ferramentas para serem designados às partes de modo a formar as famílias de partes. No decorrer da implementação do modelo, outros

conjuntos de ferramentas foram propostos de modo a atender a estratégia de otimização definida. Observa-se na tabela 6.5 que no final da implementação existem 6 tipos de famílias de partes, sendo quatro oriundas da solução inicial (1 , 2 , 3 e 5) e duas que foram geradas pelo modelo (7 e 8).

TABELA 6.6 - SEQÜÊNCIA DE CARREGAMENTO DE FERRAMENTAS NO MAGAZINE (P4 = 10)

| PARTES | FP | MAGAZINE | | | | Nº DE TROCAS |
|--------------|----|----------------------|---|---|---|--------------|
| | | TIPOS DE FERRAMENTAS | | | | |
| 6 | 7 | 2 | 3 | 6 | 7 | - |
| 3 | 2 | 2 | 6 | 7 | 8 | 1 |
| 1 | 5 | 1 | 4 | 8 | 9 | 3 |
| 7, 9, 4 | 3 | 1 | 5 | 7 | 9 | 2 |
| 2, 8 | 1 | 1 | 3 | 5 | 8 | 2 |
| 5, 10 | 8 | 1 | 2 | 4 | 6 | 3 |
| Nº de Sp = 5 | | Nº de Sf = 11 | | | | |

A seqüência de partes obtida foi: 6 , 3 , 1, 7, 9, 4, 2, 8 , 5 e 10. A seqüência das partes dentro dos lotes é determinada em ordem crescente em relação as datas de vencimento. A seqüência das famílias de partes foi: 7, 2, 5, 3, 1 e 8. Foram observados 5 “setups” de preparação e 11 “setups” de ferramentas.

A tabela 6.7 mostra as seqüências de carregamento dos conjuntos de ferramentas no magazine para P₄ igual a 60.

**TABELA 6.7 - SEQÜÊNCIA DE CARREGAMENTO DE FERRAMENTAS NO
MAGAZINE (P₄ = 60)**

| PARTES | FP | MAGAZINE | | | | N° DE TROCAS |
|--------------|----|----------------------|----------|----------|----------|--------------|
| | | TIPOS DE FERRAMENTAS | | | | |
| 9, 4, 7 | 3 | 1 | 5 | 7 | 9 | - |
| 6, 2, 8 | 1 | 1 | <u>3</u> | 5 | <u>8</u> | 2 |
| 1 | 5 | 1 | <u>4</u> | 8 | <u>9</u> | 2 |
| 10 | 6 | 1 | <u>2</u> | 4 | 8 | 1 |
| 3, 5 | 2 | 2 | <u>6</u> | <u>7</u> | 8 | 2 |
| N° de Sp = 4 | | N° de Sf = 7 | | | | |

A seqüência de partes obtida foi 9, 4, 7, 6, 2, 8, 1, 10, 3 e 5. A seqüência das famílias de partes foi 3, 1, 5, 6 e 2. Foram observados 4 “setups” de preparação e 7 “setups” de ferramentas. No final da pesquisa existiam 9 famílias de partes em *Ferra*.

A tabela 6.8 mostra as seqüências de partes e das famílias de partes obtidas para P₄ igual a 110.

TABELA 6.8 - SEQUÊNCIA DE CARREGAMENTO DE FERRAMENTAS NO MAGAZINE (P4 = 110)

| PARTES | FP | MAGAZINE | | | | Nº DE TROCAS |
|--------------|----|----------------------|----------|----------|----------|--------------|
| | | TIPOS DE FERRAMENTAS | | | | |
| 3 , 4 , 5 | 2 | 2 | 6 | 7 | 8 | - |
| 6 , 2 , 8 | 1 | <u>1</u> | <u>3</u> | <u>5</u> | 8 | 3 |
| 9 , 7 | 3 | 1 | 5 | <u>7</u> | <u>9</u> | 2 |
| 10 | 4 | 1 | <u>2</u> | <u>4</u> | 9 | 2 |
| 1 | 5 | 1 | 4 | <u>8</u> | 9 | 1 |
| Nº de Sp = 4 | | Nº de Sf = 8 | | | | |

Comparando-se a tabela 6.7 com a tabela 6.8 observa-se que o número de instantes de parada para troca de ferramentas é igual (4), mas o número de trocas de ferramentas é maior (8) . Ou seja, o número de instantes de parada é fixo mas o número de trocas de ferramentas varia. Também deve ser observado que as seqüências das partes e de carregamento de famílias de partes dos exemplos são diferentes.

A seqüência de partes obtida foi: 3 , 4 , 5 , 6 , 2 , 8 , 9 , 7, 10 e 1. A seqüência das famílias de partes foi: 2 , 1 , 3 , 4 e 5. Foram observados 4 “setups” de preparação e 8 “setups” de ferramentas. No final da pesquisa tabu existiam 8 tipos de famílias de partes.

Um fato observado durante o desenvolvimento do modelo é que pode-se ter com uma mesma seqüência de partes valores diferentes para Sp e Sf conforme a atribuição das famílias de partes. A tabela 6.9 mostra um exemplo.

TABELA 6.9 - DIFERENTES SEQUÊNCIAS DE CARREGAMENTO DE FERRAMENTAS NO MAGAZINE COM A MESMA SEQUÊNCIA DE PARTES

| PARTES | FP | MAGAZINE | | | | Nº DE Sf | PARTES | FP | MAGAZINE | | | | Nº DE Sf |
|--------------|----|----------------------|----------|----------|----------|--------------|---------|--------------|----------------------|----------|----------|----------|----------|
| | | TIPOS DE FERRAMENTAS | | | | | | | TIPOS DE FERRAMENTAS | | | | |
| 1 | 5 | 1 | 4 | 8 | 9 | - | 1 | 5 | 1 | 4 | 8 | 9 | - |
| 10 | 4 | 1 | <u>2</u> | 4 | 8 | 1 | 10 | 4 | 1 | <u>2</u> | 4 | 8 | 1 |
| 3, 4, 5 | 2 | 2 | <u>6</u> | <u>7</u> | 8 | 2 | 3, 4, 5 | 2 | 2 | <u>6</u> | <u>7</u> | 8 | 2 |
| 6, 8, 2 | 1 | <u>1</u> | <u>3</u> | <u>5</u> | 8 | 3 | 6, 8 | 1 | <u>3</u> | <u>5</u> | 7 | 8 | 2 |
| 7, 9 | 3 | 1 | 5 | <u>7</u> | <u>9</u> | 2 | 2 | 6 | <u>1</u> | 3 | 5 | 7 | 1 |
| | | | | | | | 7, 9 | 3 | 1 | 5 | 7 | <u>9</u> | 1 |
| Nº de Sp = 4 | | Nº de Sf = 8 | | | | Nº de Sp = 5 | | Nº de Sf = 7 | | | | | |

Com a mesma de seqüência de partes observa-se 4 e 5 instantes de parada para troca de ferramentas com 8 e 7 trocas de ferramentas respectivamente.

6.2.3.1.a - DESCONSIDERANDO O ATRASO

De modo a anular a influência do atraso no problema de minimização do número de trocas de ferramentas foram realizados os experimentos mostrados na tabela 6.10. Os pesos referentes aos tempos de atraso e dos períodos ociosos dos turnos são zerados. Nos demais pesos, com exceção de P_4 , é mantida a proporcionalidade da solução não tendenciosa. Os dados da tabela 6.10, com exceção aos referentes a Sp e Sf que representam número de instantes de parada e o número de trocas de ferramentas, estão na unidade dimensional de tempo minuto.

**TABELA 6.10 - MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE TROCAS DE FERRAMENTAS
DESCONSIDERANDO O ATRASO**

| | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|
| P_4 | 8,97 | 100 | 500 | 600 | 650 | 680 | 700 | 1000 |
| T_p | 540 | 520 | 520 | 520 | 520 | 514 | 514 | 514 |
| A_t | 1034 | 1232 | 1232 | 1232 | 1232 | 895 | 895 | 895 |
| S_p | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| S_f | 7 | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| T_r | 224 | 224 | 224 | 224 | 224 | 220 | 220 | 220 |

A figura 6.6 compara a solução não tendenciosa com uma das soluções de menor S_f quando o atraso é desconsiderado ($8,97 \leq P_4 \leq 500$). Observa-se que a variação do tempo de atraso aumentou comparando-se a figura 6.2 com a figura 6.6. Este comportamento era esperado, já que agora o tempo de atraso não influi na decisão dos movimentos nas pesquisas locais. As demais parcelas da função objetivo não sofreram variações significativas.

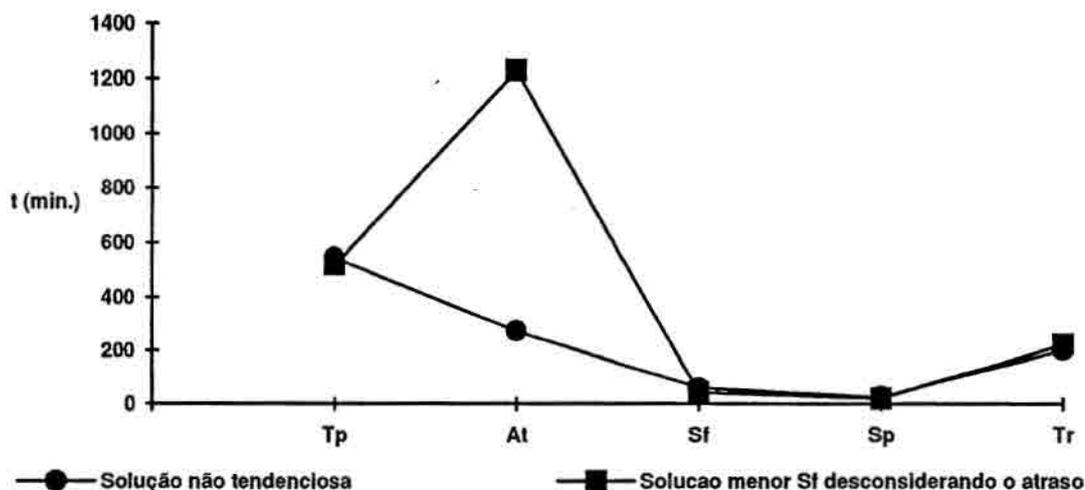


Fig. 6.6 - Comparação da solução de menor S_f desconsiderando o atraso com a solução não tendenciosa.

As figuras 6.7 e 6.8 mostram o comportamento do atraso e dos tempos de “setup” quando o atraso é desconsiderado, ou seja, P_2 é igual a zero. Analisando as figuras anteriormente citadas, observa-se que enquanto o número de trocas de ferramentas apresenta seu menor valor o comportamento do atraso é crescente ou constante em um patamar superior. Quando o número de trocas de ferramentas aumenta o atraso declina e estabiliza em um patamar inferior. Conclui-se portanto que existe uma forte relação de natureza inversa entre o tempo de atraso e a minimização do número de ferramentas. Este fato vem a confirmar a expectativa do modelo em relação ao conflito existente entre o atendimento das datas de vencimento e das abordagens de seleção de partes.

Pode-se agora afirmar que o comportamento apresentado pelo “setup” de ferramentas na figura 6.5 tem forte influência do tempo de atraso, pois quando é atribuído valor zero a P_2 (o atraso é desconsiderado) não é mais verificado um aumento simultâneo dos tempos de “setup” de ferramentas e do atraso.

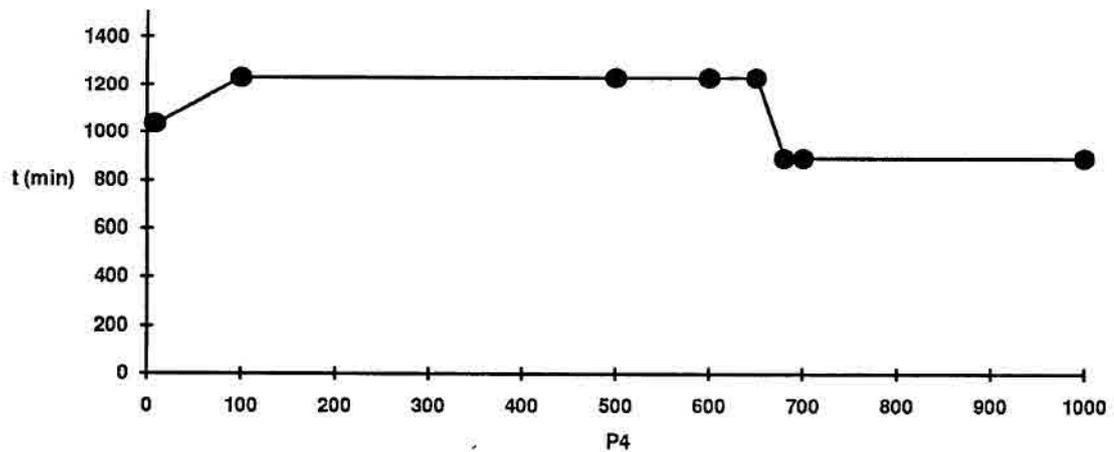


Fig. 6.7 - Comportamento do tempo de atraso com P_2 igual a zero

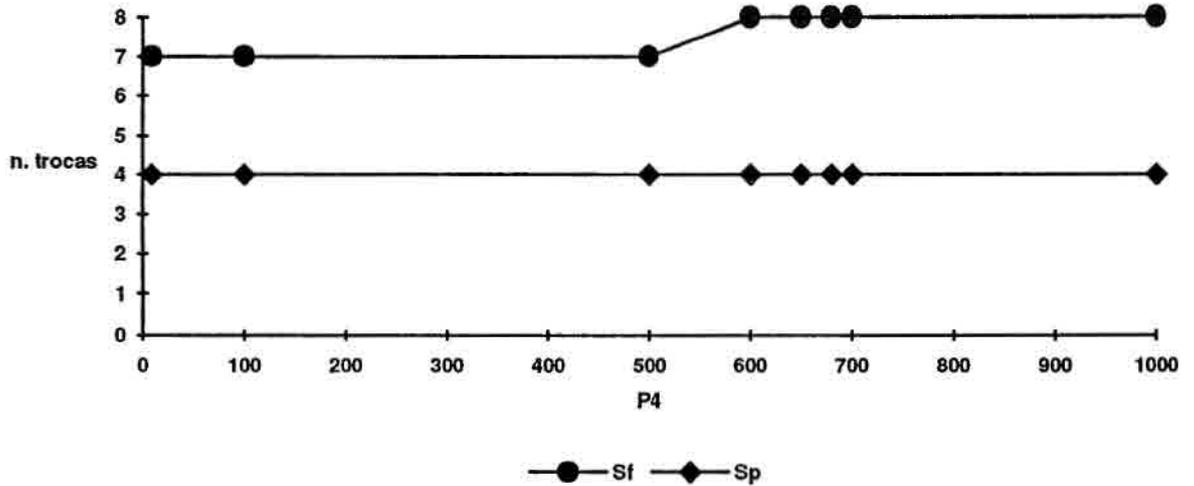


Fig. 6.8 - Comportamento dos tempos de "setup" com P_2 igual a zero

6.2.3.1. b - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Tang e Denardo (1987) quando resolveram o problema de minimização do número de trocas de ferramentas por programação inteira, considerando que a seqüência de partes inicial não era fixa, obtiveram como melhor solução 8 trocas de ferramentas. Resolvendo o problema utilizando a política KTNS obtiveram como mínimo 7 trocas de ferramentas. O MSPF obteve um mínimo de 7 trocas de ferramentas não considerando uma seqüência de partes inicial fixa e mantendo a influência das demais parcelas da função objetivo.

Widmer (1991) obteve, utilizando os mesmos dados de Tang e Denardo (1987), 4 instantes de parada para a troca de ferramentas. Aplicando a política KTNS aos resultados obtidos, Widmer obteve como mínimo 8 trocas de ferramentas.

Tang e Denardo (1987) considerando 10 ferramentas, 10 partes e capacidade do gabarito igual a 4 geraram 5 conjuntos de dados. Cada conjunto correspondia a uma seqüência de 100 partes cuja designação de ferramentas foi gerada de maneira randômica. Yanasse, Vijaykumar e Olivo (1996) geraram seqüências randômicas com as mesmas características propostas por Tang e Denardo(1987). O MSPF foi submetido ao mesmo teste, utilizando os mesmas seqüências geradas por Yanasse, Vijaykumar e Olivo(1996). A tabela 6.11 mostra os resultados obtidos por Tang e Denardo (A), Yanasse, Vijaykumar e Olivo (B) e o MSPF (M) quanto aos números mínimo (MIN) e máximo (MAX) de trocas de ferramentas observadas. A média e o desvio padrão (SIGMA).

TABELA 6.11 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

| HEURÍSTICAS | MIN | MAX | MÉDIA | SIGMA |
|-------------|-----|-----|-------|-------|
| A | 6 | 13 | 9,45 | 1,22 |
| B | 6 | 12 | 8,39 | 1,31 |
| M | 6 | 11 | 7,73 | 1,21 |

Para a obtenção dos dados da tabela 6.11 para cada problema foram geradas as famílias de partes e os “scheduling” iniciais (Solini e Alsi). Após, foi rodado Althp. Utilizou-se a estratégia de utilizar os pesos da solução não tendenciosa para todos os pesos com exceção de P_4 que teve seu valor fixado em 60. Durante as implementações variou-se para o mesmo problema P_4 de 60 a 100 em incrementos de 10 em 10 não sendo observada alteração nos resultados. Este fato veio a confirmar o comportamento observado no tempo de “setup” de troca de ferramentas na figura 6.5.

Optou-se em utilizar esta estratégia para demonstrar a robustez do MSPF. Dado que nenhuma das demais parcelas foi desconsiderada, elas portanto influenciaram nas soluções obtidas. Os demais resultados que o modelo oferece em relação a dimensão temporal e ao número de instantes de parada para a troca de ferramentas não puderam ser avaliados, já que as outras heurísticas não contemplam estes resultados. Neste particular, salienta-se que não se encontrou na literatura nenhum estudo com resultados que pudessem ser utilizados para realizar uma avaliação mais completa do MSPF. Ou seja, um estudo que abordasse os problemas de seleção de partes, de carregamento de ferramentas e do atraso simultaneamente.

6.2.3.2 - MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE INSTANTES DE PARADA

De maneira análoga ao item anterior, a partir da mesma solução inicial, do item 6.2.2, serão feitas três análises do comportamento do modelo com as seguintes estratégias para os pesos:

- com exceção de P_3 (“setup” de preparação), mantem-se os valores dos demais pesos fixos com as relações da solução não tendenciosa. A P_3 são atribuídos valores crescentes.

- é atribuído valor zero para P_2 (atraso) e P_5 (período ocioso dos turnos). A P_1 (tempo de produção) e P_4 (“setup” de ferramentas) são atribuídos os valores da solução não tendenciosa. A P_3 são atribuídos valores crescentes.

- a P_1 é atribuído valor 1, a P_2 , P_4 e P_5 são atribuídos valor zero e a P_3 são atribuídos valores crescentes

A tabela 6.12 mostra os dados da primeira estratégia. Onde com exceção de Sp e Sf que tem associados valores que representam número de instantes de parada e o número de trocas de ferramentas, os demais valores associados as outras parcelas da função objetivo estão em minutos.

TABELA 6.12 - MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE INSTANTES DE PARADA

| | | | | | | | | | | | | |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| P_3 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 500 | 1000 |
| Tp | 544 | 554 | 554 | 554 | 554 | 554 | 554 | 554 | 554 | 554 | 554 | 554 |
| At | 273 | 273 | 273 | 406 | 406 | 406 | 406 | 406 | 406 | 406 | 406 | 406 |
| Sp | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Sf | 11 | 11 | 11 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Tr | 203 | 203 | 203 | 212 | 212 | 212 | 212 | 212 | 212 | 212 | 212 | 212 |

Observa-se na tabela 6.12 que o tempo de produção não varia. Nas figuras 6.9 e 6.10 é mostrado o comportamento dos tempos de “setup” e do atraso respectivamente. Na figura 6.9 observa-se, como era esperado, a diminuição do número de instantes de parada para a troca de ferramentas (Sp) de 5 para 4. A diminuição do número de trocas de ferramentas não é considerável, sendo 10 trocas considerado um valor alto para este exemplo.

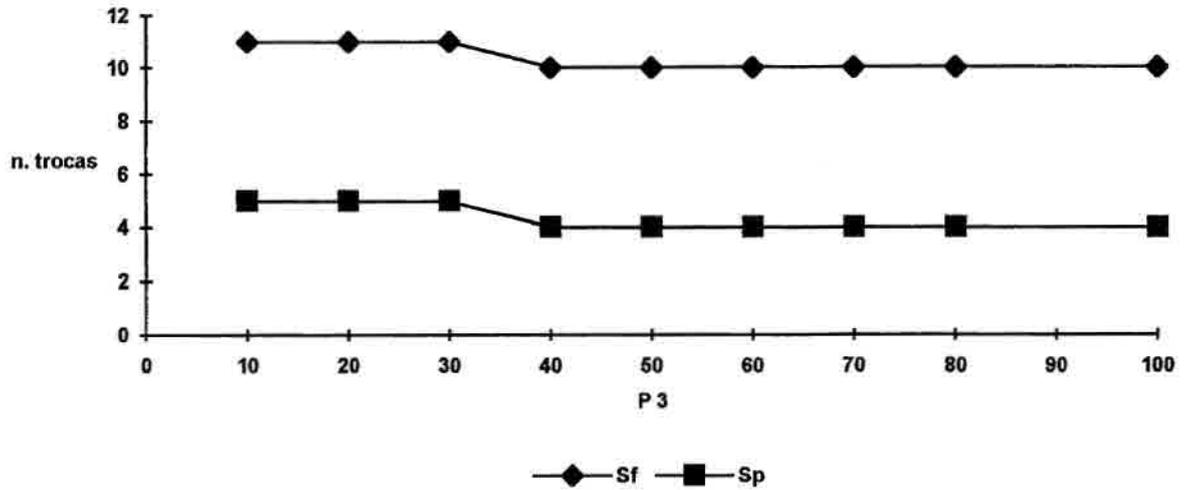


Fig. 6.9 - Comportamento dos tempos de "setup" -

O comportamento do atraso observado na figura 6.10 está coerente com o esperado do modelo. É observada novamente a relação inversa entre o número de "setups" de ferramentas e o atraso. Se o número de trocas de ferramentas diminui o atraso aumenta. Este comportamento também aqui é observado quanto ao número de instantes de parada.

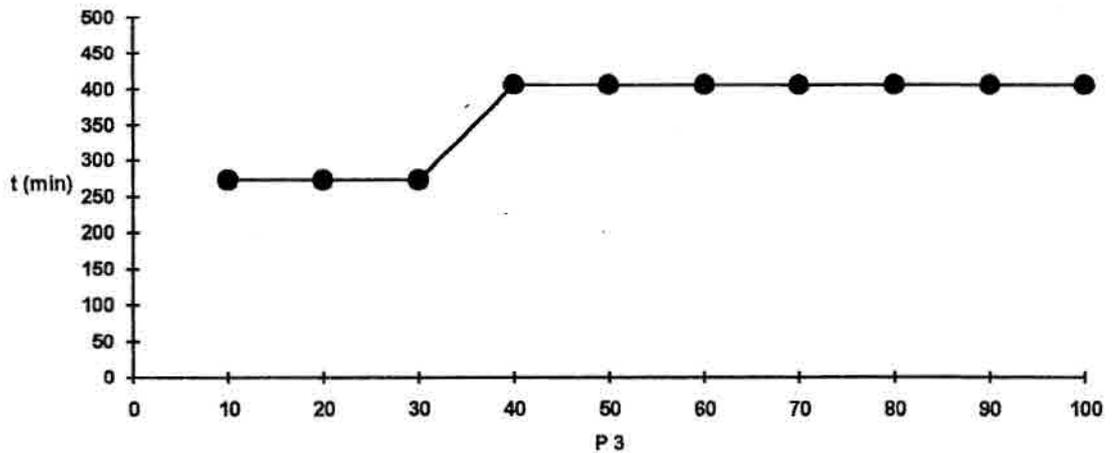


Fig. 6.10 - Comportamento do tempo de atraso

A tabela 6.13 mostra os dados da segunda estratégia. Nesta estratégia é desconsiderada a influência do atraso. Na tabela 6.13 com exceção de Sp e Sf que tem associados valores que representam número de instantes de parada e o número de trocas de ferramentas, os valores associados às demais parcelas da função objetivo estão em minutos.

TABELA 6.13 - MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE INSTANTES DE PARADA DESCONSIDERANDO O ATRASO

| | | | | | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| P_3 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 500 | 1000 |
| T_p | 544 | 554 | 554 | 554 | 554 | 554 | 554 | 554 | 554 | 554 | 554 | 554 |
| A_t | 1034 | 1034 | 1034 | 1034 | 1034 | 1034 | 1034 | 1034 | 1034 | 1034 | 1034 | 1034 |
| S_p | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| S_f | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| T_r | 224 | 224 | 224 | 224 | 224 | 224 | 224 | 224 | 224 | 224 | 224 | 224 |

A tabela 6.13 mostra todas as parcelas com valores constantes. O atraso apresenta um valor muito alto. Este comportamento era esperado já que o atraso não influencia na decisão dos movimentos. O número de “setups” se mantém constante em valores mínimos. Aqui é violentamente observada a influência do peso na restrição da vizinhança. Dados os valores constantes apresentados não serão gerados os gráficos dos comportamentos dos tempos de “setup” e do atraso para esta estratégia.

Na terceira estratégia, quando P_2 , P_4 e P_5 são zerados P_1 é igual a 1 e P_3 assume valores crescentes, obteve-se comportamento constante análogo à segunda estratégia por parte das parcelas. Os valores obtidos foram : $T_p = 514$ min. , $A_t = 897$ min., $S_f = 9$ trocas de ferramentas (52 min.) , $S_p = 4$ instantes de parada (20 min.)e $T_r = 216$ min.

A figura 6.11 compara os comportamentos obtidos do MSPF pela utilização da segunda e da terceira estratégia.

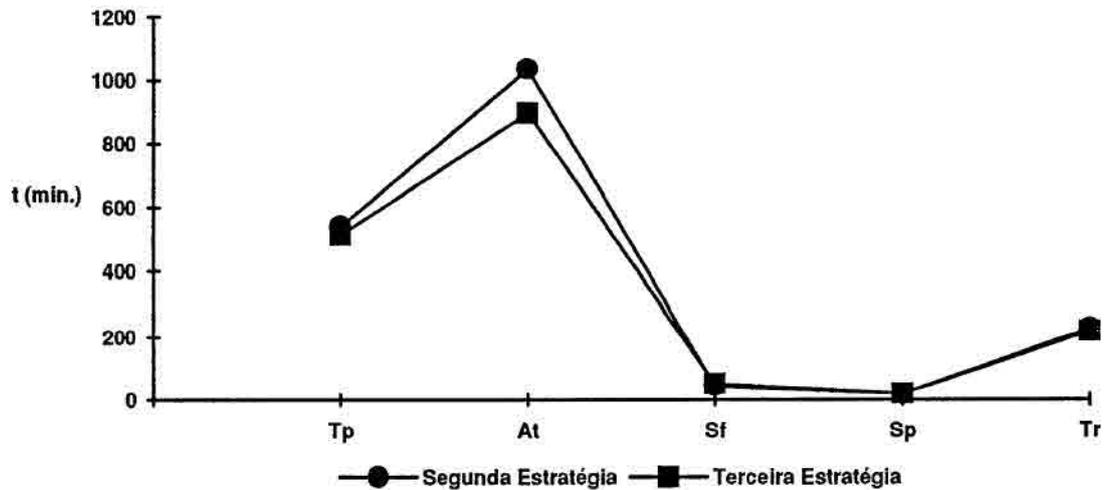


Fig. 6.11 - Comparação entre a segunda e terceira estratégias

Fica mais uma vez evidente a forte relação inversa existente entre o atraso e o número de trocas de ferramentas. A terceira estratégia, que apresenta um número de trocas de ferramentas maior do que a segunda estratégia, apresentou um valor menor para o atraso. Em contrapartida, a segunda estratégia, que apresentou um maior valor para o atraso, apresenta um menor valor para o número de trocas de ferramentas. O valor no número de instantes de parada para troca de ferramentas se manteve constante em seu mínimo em ambas as estratégias. Pode-se dizer que a minimização de Sp colabora para a diminuição de Sf e o aumento de At , mas de modo não determinante.

6.2.3.3 - MINIMIZAÇÃO DO ATRASO

A partir da mesma solução inicial, ver item 6.2.2, neste tópico será analisado o comportamento do MSPF quando o atraso é privilegiado. O peso P_2 assumirá valores crescentes em duas situações descritas abaixo:

- a todos os pesos, com exceção de P_2 , são associados os valores correspondentes a solução não tendenciosa;
- com exceção de P_1 ao qual é associado o valor da solução não tendenciosa e P_2 , aos demais pesos é associado o valor zero.

A tabela 6.14 mostra os dados obtidos aplicando-se a política da primeira situação. Na tabela 6.14, com exceção de Sp e Sf que representam número de instantes de parada e o número de trocas de ferramentas, os demais dados estão referenciados em minutos.

TABELA 6.14 - MINIMIZAÇÃO DO TEMPO DE ATRASO

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| P ₂ | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 150 | 500 | 1000 |
| T _p | 563 | 563 | 563 | 563 | 563 | 563 | 563 | 563 | 563 | 563 | 563 | 563 | 563 | 563 |
| A _t | 165 | 165 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 |
| S _p | 7 | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| S _f | 11 | 11 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| T _r | 193 | 193 | 194 | 194 | 194 | 194 | 194 | 194 | 194 | 194 | 194 | 194 | 194 | 194 |

Observa-se que os tempos de produção e do período ocioso nos turnos mantêm-se praticamente constantes. As figuras 6.12 e 6.13 mostram o comportamento dos tempos de “setup” e de atraso respectivamente.

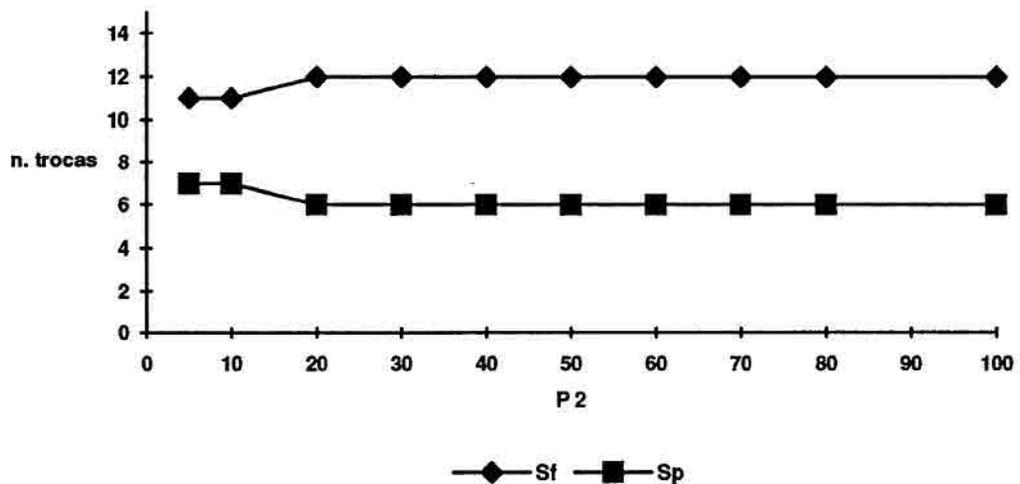


Fig. 6.12 - Comportamento dos tempos de “setup”.

Observa-se na figura 6.12 que um privilégio ao tempo do atraso provocou um aumento no número de trocas de ferramentas e uma diminuição no número de instantes de parada para carregamento do magazine.

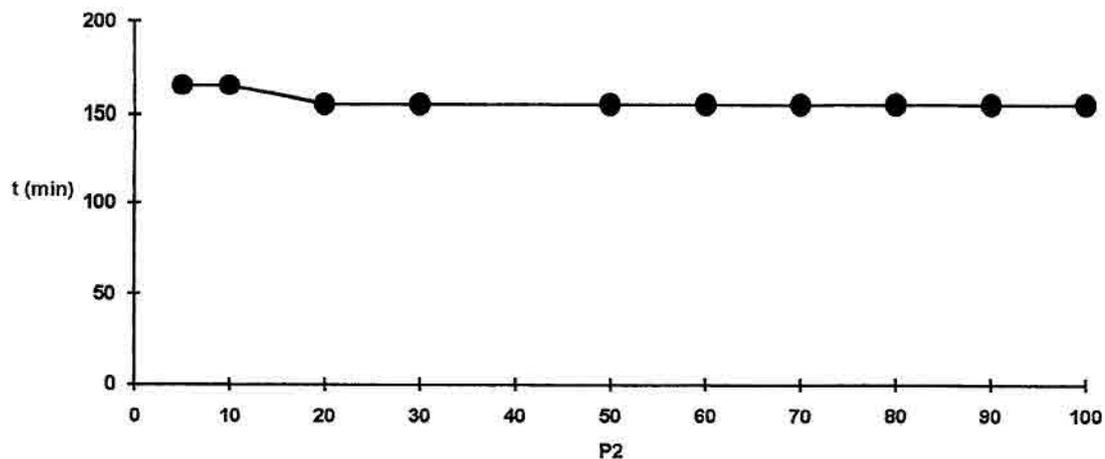


Fig. 6.13 - Comportamento do tempo de atraso

Comparando as figuras 6.12 e 6.13, novamente é observada a relação inversa entre o tempo de “setup” do número de trocas de ferramentas e o tempo de atraso. No momento em que o atraso apresenta um declínio em seus valores o número de trocas de ferramentas aumenta.

6.2.3.3.a - DESCONSIDERANDO OS TEMPOS DE “SETUP”

De modo a evitar a influência principalmente da minimização do número de trocas de ferramentas e também da minimização do número de instantes de parada, conforme já citado no item 6.2.3.3, foram anulados os valores dos pesos P_3 e P_4 . A tabela 6.15 mostra os resultados obtidos. Na tabela 6.15, com exceção de S_f e S_p que representam número de instantes de parada e o número de trocas de ferramentas, os demais dados estão referenciados em minutos.

TABELA 6.15 - MINIMIZAÇÃO DO TEMPO DE ATRASO DESCONSIDERANDO OS TEMPOS DE "SETUP"

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| P ₂ | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 100 | 150 | 200 | 500 | 800 | 1000 |
| Tp | 563 | 563 | 563 | 563 | 563 | 563 | 563 | 563 | 563 | 563 | 563 | 563 | 563 | 563 |
| At | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 |
| Sp | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Sf | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 |
| Tr | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 |

Observa-se na tabela 6.15, que os valores das parcelas da função objetivo se mantêm constantes. Comparado-se com os dados da melhor solução para o atraso da tabela 6.14 verifica-se que:

- o tempo de atraso apresenta o mesmo valor mínimo obtido quando foi considerada a influência dos tempos de "setup";
- o número de trocas de ferramentas aumentou de 12 para 13;
- o número de instantes de parada se manteve constante em 6

A figura 6.14 mostra o comportamento dos tempos de "setup".

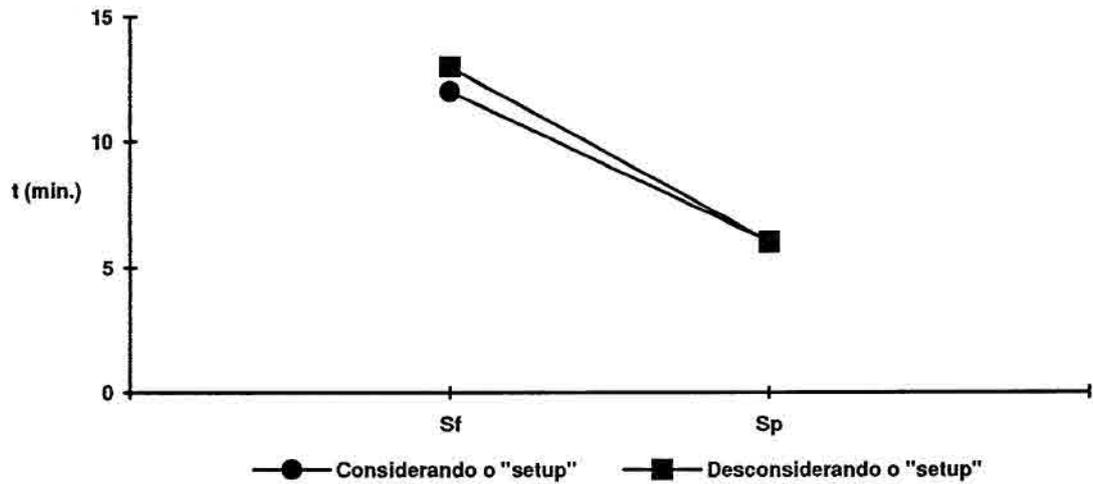


Fig. 6.14 - Comparação entre o comportamento dos tempos de "setup"

O comportamento do atraso em relação ao número de trocas de ferramentas apresenta o esperado. Quando o número de "setups" é desconsiderado o número de trocas de ferramentas aumenta. Observa-se novamente na tabela 6.15, caracterizada pelos valores constantes, a influência da magnitude do peso na restrição da vizinhança.

6.2.3.4 - MINIMIZAÇÃO DOS PERÍODOS OCIOSOS DOS TURNOS DE PRODUÇÃO

Finalizando a análise individual da influência dos pesos das parcelas da função objetivo, a partir da mesma solução inicial (ver item 6.2.2) é analisado o comportamento do MSPF quando se busca a minimização do período de tempo ocioso dos turnos de produção.

O escopo das análises realizadas são similares as anteriores:

- com exceção de P_5 , que assume valores crescentes, aos demais pesos são atribuídos os valores da solução não tendenciosa;
- com exceção de P_1 , que assume o valor da solução não tendenciosa. e de P_5 (valores crescentes) os demais pesos são anulados.

A tabela 6.16 mostra os resultados obtidos com a primeira abordagem citada acima. Com exceção dos valores associados a S_p e S_f que representam o número

de instantes de parada e o número de trocas de ferramentas, os demais valores da tabela 6.16 estão na unidade dimensional de tempo em minutos.

TABELA 6.16 - MINIMIZAÇÃO DO TEMPO OCIOSO DOS TURNOS DE PRODUÇÃO

| | | | | | | | | | | | |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| P_s | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 100 | 500 |
| T_p | 544 | 567 | 563 | 567 | 658 | 662 | 652 | 649 | 649 | 649 | 658 |
| A_t | 273 | 164 | 155 | 185 | 628 | 693 | 614 | 721 | 721 | 721 | 721 |
| S_p | 5 | 5 | 6 | 8 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| S_f | 11 | 13 | 13 | 18 | 29 | 30 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 |
| T_r | 203 | 195 | 190 | 160 | 111 | 107 | 119 | 119 | 119 | 119 | 119 |

Na tabela 6.16 observa-se um fato interessante em relação aos períodos de tempos ociosos e dos “setups”. A medida que aumentam o número de trocas de ferramentas e o número de instantes de parada o tempo ocioso dos turnos diminui. A figura 6.15 ilustra este fato.

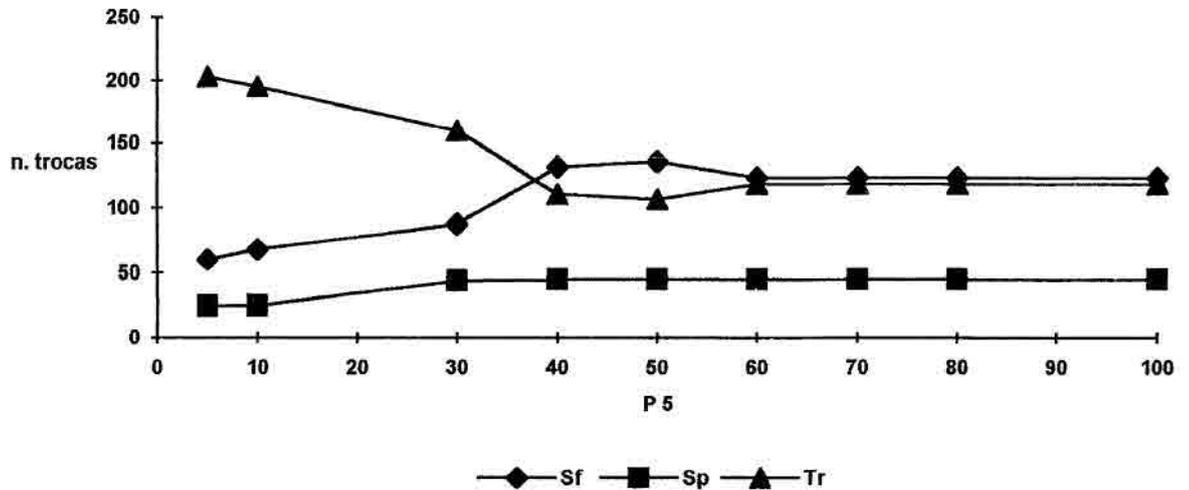


Fig. 6.15 - Comportamento dos tempos de "setup" em relação ao tempo ocioso dos turnos

O comportamento observado na figura 6.15 está de acordo com a consistência do MSPF. Quanto maior for o número de "setups" maior será o número de lotes. Dado que o número de partes é fixo, um aumento no número de lotes significa ter-se lotes que necessitam, em média, menor tempo para serem processados. Associando como medida de grandeza ao tamanho do lote o seu tempo de processamento pode-se dizer que a medida que aumenta o número de "setups", aumenta o número de lotes e por conseguinte o tamanho dos lotes tende a diminuir. Quanto menor for o tamanho dos lotes, maior será a chance de aproveitamento dos tempos dos turnos, diminuindo portanto os seus períodos ociosos. Portanto uma boa política para se minimizar o período de tempos ociosos nos turnos é maximizar o número de "setups" da produção. Sendo mais eficaz, maximizar o número de trocas de ferramentas.

A tabela 6.17 mostra os dados obtidos quando, com exceção de P_5 que tem associados valores crescentes e P_1 que tem associado o valor da solução não tendenciosa, os demais pesos são zerados. Com exceção dos valores associados a Sp e Sf que representam o número de instantes de parada e o número de trocas de ferramentas, os demais valores da tabela 6.17 estão na unidade dimensional de tempo em minutos.

TABELA 6.17 - MINIMIZAÇÃO DO TEMPO OCIOSO DOS TURNOS DE PRODUÇÃO SEM A INFLUÊNCIA DO “SETUP”

| | | | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|
| P_5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 100 | 500 | 1000 |
| T_p | 601 | 601 | 601 | 601 | 601 | 601 | 601 | 601 | 601 | 601 |
| A_t | 1824 | 1429 | 1511 | 1511 | 1511 | 1511 | 721 | 1511 | 1511 | 1511 |
| S_p | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| S_f | 25 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 |
| T_r | 127 | 119 | 119 | 119 | 119 | 119 | 119 | 119 | 119 | 119 |

Na tabela 6.17 volta a se manifestar a relação inversa entre o número de trocas de ferramentas e o atraso. A relação antes observada do tempo ocioso dos turnos com relação ao número de trocas de ferramentas se mantém. O número de instantes de parada para a troca de ferramentas se manteve constante, não indicando ter influência direta no tempo ocioso dos turnos. A figura 6.16 mostra o comportamento de S_f e T_r .

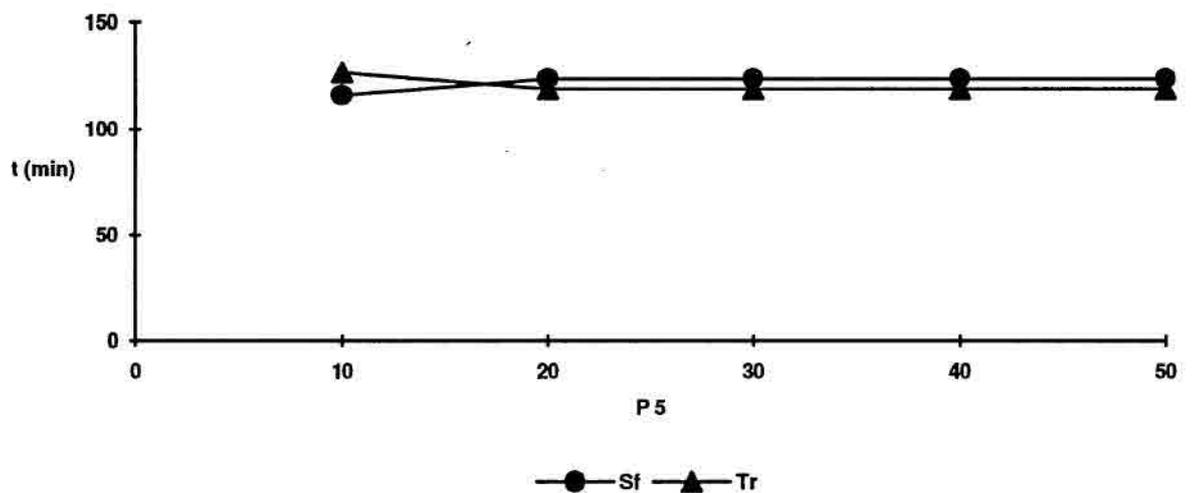


Fig. 6.16 - Comportamento do tempo ocioso dos turnos em relação ao número de troca de ferramentas quando o número de “setups” é desconsiderado.

Observa-se, na figura 6.16, que quando o número de trocas de ferramentas aumenta o tempo dos períodos ociosos diminui.

6.2.3.5 - UMA APLICAÇÃO EM MAIOR ESCALA

De modo a verificar a robustez do MSPF quanto a memória alocada, tempo de processamento e a comparar os resultados obtidos com o modelo nas análises anteriores com um exemplo de maior porte, gerou-se um exemplo de 50 partes que utiliza 10 tipos de ferramentas. Considerou-se a capacidade do magazine limitada a 4 ferramentas.

Não observou-se diferença significativa nos tempos de processamento de Solini e Alsi (tempo de processamento menor que dois segundos). Já em relação a Althp, o tempo de processamento aumentou devido ao aumento do número de soluções nas vizinhanças. Para exemplos de 10 partes com 10 ferramentas o tempo de processamento médio era de 5 segundos e as vizinhanças tinham em média 80 e 220 soluções respectivamente. Neste exemplo, as vizinhanças passam a ter em média de 1150 e 4500 soluções e o tempo de processamento passou em média para 75 minutos. Foram realizados testes em que somente partes das vizinhanças eram consideradas de maneira randômica e os resultados obtidos foram inferiores.

Aplicando aos pesos da função objetivo, os valores da solução não tendenciosa, obteve-se os seguintes resultados:

- tempo de produção = 3070 minutos;
- tempo de atraso = 4887 minutos;
- número de trocas de ferramentas = 58 (248 min.);
- número de paradas para a troca de ferramentas = 29 (145 min);
- tempo ocioso dos turnos = 201 minutos.

A figura 6.17 mostra a comparação entre a solução não tendenciosa deste exemplo, com a obtida utilizando o exemplo de Tang e Denardo (1987), ver item 6.2.3.

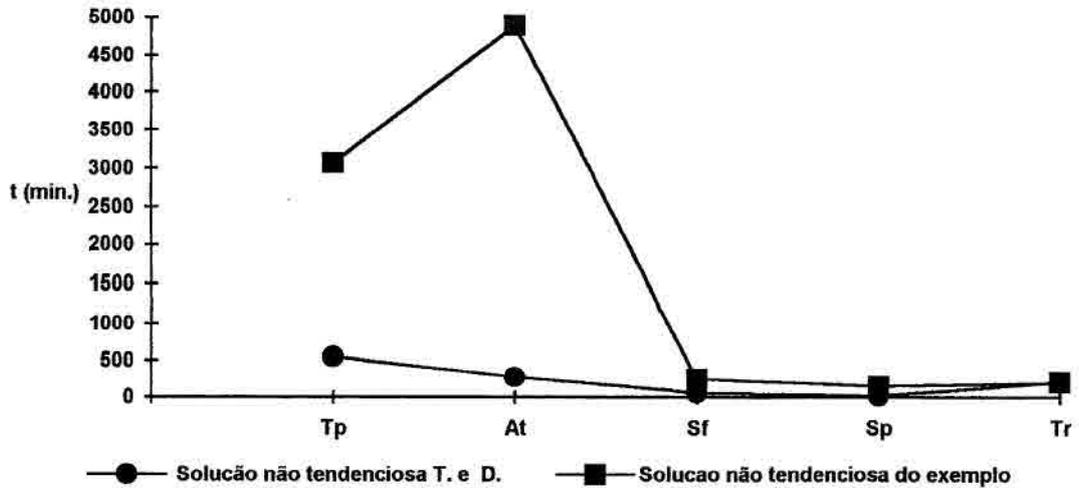


Fig 6.17 - Gráfico comparativo entre a solução não tendenciosa obtida do exemplo de Tang e Denardo e a do exemplo de grande escala.

Observa-se que com exceção do tempo de produção os demais não apresentam um comportamento inesperado. Este fato não tem nenhum significado na análise, pois o tempo de produção é função dos tempos de “setup” (Sp e Sf) e dos tempos ociosos dos turnos (Tr). Ou seja se Sp, Sf e Tr aumentam Tp também aumenta. Mas, o tempo de produção não reflete o tempo de atraso. Ou seja, um aumento do atraso não significa que o tempo de produção vai aumentar ou abaixar.

6.2.3.5.a - MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE TROCAS DE FERRAMENTAS

Para observar o comportamento do MSPF na minimização do número de trocas de ferramentas foram feitos três experimentos:

- Todos os pesos com exceção ao atribuído ao tempo de troca de ferramentas tiveram seus valores associados aos da solução não tendenciosa. Ao peso de Sf (P_4) foi atribuído o valor de 70 que pertence ao intervalo obtido no item 6.2.3.1 ($60 \leq P_4 \leq 100$), em que eram obtidos os menores valores de Sf;
- Os pesos associados aos tempos de atraso e dos períodos ociosos dos turnos são zerados. O peso do tempo de produção (P_1) e o tempo do número de instantes de parada (P_3) assumem o valor da solução não tendenciosa e P_4 assume o valor 70;

- P_1 assume o valor da solução não tendenciosa, P_4 o valor de 70 e os demais pesos são zerados.

A tabela 6.18 mostra os resultados dos experimentos denominados de A, B e C respectivamente. Com exceção dos valores associados a S_p e S_f que representam o número de instantes de parada e o número de trocas de ferramentas, os demais estão na unidade dimensional de tempo em minutos.

TABELA 6.18 - MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE TROCAS DE FERRAMENTAS

| EXPERIMENTOS | T_p | A_t | S_p | S_f | Tr |
|--------------|-------|-------|-------|-------|------|
| A | 3018 | 9910 | 20 | 47 | 260 |
| B | 3008 | 25760 | 20 | 32 | 350 |
| C | 2911 | 27661 | 20 | 22 | 370 |

A tabela 6.18 fornece resultados bem interessantes. Quando no experimento B foi desconsiderada a influência do atraso, este teve seu valor aumentado e o número de trocas de ferramentas diminuiu como era esperado. Notar que o número de instantes de parada se mantém inalterado em 20. Quando se tira além do atraso a influência do número de instantes de parada, o número de trocas de ferramentas diminuiu mais um pouco. Ou seja, observa-se que pode-se ter um número diferente de troca de ferramentas com o mesmo número de instantes de parada para a troca de ferramentas e que o número de instantes de parada para a troca de ferramentas influencia na minimização do número de trocas de ferramentas, pois quando ele foi desconsiderado obteve-se o melhor valor de S_f .

Confirma-se mais uma vez a relação inversa existente entre o atraso e o número de trocas de ferramentas; a medida que o número de trocas de ferramentas ia baixando de valor os valores associados ao atraso iam subindo.

6.2.3.5.b - MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE INSTANTES DE PARADA

Foram realizados três experimentos análogos ao item anterior, com a diferença de que o peso que agora se mantém constante para análise é o P_3 .

- Todos os pesos com exceção ao atribuído ao tempo do número de instantes de parada tiveram seus valores associados aos da solução não tendenciosa. Ao peso de Sp (P_3) foi atribuído o valor de 70 que pertence ao intervalo obtido no item 6.2.3.2 ($P_3 \geq 40$), em que eram obtidos os menores valores de Sp ;
- Os pesos associados ao tempos de atraso e dos períodos ociosos dos turnos são zerados. Os pesos do tempo de produção (P_1) e P_4 assumem o valor da solução não tendenciosa e P_3 assume o valor 70;
- P_1 assume o valor da solução não tendenciosa , P_3 o valor de 70 e os demais pesos são zerados.

A tabela 6.19 mostra os resultados dos experimentos denominados de A , B e C respectivamente. Com exceção dos valores associados a Sp e Sf que representam número de trocas, os demais estão na unidade dimensional de tempo em minutos.

TABELA 6.19 - MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE INSTANTES DE PARADA

| EXPERIMENTOS | T_p | A_t | Sp | Sf | Tr |
|--------------|-------|-------|------|------|------|
| A | 2988 | 5213 | 27 | 48 | 251 |
| B | 2975 | 22375 | 18 | 28 | 376 |
| C | 2849 | 26587 | 18 | 42 | 90 |

Observa-se, na tabela 6.19, que quando o atraso foi desconsiderado no experimento B, os valores do número de trocas de ferramentas e do número de instantes

de parada diminuíram e o valor do atraso subiu. No experimento C quando a influência da minimização do número de trocas de ferramentas é retirada observa-se que o número de instantes de parada se mantem no mínimo de B, mas que o número de trocas de ferramentas sobe e o atraso também. No experimento C pode-se observar a influência da minimização do número de instantes de parada no aumento do atraso. Este fato só foi passível de observação, quando foram retiradas todas as demais influências da função objetivo com exceção do tempo do atraso. O tempo de produção é mantido de maneira a fornecer valores diferentes às soluções das vizinhanças quando se torna muito forte a influência do peso privilegiado na escolha dos movimentos.

A figura 6.18 compara Sf e Sp dos experimentos C das tabelas 6.18 e 6.19.

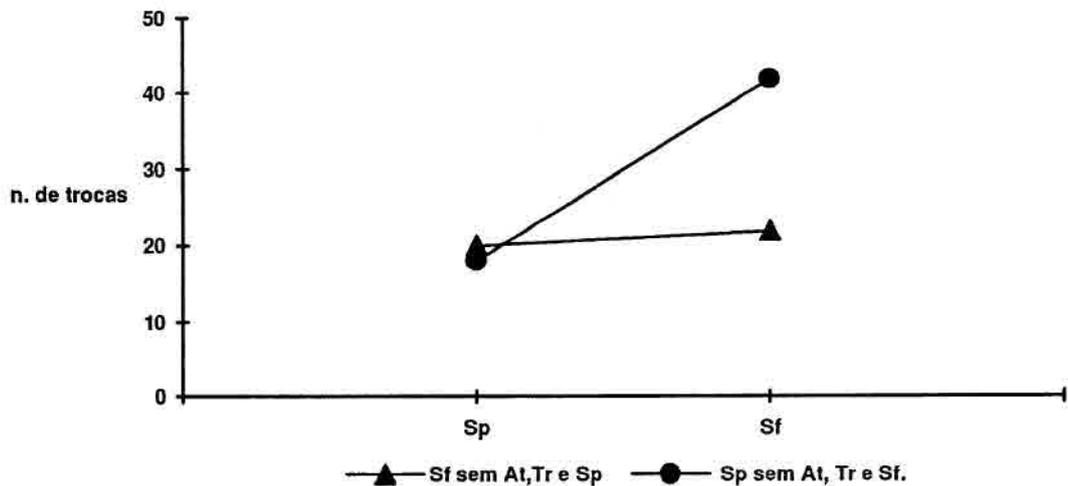


Fig. 6.18 - Comparação entre as minimizações de Sf e Sp quando somente Tp é considerado além do respectivo “setup”.

Observa-se na figura 6.18, que a a estratégia de minimização do número de ferramentas, mesmo sem a influência do número instantes de parada, gera um valor baixo para Sp. O mesmo não acontece em relação a Sf, quando se minimiza o número de instantes de parada e Sf não é levado em conta. Ou seja, a estratégia de minimização do número de instantes de parada não garante a minimização do número de trocas de ferramentas. Não se pode afirmar que o tempo de atraso influenciou, pois na solução de minimização de Sf seu valor era de 2911 e na de minimização de Sp foi de 2948.

6.2.3.5.c - MINIMIZAÇÃO DO ATRASO

Foram realizados dois experimentos para verificar-se o comportamento do MSPF quando o atraso é privilegiado:

- Todos os pesos com exceção ao atribuído ao tempo de atraso tiveram seus valores associados aos da solução não tendenciosa. Ao peso de At (P_2) foi atribuído o valor de 70 que pertence ao intervalo obtido no item 6.2.3.3 ($P_2 \geq 20$), em que eram obtidos os menores valores de Sp ;
- P_1 assume o valor da solução não tendenciosa, P_2 o valor de 70 e os demais pesos são zerados.

A tabela 6.20 mostra os resultados dos experimentos denominados de A, B respectivamente. Com exceção dos valores associados a Sp e Sf que representam número de instantes de parada e o número de trocas de ferramentas, os demais estão na unidade dimensional de tempo em minutos.

TABELA 6.20 - MINIMIZAÇÃO DO ATRASO

| EXPERIMENTOS | Tp | At | Sp | Sf | Tr |
|--------------|------|------|----|----|-----|
| A | 3228 | 4628 | 38 | 67 | 360 |
| B | 3228 | 4628 | 38 | 67 | 360 |

Não se observou diferença entre os resultados obtidos nos experimentos A e B. Nota-se a influência do peso privilegiado no direcionamento da escolha dos movimentos durante a pesquisa. Como era esperado o atraso teve atribuído um valor baixo e os números de troca de ferramentas e de instantes de parada tiveram associados valores altos.

6.2.3.5.d - MINIMIZAÇÃO DOS PERÍODOS OCIOSOS DOS TURNOS DE PRODUÇÃO

Foram realizados dois experimentos para verificar o comportamento do MSPF quando o tempo ocioso dos turnos é privilegiado:

- Todos os pesos com exceção ao atribuído ao tempo ocioso dos turnos tiveram seus valores associados aos da solução não tendenciosa. Ao peso de Tr (P_5) foi atribuído o valor de 50 que corresponde ao melhor valor para obtenção de Tr (ver ítem 6.2.3.4);
- P_1 assume o valor da solução não tendenciosa , P_5 o valor de 50 e os demais pesos são zerados.

A tabela 6.21 mostra os resultados dos experimentos denominados de A , B respectivamente. Com exceção dos valores associados a S_p e S_f que representam número de instantes de parada e o número de trocas de ferramentas, os demais estão na unidade dimensional de tempo em minutos.

TABELA 6.21 - MINIMIZAÇÃO DO TEMPO OCIOSO DOS TURNOS DE PRODUÇÃO

| EXPERIMENTOS | T_p | A_t | S_p | S_f | T_r |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A | 3355 | 12715 | 43 | 108 | 171 |
| B | 3576 | 34673 | 46 | 147 | 240 |

Observa-se no experimento A que a minimização de T_r leva a um aumento do número de trocas de ferramentas e a um aumento do número de instantes de parada para a troca de ferramentas, como já era esperado. No experimento B, isto também acontece, mas estranha-se a princípio que o valor de T_r aumentou em relação ao experimento A. Este comportamento também foi observado na análise do exemplo de 10 partes (ver ítem 6.2.3.4). Em verdade a estrutura do MSPF não tem um módulo dedicado a minimização de T_r . Os valores obtidos quando se privilegia T_r são uma

conseqüência da qualidade das soluções das vizinhanças que são formadas voltadas para os problemas de Seleção de Partes, de Carregamento de Ferramentas e do Atraso.

A figura 6.19 compara os valores obtidos de Sp e Sf nos experimentos A e B.

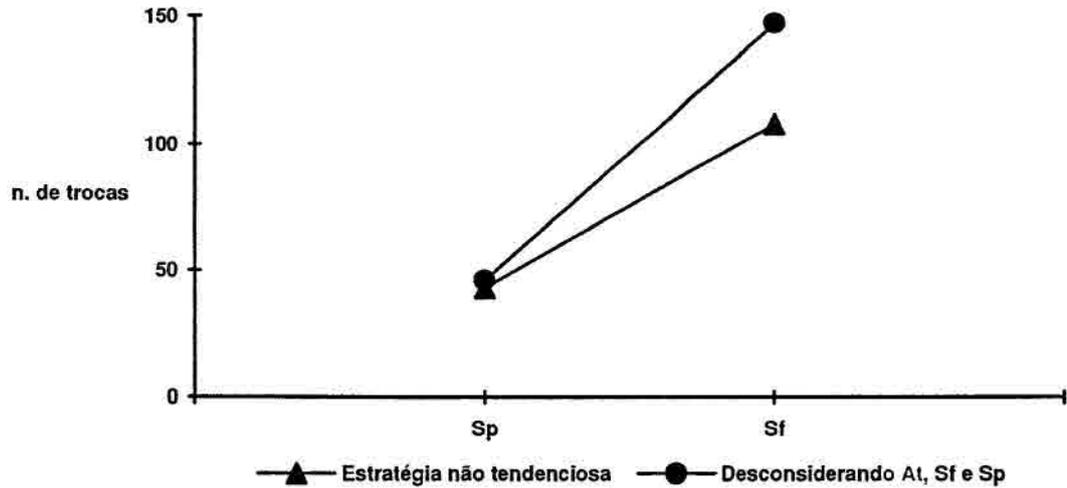


Fig. 6.19 - Comparação entre as minimizações de Tr quando utiliza-se a estratégia da solução não tendenciosa e quando, com exceção de P_1 e do peso de Tr , os demais pesos são zerados.

Observa-se, na figura 6.19, que quando na minimização dos períodos ociosos dos turnos o número de trocas de ferramentas e o número de instantes de parada não influenciam, Sp e Sf aumentam.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Foi proposto neste trabalho, um modelo de otimização que permite, a partir de um “scheduling” inicial, obter várias seqüências de partes e ferramentas que refletem as estratégias determinadas pelos pesos designados às parcelas da função objetivo. Durante o desenvolvimento desta tese, muito foi aprendido e formulado através do MSPF com relação aos problemas de Seleção de Partes, de Carregamento de Ferramentas, de “Scheduling” com restrições e com o problema de Atraso pelo enfoque da manufatura flexível. Pela qualidade dos resultados obtidos o objetivo proposto foi atingido. O MSPF pode ser melhorado e aprimorado de modo a servir como um laboratório para a resolução conjunta dos problemas de minimização do número de trocas de ferramentas, minimização dos instantes de parada para a troca de ferramentas, minimização do tempo de atraso das partes e minimização dos períodos ociosos dos turnos.

7.1 - PROBLEMAS ABORDADOS

A maior contribuição deste trabalho na solução dos problemas de Seleção de Partes e de Carregamento de Ferramentas é a abordagem oferecida pelo MSPF que permite resolvê-los conjuntamente. Esta flexibilidade do modelo permite que os problemas de minimização do número de trocas de ferramentas e do número de instantes de parada para a troca de ferramentas possam ser resolvidos juntos. Este é um ponto inovador na abordagem destes problemas. Todas as heurísticas desenvolvidas atualmente para resolver estes problemas são dedicadas a solução individual dos mesmos, não tendo sido encontrada nenhuma heurística que os abordasse juntos e os resolvesse. A chave para a solução destes dois problemas em conjunto e oferecendo soluções tão boas se fundamenta em quatro pontos:

- a associação de grupos de partes a conjuntos de ferramentas que podem processá-las continuamente pelo conceito de famílias de partes;
- a certeza com relação a quais ferramentas devem continuar no magazine nos instantes de troca de ferramentas, já que sempre a seqüência das partes e as famílias de partes a elas associadas são conhecidas em cada iteração;
- a utilização de duas pesquisas locais: uma que troca a posição de dois lotes (a designação das partes às famílias de partes permanece

constante) e outra em que as partes trocam de lotes (a designação das partes às famílias de partes pode ser alterada); e

- a enorme flexibilidade da pesquisa tabu em permitir a utilização de um grande número de restrições e em aceitar novas estruturas quanto a definição de vizinhanças e de movimentos.

As expectativas do comportamento do MSPF na solução do problema do Atraso em um “scheduling” com restrições às datas de vencimento das partes e a capacidade do magazine foram supridas pelos resultados obtidos nos experimentos. Ficou patente o conflito existente entre tentar gerar uma seqüência de partes que minimizasse o atraso e ao mesmo tempo atendesse às abordagens de seleção de partes e de carregamento de ferramentas. Não existe uma solução sem conflito para o problema do Atraso. Ou privilegia-se a minimização do tempo do atraso, ou privilegia-se a minimização do número de trocas de ferramentas e dos instantes de parada ou administra-se o conflito pelo gerenciamento dos pesos.

Na resolução do problema do Atraso, o lote desempenhou um papel preponderante. O lote foi o artifício necessário para viabilizar o movimento de conjuntos de partes. Este movimento permitiu ao MSPF uma convergência rápida na resolução do problema de atraso.

7.2 - MODELAGEM E APLICAÇÃO DO MSPF

A estrutura modular conferida ao modelo sem dúvida forneceu inúmeras vantagens durante a modelagem. Tendo-se mostrado extremamente eficaz na formação das estruturas de dados referentes as duas pesquisas locais. Ficam pendentes uma melhor definição das estruturas de memórias utilizadas nas vizinhanças. Apesar do uso de alocação dinâmica de memória do C++ e de estruturas de curto prazo utilizadas, para problemas de grande escala o tempo de processamento foi considerado muito grande. Não há como utilizar estratégias de diversificação em relação à vizinhança pois a cada iteração todo o cenário muda; lotes e famílias de partes são criados ou desaparecem. Um ponto a ser mais explorado e estudado é a utilização de estratégias de intensificação pelo gerenciamento dos pesos. A ocorrência deste fato foi observada durante a implementação do modelo, não tendo sido definida uma maneira de como ele possa ser usado na determinação do tamanho da vizinhança sem que se tenha de calcular todas as suas soluções.

Os tipos de movimentos propostos no caso de inserção e retirada de uma parte de um lote se mostraram bastante eficientes na geração de um grande número de possíveis soluções. Deve ser estudado, no entanto, se existe a possibilidade de tratá-los como operadores na determinação do tamanho e do tipo de vizinhança que se deseja pesquisar.

7.3 - RESULTADOS OBTIDOS

Conforme visto no item 6.2.3.1.b, os resultados do MSPF comparados a resultados obtidos por outras heurísticas para o problema de minimização do número de trocas de ferramentas se mostraram muito bons. Foi salientado que para demonstrar a robustez do MSPF na resolução do problema de minimização do número de trocas de ferramentas privilegiou-se o peso correspondente e os demais foram mantidos atenuados.

Com relação aos outros resultados fornecidos pelo MSPF não há referências para comparação sendo citadas a seguir as políticas obtidas pelo gerenciamento dos pesos. O tempo de produção é um reflexo dos demais tempos da função objetivo com exceção do tempo de atraso. Nas políticas propostas ele é sempre considerado com P_1 igual a 1, ou seja, o valor de seu peso associado correspondente ao da solução não tendenciosa.

7.3.1 - POLÍTICA DE MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE TROCAS DE FERRAMENTAS

O tempo de atraso exerce uma influência contrária à minimização do número de trocas de ferramentas. O número de instantes de parada influencia positivamente até um certo limite, tendo sido observado em problemas de maior porte que ele atua como um limitante inferior. O período ocioso dos turnos de produção tem uma relação inversa com o número de trocas de ferramentas. Quanto maior for o número de trocas de ferramentas menor será o tempo de períodos ociosos nos turnos, devendo ser salientado que dada a modelagem do MSPF este fato só se observa marcadamente quando o peso de Tr é privilegiado. Uma boa política seria então desconsiderar o tempo de atraso e dos períodos dos tempos ociosos e gerenciar o valor do peso de Sf em relação a Sp conforme o objetivo da otimização. O valor recomendado para P_4 está no intervalo de 60 a 100.

7.3.2 - POLÍTICA DE MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE INSTANTES DE PARADA PARA A TROCA DE FERRAMENTAS

A maior tendência contrária a minimização do número de instantes de parada é o atraso. Devendo pois ser desconsiderado. A minimização do número de trocas de ferramentas sempre levará a sua minimização, sendo que para problemas maiores pode atuar como um limitante inferior. Os períodos ociosos dos tempos de produção mostram uma influência negativa não muito preponderante. Uma boa política seria desconsiderar os tempos de atraso e dos períodos ociosos dos turnos e privilegiar

Sp. O valor de Sf deve ser gerenciado conforme o objetivo da otimização. P₃ deve assumir valores maiores que 40.

7.3.3 - POLÍTICA DE MINIMIZAÇÃO DO ATRASO

O tempo de atraso é um caso singular, todas as demais parcelas o atrapalham. Sendo a influência mais negativa desempenhada pelo número de trocas de ferramentas seguida pelo número de instantes de parada. Uma boa política é desconsiderar as influências de Sp, Sf e Tr. O valor de P₂ deverá ser maior que 1,34.

7.3.4 - POLÍTICA DE MINIMIZAÇÃO DOS PERÍODOS OCIOSOS DOS TURNOS DE PRODUÇÃO

A minimização do período ocioso dos turnos de produção tem como influência negativa direta o número de trocas de ferramentas e o número de instantes de parada para a troca de ferramentas. Um menor número de trocas de ferramentas corresponde a um grande período de tempo ocioso nos turnos. Mas observa-se que tanto Sf como Sp tem uma influência negativa que parece ser limitada, especialmente quando o peso associado a Tr assume o valor 50. Uma boa política para minimizar o período ocioso nos turnos de produção seria desconsiderar o atraso, designar para os pesos associados a Sp e Sf os valores da solução não tendenciosa e a Tr associar o valor 50.

7.4 - RECOMENDAÇÕES

As recomendações a seguir, indicam tópicos a serem estudados visando o aprimoramento do MSPF:

- desenvolver métodos para utilizar estratégias de intensificação na pesquisa tabu considerando o gerenciamento dos pesos;
- estender o modelo para várias máquinas, explorando o roteamento das partes pelo sistema empregando o conceito de ferramenta residente (Gyampah , 1994);
- aprimorar a modelagem do MSPF em relação aos períodos de tempo ociosos dos turnos de maneira a entender melhor seu comportamento e influência no MSPF;

- revisar as estruturas de memória utilizadas, de modo a melhorar a eficiência do processamento MSPF ; e
- desenvolver interfaces amigáveis de modo a tornar o MSPF mais acessível a seus potenciais usuários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aubin , J. ; Ferland , A. A large scale timetabling problem. *Computers and Operations Research* , 16 (1) : 67 -77 , 1989.
- Bard , J. F. A heuristic for minimization the number of tool switches on a flexible machine. *IIE Transactions* , 20 (4) : 382 - 381 , dez. , 1988.
- Ben-Arieh , D. ; Chane , P. T. An extension to the p-median group technology algorithm. *Computers and Operations Research* , 21 (2) : 119 - 125 , 1994.
- Bernardo , J. J. ; Mohamed , Z. The measurement and use of operational flexibility in the loading of flexibility manufacturing systems. *European Journal of Operational Research* , 60 : 144 - 155 , 1992.
- Blazewicz , J. ; Finke , G. ; Haupt , R.; Schmidt , G. New trends in machine scheduling. *European Journal of Operational Research* , 37 : 303 - 317 , 1988.
- Blazewicz , J. ; Eiselt , H. ; Finke , G. ; Laporte , G. ; Weglarz , J. Scheduling tasks and vehicles in a flexible manufacturing systems. *International Journal FMS* , 4 : 5 - 16 , 1991.
- Blazewicz , J. ; Finke , G. Scheduling with resource management in manufacturing systems. *European Journal of Operational Research* , 76 : 1 - 14 , 1994.
- Carter , M. W. A survey of practical applications of examination timetabling algorithms . *Operations Research* , 34 (2) : 193 - 202 , mar. , 1986.
- Chahal, N. ; Werra , D. An interactive system for constructing timetables. *European Journal of Operational Research* , 40 : 32 -37 , 1989.
- Costa , D. A tabu search algorithm for computing and operational timetable. *European Journal of Operational Research* , 76 : 98 - 110 , 1994.
- Crama , Y. ; Oerlemans , A. G. A column generation approach to job grouping for flexible manufacturing systems. *European Journal of Operational Research* , 78 : 58 - 80 , 1994.
- Crama , Y. ; Kolen , A. W. J. ; Oerlemans , A. G. ; Spieksma , F. C. R. Minimizing the number of tool switches on a flexible machine. *The International Journal of FMS* , 1: 33 - 55 , 1994.

- Crama , Y. Combinatorial optimization models for production scheduling in automated manufacturing systems. In : EURO XIV Conference. Jerusalem, julho 3 - 6 , 1995. *Semi-Plenary Papers*. Polônia, Roman Slowinski , 1995 , p. 237 -259.
- Dell'Amico , M. ; Trubian , M. Applying tabu search to the job-shop scheduling problem. *Annals of Operations Research* , 1992 , p.1 - 25.
- Dixon , J. R. Measuring manufacturing flexibility : an empirical investigation. *European Journal of Operational Research* , 60 : 131 - 143 , 1992.
- Ferland , J. A. ; Aubin , J. A large scale timetabling problem. *Computers and Operations Research* , 40 : 67 - 77 , 1984.
- Follonier , J. P. Minimization of the number of tool switches on a flexible manufacturing machine. *Belgian Journal of Operations Research , Statistics and Computer Science*, 34 (1) : 55 - 72 , 1994.
- Glover , F. ; Laguna , M. Tabu search , a chapter in modern heuristic techniques for combinatorial problems . *Working Paper* , University of Colorado , Boulder , jul. , 1992.
- Gómez , A. T. *Simulação da linha de produção do laboratório de circuito impresso do INPE* . (Dissertação de Mestrado em Análise de Sistemas e Aplicações) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais , São José dos Campos, 1988.
- Gunasekaran , A. ; Martikainen , T. ; Yli-olli , P. Flexible manufacturing systems : an investigation for research and applications. *European Journal of Operational Research* , 66 : 1 - 26 , 1993.
- Gupta , Y. P. ; Goyal , S. Flexibility of manufacturing systems; concepts and measurements. *European Journal of Operational Research*, 43 : 119 - 135 , 1989.
- Gupta , Y. P. ; Somers, T. M. The measurement of manufacturing flexibility. *European Journal of Operational Research* , 60 : 131 - 143 , 1992.
- Gyampah , K. A. A comparative study of FMS tool allocation and part type selection approaches for varying part type mix. *The International Journal of FMS* , 6 : 179 - 207 , 1994.
- He , W. ; Kusiak , A. A scheduling manufacturing systems. *Computers in Industry* , 20 : 163 - 175 , 1992.
- Heragu , S. S. Grouping technology and cellular manufacturing. *IEEE Transactions on Systems , Man , Cybernetics* , 24 (2) : 203 - 314 , fev. , 1994.

- Hertz , A. Tabu search for large scale timetabling problems. *European Journal of Operational Research* , 54 : 39 - 47 , 1991.
- Hirabayashi , R. ; Suzuki , H. ; Tsuchiya , N. Optimal tool module design problem for NC machine tools. *Journal of the Operations Research Society of Japan* , 27 (3) : 205 - 229 , set. , 1984.
- Hwang , S. S. ; Shanthikumar , J. G. An FMS production planning systems and evaluation of part selection approaches. *Management Science Working Paper* , n. MS 43, School of Business Administration , University of California , Berkely , 1987.
- Hwang , S. S. ; Shogan , A. W. Modelling and solving an FMS part selection problem. *International Journal of Production Research* , 27 (8) : 1349 - 1366 , 1989.
- Jaikumar , R. ; Van Wassenhove L. N. A production planning framework for flexible manufacturing systems. *Journal of Manufacturing and Operations Management* , (2) : 52 - 79 , 1989.
- Kingston , J. R. ; Cooper , T. B. The solution of real instances of the timetabling problem. *The Computer Journal* , 36 (7) : 645 - 553 , 1993.
- Kouvelis , P. Design and planning problems in flexible manufacturing systems: a critical review. *Journal of Intelligent Manufacturing* , 3 (2) : 75 - 100 , abril , 1992.
- Kumar , K. R. ; Kusiak , A. ; Vannelli , A. Grouping of parts and components in flexible manufacturing systems. *European Journal of Operational Research* , 24 : 387 - 397 , 1986.
- Kusiak , A. The part families problem in flexible manufacturing systems. *Annals of Operations Research* , 3 : 297 - 300 , 1985.
- Kusiak , A. ; Chow , W. S. Efficient solving of the group technology problem. *Working Paper* , 6 / 86 . University of Manitoba , Department of mechanical engineering , Winnipeg , Manitoba , jun. , 1986.
- Laguna , M. ; Barnes , J. W. ; Glover , F. W. Tabu search methods for a single machine scheduling problem. *Journal of Intelligent Manufacturing* , 2 : 63 - 74 , 1991.
- Moreno , A. A. ; Ding , F. Heuristics for the FMS-loading and part-type selection problems. *The International Journal of Flexible manufacturing Systems* , 5 : 287 - 300 , 1993.
- Nakornchai , V. ; King , J. R. Machine-component group formation in group technology review and extension. *International Journal Production Research* , 20 (12) : 117 - 133 , 1982.

- Oerlemans , A. G. Flexible manufacturing : concepts and methods. *JORBEL - Belgian Journal of Operations Research , Statistics and Computer Science* , 34 (1) : 5 - 22 , 1994.
- Roy , S. ; Ferland , J. A. Timetabling problem for university as assignment of activities for resources. *Computers & Operations Research* , 12 (2) : 207 - 218 , 1985.
- Sethi , A. K. ; Sethi , S. P. Flexibility in manufacturing : a survey. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems* , (2) : 289 - 328 , 1990.
- Shodi , M. S. ; Askin , R. G. ; Sen , S. A hierarchical model for control of flexible manufacturing systems. *Journal of the Operational Research Society* , 45 (10) : 1185 - 1196 , 1994.
- Singh , N. Design of cellular manufacturing systems : an invited review. *European Journal of Operational Research* , 69 : 284 - 291 , 1993.
- Sodhi , M. S. ; Agnetis , A. ; Askin , R. G. Tool addition strategies for flexible manufacturing Systems. *The International Journal of FMS* , 6 : 287 - 316 , 1994.
- Stecke , K. E. A hierarchical approach to solving machine grouping and loading problems of flexible manufacturing systems. *European Journal of Operational Research* , 24 : 369 - 375 , 1986.
- Stecke , K. E. ; Kim , I. A study of FMS part type selection approaches for short-term production planning. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems* , 1 (1) : 7 - 29 , abril , 1988.
- Stecke , K. E. ; Kim , I. A flexible approach to part type selection in flexible flow systems using part mix ratios. *International Journal of Production Research* , 29 (1) : 53 - 57 , jan. , 1991.
- Stecke , K. E. Algorithms for efficient planning and operation of a particular FMS. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems* , (1) : 287 - 327 , 1989.
- Stecke , K. E. ; Toczyłowski , E. Profit-based FMS dynamic part type selection over time mid-term production planning. *European Journal of Operational research* , (63) : 54 - 65 , 1992.
- Tang , C. S. ; Denardo , E.V. Models arising from flexible manufacturing machine, part I: minimization of the number of tool switches. *Operations Research* , 36 (5) : 767-776, Nov. 1987.

- Tang , C. S. ; Denardo , E.V. Models arising from flexible manufacturing machine, part II: minimization of the number of switching instants. *Operations Research* , 36 (5) : 778 - 784, 1988.
- Werra, D. An introduction to timetabling . *European Journal of Operational Research* , 19 : 151 - 162 , 1985.
- Widmer , M. Job shop scheduling with tooling constraints: a tabu search approach. *Journal of the Operational Research Society* , 42 (1) : 75-82 , 1991.
- Yanasse , H. H. ; Vijaykumar , N. L. ; Olivo , N. L. A heuristic procedure to minimize the number of tool switches in a flexible manufacturing machine. In : XXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional , Rio de Janeiro , 1996. *Anais*. Rio de Janeiro, SOBRAPO , 1996 , v. 6 , p. 599-603.