

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

Este exemplar corresponde à redação final da tese  
defendida por Maurício Fernandes Figueiredo  
e aprovada pela Comissão  
Julgadora em 31 / 10 / 91.

  
Orientador

Estratégia para Seqüenciamento Distribuído e Tempo-real em  
Sistemas Flexíveis de Manufatura.

Maurício Fernandes Figueiredo

Orientador: Fernando Antônio Campos Gomide

Tese apresentada ao Departamento de  
Engenharia de Computação e Automação  
Industrial da Faculdade de  
Engenharia Elétrica da UNICAMP como  
parte integrante dos requisitos para  
obtenção do grau de Mestre em Enge-  
nharia Elétrica.

Campinas, outubro de 1991.

Dedico à ciência.

## Resumo.

Nos modernos sistemas de manufatura, onde os produtos manufaturados são transportados automaticamente, é freqüente criar estoques intermediários entre as máquinas para equacionar objetivos conflitantes tais como: maximizar a produção mantendo estoques e tempo de manufatura em níveis razoáveis. No entanto para oferecer estabilidade ao sistema alguma estratégia conveniente deve ser aplicada.

Considere sistemas de manufatura (SM) dinâmicos e determinísticos, cuja fabricação de  $P$  tipos de produtos distintos seja realizada por  $M$  máquinas a partir de operações simples, montagens ou desmontagens, podendo estar sujeitos a perturbações de duração limitada. Considere ainda que cada uma de suas máquinas possua um mecanismo de entrada de peças, subdividido para cada tipo de peça. Suponha que as peças de diferentes tipos, necessárias à produção de cada produto final, cheguem ao sistema continuamente.

Devido à característica dinâmica do SM considerado acima, a estratégia utilizada para a escolha do tipo de peça a ser processada e do momento de seu processamento influi em sua estabilidade. Ou seja, os níveis de estoques correspondentes a cada máquina podem permanecer abaixo de certos limites ou não.

Para esta classe de sistemas, este trabalho propõe uma estratégia para programação da produção em tempo real que garante a sua estabilidade, mantendo os níveis de estoque abaixo de certos limites cujos valores podem ser calculados para cada tipo de peça. No caso de uma única máquina, os valores limites referem-se ao seu ponto de operação em regime, para onde convergirão os valores de pico dos estoques. Tais limites compõem uma solução eficiente para o problema de minimização dos valores máximos de nível de estoque.

A avaliação de seu desempenho foi feita a partir de comparações com outras estratégias, tomando-se como parâmetro tanto o nível de pico nos estoques para cada tipo de peça quanto sua média. Os resultados computacionais apresentados confirmam o previsto pela teoria, incluindo sua utilidade e robustez.

índice.

1- Introdução.....	1
2- Aspectos Gerais dos Sistemas de Manufatura.....	6
2.1- Classificação dos Sistemas de Manufatura.....	7
3- A Programação da Produção.....	10
3.1- Introdução.....	11
3.2- Classificação da Programação da Produção.....	12
3.3- A Prática.....	14
3.4- A teoria.....	15
3.5- A Programação da Produção em Tempo-real.....	19
3.5.1- A Prática.....	19
3.5.2- A teoria.....	20
4- Apresentação da Estratégia.....	25
4.1- Introdução.....	26
4.2- Estratégia de Decisão para Máquina Isolada.....	28
4.2.1- A Estratégia Regular é Estável.....	30
4.2.2- O Comportamento dos Níveis de Estoque Alcança um Estado de Regime.....	31
4.2.3- Cálculo dos Limites para os Níveis de Estoque....	38
4.2.4- A Estratégia Regular Proporciona Picos de Nível de Estoque Eficientes.....	40
4.3- Aplicação da Estratégia Regular em Sistemas de Manufa- tura Tipo <i>Job-shop</i> .....	44
4.4- Alteração do Modelo Inicial.....	45
5- Resultados.....	46
5.1- Programa para Simulação do FMS.....	47
5.2- Resultados das Simulações.....	49
5.2.1- Exemplo para Máquina Isolada.....	50
5.2.2- Exemplo tipo <i>job-shop</i> .....	57
6- Conclusões.....	66
7- Bibliografia.....	69

## 1-Introdução

## 1-Introdução.

Devido ao comportamento da sociedade atual, as pressões oriundas da competitividade de mercado são crescentes. Para suportá-las as indústrias devem dispensar um esforço cada vez maior. Todas as suas atividades devem ser estudadas, planejadas e programadas para lhes garantir uma melhor eficácia. A nível da produção propriamente dita esta preocupação está sob a incumbência do gerenciamento da Programação da Produção.

O problema da Programação da Produção (PP) surge quando pretende-se alocar diversas atividades nos recursos de manufatura de maneira eficiente. Sua solução determina o que deve ser manufaturado, o momento em que esta atividade será iniciada e qual recurso se encarregará de efetuar-la de modo a satisfazer algum critério de desempenho. Conseqüentemente ela estabelece todo o dinamismo da produção.

Sabe-se que métodos informais para uso na Programação da Produção são usados diariamente há séculos, enquanto que, formalmente, estes só apareceram durante a primeira guerra mundial com o advento da carta de Gantt [6]. A partir de então o interesse de pesquisa nesta área tem se tornado a cada dia maior, o que pode ser evidenciado pelo crescente número de artigos publicados nas fontes de literatura específica.

Tradicionalmente o problema é formulado considerando-se um modelo de SM estático e determinístico, facilitando abordagens semelhantes às aplicadas em problemas de caráter combinatorial. Seu objetivo freqüentemente visa minimizar o tempo total de processamento ou o número de tarefas que avançam seu prazo. Cada vez menos este tipo de modelagem atende as necessidades reais da indústria, além de que a solução deste problema está sujeita à dificuldade denominada explosão combinatorial. Procurando aproximar o modelo da situação real e evitar a solução tipo problema combinatorial, várias outras abordagens têm surgido.

Nos modernos sistemas de manufatura, onde os produtos são transportados de maneira automatizada, freqüentemente cria-se estoques intermediários entre as máquinas para equacionar objetivos conflitantes tais como: maximizar a produção mantendo estoques

e tempo de manufatura em níveis razoáveis. Para oferecer estabilidade ao sistema alguma estratégia conveniente deve ser aplicada [15].

Propõe-se nesta dissertação uma formulação do problema quando este refere-se à limitação de capacidade de estoques de um SM cujo modelo possui características dinâmicas e determinísticas (embora admita certo grau de perturbação). Os resultados alcançados a partir de uma abordagem simples aplicam-se tanto em situações de tempo real como também a sistemas de manufatura distribuídos.

O modelo de sistema de manufatura utilizado neste trabalho é formado por  $M$  máquinas responsáveis em manufaturar  $\mathcal{P}$  tipos de produto. As rotas das peças podem caracterizar um sistema tipo *job-shop*. Observe-se a figura 1.1 que apresenta a modelagem segundo a abordagem sugerida neste trabalho para um caso particular de SM.

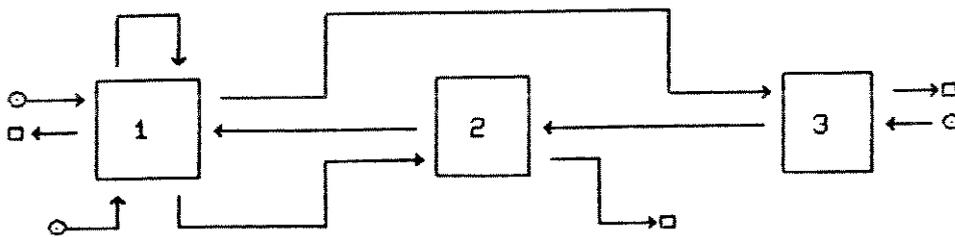


Figura 1.1: Sistema de Manufatura tipo job-shop.

Peças de um determinado tipo entram no sistema em (O) e percorrem uma seqüência de máquinas (rota) pré-estabelecida necessária à manufatura de seu produto correspondente, o qual deixa o sistema em (□). Para cada máquina  $m$  existe um *buffer* de entrada  $B_m$  formado de estoques  $b_{mi}$  referentes a cada tipo de linha de produção  $i$  que deva ser processada na máquina  $m$  [cada linha de produção ( $LP_{mi}$ ) corresponde a uma operação distinta  $i$  realizada em alguma máquina  $m$ ]. Com relação as peças correspondentes a  $LP_{mi}$  considera-se contantes:

- 1-a taxa de entrada no sistema de peças que, mesmo depois de algum processamento anterior, pertençam a  $LP_{mi}$  ( $d_i$ );
- 2-o tempo de processamento para cada peça de  $LP_{mi}$  na máquina

$m(\tau_i)$ ;

3-o tempo de transporte de peças pertencentes a  $LP_{mi}$  da máquina  $m$  para a máquina  $m'$  ( $\sigma_{mim'}$ );

4-o tempo de preparação para troca de operação do tipo  $j$  para o tipo  $i$  ( $\delta_{ji}$ ).

Focalizando a atenção numa máquina  $m$  particular conclui-se que seu funcionamento deve ser controlado por uma estratégia que determine, para cada tipo de  $LP_{mi}$ , o instante de início e fim de seu processamento. Ao final deste intervalo várias peças do tipo  $i$  foram processadas e um novo tipo de peças  $j$  é escolhido por esta estratégia para dar continuidade à produção. Neste caso é interessante observar que o dinamismo da entrada de peças no sistema possibilita que os níveis de seus estoques atinjam valores ilimitados dependendo da estratégia utilizada. Assim, o presente trabalho propõe uma estratégia que garanta que o sistema permaneça estável, ou seja, que os níveis de seus estoques nunca ultrapassem certos valores limites. Seu desempenho é comparado com os de estratégias já propostas em recentes trabalhos (Perkins e Kumar [18]) tomando-se como parâmetros tanto os valores de pico nos diversos tipos de estoques do sistema quanto a média de trabalho acumulado em estoque.

São várias as questões relacionadas à Programação da Produção diferentes da formulada acima. Para uma introdução ao estudo do problema sugere-se: Baker [3] e French [1]; onde são discutidos, com maior ênfase, problemas num enfoque mais tradicional. Um panorama recente da Programação da Produção teórica e prática pode ser encontrado em Rodammer e White [5]. A aplicação da Inteligência Artificial em Programação da Produção é tratada em Phelps [7] e Grant [8]. Os trabalhos de Shaw [11] e de Kusiak [22] também são exemplos de abordagens segundo este contexto.

Diversas outras abordagens tem surgido para equacionar o problema da PP segundo cada uma de suas inúmeras facetas, tais como: teoria do fractal [17], sequenciamento "oportunistico" [16] e álgebra min-max [21].

Trabalhos que abordam o problema de estabilidade de sistemas no contexto de limitações de estoques com aplicação de teoria estocástica podem ser encontrados em Buyukkoc [15] e Choong e

Maimon [20]. Nesta mesma perspectiva, porém baseado em características determinísticas do modelo, pode-se encontrar resultados em Perkins e Kumar [18] e Kumar e Seidman [19].

O capítulo seguinte classifica os diversos tipos de sistemas de manufatura caracterizando o contexto do trabalho. O capítulo 3 ilustra alguns aspectos sobre o sistema de manufatura, discorre a respeito do problema da programação da produção classificando-o e apresentando as principais abordagens; em seu último item trata especificamente da programação da produção em tempo real. O capítulo 4 propõe uma nova estratégia de controle para o modelo de sistema de manufatura flexível. A discussão à respeito da comparação de desempenhos entre esta e outras estratégias configuram o capítulo seguinte. O capítulo 6 trata dos comentários finais.

2-Aspectos Gerais dos Sistemas de Manufatura

## 2-Aspectos Gerais dos Sistemas de Manufatura.

Os sistemas de manufatura são assunto de extensa bibliografia [12], [13], [14], [23] e [24]. Portanto, apenas para situar onde os resultados do presente trabalho se aplicam, alguns comentários breves a este respeito se fazem necessários.

É importante observar que os SM formam uma classe de sistemas de produção. Considerando-se um contexto industrial existe ainda os sistemas de processos nos quais, diferentemente dos SM cuja produção pode ser enumerada, não se pode identificar um produto isolado. São exemplos para tais sistemas as refinarias de petróleo e indústrias químicas. Um bom exemplo para SM pode ser as montadoras de automóveis.

Pode-se dizer que um sistema de manufatura compõe-se de fontes de trabalho (máquinas, ferramentas, etc.) e de outros dispositivos convenientemente dispostos que caracterizam a estrutura do sistema de produção. Toda esta estrutura é apoiada pela informação da produção, a saber: métodos e tecnologia. Em posse de tal estrutura o SM converte matérias-primas em produtos finais. Todo este sistema opera segundo procedimentos estabelecidos por algum gerenciamento próprio que se pode definir, brevemente, pela tentativa de alcançar seus objetivos através da integração de mão-de-obra, máquinas, materiais e capital.

O SM caracteriza-se por apresentar uma grande discretização em suas atividades e, ao contrário do que pode ter deixado transparecer na definição anterior, trata-se de um ambiente muito dinâmico. São diversas as operações que realizam-se durante todo o tempo. Cortes, desbastes, furos, soldas, montagens e dobramentos podem ser exemplos de algumas delas. O transporte de peças (produtos semi-acabados) e ferramentas junto ao deslocamento de homens também conferem ao ambiente de chão-de-fábrica uma intensa movimentação.

### 2.1-Classificação dos Sistemas de Manufatura.

Um primeiro parâmetro para classificação trata das fontes de

encomendas. As encomendas requisitadas ao SM geralmente podem ser oriundas ou dos próprios clientes ou serem determinadas a partir do estado dos estoques. Desta forma, no primeiro caso diz-se que a produção é baseada em pedidos e no segundo em reposição de estoques.

Também pode-se diferenciar as manufaturas segundo seu volume de produção. Para um grande volume a manufatura é denominada de produção contínua. Para um pequeno volume classifica-a como sendo de produção por tarefa e, num caso intermediário, tem-se a produção intermitente ou por lotes [13].

Alguns SM estão associados às seguintes características:

- 1-variedade de produtos distintos;
- 2-variedade de processos de produção;
- 3-complexidade de determinação da capacidade produtiva;
- 4-instabilidade das condições de mercado;
- 5-dificuldade no planejamento e na programação da produção;
- 6-e dinamismo no ambiente fabril.

É comum empregar-se o termo *job-shop* para se referir a classe de tais sistemas. Ainda neste caso se os componentes cursam uma rota comum os SM são denominados *flow-shop* e num caso intermediário, considerando este particular, *flow-shop* flexível.

Alguns tipos de diretrizes de produção (conjunto de procedimentos que visam, entre outras coisas, aumentar a produtividade) são empregados no SM tipo *job-shop*: engenharia industrial, tecnologia de grupo, orientação por partes são alguns exemplos. Um outro tipo de interesse é denominado manufatura flexível. Seu objetivo é casar os níveis de eficiência e utilização encontrados nas manufaturas de massa com as características avessas de uma manufatura tipo *job-shop* [2]. A flexibilidade da manufatura torna-se maior se mais alternativas de produção ela pode proporcionar diante das necessidades impostas pelas demandas do mercado. Assim, o emprego de máquinas com múltiplas funções, ou de máquinas extras constituem, entre outras, algumas idéias neste sentido. Chega-se mais próximo daquele objetivo se a automação entra em jogo. Atualmente pode-se dispor de máquinas que são programadas e controladas diretamente por computador (CNC) [12] e [13]. Várias delas trabalhando

em conjunto e servidas por sistemas automatizados de transporte de peças e ferramentas podem ser operadas de forma integrada. Tais ambientes automatizados são conhecidos por Sistemas de Manufatura Flexível (FMS) [14].

Além de todas as considerações estritamente relacionadas à produção de um SM, que lhe conferem por si só um alto grau de complexidade, é bom elucidar que um ambiente industrial está sujeito a diversas perturbações. Para citar algumas, são exemplos: falta de energia, atraso de encomendas, paralização de alguns setores da sociedade (fatores externos), falha das máquinas, ausência de mão-de-obra, acidentes diversos (fatores internos). Para que este sistema trabalhe em condições adequadas atendendo a certos requisitos de desempenho, deve-se admitir que o gerenciamento possui um elevado grau de responsabilidade. Desde que são diversos os tipos de produção e as diretrizes que podem ser aplicadas, é de se esperar diversas abordagens possíveis para gerenciar um determinado SM.

O assunto do capítulo seguinte trata do gerenciamento a nível de chão-de-fábrica denominado Programação da Produção.

### 3-A Programação da Produção

### 3-A Programação da Produção.

#### 3.1-Introdução.

Apesar de toda a complexidade que envolve o gerenciamento da produção ele deve ser tal que o sistema onde atua possa ser observado como se fosse uma caixa-preta. Dessa forma a partir de entradas (materiais, especificação de encomendas, prazos, etc.) obtém-se as saídas correspondentes (produtos, lucros, custos, etc.) da forma mais determinística possível. Portanto as perturbações e dificuldades de toda ordem seriam "absorvidas" por um competente e complexo sistema gerencial.

Para alcançar este objetivo o gerenciamento consiste de inúmeros procedimentos que de alguma forma devem estar integrados. Entre outros pode-se citar: estabelecimento dos objetivos, planejamento, organização, integração, coordenação, alocação de pessoal, direção, supervisão, motivação e controle. Nota-se que nem todos eles são aplicáveis igualmente em todos os níveis da produção; cabendo alguns somente em alguns níveis e outros em mais de um. Portanto, dois tipos de classes podem ser estabelecidas para organizar todos os procedimentos que envolvem a produção: planejamento estratégico da produção e gerenciamento operacional. O primeiro compreende os procedimentos envolvidos nas decisões estratégicas necessárias para o relacionamento entre o sistema e o ambiente externo; está mais ligado à previsão, ou seja, seus procedimentos decidem pelo futuro da produção. Já o segundo lida com a produção propriamente dita, ou seja, com decisões que digam respeito à operacionalidade da produção, influenciando os acontecimentos que se cumprirão num menor prazo de tempo. Estas duas classes principais, por sua vez, compreendem outros estágios e particularmente a segunda abrange o estágio da programação da produção, ligada a este trabalho.

Devido às suas peculiaridades, o gerenciamento da programação da produção depende das atuações de outros estágios do gerenciamento sobre questões a nível de planejamento e mesmo a nível operacional. A nível de planejamento as especificações das tarefas

tais como: quantidade, produtividade, nível de qualidade, etc., assim como a disponibilidade de recursos são claramente discriminados e descritos. A nível operacional estabelece-se (excluindo, aqui, a função da programação da produção) de qual forma o produto final será obtido, ou seja, todas as sequências de operações, restrições técnicas, possibilidade de recursos, etc. se tornarão conhecidos. Frequentemente, muitas outras questões em ambos os níveis devem ser consideradas e solucionadas antes que a programação da produção possa exercer sua função. Sua incumbência é alocar tarefas aos seus devidos recursos, ambos sujeitos a restrições, visando algum objetivo previamente estabelecido que avalie o resultado desta ordenação [3].

Portanto, diante de diversas tarefas de diferentes tipos e de múltiplos recursos distintos ou não que viabilizem seus processamentos; como sequenciar tais tarefas e distribuí-las aos recursos, satisfazendo algum critério de avaliação do melhor modo possível? A resposta cabe à programação da produção.

Mesmo restringindo-se à indústria as diferentes características impostas por cada tipo de produção leva os programadores a terem uma opinião comum: cada um dos seus respectivos problemas não só é único, mas também é suficientemente diferente dos outros requerendo uma solução específica [5]. Portanto, assim como no capítulo anterior, sugere-se uma classificação dos casos mais comuns visando um melhor esclarecimento do problema.

### 3.2-Classificação da Programação da Produção.

Devido aos incontáveis exemplos de tipos de programação da produção distintos entre si, tal classificação tornou-se uma tarefa difícil. A seguir são apresentadas três dimensões com as quais pretende-se abranger o maior número possível de classes de problemas. Estas dimensões são:

- fonte de encomendas;
- complexidade do processamento;
- critério de avaliação.

A primeira dimensão, fonte de encomendas, é a mais geral. Caso as encomendas (pedidos) tenham sido feitas pelos próprios clientes tem-se o tipo aberto. Por outro lado, se os pedidos originaram-se a partir de decisões ligadas à reposição de estoque, então a programação da produção é do tipo fechado. Muitas são as diferenças encontradas nos problemas de programação dependendo em qual classe forem melhor enquadrados (problemas puramente do tipo aberto ou fechado são raros; existindo na verdade, um comportamento mais próximo a um destes). No caso aberto o problema trata com o sequenciamento de tarefas nos possíveis recursos. Já para o fechado a programação da produção, além destas questões, tem que determinar o tamanho do lote, ou seja, estabelecer quantidade de produtos de cada tipo a serem fabricados junto ao processo de reposição de estoque [4].

A complexidade do processamento está vinculada ao número de operações associadas a cada tarefa ou item. Assim, é de uso comum esta dimensão ser subdividida em [4]:

- operação única, máquina única;
- operação única, múltiplas máquinas;
- múltiplas operações, *flow-shop*;
- múltiplas operações, *job-shop*.

A dificuldade do problema também pode ser revelada pelo número de possibilidades que permitam a realização da tarefa. Estas opções podem ser frutos do número de recursos capacitados para uma mesma operação, de restrições rígidas no uso dos recursos que diminuam tais opções [energia insuficiente, restrições técnicas das máquinas (temperatura, desgaste, etc.), número de operários insuficiente, etc.], etc..

O critério de avaliação indica sob qual aspecto a programação da produção está sendo considerada com respeito aos seus resultados. Pode-se dizer que as duas classes de critérios são: custo e desempenho. Quando baseado no critério de custos, considera-se os custos associados com: tempos de preparação das máquinas, manutenção de estoques, avanço nos prazos, falta de estoques, implementação da própria programação, assim como sua geração e monitoração. O desempenho da programação, por outro lado, pode ser avaliada de

diversos modos. Para um determinado conjunto de tarefas pode-se medir a média ou o máximo tempo para que todas tenham sido executadas, ou o número destas que porventura avancem o prazo, ou a diferença (positiva) entre o prazo e a data real de seu término (também conhecido como *tardines*). Estes são apenas algumas das inúmeras e complexas e as vezes conflitantes medidas de desempenho (Mellor [25] cita 27 objetivos distintos para tal avaliação).

Ambiente da programação e natureza das especificações também serão considerados como dimensões muito embora sejam mais aplicadas na identificação do modelo a ser utilizado em algum estudo teórico do que na caracterização do problema real.

Ambiente de programação considera o dinamismo relativo às encomendas. Caso a programação seja estabelecida sobre um conjunto fixo de tarefas, esta é considerada estática. Por outro lado, caso o sistema esteja sujeito a novos pedidos por parte dos fregueses, ou seja, novas tarefas surjam a medida que a produção se realiza, tem-se o tipo dinâmico.

A natureza das especificações considera a forma pela qual pode ser representada as especificações do problema. Se as especificações são do tipo aleatórias tem-se o modelo estocástico, caso contrário o problema é considerado determinístico.

Outros aspectos tem se tornado particularmente importantes quando se modela o problema da programação. Um deles refere-se à escala de tempo na tomada de decisões, permitindo classificar a programação da produção como em tempo real ou não [1].

Estas classificações, apresentadas aqui, longe de serem rígidas, devem ser encaradas mais como um auxílio no estudo deste problema. Assim, as definições colocam casos extremos nos quais poucas situações possam se encaixar perfeitamente. Contudo cada situação apresentará algumas características marcantes que proporcionarão uma razoável noção de sua posição relativa dentro de seu conjunto universo.

### 3.3-A Prática.

A prática industrial mostra que a programação da produção

muito se fundamenta em intuição e experiência adquirida ao longo dos anos. Porém, diversas empresas já se utilizam de algum método que incorporado, ou junto a ferramentas computacionais e base de dados, auxilia no trabalho dos programadores. Dentre os métodos mais recentes utilizados para a programação da produção destacam-se: MRP (Manufacturing Resource Planning), JIT (Just-In-Time Production) e OPT (Optimized Production Timetables) [5].

MRP e OPT (hoje já disponíveis comercialmente na forma de pacotes de *software*) são metodologias, que a partir dos prazos de entrega das encomendas e das características específicas para sua produção, fornecem dados para a programação. Para tal, considera-se a produção pronta nos prazos de entrega e seguindo o caminho inverso da produção primeiro se calculam as datas de início das operações imediatamente anteriores à conclusão das encomendas e assim sucessivamente até que os procedimentos iniciais também sejam obtidos.

A produção baseada em JIT, na verdade, não implica numa programação, mas sim numa pura filosofia de produção, cuja idéia principal é reduzir o acúmulo nos estoques. A produção baseada em JIT se beneficia de duas grandes vantagens: melhora do fluxo e do controle da produção, esta última no que concerne à detecção de problemas. Muito embora tenha surgido a partir da experiência adquirida na própria manufatura, já existem estudos que permitem analisar sua aplicação em sistemas com diferentes características [22].

Estes três métodos empregados na indústria consideram ambientes estáticos e determinísticos. Além disso, também não garantem a factibilidade de suas soluções. Portanto, em seguida os programadores devem ajustá-las, adequando-as à situação real.

A partir deste cenário, logo conclui-se que a teoria não tem conseguido amparar de forma satisfatória as reais e novas necessidades que surgem. Em seguida são apresentadas algumas abordagens consideradas na área da programação da produção.

### 3.4-A Teoria.

Muito embora este trabalho se concentre na aplicação da pro-

gramação da produção nos SM, a pesquisa já avança nas mais diversas áreas. Porém, o problema é tradicionalmente estudado a partir de um modelo mais ou menos padrão. Ele é construído segundo algumas hipóteses comentadas a seguir. A linguagem utilizada refere-se ao ambiente industrial, mas nada impede uma fácil transformação. Um pouco de observação será o suficiente para perceber características mais sutis do problema e para notar o quão distante o modelo para um SM coloca-se da situação real [1].

1-Cada tarefa é considerada uma entidade. Nenhuma dentre as operações que a compõem pode ser realizada simultaneamente a outra, além de que a sequência de operações é fixa. Portanto, a execução da tarefa não pode ser tratada segundo alternativas que porventura existam.

2-Não é permitida interrupção de tarefas. Embora tal hipótese seja comumente abandonada na área computacional, pode ser que haja ou que venham a surgir casos, no âmbito de um FMS, para os quais também deva ser relaxada.

3-O número de operações que compõem cada tarefa é igual ao número de máquinas e cada uma delas é realizada em uma máquina diferente. Particularmente esta hipótese é muito forte para ser aceita num FMS.

4-As tarefas não são canceladas.

5-As características de cada tarefa são independentes da programação. Esta consideração restringe, por exemplo, casos em que tempos de processamento, ou de preparação podem estar sujeitos a variações decorrentes das operações predecessoras ou sucessoras.

6-Estoques intermediários são permitidos. Há diversos problemas em que produtos em fase de processamento não permitem discretização do processo, ou seja, sua produção deve ser contínua. Para um FMS esta restrição pouco importa na maioria dos casos. Porém vale lembrar que existem situações em que tais estoques intermediários possuem limitações com relação à sua capacidade.

7-Cada máquina é única. Também foge à realidade de um FMS tal restrição. Frequentemente encontra-se no ambiente fabril duplicação de máquinas.

8-Máquinas podem permanecer ociosas. Há casos, certamente raros, em que tal hipótese deve ser abandonada. No meio siderúrgico, o alto forno é uma possível situação, pois a continuidade de seu funcionamento é uma das preocupações básicas.

9-Não há impedimento de disponibilidade das máquinas. Aqui deixam de ser considerados defeitos, manutenção, ou outro tipo de restrição tais como: insuficiência de energia, falta de mão-de-obra, etc..

Ainda que existam ambientes industriais que possam ser tratados segundo modelos tão restritos, seu número tende a diminuir a cada dia devido ao fato do aumento da flexibilidade necessária a este ambiente. Assim várias dessas hipóteses estão muito fora da realidade de um FMS, outras ainda podem ser toleradas, mas fatalmente deverão ser abandonadas com o passar do tempo. Além disso não são somente suas restrições que distanciam estes modelos da realidade. Os frequentes avanços tecnológicos proporcionam novas alternativas para a programação da produção e auxiliam em sua determinação. Por outro lado, as exigências com respeito ao desempenho são maiores, exigindo um estudo mais apurado do problema.

Usualmente, a busca de soluções provém do estudo baseado na pesquisa operacional. A pesquisa operacional trata o problema cientificamente, ou seja, a partir de modelos matemáticos que tentam descrevê-lo, tornando possível sua análise para posterior obtenção de resultados. As abordagens segundo esta diretriz são várias [8]. Algumas serão citadas a seguir.

1-As soluções provenientes de um processo de enumeração de possibilidades (mesmo implicitamente) em busca da melhor alternativa são formalmente estudadas em abundância. Tipicamente são empregados para suas resoluções os métodos: *branch and bound* e programação dinâmica. A grande dificuldade que surge no momento de suas aplicações é devida à explosão combinatorial. Mesmo com o

emprego de regras heurísticas, ou com o abandono da otimalidade da solução (idéias lançadas com o objetivo de fugir deste empecilho) os resultados ainda permanecem muito aquém dos desejados, devido a particularidades dos modelos ou mesmo do custo computacional.

2-A maioria dos sistemas de manufatura são muito complexos, impossibilitando uma avaliação analítica do problema. As técnicas e ferramentas disponíveis para a aplicação da simulação entram em cena nestes casos. A simulação permite observações até certo ponto claras a respeito da dinâmica do sistema, proporcionando as mais variadas mudanças no modelo na busca de alguma solução satisfatória. Porém, a cada teste necessita-se de interpretações bem apuradas dos dados obtidos demandando um extenso ciclo para respostas. Seus custos são computacionalmente altos e os conhecimentos adquiridos não podem ser generalizados.

3-Por vezes o comportamento do sistema permite classificá-lo como sendo estocástico. A teoria matemática concernente alcança resultados para tais sistemas. Porém, para obtê-los, necessita-se de fortes simplificações. Apesar disso, tal abordagem tem sido muito empregada. A pesquisa atual, mesmo com as dificuldades encontradas, continua sendo intensa junto a problemas que se encaixam em teoria de filas, ou naqueles relacionados a estoques, ou a tamanho de lotes.

Observa-se que a procura por abordagens que tentem satisfazer as necessidades reais da programação da produção é intensa. Um dos diversos pontos em aberto refere-se à questão da reprogramação. Neste caso a dificuldade surge quando o tempo disponível para se estabelecer uma nova programação, motivada por alguma nova ocorrência ignorada quando da primeira vez, é limitado. O tempo também surge como fator importante para a programação em um nível mais próximo às máquinas, onde toma-se uma decisão a respeito da prioridade entre as diversas operações que requisitam um recurso comum simultaneamente.

### 3.5-A Programação da Produção em Tempo-Real.

Apesar da programação ter sido apresentada de forma única é comum distinguir-se dois níveis de atuação quando se focaliza este problema numa indústria de manufatura.

Cabe ao nível superior organizar a produção de modo que as tarefas sejam atendidas pelos recursos (máquinas, ferramentas, mão-de-obra, etc.), distribuindo-as da melhor forma possível a fim de que se cumpram os prazos previstos para suas conclusões, ou que alguma outra medida seja satisfeita. Assim, as rotas, os lotes de produção, as deliberações para o início de sua execução são estabelecidos considerando certo período de tempo, comumente estendendo-se de 1 mês a 1 ano [3]. Este tipo de programação, pode-se dizer, faz um planejamento da programação da produção, pois suas decisões são tomadas a partir de hipóteses a cerca de situações futuras.

Há entretanto uma programação a nível inferior cuja função ocorre em tempo real, ou seja, suas decisões são tomadas diante de fatos presentes e suas características particulares, dentro de um intervalo de tempo que não comprometa ao andamento da produção. Assim, a medida que as tarefas são liberadas para o início de sua execução, acumulam-se solicitações de partes dos diversos produtos para a utilização de um recurso comum. Neste momento a programação deve deliberar sua ordem indicando qual parte deve ser processada, após julgamento das condições reais segundo alguma estratégia ou simples regras de despacho.

#### 3.5.1-A Prática.

As regras de despacho são largamente usadas no ambiente industrial e inúmeras são conhecidas. Em [10] são citadas várias de forma exaustiva. Duas dessas regras são apresentadas a seguir:

- Selecionar a tarefa com o menor tempo de operação na máquina requisitada presentemente.

- Selecionar a tarefa com a menor folga (com relação ao prazo de sua conclusão), mas se isto obrigar uma outra tarefa sair do prazo, então despache esta última.

Geralmente as regras apresentam algum grau de heurística em suas formulações. Entretanto existem aquelas que possuem um caráter totalmente aleatório. Além disso algumas chegam a considerar o dinamismo da produção. Também podem considerar informações locais ou globais.

Devido às características dinâmicas do problema (durante todo o tempo acontece a chegada de novas partes aos estoques intermediários) e à necessidade de decisões em tempo real, seu tratamento analítico torna-se difícil. A maioria dos resultados referidos na literatura provém de estudos baseados em simulações, que procuram estabelecer qual a melhor política segundo um parâmetro pré-estabelecido.

Embora tais regras possam atingir um razoável grau de complexidade seu desempenho está estritamente relacionado à prática de seu uso. A necessidade de simulações para que se obtenha uma certa previsão dos resultados torna-se uma tarefa custosa que incita a busca de novos métodos para aplicação prática.

### 3.5.2-A Teoria.

Um método heurístico pode ser entendido como sendo algum procedimento utilizado em auxílio à resolução de problemas, mas que não pode ser justificado teoricamente [8]. Em outras palavras, são procedimentos que surgem a partir do confronto do homem e seus problemas e cujas manifestações provêm ou da experiência adquirida no assunto, ou por pura e simples intuição. Portanto sua aplicação não depende de desenvolvimento de teoria pertinente, chegando ao ponto de sua utilização por vezes ser justificada subjetivamente. Em [7] cita-se a preferência de seu uso por causa da facilidade de entendimento.

Em face das dificuldades teóricas encontradas pela Pesquisa Operacional (PO) no estudo da programação da produção, esta tem

recorrido cada vez mais à aplicação deste método com o fim de superá-las. O desconhecimento de como tratar o problema analiticamente, ou o alto custo computacional empregado em sua solução, são motivos, dentre outros, que justificam seu uso por parte da PO. Porém, o enfoque da PO não proporciona um aproveitamento total deste método desde que a subjetividade presente nas atividades humanas não é por ela considerada. Já um outro ramo da pesquisa baseia-se exatamente neste ponto para dar cabo dos problemas da programação da produção. Trata-se da Inteligência Artificial (IA) [8].

Programação segundo IA	Programação Convencional
. Basicamente simbólica,	. Geralmente numérica,
. Busca heurística (solução implícita),	. Algoritmo (solução explícita),
. Controle separado do conhecimento,	. Controle e conhecimento integrado,
. Fácil modificação e ampliação,	. Difícil alteração e ampliação,
. Respostas incorretas toleráveis,	. Respostas corretas requeridas,
. Solução sub-ótima,	. Solução ótima,
. Dinâmica.	. Estática.

Figura 3.1: Comparação da IA com a programação convencional.

De uma forma bem simplificada, pode-se dizer que por IA denomina-se todo o ramo da pesquisa que objetiva emular a necessária ação da inteligência humana por alguma forma de inteligência artificial. Assim a presença da IA se faz sentir nos sistemas robotizados, em processamento da linguagem natural, em provas de teoremas, em banco de dados, etc. Sua presença na área de programação da produção se dá através de programas de computador denominados Sistemas Baseados em Conhecimento - SBC - (por exemplo, Sistemas Especialistas) [7]. Para bem ilustrar as marcantes diferenças entre a IA e a Pesquisa Operacional compare-se as características apresentadas na figura 3.1. Talvez a mais contundente característica refere-se às respostas. Enquanto a PO requer respostas corretas a IA chega a tolerar respostas erradas, além de que a IA se satisfaz com soluções sub-ótimas. Este abrandamento das condições por parte da IA torna-a mais capaz de modelar o problema com maior grau de realismo, desde que não preocupa-se em apresentar uma solução analítica, gerando implicitamente sua resposta, sob forte

influência da heurística.

Os SBC constituem-se de três principais componentes: máquina de inferência, base de dados e base de conhecimento. Uma visão dessa estrutura pode ser apreciada na figura 3.2. A base de conhecimento consiste de conhecimento heurístico (e.g. regras práticas, intuição adquirida de algum perito e representada no sistema) ou de fatos conhecidos e aceitos pelos especialistas no assunto. A base de dados armazena os objetivos desejados, o estado do sistema ou outras informações da situação do mundo externo. A máquina de inferência por sua vez é capaz de gerar decisões a partir do conhecimento (base de conhecimento), do estado do sistema e dos objetivos finais (base de dados).

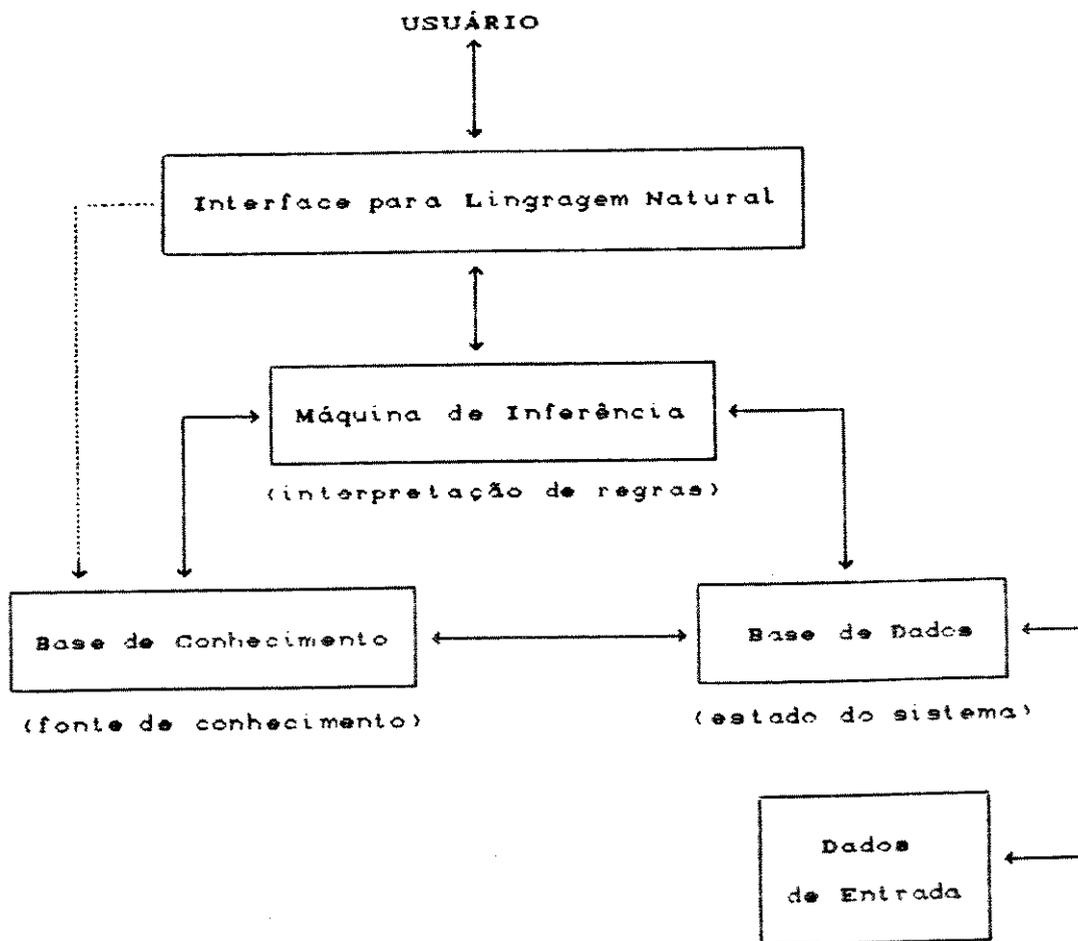


Figura 3.2: Estrutura básica para um sistema especialista.

A aquisição de conhecimento e sua representação constituem-se dificuldades que limitam um melhor aproveitamento de um SBC. Na

maioria das vezes o conhecimento provém exclusivamente de peritos, não permitindo um casamento mais complexo com regras oriundas da teoria. O dinamismo do aprendizado também é pouco considerado, ou seja, não está bem desenvolvido algum método de evolução do conhecimento original. Tais fatos podem ser observados a partir da literatura atual. De qualquer forma utiliza-se SBC inclusive em situações onde o tempo é fator preponderante (Sistemas a tempo real) [8].

Os resultados teóricos presentes na literatura e aqui discutidos de forma bem breve podem ser aplicados, mas usualmente restringem-se a casos bem particulares sem grandes possibilidades de generalização. Os interessados ainda não os vêem como uma boa saída para a solução de seus problemas. Os motivos são vários, podendo-se citar dentre outros: implementação às vezes custosa e/ou lenta, pouca garantia de resultados satisfatórios (a teoria ainda muito recente, simplifica por demais os modelos) e baixa flexibilidade (não suscetível a alterações que acompanhem a evolução tecnológica ou mudanças nas diretrizes de produção, por exemplo).

As necessidades atuais presentes no ambiente industrial cada vez mais urgem por soluções que tratem de problemas em ambientes flexíveis, onde o tempo é um fator decisivo (programação em tempo real) e sujeitos a diversos critérios de desempenho. A PO pouco tem conseguido em matéria de resultados práticos no que diz respeito a tais sistemas, uma vez que a intervenção do perito sempre acontece. Mas, se por um lado a PO tem encontrado uma grande dificuldade na resolução destes problemas, a IA vem a cada dia mostrando novas perspectivas neste sentido.

Este desempenho da IA é plausível devido, entre outros motivos, ao abandono do tratamento matemático e da busca de resultados otimizados. Entretanto, vale comentar que se a IA utilizar-se somente de métodos heurísticos, devido à própria natureza deste enfoque estará desconsiderando o grande auxílio que a teoria tradicional pode fornecer e que, indubitavelmente, proporcionou o atual estágio do desenvolvimento. Desta forma os resultados da IA tornar-se-ão realmente brilhantes quando em conjunto com a PO. E não parece que o caminho possa ser diferente, desde que na área de programação da produção a tendência atual da

pesquisa é tentar considerar ambos os pontos de vista: Pesquisa Operacional e Inteligência Artificial [9]. Inclusive pode-se observar (figura 3.1) que em alguns aspectos há um complemento destes pontos de vista, apontando este rumo como sendo de grande perspectiva para uma melhor desenvoltura da pesquisa.

Deixando o raciocínio por algum momento um pouco mais livre, talvez se possa imaginar que o desenvolvimento da ciência esteja retornando a um ciclo já transposto, mas segundo um outro panorama. No princípio, o homem solucionava os problemas que o afligiam acreditando em sua intuição e prática, porém com o passar do tempo descobriu que o desenvolvimento de uma teoria poderia ser utilizada em seu auxílio. Assim pode-se enxergar a evolução da pesquisa atual na área da programação da produção. Principiando com a idéia do uso exclusivo da heurística em busca de seus resultados, a IA aos poucos irá absorvendo e aproveitando resultados da PO. Talvez para isso a teoria tenha que se ajustar às novas condições que a IA determina, talvez não. Porém tudo leva a crer que tal cooperação será um fato.

Conseqüentemente, resultados teóricos a partir da PO ainda devem ser pesquisados, mesmo que particulares, ou mesmo sujeitos a simplificações. Todos estes resultados, provavelmente ainda serão usados pela IA, que por meio dos SBC serão considerados junto aos conhecimentos heurísticos em busca de aplicações reais.

O próximo capítulo discorre a respeito de um resultado segundo a abordagem da PO, para aplicação em tempo real e distribuído, que modela um sistema de manufatura flexível cujo problema crítico refere-se a limitação de capacidade de seus estoques.

#### 4-Apresentação da Estratégia

## 4-Apresentação da Estratégia.

### 4.1-Introdução.

Ao final deste capítulo se verificará que a estratégia proposta para um sistema tipo *job-shop* é uma extensão da estratégia aplicada no caso de uma máquina isolada. Portanto, a análise do problema se iniciará a partir deste caso simples.

A estratégia que controla o sequenciamento da produção numa máquina isolada determina o intervalo de processamento referente a cada linha de produção  $i$  ( $LP_i$ ) (para este caso pode-se abolir o índice referente à máquina). Ao final deste intervalo várias peças do tipo  $i$ , ou seja, pertencentes a  $LP_i$ , foram processadas e um novo tipo de peças  $j$  é escolhido por esta estratégia para dar continuidade à produção. Este tipo de controle permitirá que o sistema permaneça estável ou não.

Para se estabelecer o conceito de estabilidade de uma maneira rigorosa algumas considerações são necessárias, além das 4 enumeradas no início do capítulo 2. Para uma máquina  $m$  isolada cujas linhas de produção indexadas por  $1, \dots, P$  possuem uma manufatura simples (sem montagens, desmontagens ou retrabalho), tem-se:

\*  $u_i(t)$  - função que representa o total de peças do tipo  $i$  destinadas à produção, ou seja, que chegam à máquina, no intervalo  $[0, t]$ .

\*  $y_i(t)$  - total de peças do tipo  $i$  produzidas no intervalo  $[0, t]$ .

\*  $x_i(t)$  - total de peças do tipo  $i$  armazenadas no respectivo estoque à espera de processamento no instante  $t$ .

Assim, diz-se que um sistema é estável [18] se e somente se mantém a diferença entre a demanda e a produção limitada por um determinado valor finito, ou seja, se:

$$\sup_t [u_i(t) - y_i(t)] \leq M_i \quad (4.1)$$

onde  $M_i < \infty$ , para todos os tipos de peça  $i=1, \dots, P$ .

Desde que

$$x_i(t) = u_i(t) - y_i(t),$$

a expressão (4.1) pode ser reescrita como:

$$\sup_t x_i(t) \leq M_i, \quad \forall i = 1, \dots, P.$$

Outra questão importante para este estudo trata da condição necessária para a estabilidade de qualquer estratégia. Ela está estabelecida no lema que se segue [18]:

Lema 1: Se a estratégia é estável, e considerando-se que  $\rho_i = \tau_i d_i$ , então:

$$\rho = \sum \rho_i < 1. \quad (4.2)$$

Existe uma classe de estratégias que, somente quando o estoque do tipo de peça em operação torna-se esgotado, permite a preparação da máquina para atender outro tipo de peça. No trabalho de Perkins e Kumar [18] sugere-se classificar tais estratégias como sendo do tipo *clear*.

Sejam então:

- $T_n$  o instante em que a troca de tipo de operação foi determinada pela estratégia e, portanto, iniciou-se a preparação da máquina;
- $p(T_n)$  o tipo de peça escolhida no instante  $T_n$  para ser processada.

Assim, tem-se a expressão (4.3) válida somente no caso da estratégia tipo *clear*, aplicada no caso da máquina isolada. Determina-se esta expressão a partir da intersecção de retas que repre-

sentem o acúmulo de peças no estoque tipo  $p(T_n)$  [ $\xi_{p(T_n)}(t)$ ] e a sua produção [ $\vartheta(t)$ ], para  $t \in [T_n, T_{n+1}]$ .

$$T_{n+1} = T_n + (\delta + x_{p(T_n)}(T_n) \tau_{p(T_n)}) / (1 - \rho_{p(T_n)}). \quad (4.3)$$

$$\xi_{p(T_n)}(t) = x_{p(T_n)}(T_n) + d_{p(T_n)}(t - T_n).$$

$$\vartheta(t) = \begin{cases} 0 & , t < T_n + \delta; \\ \tau_{p(T_n)}^{-1}(t - T_n) - \delta \tau_{p(T_n)}^{-1} & , t > T_n + \delta, \end{cases}$$

A expressão (4.3) determina o instante em que o estoque do tipo  $p(T_n)$  se esgotará. A estratégia indicará um novo tipo de peça a ser processado [ $p(T_{n+1})$ ]. Observe-se que o tempo de preparação aqui considerado não está indexado para simplificação de notação.

Ainda em [18], apresenta-se uma classe de estratégias do tipo *clear* denominada CAF (*clear a fraction*). Segundo esta estratégia o tipo de peça escolhido para processamento deve ser tal que seu estoque correspondente satisfaça a seguinte expressão:

$$x_{p(T_n)}(T_n) \geq \epsilon \sum x_i(T_n), \quad \epsilon > 0.$$

Baseado nestas considerações o item seguinte apresentará uma classe de estratégias denominada Regular.

#### 4.2-Estratégia de Decisão para Máquina Isolada.

Imagine uma estratégia tal que entre duas escolhas de um mesmo tipo de peça  $i$  todos os outros tipos de peças foram processadas uma única vez.

Para formalizar os desenvolvimentos dos resultados que se seguem alguns conceitos serão estabelecidos.

Considere  $\Omega = \{1, \dots, P\}$  um conjunto finito. A partir de seus elementos várias seqüências numéricas, finitas e distintas, podem ser criadas.

Considere a seguinte definição:

•Fracção de Uma Sequência é a seqüência que se forma quando, escolhido algum elemento da seqüência original, todos os que se seguem são cancelados.

A partir dela sugere-se a seguinte classificação para as seqüências numéricas:

•Sequência completa: é aquela tal que todos os elementos de  $\Omega$  surjam pelo menos uma única vez.

•Sequência fechada: é tal que a menor de suas frações que seja completa é idêntica à própria seqüência.

•Sequência mínima: é aquela que é fechada e tal que nenhum elemento se repete.

Note-se que este tipo de seqüência numérica pode ser formada por alguma estratégia estável, caso tome-se a seqüência de índices que ela origina ao escolher o tipo de operação a cada  $T_n$ . Observe-se que para qualquer estratégia estável, a seqüência de índices é formada pela concatenação de seqüências fechadas. Caso contrário algum tipo de peça deixará de ser escolhido e, portanto, o nível de seu estoque se tornará ilimitado.

A partir dessas definições nota-se que a estratégia Regular é formada por uma sucessão de seqüências mínimas iguais. Considere-se ainda que a estratégia regular seja do tipo *clear*.

**Lema 2: Construção da Estratégia Regular:** A concatenação de seqüências mínimas será gerada se para cada instante  $T_n$ ,  $n \geq 2$ , o tipo de peça escolhido satisfizer a:

$$p(T_n) = \arg \max_i \{x_i(T_n)/d_i\}.$$

Demonstração: A prova é imediata caso se considere que a estratégia é do tipo *clear* e a seqüência a ser gerada é mínima. ■

#### 4.2.1-A Estratégia Regular é Estável.

**Teorema 1: Estabilidade da Estratégia Regular:** A estratégia Regular tal como definida anteriormente (estratégia *clear* caracterizada por gerar uma sucessão de sequências mínimas iguais) é estável se o lema 1 for satisfeito.

Demonstração: Para qualquer instante tipo  $T_n$ ,  $n \geq 2$ , a decisão do tipo de peça a ser processada pode ser estabelecida segundo o lema 2, portanto:

$$x_{p(T_n)}(T_n) \geq \frac{d_{p(T_n)}}{P} \sum_i x_i(T_n)/d_i.$$

O segundo membro da expressão anterior pode ser minorado por:

$$\frac{d_{p(T_n)}}{P} \sum_i x_i(T_n)/d_i \geq \frac{\bar{d}}{P\underline{d}} \sum_i x_i(T_n) = \epsilon \sum_i x_i(T_n). \quad (4.4)$$

Em que:  $\underline{d}$  e  $\bar{d}$  são  $\min\{d_i\}$  e  $\max\{d_i\}$ , respectivamente.

Desde que  $\epsilon > 0$  a estratégia pode ser reduzida a uma estratégia do tipo CAF e, portanto, é estável [18]. ■

A figura 4.1 apresenta as posições relativas para algumas classes de estratégias de decisão aplicadas à máquinas isoladas. Para tanto considere os seguintes conjuntos:

- conjunto de todas as estratégias possíveis (E);
- conjunto das estratégias estáveis (EE);
- conjunto das estratégias tipo *clear* (C);
- conjunto das estratégias tipo CAF (CAF);
- conjunto das estratégias Regulares (R).

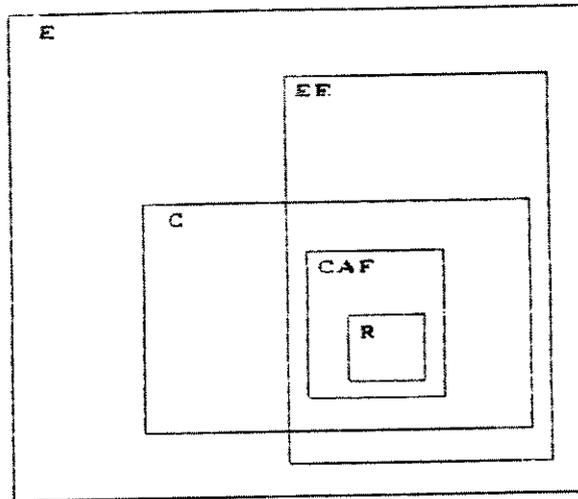


Figura 4.1: Posição relativa para algumas classes de estratégias.

#### 4.2.2- O Comportamento dos Níveis de Estoque Alcança um Estado de Regime.

O comportamento da curva para o nível de estoque de cada tipo de peça atinge um estado de regime se a estratégia Regular é aplicada no caso de uma única máquina. Tal estado de regime é caracterizado por uma curva dente-de-serra cujo valor mínimo é zero (estratégia *clear*) e cujo valor máximo converge para seu respectivo limite calculado no teorema seguinte. Observe-se a figura 4.2.

Nela apresenta-se a dinâmica dos níveis de estoque para os dois primeiros tipos de peças escolhidos para processamento. Considerou-se estoques iniciais nulos para todos os tipos. A escala de tempo foi alterada até que o tempo de preparação devido ao primeiro processamento estivesse terminado; após isso, todos os tempos de preparação foram desprezados no desenho. A letra  $\pi$  indexada refere-se ao intervalo de tempo entre dois instantes consecutivos em que o estoque de um mesmo tipo de peça esgota-se; e  $T$  indexado significa o tempo total de processamento necessário para que se esgote o estoque a cada vez que um determinado tipo de peça é escolhido para operação.

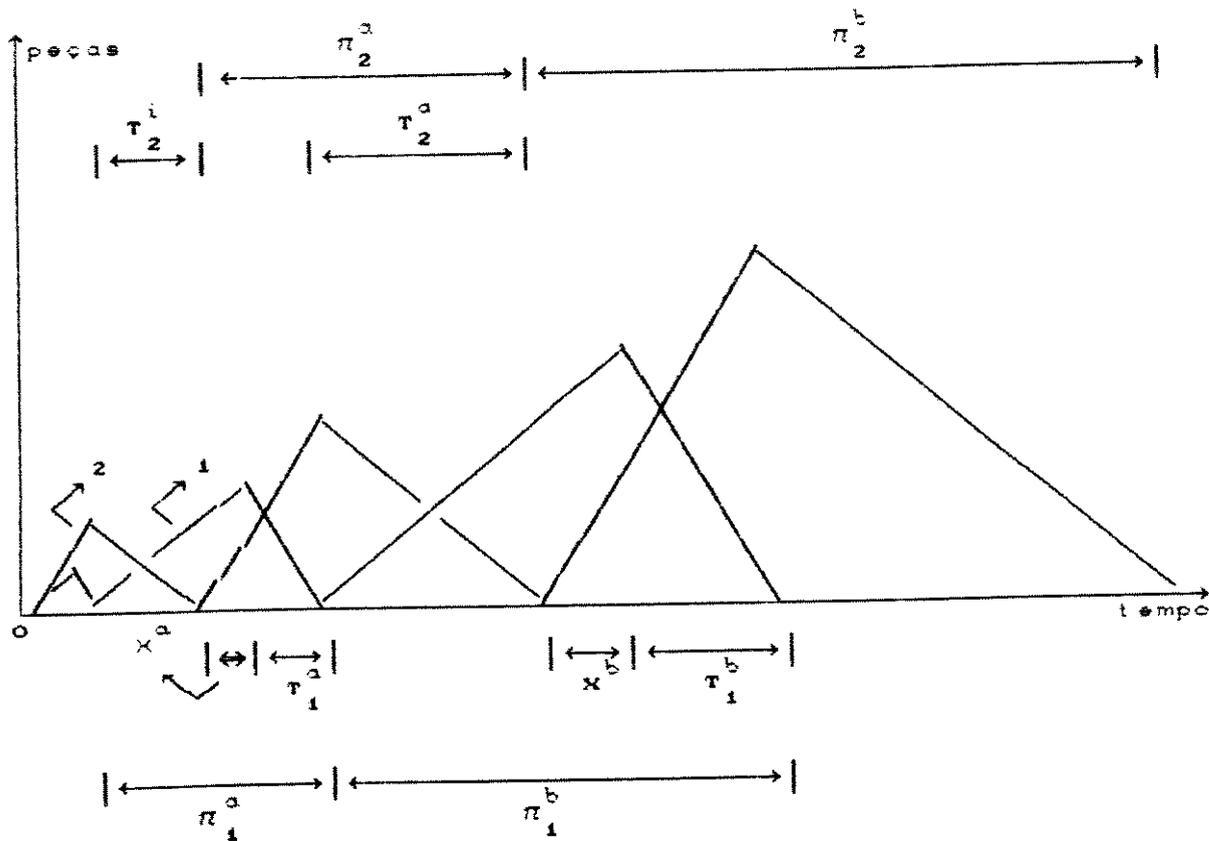


Figura 4.2: Dinâmica do comportamento dos níveis de estoque para tipos 1 e 2.

**Teorema 2: Estado de Regime da Estratégia Regular:** Considere uma máquina isolada tal que satisfaça o lema 1. A estratégia Regular leva o sistema a um estado de regime em que os níveis de estoque comportam-se como uma curva dente-de-serra cujo valor mínimo é zero (estratégia *clear*) e cujo valor máximo converge para o limite calculado no teorema 3.

Este teorema será demonstrado em três partes.

**Parte 1:** Aqui o teorema 2 será desenvolvido considerando-se o caso particular onde todos os estoques estão esgotados no instante inicial.

**Demonstração:** Observe-se a figura 4.2. Seja  $k'$  a razão obtida

entre a altura de cada triângulo e a respectiva base.

Observe que a altura  $h_i$  de cada triângulo correspondente a cada tipo de peça  $i$  pode ser determinada por:

$$h_i = d_i \xi,$$

em que  $\xi$  corresponde à projeção do lado de inclinação positiva do respectivo triângulo.

Desde que as curvas de aumento e redução de estoque possuem inclinação fixa para cada tipo de peça, os triângulos que as formam são semelhantes. Assim, calculando-se o valor de  $\xi$  e valendo-se das propriedades de semelhança de triângulos tem-se

$$\pi_2^a = k(\pi_1^a - \tau_2^i).$$

$$\pi_2^b = k(\pi_1^b - \tau_2^a).$$

Além disso, tem-se que:

$$\pi_1^a = \delta_2 + \tau_2^i + x^a + \tau_1^a.$$

$$\pi_1^b = \delta_2 + \tau_2^a + x^b + \tau_1^b.$$

Portanto, resulta:

$$(\pi_2^b - \pi_2^a) = k[(x^b - x^a) + (\tau_1^b - \tau_1^a)]. \quad (4.5)$$

Desde que a estratégia Regular gera uma concatenação de seqüências mínimas iguais prova-se que:

$$\pi_1^b > \pi_1^a$$

e

$$\tau_1^b > \tau_1^a.$$

Os intervalos de tempo  $x^b$  e  $x^a$  são formados por tempos de

preparação e tempos de processamentos relacionados aos tipos de peças diferentes de 1 e 2 (o valor do tempo de preparação do tipo de peça 1 também deve ser considerado). Da mesma forma, tem-se:

$$x^b > x^a.$$

Portanto, a diferença do primeiro membro da expressão (4.5) é positiva.

Este resultado é interessante no sentido de que um raciocínio análogo pode ser agora repetido para todos os intervalos de tempo do tipo  $\pi$  que se seguem e para qualquer tipo de peça. E dessa forma, desde que as alturas dos triângulos são proporcionais às suas bases, conclui-se que os picos de nível de estoque aumentam indefinidamente. Porém, sabe-se que a estratégia regular é estável. Assim, os picos de estoque possuem um crescimento convergente para seu limite calculado no teorema seguinte. ■

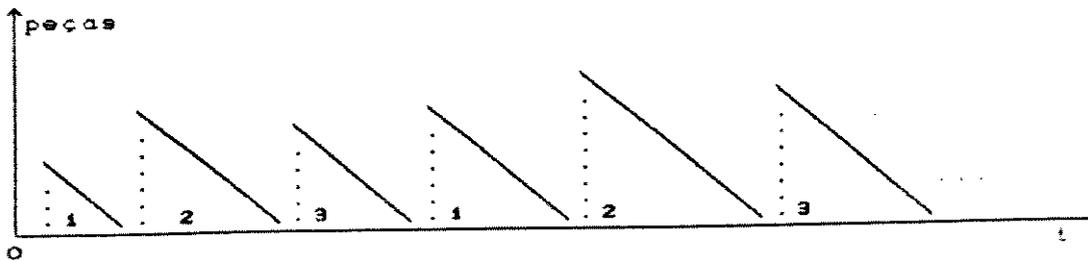


Figura 4.3: Comportamento dos estoques no caso de estoques iniciais nulos.

Pode-se dizer que o comportamento dos estoques para o caso em que estes são inicializados com valor nulo estabelece a dinâmica do sistema. Observe-se a figura 4.3 onde se representa o nível de estoque entre os instantes  $T_n$  e  $T_{n+1}$  (intervalo  $I_n$ ), se considera-se uma máquina com três tipos de peça e sob controle da estratégia Regular. Cada triângulo está indexado de acordo com o tipo de peça correspondente e separados dos demais devido aos tempos de preparação. Desde que o tempo de processamento entre os instantes  $T_{n+1}$  e  $T_n$  é proporcional ao nível de estoque em  $(T_n + \delta)$ , a base do primeiro triângulo é determinada pelas peças acumuladas apenas durante o respectivo tempo de preparação. Para a segunda escolha

as peças acumuladas em seu estoque até  $(T_1 + \delta)$  são devidas ao tempo de preparação mais o intervalo  $I_0$ . Sua base é proporcional a este valor. Um raciocínio análogo pode ser repetido para toda a sequência que se segue. Esta idéia é importante na demonstração da última parte deste teorema.

Antes de se iniciar a segunda parte do teorema considere que no instante  $T_0$  apenas o estoque do primeiro tipo de peça a ser escolhido é igual a  $\chi \neq 0$ . Pode-se considerar que o tempo de processamento para o intervalo  $I_0$  equivale ao tempo tal qual no caso anterior (estoques iniciais nulos) mais um tempo proporcional ao valor do estoque inicial  $\chi$ . Da mesma forma, o segundo intervalo  $I_1$  equivale a um tempo devido a dinâmica do sistema (como estabelecido na figura 4.3) mais um tempo proporcional ao estoque acumulado durante o processamento correspondente a  $\chi$ . Repetindo este raciocínio para a sequência que se segue chega-se a conclusão: o comportamento do sistema quando  $x_1(0) = \chi$  é equivalente ao comportamento dinâmico do sistema mais uma perturbação devida ao estoque inicial. Observe-se a figura 4.4 onde a área hachurada é devida à perturbação do estoque inicial não nulo.

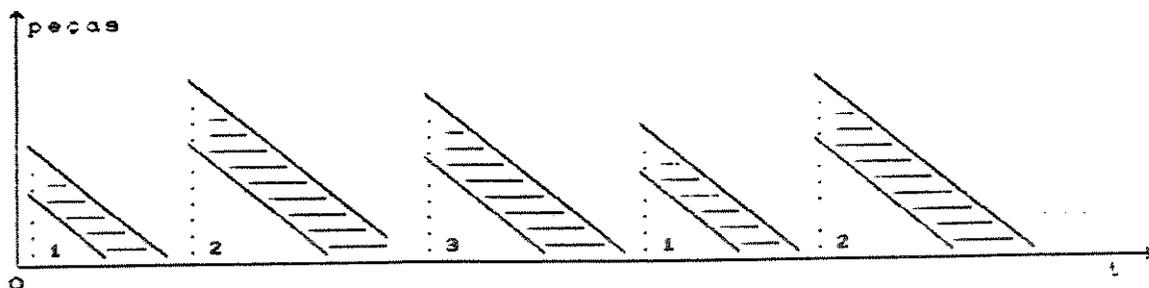


Figura 4.4: Comportamento dos estoques para o caso de estoque inicial não nulo.

A figura 4.5, construída a partir da figura 4.4 por deslocamento de triângulos, apresenta uma visão alternativa do comportamento dos estoques. Nela, para cada intervalo  $I_n$  dois triângulos são desenhados: o primeiro relativo ao comportamento dinâmico do sistema e o segundo, hachurado, relativo à perturbação causada pelo estoque inicial  $\chi$ .

A figura 4.5 ressalta a idéia de que o comportamento do sistema no caso de estoque inicial não nulo pode ser visto como o comportamento no caso de estoques nulos mais uma perturbação cau-

sada pela introdução de peças no instante inicial. Conclui-se, portanto, que o estudo para este caso pode ser desdobrado em dois problemas menores: um relativo a dinâmica do sistema (caso dos estoques iniciais nulos), já estudado, e outro devido a introdução do estoque inicial não nulo.

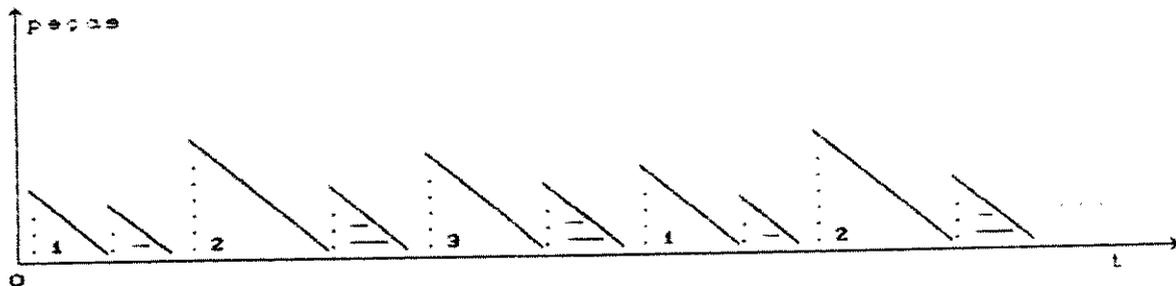


Figura 4.5: Representação alternativa do comportamento dos estoques para o caso de estoque inicial não nulo.

Com relação a este segundo problema note-se que os triângulos correspondentes a cada intervalo  $I_n$  estão justapostos. Assim, ao dissociarmos as duas sequências de triângulos, aquela formada pela perturbação será tal como mostra a figura 4.6 onde não existe separação entre eles. A altura do primeiro triângulo é igual ao valor do estoque inicial. Note-se, ainda, que este comportamento equivale ao caso de um sistema análogo onde não existem tempos de preparação.

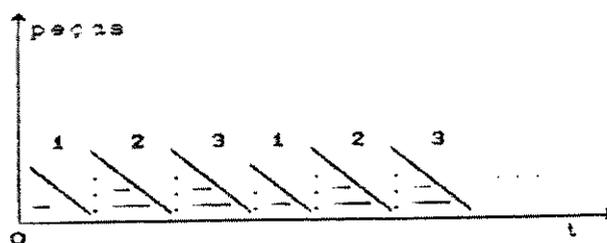


Figura 4.6: Comportamento dos estoques num sistema onde não existe tempos de preparação ( $\tau_1(C) = \lambda$ ).

Parte 2: Considere uma máquina isolada que satisfaça o lema 1 e tal que não exista tempo de preparação. Considere que pelo menos um tipo de peça possui estoque inicial não nulo. Considere, ainda, que seja aplicada a estratégia Regular. Então, após um tempo  $t < \infty$  o valor de todos os estoques será zero.

Demonstração: Considerando-se a sequência completa formada pela estratégia a partir do instante inicial, tome-se a última sequência fechada formada, iniciada em  $T_c$  e finalizada em  $T_f$ . O número de peças que chegaram ao sistema até o instante  $T_c$  foram processadas até o instante  $T_f$ . O tempo total de processamento destas peças  $T_{op}$  é dado por:

$$T_{op} = \sum \tau_i (d_i T_c) = T_c (\sum \tau_i d_i) = \rho T_c.$$

Desde que a estratégia Regular é estável e caso se suponha que algum estoque não se esgota tem-se:

$$0 < T_f - T_c < \Phi < \infty.$$

Considere que o tempo de processamento relativo às peças nos estoques iniciais seja  $T_e$ . Assim:

$$\rho T_c + \Phi + T_e > T_f.$$

$$\rho T_c + \Phi + T_e > T_c.$$

$$(\rho - 1)T_c > -T_e - \Phi.$$

A última expressão é uma contradição em face do lema 1. Portanto os estoques se esgotam em algum tempo menor que infinito. ■

Observe-se que a demonstração anterior vale para qualquer estratégia estável.

Parte 3: Considere que os estoques iniciais possam ser não nulos para um sistema controlado pela estratégia Regular e que satisfaça o lema 1. Seu estado de regime será determinado pelo seu comportamento dinâmico.

Demonstração: Devido às características lineares do modelo a análise feita a partir das figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 pode ser repetida para este caso geral. Assim, o comportamento dos níveis

de estoque pode ser analisado segundo dois problemas menores estudados na parte 1 e 2 anteriores. Desde que a perturbação causada pelos estoques iniciais desaparece após um período de tempo finito (parte 2), o comportamento do sistema torna-se tal qual no caso em que seus estoques iniciais são nulos (parte 1). ■

O resultado deste teorema pode ser observado sob uma outra perspectiva. Considere que o sistema esteja sujeito a alguma perturbação após algum instante  $t > 0$ . O instante  $t'$ ,  $t < t'$ , em que a perturbação cessa pode ser considerado o novo instante inicial para o sistema tomando-se os níveis de estoque  $x_i(t')$  como seus valores iniciais. O teorema anterior garante que a perturbação será compensada e o sistema retornará ao seu comportamento dinâmico.

#### 4.2.3- Cálculo dos Limites para os Níveis de Estoque.

O resultado do teorema anterior afirma que o sistema alcança um estado de regime caso a estratégia Regular seja aplicada. O teorema 3 permitirá o cálculo dos valores limites para os níveis de estoque após o sistema ter alcançado este estado.

**Teorema 3: Valor Máximo para o Nível de Estoque:** Considere uma máquina isolada operando segundo estratégia Regular e que satisfaça o lema 1. O limite ( $L_i$ ) para o qual convergirá o valor máximo de estoque do tipo  $i$  é dado por:

$$L_i = \frac{\Delta}{(1-\rho)} d_i (1-\rho_i),$$

em que  $\Delta$  é a soma de todos os tempos de preparação necessários para que se complete a sequência mínima estabelecida pela estratégia.

**Demonstração:** Considere que o sistema esteja operando em situação limite, ou seja, em  $t = \infty$ . Desde que o pico do nível de estoque ( $L_i$ ) que acontece após o tempo de preparação é fixo, pode-

se reescrever a expressão (4.3) da seguinte forma:

$$I = T_{n+1} - T_n = \delta + (L_{P(T_n)} \tau_{P(T_n)}) / (1 - \rho_{P(T_n)}).$$

Observe-se que este intervalo  $I$  de processamento torna-se característico para cada tipo de peça, conseqüentemente tem-se:

$$I_i = \delta + (L_i \tau_i) / (1 - \rho_i). \quad (4.6)$$

Portanto o período ( $\pi$ ) necessário para que a seqüência se repita será dado por:

$$\pi = \sum_i I_i. \quad (4.7)$$

Desde que a estratégia é do tipo *clear*, tem-se:

$$L_i = d_i \xi,$$

em que  $\xi$  é o intervalo de tempo durante o qual a máquina não processou peças do tipo  $i$ . Assim:

$$L_i = d_i \left[ \pi - \tau_i L_i / (1 - \rho_i) \right] \text{ ou,}$$

$$L_i = d_i \pi (1 - \rho_i). \quad (4.8)$$

Substituindo  $\pi$  pela sua expressão (4.7), em (4.8), vem:

$$L_i / d_i (1 - \rho_i) = \sum_j \tau_j L_j / (1 - \rho_j) + \Delta. \quad (4.9)$$

Desde que o segundo termo da expressão (4.9) é constante, subtraindo-se entre si estas equações escritas para cada tipo de peça, resulta a seguinte identidade:

$$L_k = \frac{d_k(1-\rho_k)}{d_i(1-\rho_i)} L_i, \quad \forall i, k \in \{1, \dots, P\}.$$

Substituindo-se em (4.9), vem:

$$(1-\sum \rho_i)L_i = \Delta d_i(1-\rho_i), \text{ ou}$$

$$L_i = \frac{\Delta}{(1-\rho)} d_i(1-\rho_i). \quad (4.10) \blacksquare$$

Para que se obtenha a partir desta estratégia os menores picos de estoque basta encontrar o valor mínimo para  $\Delta$ . Caso os tempos de preparação dependam unicamente do tipo de peça escolhido, então o valor de  $\Delta$  é fixo para qualquer sequência mínima.

#### 4.2.4- A Estratégia Regular Proporciona Picos de Nível de Estoque Eficientes.

O teorema anterior confere à estratégia Regular a qualidade de ser eficiente se considerarmos o seguinte problema multiobjetivo:

$$\min_{\mathcal{S}} \max (L_1, L_2, \dots, L_P),$$

em que  $\mathcal{S}$  é qualquer estratégia e  $L_i$  é o limite superior do nível de estoque para uma máquina isolada.

Nesta seção será demonstrado que o valor do pico de estoque dado por (4.10) não pode ser reduzido para todos os tipos de peça se o menor valor para o tempo de preparação total de qualquer sequência fechada seja dado por  $\Delta$  definido no teorema anterior.

Considere a figura 4.7.

Nível de Estoque para Tipo 1.

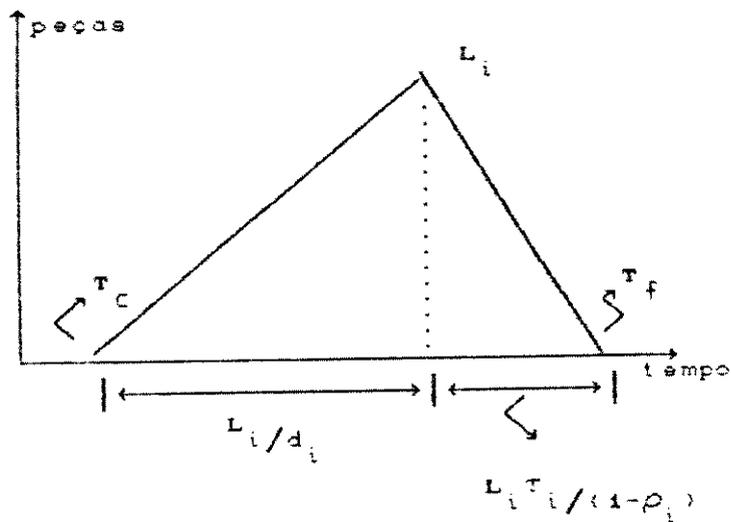


Figura 4.7: Máximo intervalo entre duas escolhas consecutivas de um mesmo tipo de peça no caso da estratégia Regular.

Nela está apresentado o máximo intervalo entre duas escolhas consecutivas de um mesmo tipo de peça no caso da estratégia Regular. Os instantes  $T_f$  e  $T_c$  representam os momentos em que o nível de estoque do último tipo de peça escolhido em quaisquer seqüências fechadas consecutivas se esgotam (no caso particular da estratégia Regular trata-se de uma seqüência mínima). Seja  $i$  o último tipo de peça escolhido tal que seu nível de estoque tenha se esgotado em  $T_f$ .

Muito embora a figura 4.7 refira-se à estratégia Regular, a curva de nível de estoque apresentada ocorre para qualquer estratégia estável do tipo clear, pois todas devem ser formadas por uma concatenação de seqüências fechadas. A inclinação positiva da curva pode não necessariamente iniciar em  $T_c$ , acontecendo, porém, num instante anterior (isto porque diferentemente da estratégia Regular o último tipo de peça escolhido numa seqüência fechada não é necessariamente o último da seqüência fechada seguinte). Transfira-se, então, o desenho para estas outras estratégias em que o valor de pico e os intervalos de tempo possuam valores diferentes. Mantenha-se, entretanto, os instantes  $T_c$  e  $T_f$  como sendo o início e fim de uma seqüência fechada qualquer, tal como descrito no

parágrafo anterior. Para uma correta compreensão da demonstração que se segue as sequências fechadas devem ser formadas através da concatenação a partir do instante inicial (a observação procede desde que se pode encontrar várias sequências fechadas possíveis que não corresponderiam às encontradas desta forma).

**Teorema 4: Os Picos de Estoque Proporcionados pela Estratégia Regular são Eficientes:** Considere uma máquina isolada operando segundo a estratégia Regular e que satisfaça o lema 1. Nenhuma estratégia mantém todos os picos de nível de estoque abaixo dos apresentados por meio do teorema anterior se existir uma sequência mínima tal que a soma de todos os tempos de preparação seja mínima.

Parte 1: Análise para estratégias tipo *clear*.

Demonstração: Suponhe-se que exista alguma estratégia estável tal que todos os picos de estoque sejam sempre menores que os calculados em (4.10). Se tal estratégia existir, para que os picos de estoque satisfaçam esta hipótese, necessariamente, a relação seguinte deve ser satisfeita:

$$T_f - T_c < L_i/d_i + L_i\tau_i/(1-\rho_i).$$

Utilizando-se do resultado em (4.10), vem:

$$T_f - T_c = \xi < \Delta/(1-\rho) = \pi. \quad (4.11)$$

Em que  $\pi$  é o mesmo que em (4.7).

Desde que  $T_c$  inicia uma nova sequência fechada, obrigatoriamente todas as peças que entraram em seus estoques até este instante foram processadas até o instante  $T_f$ . Portanto o tempo gasto ( $T_{op}$ ) para processamento destas peças é dado por:

$$T_{op} = \sum_j T_c d_j \tau_j = T_c \rho. \quad (4.12)$$

Considere-se, agora, uma função  $N(T_f)$  que enumera as sequên

cias fechadas, ou seja, seu valor em  $T_f$  é igual ao número de sequências fechadas que surgiram até o instante  $T_f$ . Assim,  $N(T_f)$  pode ser definida como  $N(t): \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{Z}_+$ , e que satisfaz as seguintes propriedades:

- 1-  $N(t)$  é crescente,
- 2-  $\lim_{t \rightarrow \infty} N(t) = \infty$ .

Portanto, o tempo gasto com preparações da máquina ( $T_\delta$ ) satisfaz a seguinte relação:

$$T_\delta \geq N(T_f)\Delta, \quad (4.13)$$

A relação anterior é válida deste que o valor de  $\Delta$  é o menor valor possível para qualquer sequência fechada.

Defina-se  $P(T_f)$ , da seguinte forma:

$$N(T_f)P(T_f) = T_f.$$

Observando-se a expressão (4.11) é claro que:

$$P(T_f) \leq k < \pi. \quad (4.14)$$

Tomando-se as expressões (4.12) e (4.13), vem:

$$T_{op} + T_\delta \leq T_f.$$

$$T_c\rho + N(T_f)\Delta \leq T_f.$$

$$N(T_f)\Delta \leq T_f - T_f\rho + \xi\rho.$$

Considerando-se (4.14), resulta:

$$T_f\Delta \leq T_f(1-\rho)k + \xi k\rho.$$

$$T_f(\Delta - (1-\rho)k) \leq \xi k\rho$$

Para que a última expressão seja válida o coeficiente de  $T_f$  deve ser negativo. Assim, considere por hipótese que:

$$(\Delta - (1-\rho)k) < 0.$$

Então:

$$k > \Delta / (1-\rho).$$

Novamente, considerando (4.14), nota-se que a conclusão é absurda e, portanto, os valores limites para pico de estoque da estratégia Regular compõem uma solução eficiente se considerarmos um problema multiobjetivo de minimização dos limites de estoque para cada tipo de peça. ■

Parte 2: Estratégias não clear.

Demonstração: Caso se suponha que os níveis de estoque nunca ultrapassam o valor dado por 4.10 então a expressão 4.12 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$T_{op} \geq \sum_j T_{c,j} d_j \tau_j - H, \quad (4.15)$$

em que  $H = \text{constante} < \infty$ .

A partir de 4.15 a demonstração segue análoga à parte 1. ■

#### 4.3-Aplicação da Estratégia Regular em Sistemas de Manufatura tipo *Job-Shop*.

Prova-se em [18] que todas as estratégias do tipo CAF são estáveis para o caso de sistemas acíclicos. Nestes sistemas pode-se ordenar as máquinas convenientemente de forma que as rotas para qualquer tipo de peça possuam uma direção comum. Assim, se as máquinas forem indexadas, qualquer peça que deixe a máquina  $m$  só pode ser manufaturada em  $m'$  se  $m' > m$ .

Por outro lado já foi demonstrado em [19] que estratégias tipo CAF podem não ser estáveis quando aplicadas em sistemas tipo *Job-shop*. Em [18] foi apresentado uma maneira de transformar estratégias tipo CAF para serem aplicadas em tais sistemas de manu-

fatura mantendo a estabilidade, porém deixando de ser *clear*. Tais estratégias foram denominadas de CAF *BACKOFF*.

Para tanto, basta empreender à máquina um regime de trabalho tal qual ela estivesse operando isoladamente segundo a estratégia CAF.

Desde que a estratégia Regular também é do tipo CAF, esta pode ser alterada da mesma maneira para aplicação em sistemas mais complexos. A estratégia assim modificada será denominada por Regular *BACKOFF*.

#### 4.4-Alteração do Modelo Inicial.

Nos sistemas de manufatura modelados até aqui a chegada de peças bem como seu processamento são considerados funções contínuas no tempo. Porém, em diversos casos práticos a discretização destes eventos torna-se necessária.

Considere-se que a entrada de peças obedece à relação:

$$d_i t \geq u_i(t) \geq d_i t - \gamma, \text{ em que } \gamma \in \mathbb{Z},$$

e o processamento à:

$$\tau_i^{-1} t \geq y_i(t) \geq \tau_i^{-1} t - \gamma, \text{ nos intervalos de processamento.}$$

As estratégias tipo CAF para sistemas acíclicos e que satisfaçam as duas relações anteriores conservam sua estabilidade [18]. Desde que a estratégia Regular é um caso particular de estratégia CAF o teorema 1 é válido também nestes casos.

Observa-se por simulação que o comportamento adquirido pelo sistema é bem próximo do caracterizado pelos teoremas 2 e 3.

Considerando-se a estratégia Regular *BACKOFF* deve-se alterar o algoritmo para que calcule os instantes de troca de tipo de operação tal qual no sistema isolado e discreto.

As simulações seguem no capítulo 5.

## 5-Resultados

## 5-Resultados.

### 5.1-Programa para Simulação do FMS.

Para que uma observação do comportamento dos níveis de estoque pudesse ser feita quando a estratégia Regular fosse utilizada, implementou-se um programa para simulação do modelo de sistema de manufatura em questão. Outro motivo é o de se estabelecer uma idéia do desempenho desta estratégia junto a outras sugeridas na literatura.

Várias etapas estão envolvidas na criação de um programa para simulação. Dentre algumas pode-se citar: definição dos resultados esperados, análise do problema, esboço do programa e sua realização, estudo do desempenho do simulador, etc..

A simulação de um sistema de manufatura flexível pode ser concebida em quatro níveis hierárquicos [12]:

- componentes básicos do SMF,
- controle das máquinas
- sequenciamento
- e planejamento.

O caso em questão trata do nível de sequenciamento. Este nível é de maior dificuldade para ser emulado devido a grande variedade de métodos e estratégias de controle. Porém, particularmente neste trabalho, interessa-se pela aplicação de um tipo de estratégia na escolha da seqüência em que as linhas de produção serão processadas, o que simplifica bastante a realização do simulador. Um importante aspecto da simulação é testar o comportamento dinâmico do modelo em função do tempo. No caso em questão objetivou-se apenas a observação do comportamento dos níveis de estoques. O fato do modelo para o sistema de manufatura ser bem definido, também reduz o esforço para implementação do simulador.

Considerando-se estas simplificações e desde que o modelo para o sistema tem um caráter geral (número de máquinas, linhas de produção e rotas podem ser as mais variadas possíveis) optou-se por implementar um programa para simulação em vez de se utilizar

alguma das ferramentas disponíveis tais como: GPSS, SIMSCRIPT, etc..

O programa foi construído em linguagem Pascal. Das diversas ferramentas padrões necessárias para se implementar um simulador vale citar o mecanismo de controle temporal. Em particular utilizou-se do mecanismo orientado a eventos. A interface para o usuário oferece algumas facilidades, reduzindo muitos dos comentários necessários para sua utilização. A construção do modelo está limitada a 10 máquinas e 10 linhas de produção para cada uma delas. Como resultado de sua execução o programa armazena o nível de estoque e o instante respectivo a cada alteração que lhe ocorre. (No caso de uma montagem, os estoques correspondentes a cada componente não podem ser escolhidos como saídas de dados, porém uma saída possível considera o estoque que representa o número de conjuntos completos de peças componentes). O desempenho do programa com respeito a sua velocidade de execução pouco foi testado, pois não constitui objetivo principal deste trabalho. Por outro lado a validade dos seus resultados pode ser comprovada a partir do teorema 3.

O programa é capaz de auxiliar o usuário quando da formação do modelo a ser simulado. Os dados solicitados são todos da forma de índices numéricos. Assim, cada máquina deve possuir um índice que a identifique na manufatura. Cada linha de produção, da mesma forma, possui um índice que a identifica considerando a máquina em que está sendo processada. Devido ao fato de se considerar montagens, há necessidade de um índice para identificação do tipo de estoque. Cada linha de produção no caso de uma montagem pode possuir 5 estoques distintos, um para cada componente da montagem. Além destes, existe um estoque comum indexado por zero que é formado pelo número mínimo de peças necessárias à fabricação de uma única unidade do produto. Quando o processamento não se trata de uma montagem este é o único estoque utilizado. Observe-se que para a correta identificação do destino da peça são necessários três índices: máquina, linha de produção e estoque; a não ser no caso em que a peça destina-se ao exterior do sistema caso em que a máquina deve ser indexada com um índice negativo.

São consideradas 6 classes de processamentos diferentes e possíveis para cada máquina e cada linha de produção. A tabela 5.1

apresenta cada uma delas associada a seu índice correspondente.

índice	Tipo
1	simples
2	montagem
3	desmontagem
4	montagem e desmontagem
5	c/ roteamento
6	montagem c/ roteamento

Tabela 5.1: Tipos de processamento.

A classe tipo c/roteamento é tal que há diversos destinos diferentes. Assim, a cada fração de itens produzidos um destino correspondente será considerado. Esta classe diferencia-se da desmontagem desde que neste caso para cada peça que é processada há uma divisão da mesma em várias outras, cada qual com um destino particular.

## 5.2-Resultados das Simulações.

Dois modelos de sistema de manufatura foram construídos com o objetivo de comparar estratégias e observar o comportamento dinâmico dos níveis de estoque quando o sistema está sob o controle da estratégia Regular.

### 5.2.1-Exemplo para Máquina Isolada.

O primeiro exemplo (exemplo 1) a ser apresentado consta de uma máquina isolada cuja carga de trabalho inclui seis linhas de produção. Cada linha de produção pode corresponder a um grupo de peças com semelhantes procedimentos de manufatura. Os parâmetros utilizados para a simulação estão apresentados na tabela 5.2.

linha de produção	demanda ( $d_i$ )	tempo de processamento ( $\tau_i$ )	tempo de preparação ( $\delta_i$ )
1	1	0.1	1
2	1.5	0.05	1.5
3	3.6	0.03	2.9
4	4.5	0.04	3.5
5	5.4	0.04	5.5
6	6.4	0.04	6.1

Tabela 5.2: Parâmetros utilizados na simulação do sistema tipo máquina isolada.

Uma estratégia sugerida em [18] servirá como termo de comparação para se observar o desempenho da estratégia Regular. Trata-se de uma estratégia (denominada aqui de MM) que procura minimizar a média de tempo de trabalho correspondente à quantidade de peças acumuladas no estoque total da máquina. Ela surge a partir de um limite inferior para esta média ( $I_m$ ) também calculado em [18]. A função  $F_e(t)$  a ser minimizada pela estratégia é dada por:

$$F_e(t) = 1/t \left\{ \int_0^t [\sum \tau_i x_i(s)] ds \right\}.$$

O limite inferior  $I_m$  é dado por:

$$I_m = \frac{\delta [\sum \sqrt{\rho_i (1-\rho)}]^2}{2(1-\rho)}$$

Portanto, tem-se:

$$\liminf_{t \rightarrow +\infty} Fe(t) \geq I_m.$$

A estratégia sugerida para minimização de  $Fe(t)$  é do tipo CAF e tal que o tipo de peça a ser escolhido obedece a regra dada a seguir.

$$p(T_n) = \arg \max_i \left\{ \frac{x_i(T_n) + \delta d_i}{d_i \sqrt{\rho_i^{-1} (1-\rho_i)}} \right\}.$$

Antes de serem apresentadas as curvas representativas de níveis de estoque, serão calculados os níveis de pico correspondentes quando a estratégia Regular é aplicada. Para tanto, basta que se use o resultado (4.10).

A partir da tabela 5.1 vem:

$$\sum \rho_i = \rho = 0.935.$$

$$\sum \delta_i = \Delta = 20.5.$$

Aplicando-se (4.10) gera-se a tabela 5.3, onde estão apresentados os valores dos picos de estoque  $L_i$  para cada tipo de linha de produção  $i$ .

Na figura que se segue (5.1), os gráficos correspondentes para cada estratégia estão apresentados. As curvas para o caso da aplicação da estratégia Regular estão representadas por curvas contínuas.

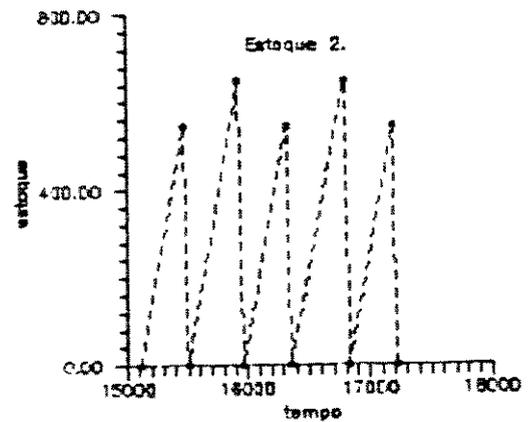
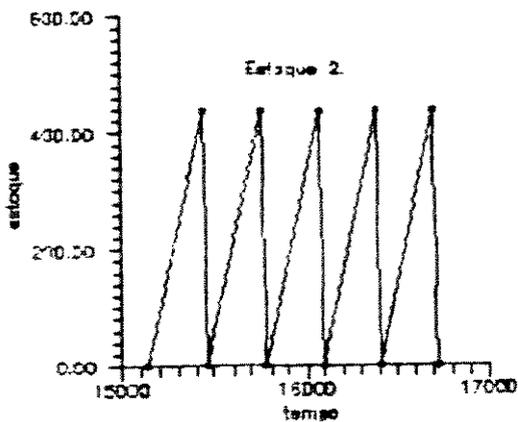
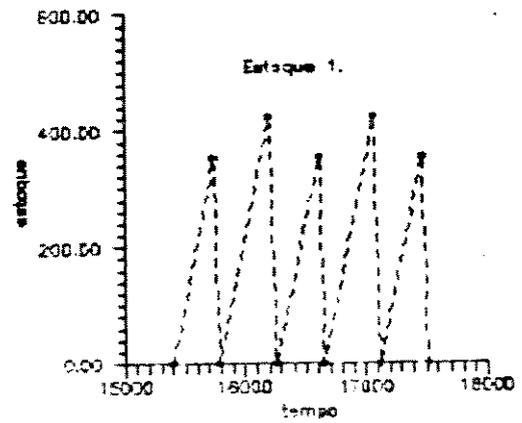
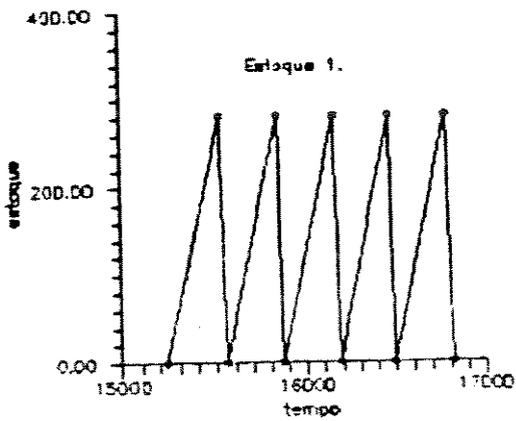
Pode-se observar o comportamento periódico de  $x_i(t)$  quando a estratégia Regular é aplicada. Observe-se também que alguns níveis de estoque para o caso da estratégia MM alcançam valores maiores que os da estratégia Regular. Devido à característica periódica de

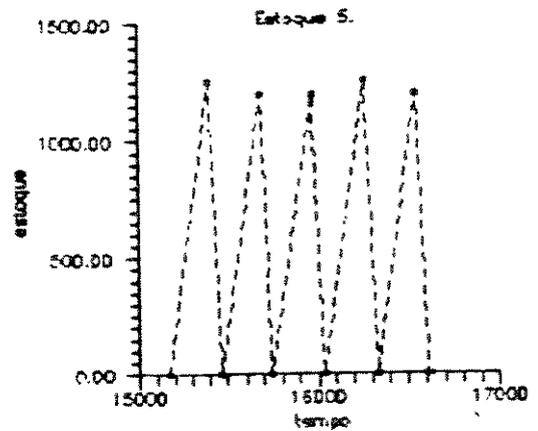
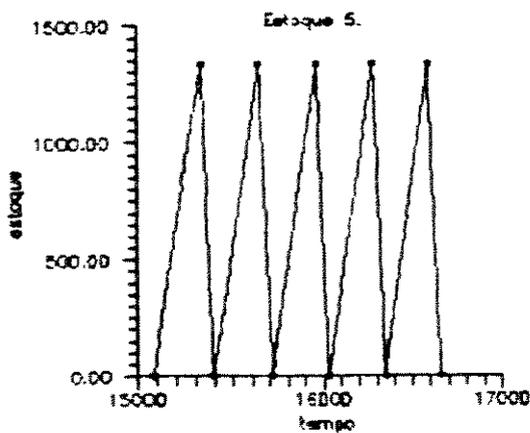
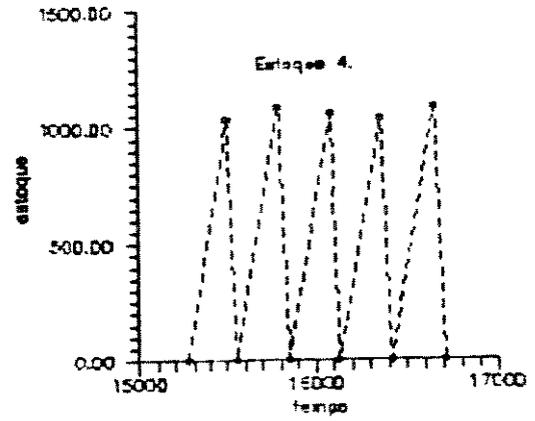
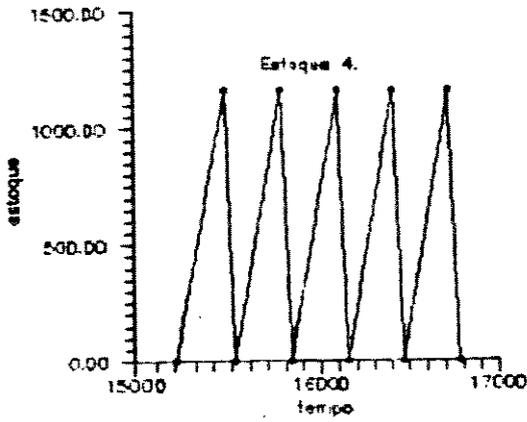
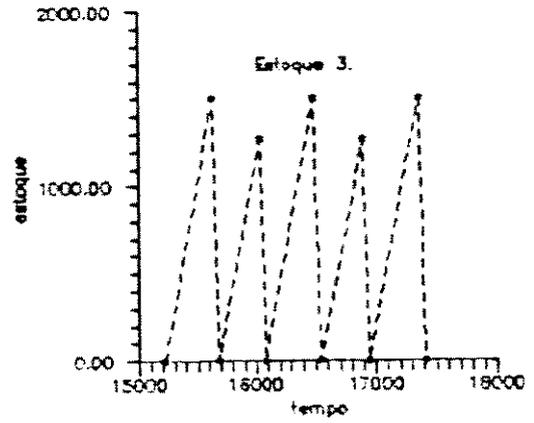
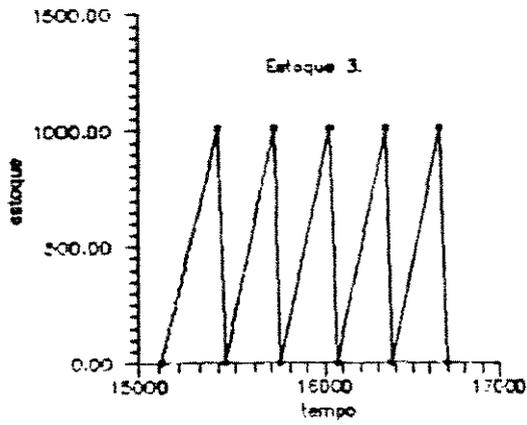
$x_i(t)$  o cálculo da média de trabalho armazenado nos estoques torna-se uma tarefa simples sem necessidade de simulação. Assim, tem-se que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \inf Fe(t) = \sum \tau_i L_i / 2. \quad (5.1)$$

linha de produção i	1	2	3	4	5	6
máximo nível de estoque ( $L_i$ )	284	437	1012	1163	1335	1501

Tabela 5.3: Nível de Pico de estoque para cada tipo de linha de produção.





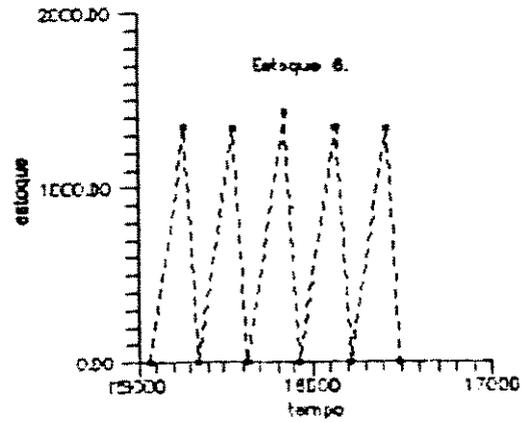
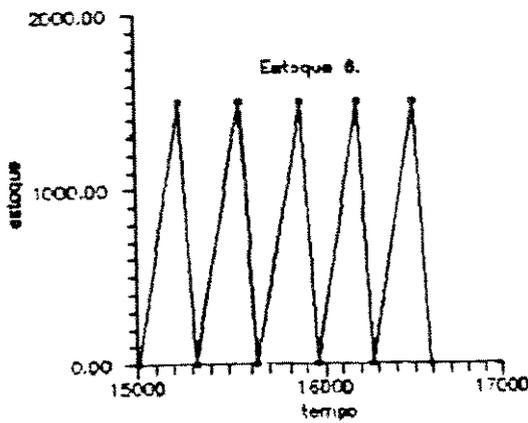


Figura 5.1: Comportamento dos níveis de estoque sob controle da estratégia Regular (curvas contínuas) e da estratégia MM (exemplo 1).

		Média do Tempo de Trabalho Acumulado em Estoque	
estratégia		Regular	MM
exemplo			
1		120	125
2		35	34

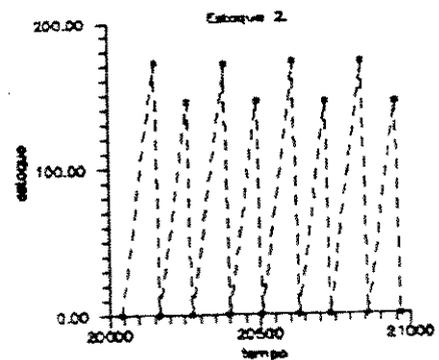
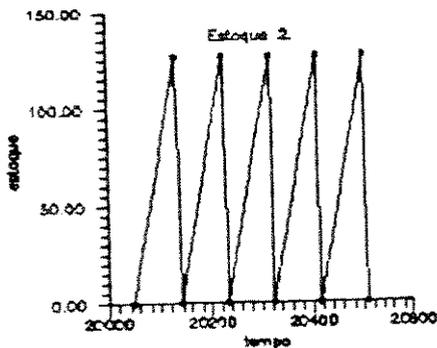
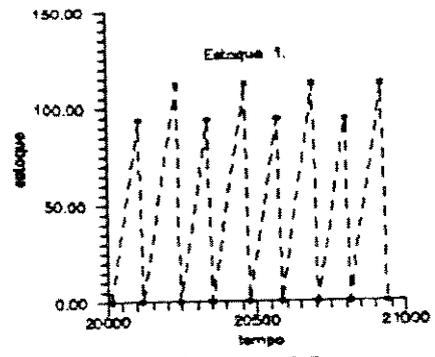
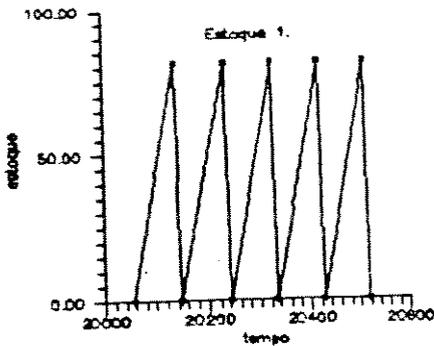
Tabela 5.4: Média de tempo de trabalho acumulado em estoque.

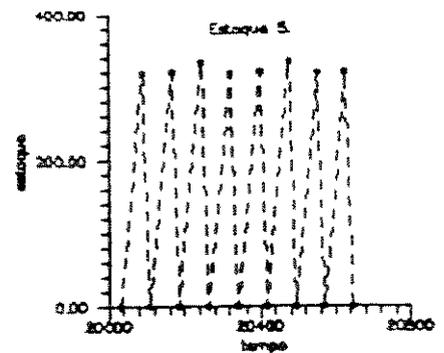
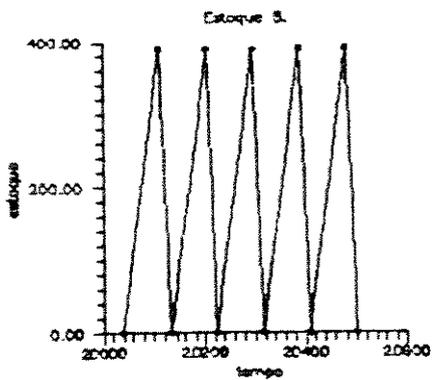
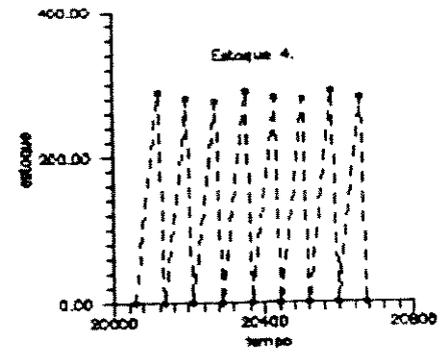
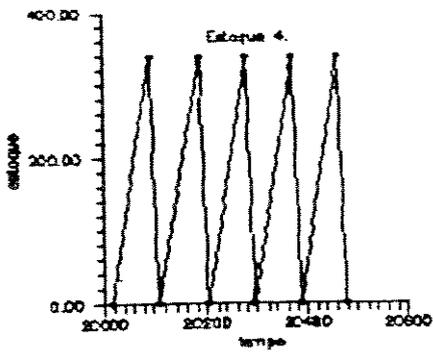
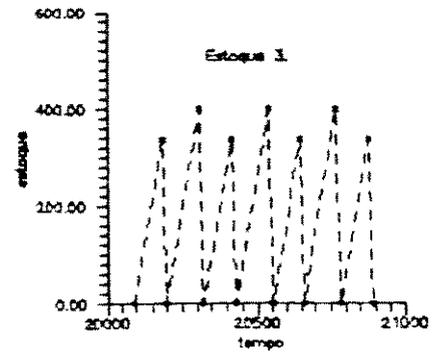
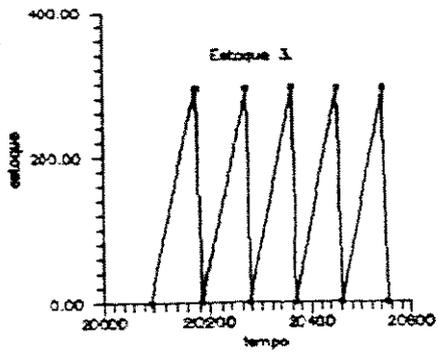
A partir dos dados resultantes de simulação pode-se observar uma característica também periódica para a estratégia MM para cada valor de pico. Aplicando-se a mesma idéia sugerida em (5.1), calculou-se o valor da média de trabalho acumulado em estoque no caso desta estratégia. Considerando-se esta média como termo de comparação, resultados baseados em simulação mostraram que a estratégia Regular torna-se superior à estratégia MM à medida que os valores dos tempos de preparação aumentam as diferenças entre si. Por outro lado, se estes valores tornam-se iguais a estratégia MM é

superior. Desde que é razoável existirem tais diferenças a estratégia Regular pode ser considerada mais conveniente caso tome-se este parâmetro como medida de desempenho.

Para ilustrar este comportamento alterou-se a coluna dos tempos de preparação da tabela 5.2. No novo sistema construído (exemplo 2) seus valores foram considerados todos iguais a 1 unidade de tempo. A tabela 5.4 apresenta a comparação para os exemplos 1 e 2.

A figura 5.2 apresenta os resultados da simulação para o exemplo 2.





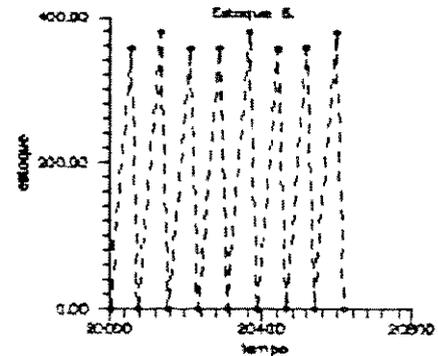
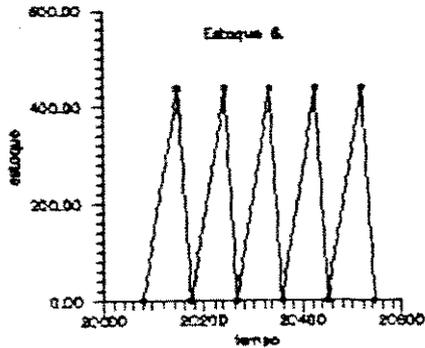


Figura 5.2: Comportamento dos níveis de estoque sob controle da estratégia Regular (curvas contínuas) e da estratégia MM (exemplo 2).

### 5.2.2-Exemplo Tipo *Job-shop*.

Para facilitar a visualização do sistema a ser simulado a figura 5.3 apresenta o esboço da disposição das máquinas junto com as rotas de cada linha de produção.

Com respeito à identificação, as máquinas estão indexadas por números maiores e as linhas de produção por números menores. A figura mostra que neste sistema há montagens nas máquinas 1 e 3 (quando rotas convergem) e desmontagem numa das linhas de produção que passa pela máquina 2 (quando a rota se bifurca). (Após a montagem a representação da rota é feita por uma daquelas que a formaram).

A tabela 5.5 resume os dados de entrada com respeito às fontes de peças, ou seja, por onde elas entram no sistema de manufatura. A identificação do estoque é feita por uma tripla ordenada cujo primeiro índice refere-se à máquina, o segundo à linha de produção e o último ao estoque (que só possui algum significado quando a operação trata-se de uma montagem). Por exemplo, conside-

re a fonte de número 4 na tabela 5.5. As peças para esta fonte são conduzidas à máquina 3, correspondem a linha de produção 1 e permanecem armazenadas no estoque destinado ao segundo componente da montagem.

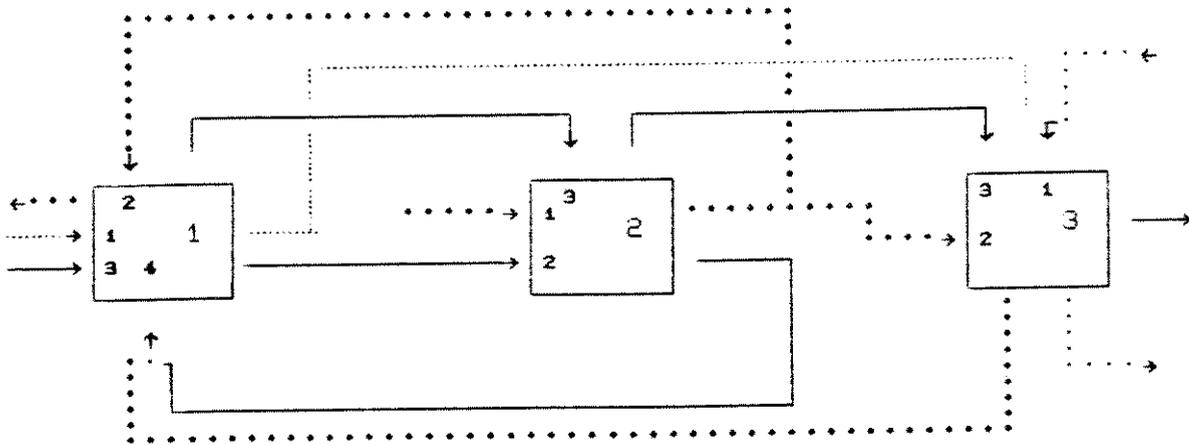


Figura 5.3: Esquema do sistema de manufatura simulado, mostrando a disposição das máquinas e rotas para cada linha de produção.

Índice da fonte	Entrada	Período de chegada
1	(1, 3, 0)	1
2	(2, 1, 0)	1
3	(1, 1, 0)	0.25
4	(3, 1, 2)	0.25

Tabela 5.5: Dados referentes às fontes de peças.

Os dados para a criação do modelo estão organizados nas tabelas que se seguem, uma para cada máquina. Para tanto, deixe que os nomes: linha de produção, demanda, tempo de preparação, tempo de

processamento e tempo de transporte sejam respectivamente representados por:  $LP$ ,  $d$ ,  $\delta$ ,  $\tau$ ,  $\rho$ ; que se surgindo necessidade de especificação da máquina e linha de produção receberão índices convenientes ( $d_{ij}$  refere-se a demanda de peças para a máquina  $i$  e linha de produção  $j$ . O valor do tempo de transporte equivale ao tempo gasto no transporte do produto até a próxima máquina). Uma das colunas destas tabelas refere-se aos valores de pico de estoque ( $L_{ij}^o$ ) calculados segundo (4.10), considerando-se a máquina isolada, ou seja, as fontes de peças seriam seus próprios estoques. Os índices  $i$  e  $j$  correspondem aos índices da máquina e da linha de produção em questão. Também será reservada uma coluna para mostrar o destino das peças, apenas para exemplificar sua identificação na forma de índices (Observe que a identificação para o modelo como um todo poderia ser qualquer outra. Os valores dados aos índices neste exemplo são apenas uma possibilidade).

A estratégia *CAF.BACKOFF* que será tomada como termo de comparação nesta simulação também foi sugerida em [18]. Trata-se de uma estratégia originalmente do tipo *clear* modificada para ser aplicada em sistemas do tipo *job-shop* (veja seção 4.3). Originalmente a estratégia escolhe para ser processada qualquer tipo de peça  $p$  que satisfaça a inequação (5.2).

$$x_p(T_n) \geq \epsilon \sum x_i(T_n) \quad (5.2)$$

Em que  $\epsilon$  é uma constante positiva menor que a unidade.

Considerando-se o estudo feito em [18] pode-se demonstrar que o limite para a soma dos níveis de estoque para máquina isolada submetida a qualquer estratégia CAF é tal que.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sum x_i(t) \leq \rho \delta / \tau + \frac{\bar{\tau} \delta}{\tau \delta (1 - \rho)} \max_i \left( \frac{(\rho - \rho_i)}{\tau_i} \right) \quad (5.3)$$

Para se calcular os limites de estoque no caso de estratégias do tipo *BACKOFF* aplicados em sistemas gerais (como neste exemplo), basta que sejam considerados todos os atrasos para cada peça devidos à permanência destas em outros estoques e aos tempos de transporte, além dos limites impostos pelas próprias máquinas

[18]. À guisa de exemplo, será calculado um destes limites para o caso da estratégia Regular BACKOFF passo a passo. Seguindo o mesmo procedimento pode-se calcular os valores destes limites caso utilize-se o limite dado por (5.3) para cada tipo de estoque indiferentemente.

LP	d	$\delta$	$\tau$	$\sigma$	destino	$L^*$
1	4	1.5	0.05	1	(3,1,1)	244
2	1	0.8	0.25	2	(-2,0,0)	58
3	1	0.5	0.2	1	(2,2,0)	61
4	1	1	0.3	1.5	(2,3,0)	54

Tabela 5.6: Dados para modelagem da máquina 1.

LP	d	$\delta$	$\tau$	$\sigma$	destino	$L^*$
1	1	1	0.6	1	(1,2,0) (3,2,0)	13
2	1	1	0.2	1	(1,4,1)	25
3	1	1	0.1	1	(3,3,0)	28

Tabela 5.7: Dados para modelagem da máquina 2.

Antes, porém, tece-se algumas considerações a respeito da escolha do valor para a constante  $\epsilon$ . Desde que um dos parâmetros para comparação de desempenho será o do nível máximo de estoque, deve-se escolher o valor de  $\epsilon$  o maior possível, no sentido de se obter com a estratégia CAF BACKOFF os menores níveis de pico (tal conclusão só é válida se não houver nenhuma outra condição além de (5.2) no momento da troca de tipo de processamento). No caso de

uma única máquina este valor é dado por  $1/P$ , caso considere-se qualquer possibilidade para a condição inicial, em que  $P$  é o número de linhas de produção (valor limitado pela própria construção da estratégia). Assim,  $\epsilon$  foi escolhido igual a  $1/P$  nesta simulação (observe-se que o valor de  $P$  é particular a cada máquina, o que faz sentido, já que cada máquina operará como se estivesse isolada).

Para exemplo do cálculo dos limites se escolherá a linha de produção representada pela linha contínua na figura 5.3 por abranger uma montagem e uma desmontagem, possibilitando a visualização de um caso bem geral.

O limite superior para o nível de cada estoque será representado por  $L_{ij}$ , em que os índices são tais como em  $L_{ij}^0$ .

Logo que as peças entram no sistema são armazenadas no estoque  $(1,3,0)$ . Desde que não houve algum atraso o limite de peças para esse estoque é igual ao do caso para a máquina isolada, portanto:  $L_{13} = L_{13}^0 = 61$ .

LP	d	$\delta$	$\tau$	$\sigma$	destino	$L^0$
1	4	0.5	0.1	0	(-3,0,0)	19
2	1	0.5	0.3	1	(1,4,2)	6
3	1	0.5	0.1	0	(-1,0,0)	7

Tabela 5.8: Dados para modelagem da máquina 3.

Em seguida, logo após ser processada, a peça é transportada até o estoque  $(2,2,0)$  gastando um tempo igual  $\sigma_{13}=1$  (tabela 5.6). O limite deste estoque é dado por:

$$L_{22} = L_{13} + (\sigma_{13} d_{22}) + L_{22}^0$$

Substituindo-se valores resulta:

$$L_{22} = 87.$$

A próxima etapa de processamento de uma peça deste tipo será uma montagem, por isso deve-se conhecer o atraso de todas as outras peças componentes. Porquanto deixe que tome-se inicialmente o limite do estoque (3,2,0). O cálculo, apesar da desmontagem, não difere em nada do cálculo anterior (mesmo no caso de tratar-se de um processo com roteamento o procedimento mantém-se). Desta forma tem-se:

$$L_{32} = L_{21} + (\sigma_{21} d_{32}) + L_{32}^{\circ}, \text{ desde que } L_{21} = L_{21}^{\circ}.$$

$$L_{32} = 20.$$

Para cálculo do limite de estoque de uma montagem o atraso considerado será o menor dentre os que compõem o produto final. Assim, vem:

$$L_{14} = \min \left\{ \left[ (\sigma_{22} d_{14}) + L_{22} \right], \left[ (\sigma_{32} d_{14}) + L_{32} \right] \right\} + L_{14}^{\circ}.$$

$$L_{14} = 75.$$

Seguindo os mesmos raciocínios encontram-se os valores para os limites dos outros estoques organizados na tabela 5.9.

Note-se que a cada resultado os valores são truncados já que os níveis de estoque são discretos.

A comparação destes valores com os calculados por (5.3) e organizados na tabela 5.10 mostram que esta expressão oferece uma idéia pouco precisa deste limite superior, quando comparado com o possibilitado por (4.10), além de que não oferece nenhuma informação à cerca dos limites individuais para cada estoque.

Os resultados da simulação podem ser visualizadas a partir dos gráficos do estoque em função do tempo representados na figura 5.4.

Observe-se que picos de estoque para o caso da estratégia CAF BACKOFF são maiores que no caso da Regular BACKOFF em alguns casos. Tal resultado não deve causar estranheza desde que o comportamento isolado de certa forma foi transferido para o geral.

Limites de Estoque			
LP \ M	1	2	3
1	244	13	19
2	72	97	20
3	61	105	113
4	75	-	-
$\Sigma$	452	205	152

Tabela 5.9: Limites de estoque quando calculados segundo (4.10) ((M) máquina, (LP) linha de produção).

Limites de Estoque Total			
Máquina	1	2	3
Caso Isolado	10828	1449	161
Sistema	15341	23110	24726

Tabela 5.10: Limites de estoque quando calculados segundo (5.3).

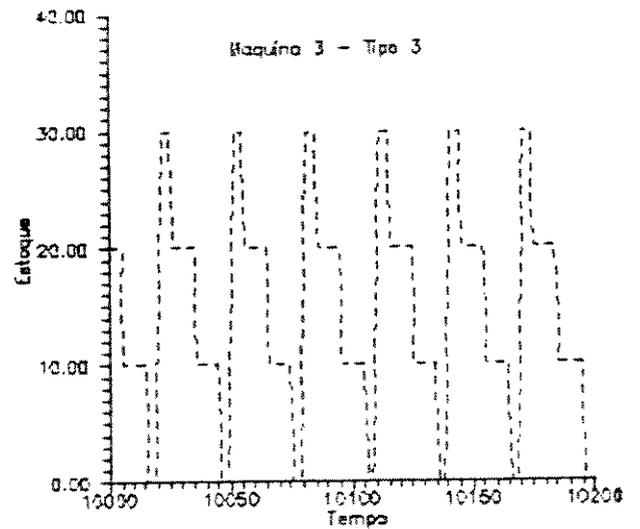
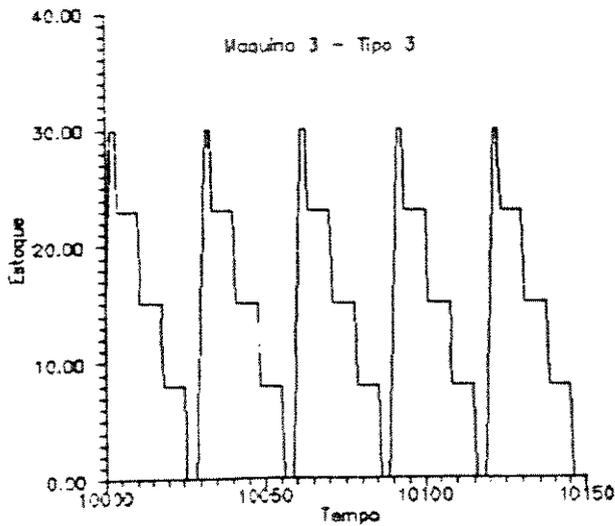
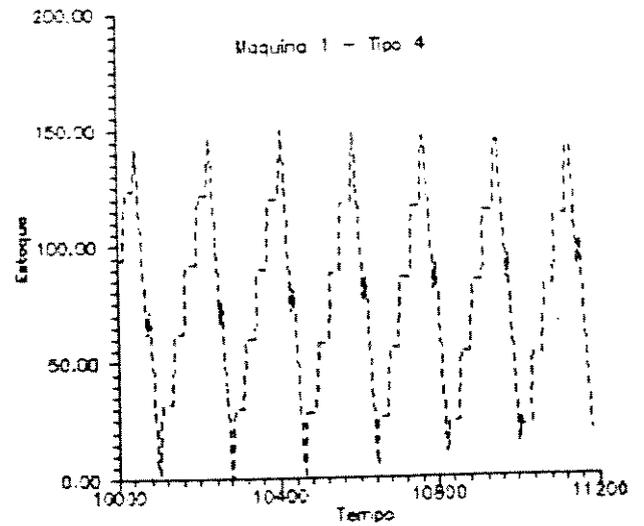
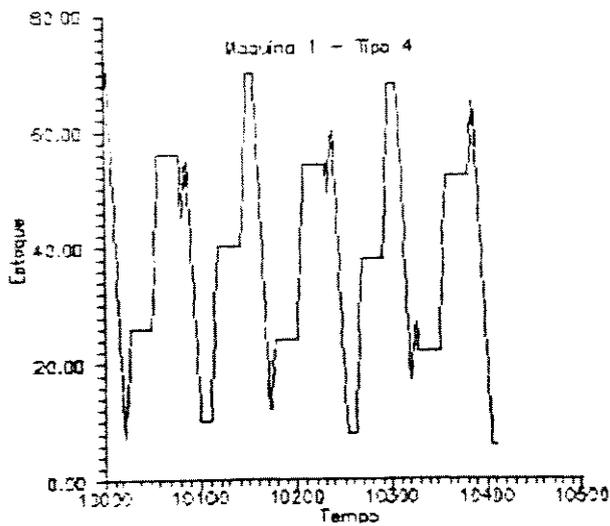
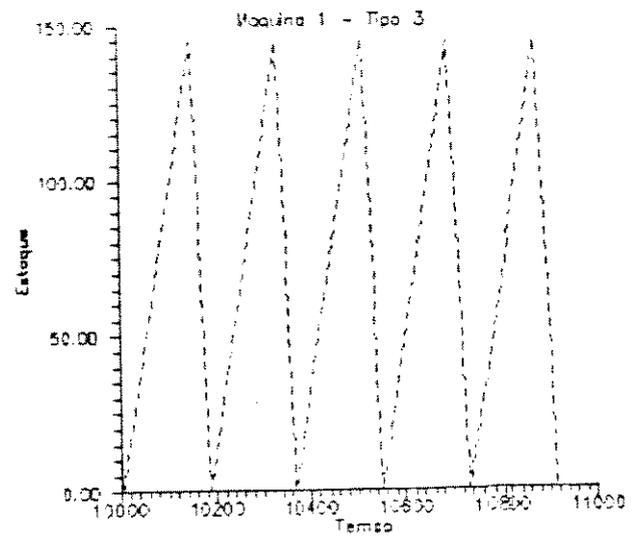
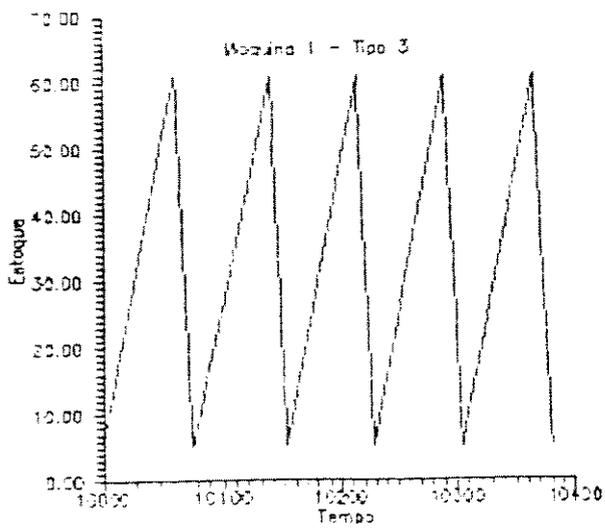


Figura 3.4: Curvas referentes à simulação do sistema tipo job-shop, considerando-se as estratégias: Regular (curvas contínuas) e CAF ambas BACKOFF.

## 6-Conclusões

## 6-Conclusões.

Este trabalho apresentou uma estratégia de sequenciamento para sistemas flexíveis de manufatura que garante sua estabilidade no sentido de manter limitado os níveis de estoque.

Quatro teoremas caracterizam a estratégia sugerida (Regular), quando aplicada numa máquina isolada:

- Teorema 1: Demonstra sua estabilidade.

- Teorema 2: Demonstra que o comportamento da função representativa dos estoques é periódico e seus valores máximos atingem uma situação de regime.

- Teorema 3: Apresenta uma fórmula fechada para cálculo dos níveis máximos de nível de estoque para cada tipo de peça individualmente.

- Teorema 4: Garante que nenhuma outra estratégia pode reduzir todos os níveis de pico de estoque característico da estratégia Regular, ou reduzir algum sem que outro necessariamente seja aumentado. A solução da estratégia é eficiente.

Para garantir a estabilidade de sistemas mais gerais a estratégia deve ser alterada. A nova estratégia herda características da original.

Considerando-se o caso de máquina isolada, seu desempenho tanto com respeito à média de trabalho acumulado em estoques quanto aos seus níveis máximos é comparado com a estratégia propostas no trabalho de Perkins e Kumar [18] aqui denominada de MM. Com relação ao primeiro parâmetro apresenta-se um exemplo em que é superior à estratégia criada especificamente para este sentido. Com relação ao segundo, o próprio teorema 4 já lhe garante qualidades que puderam ser confirmadas em simulação.

Considerando-se sistemas gerais a precisão dos valores dos limites de estoque calculados segundo pela estratégia Regular é sensivelmente superior à permitida pela estratégia CAF BACKOFF, também proposta em [18].

Além disso, a fórmula gerada no teorema 3 permite uma análise do sistema com respeito aos níveis máximos de estoque segundo seus

parâmetros.

Observou-se durante o trabalho que a característica determinística do modelo para um sistema de manufatura não restringe seus resultados a tais sistemas. Ou seja, qualquer que seja a perturbação de duração limitada imposta a tais modelos, a natureza estável do mesmo não será alterada quando esta estratégia for utilizada, pois sempre os níveis de estoque retornarão aos seus comportamentos normais após o término de sua manifestação.

Com a ajuda da simulação percebeu-se o comportamento periódico das curvas de nível de estoque. Isto sugere que se possa conseguir um certo conjunto de parâmetros (demandas, tempos de processamento, tempos de preparação, etc.) tal que o sistema atinja um estado de 'ressonância' tal que os níveis máximos de estoque fossem reduzidos. Este estado de 'ressonância' seria tal que as mudanças de tipo de peça em determinada máquina estariam sujeitas àquelas operadas nas máquinas anteriores e posteriores (com relação ao destino de cada tipo de peça). Esta idéia indica um possível direcionamento para trabalhos futuros. Por fim, o resultado de [19] abre uma questão: quais os sistemas cíclicos permitem que estratégias CAF garantam sua estabilidade?

## 7-Bibliografia

## 7-Bibliografia.

- [1] French, Simon, Sequencing and Scheduling. an Introduction to the Mathematics of The Job-Shop., Ellis Horwood Limited, Chichester, 1986.
- [2] Stecke, Katheryn E. e Soldberg J., "Loading and Control Policies for a Flexible Manufacturing System.", Int. J. Prod. Res., 1981, vol. 19, no. 5, 481-490.
- [3] Baker, Kenneth R., Introduction to Sequencing and Scheduling, John Wiley & Sons, New York, 1974.
- [4] Graves, S.C., "A Review of Production Scheduling", Oper. Res., vol. 29, no. 4, 646-675, Aug. 1981.
- [5] Rodammer, F.A. e White, K.P., Jr., "A Recent survey of Production Scheduling", IEEE Transaction on Systems, Mans, and Cybernetics, vol. 18, no.6, nov./dec. 1988.
- [6] Silver, E.A., Vidal, R.V.V., Werra, D., "A Tutorial on Heuristic Methods", European Journal of Operational Research, 5, 1980.
- [7] Phelps, R.I., "Artificial Intelligence - an Overview of Similarities with O.R.", J. Opl. Res. Soc., vol. 37, no. 1, 1986.
- [8] Grant, T.J., "Lessons for O.R. from A.I.: A Scheduling Case Study", J. Opl. Res. Soc., vol. 37, no 1, 1986.
- [9] Engell, S. and Moser, M., "Two-Layer On-Line scheduling of Flexible Manufacturing Systems", Computer Integrated Manufacturing, May., 1990.
- [10] Hwan, Syming S. e Shogan, Andrew W., "Modelling and Solving an FMS Part Selection Problem", Int. J. Prod. Res., vol. 27,

no 8, 1989.

- [11] Shaw, M.J., "Knowledge-based Scheduling in Flexible Manufacturing Systems: An Integration of Pattern-Directed Inference and Heuristic Search.", Int. J. Prod. Res., 1988, vol. 26, no. 5, 821-844.
- [12] Rembold, Ulrich, Blume, Christian e Dillmann, Ruediger, "Computer-Integrated Manufacturing Technology and Systems", Marcel Dekker, inc., New York, 1985.
- [13] Hitomi, K., "Manufacturing Systems Engineering", Taylor & Francis LTD., 1979.
- [14] Kusiak, Andrew, Intelligent Manufacturing Systems., Prentice Hall, New Jersey, 1990.
- [15] Buyukkoc, Cagatay, "An Approximation Method for fedforward Queueing Networks with Finite Buffers. A Manufacturing Perspective.", IEEE, 1986, CH2282-2/86/0000/0965.
- [16] Fox, B.R. e Kempf, K.G., "Complexity, Uncertainty and Opportunistic Scheduling." IEEE, 1985, CH2215-2/85/0000/0487.
- [17] Parunak, H.V.D., et alii, "Fractal Actors for Distributed Manufacturing Control.", IEEE, 1985, CH2215-2/85/0000/0653.
- [18] Perkins, J.R. e Kumar, P.R., "Stable, Distributed, Real-time Scheduling of Flexible Manufacturing / Assembly / Disassembly Systems", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 34, no. 2, Feb. 1989.
- [19] Kumar, P.R. e Seidman, Thomas I, "Dynamic Instabilities and Stabilization methods in Distributed Real-time Scheduling of Manufacturing Systems", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 35, no. 3, Mar., 1990.
- [20] Yong F.C. e Oded Z.M., "On Dynamic Routing In FMS.", IEEE,

- [21] Engell, Sebastian e Moser, Manfred, "Two-Layer On-Line Scheduling of Flexible Manufacturing Systems.", Symposium on Computer Integrated Manufacturing, May, 1989, RPI, Troy, New York, USA.
- [22] Patrick R.P. et alii, "An Investigation of the Factors Influencing the Numbers of Kanbans Required in the Implementation of the JIT Technique with Kanban", Int. J. Prod. Res., 1987, vol. 25, no.3, pp. 457-472.
- [23] Gerelle, E.G.R. e Stark, J., Integrated Manufacturing. Strategy, Planning and Implementation. McGraw Hill, New York, 1988.
- [24] Eric T., Joel N.O., Computer-Integrated Manufacturing Handbook. Mc Graw-Hill, New York, 1987.
- [25] Mellor, P., "A Review of Job Shop Scheduling", Operational Research Quaterly", vol. 17, no. 2, pp. 161-171.
- [26] Figueiredo, Mauricio e Gomide, Fernando, 'Regular Policies in Distributed, Real-Time Scheduling of Flexible Manufacturing Systems', submetido para publicação.
- [27] Figueiredo, Mauricio e Gomide, Fernando, 'Estratégia Estável para Sequenciamento Tempo-real em Sistemas Flexíveis de Manufatura', submetido para publicação no 9º Congresso Brasileiro de Automática.