

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS

VOLMIR EUGÊNIO WILHELM

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA INTELIGENTE
DE GERAÇÃO DE PLANOS DE SEQÜENCIAMENTO
APLICADO À MANUFATURA DO TIPO *FLOW-SHOP*

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE E ENGENHARIA

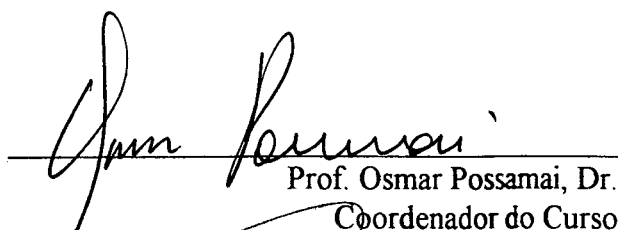
FLORIANÓPOLIS
1994

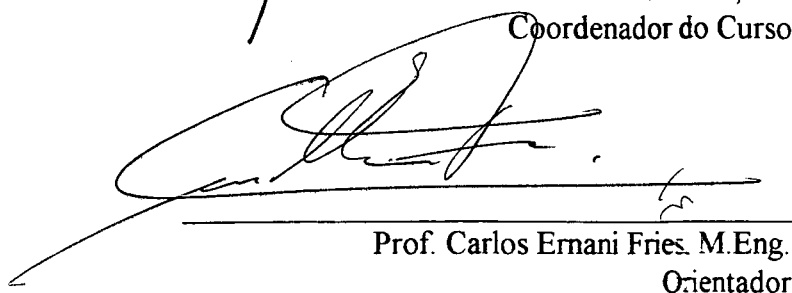
**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA INTELIGENTE
DE GERAÇÃO DE PLANOS DE SEQUENCIAMENTO
APLICADO À MANUFATURA DO TIPO *FLOW SHOP***

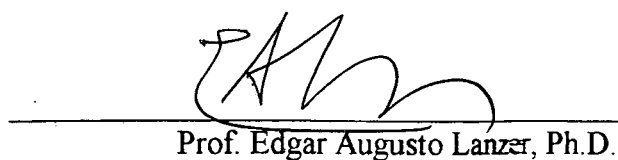
Volmir Eugênio Wilhelm

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de "Mestre em Engenharia" especialidade em Engenharia de Produção e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação

Banca Examinadora:


Prof. Osmar Possamai, Dr.
Coordenador do Curso


Prof. Carlos Ermani Fries, M.Eng.
Orientador


Prof. Edgar Augusto Lanzer, Ph.D.


Prof. Plinio Sange, Dr.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. CARLOS ERNANI FRIES pela valiosa orientação prestada durante o desenvolvimento do trabalho.

A HELENA MARIA WILHELM pelas sugestões que permitiram enriquecer e aperfeiçoar o presente trabalho.

A CLEDY GONÇALVES PEREIRA, seu marido MAURI CARLOS BELLEI pelo apoio e incentivos dados, principalmente na fase final do desenvolvimento da dissertação.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

**"Sonho que se sonha só
é só um sonho que se sonha só,
mas sonho que se sonha junto é realidade."
(Raul Seixas)**

RESUMO

O objetivo do planejamento da produção é gerar planos de produção. Um plano de produção deve definir quanto, quando e onde devem ser produzidas as encomendas disponíveis no período de planejamento. Na definição de quando e onde produzir fica caracterizado o problema do seqüenciamento, objeto central de estudo deste trabalho. O problema de seqüenciamento tem sido intensivamente estudado nas últimas décadas, e apesar de todos os esforços dispendidos, inexistem algoritmos exatos para a solução dos problemas correntes na prática. Técnicas de Inteligência Artificial têm sido citadas freqüentemente na literatura como um caminho bastante promissor para tratar o problema de seqüenciamento.

Neste trabalho propõe-se um sistema inteligente de geração de planos de seqüenciamento. A proposta para a criação deste sistema divide-se em duas fases: a fase inicial, compreendendo a avaliação de estratégias para formar a base de informações, e a fase operacional, que trata da aplicação das informações obtidas na fase inicial.

Na fase inicial faz-se uso de simulação para criar uma base de informações contendo os desempenhos de algumas regras de prioridade para vários contextos do sistema de manufatura. Na fase operacional destas informações foram avaliadas duas abordagens de inferência: a utilização de Redes Neurais e a utilização do procedimento de inferência *Geometrical Approximate Reasoning*.

A avaliação do sistema proposto foi feita para um caso de manufatura tipo *flow shop*, considerando-se três objetivos clássicos do planejamento da produção: a minimização do ciclo médio de fabricação, a minimização dos níveis de estoques e a maximização do atendimento do prazo de entrega. Os resultados mostram que o sistema procura - para as duas abordagens tratadas - gerar planos de seqüenciamento que tendam, em geral, a seguir os objetivos traçados pela gerência, adaptando-se ao contexto atual do modelo.

ABSTRACT

The aim of production planning is the generation of production plans. A production plan should define how much, when and where the goods must be produced in the planning period. The problem of scheduling, which is the focus of this work, appears when is defined where and when the material will be produced. In the last decades, the problem of scheduling has been intensively studied and, in spite of researcher's efforts, there is not an exact algorithm to solve practical problems. Artificial Intelligence techniques have been cited frequently throughout the literature of the field as being an efficient method to face the problem of scheduling.

This work presents an intelligent system to generate scheduling plans. The proposal to create this system is divided in two steps: the first one deals with the evaluation of the strategies which constitute the information base; the second one, the operational phase, applies the information obtained in the first phase.

In the first phase, simulation is used to create an information base which should contain the performance of some priority rules applied to different contexts of the manufacturing system. In the operational phase, two different approaches were evaluated: the use of Neural Networks and the use of the Geometrical Approximate Reasoning inference procedure.

The evaluation of this system was done to be applied in a manufacturing situation called *flow shop*, in which is taken into account three typical objectives of the production planning: the flowtime minimization, the stock level minimization and the due date attendance maximization. The results show that the system searches - in both approaches - for generating scheduling plans which, generally, follow the management's aims and, adapt to the model's context.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Objetivo do Trabalho	2
1.2 - Importância do Trabalho	2
1.3 - Estrutura do Trabalho	3
2 - O PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO E O PROBLEMA DE SEQÜENCIAMENTO.....	5
2.1 - Considerações Gerais.....	5
2.2 - O Problema de Seqüenciamento.....	7
2.2.1 - Critérios Usados na Geração de Planos de Seqüenciamento.....	8
2.2.2 - Métodos de Solução do Problema de Seqüenciamento.....	10
2.3 - Considerações Finais.....	16
3 - SIMULAÇÃO E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO.....	17
3.1 - Inteligência Artificial e Simulação na Abordagem do Problema de Seqüenciamento.....	17
3.1.1 - Sistemas Especialistas.....	17
3.1.2 - Redes Neurais.....	22
3.2 - O Papel da Simulação no Estudo de Problemas de Seqüenciamento..	24
3.3 - Alguns Procedimentos para o Seqüenciamento Inteligente.....	25
3.4 - Considerações Finais.....	30

4 - O MODELO PROPOSTO.....	31
4.1 - Considerações Gerais.....	31
4.2 - Fase de Avaliação de Estratégias.....	33
4.2.1 - Estados do Sistema.....	33
4.2.2 - Conjunto de Estratégias.....	34
4.2.3 - Critérios de Desempenho.....	35
4.2.4 - Considerações Finais.....	40
4.3 - Fase de Operacionalização do Modelo.....	42
4.3.1 - O Procedimento de Inferência.....	43
4.3.1.1 - Inferência Usando a Técnica de Redes Neurais.....	44
4.3.1.2 - Inferência Usando o Método <i>Geometrical Approximate Reasoning</i>	45
4.4 - Considerações Finais.....	46
5 - APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO.....	47
5.1 - Descrição do Sistema de Manufatura Utilizado.....	47
5.2 - Fase de Avaliação das Estratégias.....	48
5.2.1 - Definição de Parâmetros de Controle para as Variáveis Indicadoras de Estado.....	50
5.2.2 - Descrição dos Experimentos.....	51
5.2.2.1 - Análise do Parâmetro Taxa de Entrada de Encomendas.....	51
5.2.2.2 - Análise do Parâmetro Prazo de Entrega das Encomendas.....	52
5.2.2.3 - Número de Simulações Realizadas.....	52
5.2.2.4 - Análise do Estado de Equilíbrio.....	53
5.2.3 - Resultados da Fase de Avaliação.....	54
5.3 - Fase de Operacionalização do Modelo.....	56
5.4 - Avaliação do Desempenho do Modelo Proposto.....	56
5.4.1 - Descrição dos Experimentos da Fase de Operacionalização.....	57
5.4.2 - Resultados Obtidos.....	59

5.4.2.1 - Critério de Minimização do Ciclo Médio de Fabricação.....	59
5.4.2.2 - Critério de Maximização do Atendimento do Prazo de Entrega.....	62
5.4.2.3 - Critério de Minimização dos Níveis de Estoques.....	66
5.4.2.4 - Resultados Usando a Forma Ponderada do Ciclo Médio de Fabricação e do Desvio Médio do Prazo de Entrega em Relação aos seus Tempos de Processamento.....	69
5.5 - Considerações Finais.....	73
6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	75
6.1 - Conclusões.....	75
6.2 - Recomendações.....	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
ANEXOS I	79
ANEXO II	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Produção como Processo de Transformação.....	5
Figura 2.2 - Relação Entre os Conjuntos Formados pelos Critérios Qualitativos Usados na Busca de Planos de Seqüenciamento.....	9
Figura 2.3 - Exemplo de um Plano de Seqüenciamento Representado Segundo a Técnica de GANTT.....	12
Figura 3.1 - Representação dos Componentes Básicos de um Sistema Especialista.....	18
Figura 3.2 - Os Princípios da Indução.....	20
Figura 3.3 - Representação Esquemática das Estratégias de Busca <i>Backward</i> e <i>Chaining</i> e <i>Forward Chauning</i>	22
Figura 3.4 - Representação da Arquitetura de uma Rede Neuronal.....	23
Figura 4.1 - Representação Gráfica dos Desempenhos dos Critérios em Função da Carga no Sistema de Manufatura.....	41
Figura 4.2 - Representação da Arquitetura da Rede Neuronal Utilizada na Operacionalização do Modelo.....	44
Figura 4.3 - Representação da "Malha" Obtida com a aplicação da regra FIFO.....	46
Figura 5.1 - Representação Esquemática do Fluxo no <i>Flow-shop</i> Usado na Avaliação do Modelo.....	48
Figura 5.2 - Resultado da Análise do Estado de Equilíbrio do Sistema Simulado.....	53
Figura 5.3 - "Malhas" Obtidas com a Aplicação das Regras de Prioridade SLACK (Figura 5.3a) e SPT (Figura 5.3b), na Fila 1 do Sistema de Manufatura.....	54
Figura 5.4 - Resultados Obtidos para a Minimização do Ciclo Médio de Fabricação (Figura 5.6a - Nível Alto de Criticidade, Figura 5.6b - Nível Médio de Criticidade, Figura 5.6c - Nível Baixo de Criticidade)	60
Figura 5.5 - Freqüência de Chamada das Regras de Prioridade para o Caso de Minimização do Ciclo Médio de Fabricação.....	61

Figura 5.6 - Resultados Obtidos Para a Maximização do Atendimento do Prazo de Entrega (Figura 5.6a - Nível Alto de Criticidade, Figura 5.6b - Nível Médio de Criticidade, Figura 5.6c - Nível Baixo de Criticidade).....	63
Figura 5.7 - Frequência de Chamada das Regras de Prioridade para o Caso de Maximização do Atendimento do Prazo de Entrega.....	65
Figura 5.8 - Resultados Obtidos para a Minimização dos Níveis de Estoques (Figura 5.6a - Nível Alto de Criticidade, Figura 5.6b - Nível Médio de Criticidade, Figura 5.6c - Nível Baixo de Criticidade).....	66
Figura 5.9 - Frequência de Chamada das Regras de Prioridade para o Caso de Minimização dos Níveis de Estoques.....	68
Figura 5.10 Resultados Obtidos Para a Minimização do Ciclo Médio Ponderado de Fabricação (Figura 5.6a - Nível Alto de Criticidade, Figura 5.6b - Nível Médio de Criticidade, Figura 5.6c - Nível Baixo de Criticidade).....	70
Figura 5.11 Resultados Obtidos Para a Maximização do Atendimento do Prazo de Entrega Ponderado (Figura 5.6a - Nível Alto de Criticidade, Figura 5.6b - Nível Médio de Criticidade, Figura 5.6c - Nível Baixo de Criticidade)...	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 -	Processo de aprendizagem do método GENREG.....	26
Quadro 4.1 -	Descrição dos Níveis de Estoque Ideal e Observado para o Caso de uma Encomenda de duas Operações.....	39
Quadro 4.2 -	Algoritmo para Seleção da Melhor Regra.....	43

CAPÍTULO I

1 - INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas poucas áreas dentro da Administração da Empresa mudaram tanto como a administração da produção. Há um movimento crescente de revalorização e reavaliação do papel da manufatura. Tem-se uma grande quantidade de publicações e livros editados a respeito do tema e os congressos internacionais na área de administração da produção têm privilegiado esta nova área, que tem sido considerada por ambos, acadêmicos e profissionais práticos, como tendo importante contribuição a dar ao aumento de competitividade das organizações

Os motivos que levaram a esta reavaliação podem ser classificados em três categorias principais:

"A primeira é a crescente pressão por competitividade que o mercado mundial tem demandado das empresas, com a queda de importantes barreiras alfandegárias protecionistas e o surgimento de novos concorrentes bastante capacitados. A segunda razão é o potencial competitivo que representa o recente desenvolvimento de novas tecnologias de *processo* e de gestão de manufatura, como os sistemas de manufatura integrada por computador e os sistemas flexíveis de manufatura. A terceira razão está relacionada ao recente desenvolvimento de um melhor entendimento do *papel estratégico* que a produção pode e deve ter no atingimento dos objetivos globais da organização." [Corrêa/Gianesi,1993,p.16]

A tecnologia de manufatura tem sido considerada uma das principais áreas de decisão dentro da função de administração de produção. Mudanças na tecnologia de manufatura foram, por longo tempo, vagarosas e graduais, não demandando mudanças profundas nos métodos e técnicas usados para sua gestão e planejamento. Com as novas tecnologias, começou a ser possível produzir produtos diferenciados a taxas horárias que só eram obtidas em produção em massa, com poucos ou um único produto.

A escolha de processos e métodos para organizar a produção através do planejamento da produção traz implicações estratégicas para a organização em termos de capacidade e agilidade em responder às necessidades dos mercados, capacidade (em volume e variedade) e características de produção, nível de investimento necessário, custos unitários envolvidos e tipo de controle e estilo gerencial mais apropriado.

O objetivo do planejamento da produção é gerar planos de produção que tentem atender os critérios pré-estabelecidos pelos administradores da empresa, considerando o cenário econômico descrito anteriormente. Um plano de produção deve definir quanto, quando e onde devem ser produzidas as encomendas disponíveis no período de planejamento. Nas definições de quando e onde produzir fica caracterizado o problema do seqüenciamento, objeto central de estudo deste trabalho. O problema de seqüenciamento tem sido intensivamente estudado nas últimas décadas e, apesar de todos os esforços dispendidos, inexistente um algoritmo exato para a solução dos problemas correntes na prática. Técnicas de Inteligência Artificial têm sido citadas freqüentemente na literatura como um caminho bastante promissor para tratar o problema de seqüenciamento.

1.1 Objetivo do Trabalho

Neste trabalho propõe-se um sistema inteligente de geração de planos de seqüenciamento para um sistema de manufatura do tipo *flow-shop*. A proposta para a criação deste sistema divide-se em duas fases: a fase inicial, compreendendo a avaliação de estratégias para vários contextos, e a fase operacional, que trata da aplicação dos resultados obtidos com a avaliação.

Na fase inicial faz-se uso de simulação para criar uma base de informações contendo os desempenhos de algumas estratégias para vários contextos operacionais do sistema de manufatura. A fase operacional consiste do uso de técnicas de Inteligência Artificial para utilizar estas informações de modo que o sistema possa escolher a melhor estratégia sempre que uma situação de decisão for detectada.

1.2 Importância do Trabalho

No modelo proposto, os planos gerados observam as preferências estabelecidas pela gerência quanto aos objetivos clássicos do planejamento da produção: minimização do ciclo médio de fabricação, maximização do atendimento do prazo de entrega e a minimização do nível de estoque, permitindo ao decisor uma certa flexibilidade no estabelecimento de objetivos a serem atingidos, tanto isoladamente como através de uma composição dos mesmos. A geração de planos através do sistema aqui proposto prevê

ainda a consideração do contexto atual do sistema de manufatura, caracterizado neste trabalho pela carga de trabalho submetida ao sistema de manufatura e pelo grau de criticidade média (em relação do prazo de entrega) das filas que se formam perante as máquinas de processamento.

As dificuldades encontradas com o uso de métodos analíticos e heurísticos para tratar o problema do seqüenciamento têm exigido a utilização de técnicas mais flexíveis na abordagem do problema. A importância do trabalho está na apresentação de um modelo de geração de planos de seqüenciamento segundo objetivos delineados pela gerência levando em consideração as situações de contexto.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado em seis capítulos:

No primeiro capítulo é apresentada uma introdução ao tema, bem como são estabelecidos os objetivos e a importância do trabalho.

O capítulo II descreve o problema geral do planejamento da produção e, em particular, descreve o problema do seqüenciamento, objeto central de estudo neste trabalho.

Em seguida, no capítulo III, descrevem-se técnicas usando ferramentas da Inteligência Artificial - Sistemas Especialistas e Redes Neurais - para a abordagem de problemas relativos ao seqüenciamento. O uso destas técnicas é indicado devido às dificuldades envolvidas com o uso de métodos analíticos e heurísticos para abordagem do problema de seqüenciamento.

No capítulo IV é formalizado o modelo proposto para a geração de planos de seqüenciamento.

O capítulo V consiste da explanação da aplicação do modelo proposto num sistema de manufatura do tipo *flow-shop* bem como dos resultados obtidos. Inicialmente descrevem-se o sistema de manufatura utilizado para aplicação do modelo proposto e as variáveis pertinentes ao problema. Na seqüência, descrevem-se a fase da avaliação de desempenho das regras de prioridade e a fase operacional do modelo. O capítulo é concluído com a apresentação dos resultados obtidos.

No capítulo V apresentam-se as conclusões conseqüentes do desenvolvimento do trabalho e as recomendações para futuras pesquisas.

O trabalho ainda inclui os Anexos I e II. O Anexo I contém a descrição do método de inferência *Geometrical Approximate Reasoning*. No Anexo II encontra-se a listagem do modelo de simulação programado na linguagem SIMAN.

CAPÍTULO II

2 - O PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO E O PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO

2.1 - Considerações Gerais

A produção pode ser vista como um processo de transformação com entradas - constituídas por matérias-primas, equipamentos e pessoal - e saídas - correspondentes a bens materiais e/ou serviços [Figura 2.1].

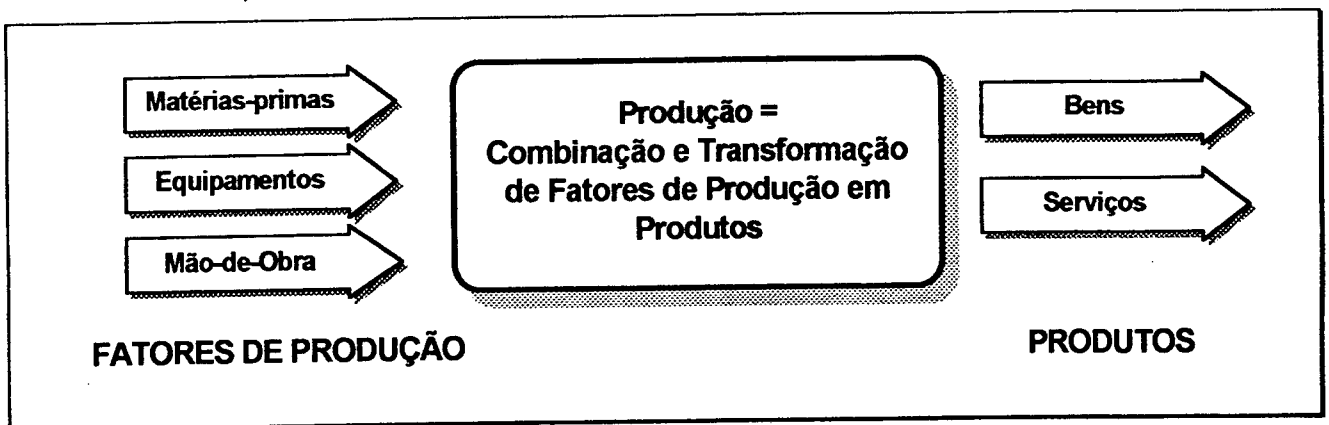


Figura 2.1 - Produção como Processo de Transformação [Fonte: Kistner/Steven, 1990,p.2]

As atividades do planejamento da produção, [Kistner/Steven apud Anthony,1990,p.12], podem comumente ser categorizadas em três níveis hierárquicos:

Estratégico: engloba planos empresariais cujos efeitos se estendem no longo prazo, em geral, com horizonte de planejamento de um ano, como por exemplo, o desenvolvimento de produtos, o planejamento de prazos, o planejamento do fornecimento de materiais e o planejamento de melhor utilização da mão-de-obra.

Tático: nível onde geralmente os planos procuram garantir a obtenção e o uso eficiente dos recursos disponíveis a fim de que os objetivos traçados sejam atingidos.

Operacional: neste nível deve ser garantido que tarefas específicas sejam executadas de forma eficiente e eficaz.

O planejamento operacional tem por objetivo realizar o planejamento da produção de acordo com a estrutura do processo de produção. A estrutura do processo pode ser classificada em três tipos:

- 1) Produção sob Encomenda: produção de artigos especiais, especificados pelo consumidor. Neste caso, devem ser definidos: a seqüência com que as encomendas serão trabalhadas e o plano de trabalho das máquinas (ou seja, a atribuição da encomendas às máquinas no decorrer do tempo).
- 2) Produção em Série: uma quantidade limitada de produtos é fabricada, em etapas, na mesma unidade de produção. Neste caso, devem ser definidos o tamanho de uma série de produtos e a seqüência com que a série de produtos deva ser produzida.
- 3) Produção Contínua (ou produção em massa): quando há um único fluxo de transformação das matérias-primas em produtos acabados, geralmente assemelhados.

O objetivo do planejamento da produção é gerar planos de produção que tenham abrangência no curto e médio prazos. Por esta razão, são classificados geralmente como de natureza tática e principalmente operacional. A fim de que os objetivos clássicos do planejamento da produção - minimização do ciclo médio de fabricação, maximização da ocupação das máquinas, minimização dos níveis de estoques e maximização do atendimento do prazo de entrega - sejam atingidos tão bem quanto possível, os planos devem especificar quanto, quando e onde cada produto será fabricado. Deve-se ressaltar que não existe um plano que garanta a otimização simultânea de todos os objetivos, o que obriga o decisor a adotar planos de produção que constituem de soluções compromissadas com estes objetivos, ou seja, cujas ponderações possam variar em cada período de planejamento.

O controle da produção tem a função de monitorar a realização da produção, detectar e eliminar discrepâncias entre realizado e planejado. Compreende especialmente controle da qualidade, controle dos prazos e controle das quantidades planejadas e realmente produzidas.

A definição dos valores de quanto, quando, e onde produzir deveria ser determinada de forma simultânea pois existe uma relação intrínseca entre estas variáveis. Porém, na prática corrente, a sistemática geral para determinar os valores acima é feita por etapas, seguindo-se o que dita o bom senso: inicialmente determinam-se as quantidades a serem produzidas (problema relativo à determinação dos lotes de fabricação), para somente então determinar-se onde e quando estes lotes serão fabricados. Nesta última etapa do planejamento da produção encontra-se inserido o problema do seqüenciamento.

2.2 - O Problema de Seqüenciamento

O problema de seqüenciamento consiste em apurar a ordem de fabricação das encomendas nos equipamentos disponíveis, bem como definir as datas de início de todas as operações relativas às encomendas que devam ser completadas no período de planejamento. A caracterização de um problema de seqüenciamento envolve o conhecimento da seqüência de máquinas e dos tempos de processamento das operações de cada encomenda. A seqüência de máquinas de uma encomenda é tecnologicamente especificada *a priori*. Ela define a ordem de máquinas que deverão ser visitadas por uma encomenda antes de esta ser concluída.

Três versões clássicas de problemas de seqüenciamento têm sido bastante estudadas:

- *flow shop*, que se caracteriza por tratar de encomendas que tenham sempre a mesma seqüência de máquinas;
- *job shop*, caso em que a seqüência de máquina é diferente para cada encomenda;
- *open shop*, quando a seqüência de máquinas existe mas não é pré-fixada.

Para uniformizar o estudo dos problemas de seqüenciamento, e portanto viabilizar a comparação de resultados, são estabelecidas algumas premissas básicas que devem ser atendidas:

- (1) os tempos de processamento das encomendas devem ser conhecidos *a priori*;
- (2) o processamento de uma encomenda não pode ser interrompido;
- (3) as máquinas podem processar somente uma encomenda de cada vez;
- (4) as máquinas em operação não podem sofrer paralisações;
- (5) a ordem de visitação das máquinas de cada encomenda é conhecida *a priori*;
- (6) uma encomenda é considerada uma unidade indivisível, ou seja, a cada instante ela poderá estar sendo processada por somente uma máquina;

Um problema qualquer de seqüenciamento é caracterizado basicamente pelas seguintes variáveis:

- i - Encomenda ($i = 1, 2, \dots, n$);
- j - Máquina ($j = 1, 2, \dots, m$);
- $t_{i,j}$ - Tempo de processamento da encomenda i na máquina j ;
- S_i - Seqüência de máquinas da encomenda i .

Os problemas diferenciam-se essencialmente quanto ao número de encomendas a serem processadas e quanto ao processo de chegada. O processo de chegada das encomendas pode ser do tipo dinâmico ou estático. Num processo estático, um certo número de

encomendas chega simultaneamente à fábrica, que está imediatamente disponível para processar as encomendas. Num problema dinâmico, o processo de chegada das encomendas é intermitente e a fábrica permanece em contínuo processamento.

O encaminhamento de solução para o problema do seqüenciamento passa pela avaliação da complexidade deste problema: se existirem, por exemplo, n encomendas a serem processadas em uma máquina, existirão $n!$ planos de seqüenciamento possíveis; se houver m máquinas disponíveis, o número de planos de seqüenciamento possíveis eleva-se para $(n!)^m$. Considerando-se adicionalmente a seqüência de máquinas, o número de planos a ser considerado conduz ao conjunto de planos viáveis, cujo número de elementos é menor, mas ainda assim consideravelmente grande, o que impede a busca da solução por algum método enumerativo [Kistner/Steven, 1990, p.119].

2.2.1 - Critérios Usados na Geração de Planos de Seqüenciamento

O processo de busca de soluções para um problema de decisão que envolve muitas alternativas exige a fixação de um ou mais critérios. A existência de um critério permite o estabelecimento de uma ordem de preferência para os elementos do conjunto de alternativas.

Os critérios usados podem ser classificados em:

- critérios qualitativos;
- critérios quantitativos.

Critérios Qualitativos

Os critérios qualitativos referem-se aos conceitos de viabilidade dos planos de seqüenciamento

- a) Planos Viáveis: A viabilidade é uma exigência que deve ser sempre atendida para qualquer plano de seqüências. Ela é atendida quando a seqüência de máquinas é atendida e os tempos de conclusão das operações forem atendidos. Além disso, não pode ocorrer nenhuma superposição de encomendas sobre uma máquina nem a superposição de operações em uma encomenda.
- b) Planos Semi-Ativos: Um plano é chamado de semi-ativo, se não contiver tempos de espera desnecessários.
- c) Planos Ativos: Um plano ativo tem, além de atender o critério de viabilidade, a propriedade de que nenhuma operação pode ser adiantada sem que alguma outra seja atrasada.

Estes três critérios limitam o número de planos de seqüenciamento a serem considerados no planejamento. Vale a seguinte relação entre os conjuntos:

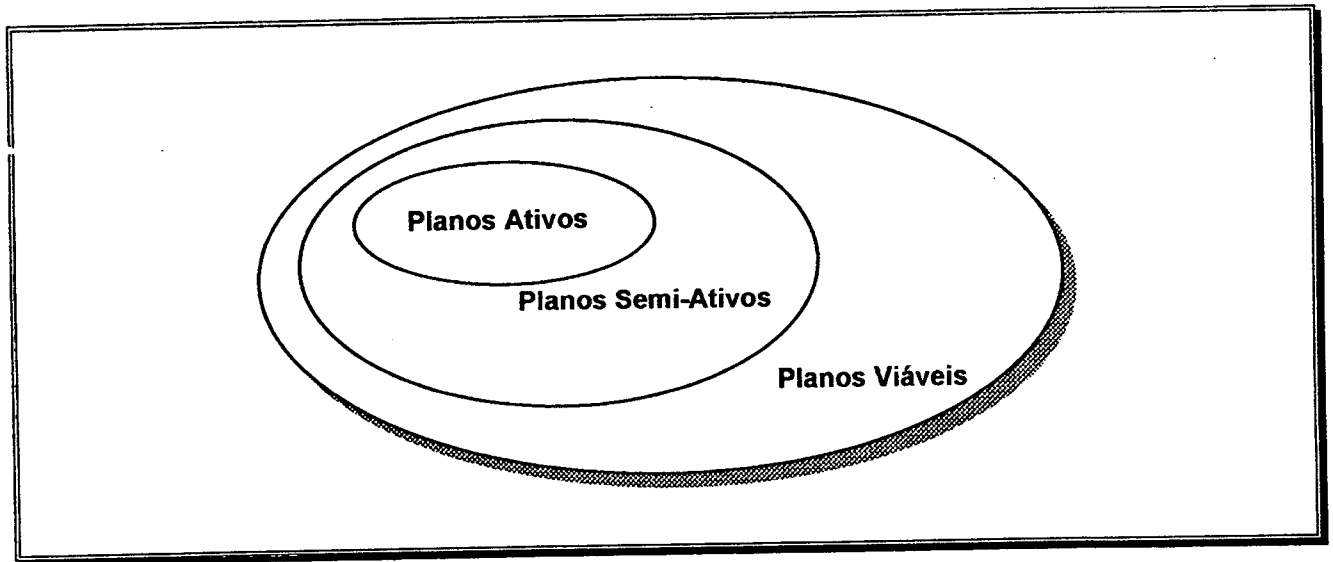


Figura 2.2 - Relação entre os Conjuntos Formados pelos Critérios Qualitativos Usados na Busca de Planos de Seqüenciamento

Critérios Quantitativos

Uma limitação adicional para a geração de planos de seqüenciamento é dada pela pré-fixação de critérios quantitativos, os quais devem ser observados no planejamento. A seguir serão discutidos alguns dos critérios mais usados no seqüenciamento:

a) Critérios relativos ao tempo: Neste caso deseja-se minimizar uma variável importante de tempo.

Seja:

- i - Índice das encomendas.
- j - Índice das operações.
- W_i - Tempo total de espera da encomenda i .
- $W_{i,j}$ - Tempo total de espera da encomenda i para a operação j .
- $t_{i,j}$ - Tempo de processamento da encomenda i na operação j .
- F_i - Ciclo médio de fabricação da encomenda i .
- FP_i - Ciclo médio de fabricação ponderado da encomenda i .
- TP_i - Tempo total de processamento da encomenda i .
- m - Número de operações da encomenda i .

Então:

- o tempo total de espera da encomenda i é então dado por:

$$W_i = \sum_{j=1}^m w_{i,j}$$

- o ciclo médio de fabricação da encomenda i será dado por:

$$F_i = \sum_{j=1}^m (w_{i,j} + t_{i,j})$$

- o ciclo médio de fabricação ponderado da encomenda i será dado por:

$$FP_i = \sum_{j=1}^m (w_{i,j} + t_{i,j}) \times TP_i$$

O ciclo médio de fabricação ponderado é uma forma alternativa para medir o ciclo médio de fabricação das encomendas. A ponderação do ciclo de fabricação de cada encomenda em relação dos tempos de processamento faz com que encomendas com maior tempo processamento influam mais na obtenção do valor final do critério que encomendas com menor tempo de processamento.

Com a minimização do tempo em processo procura-se processar as encomendas disponíveis tão rápido quanto possível a fim de liberar os equipamentos para outras encomendas. Pode-se mostrar que o critério de minimização do tempo médio total de espera é equivalente ao critério de minimização do ciclo médio de fabricação.

b) Critérios relativos a custos: O processamento de uma encomenda em uma dada máquina exige geralmente operações de preparação de máquina. A estas operações estão associados custos de preparação. Geralmente estes custos dependem da seqüência e por isto devem ser considerados na geração de planos.

2.2.2 - Métodos de Solução do Problema de Seqüenciamento

Os métodos de solução para o problema de seqüenciamento podem ser classificados em modelos exatos e modelos heurísticos. A aplicação dos métodos exatos existentes, resume-se a pequenos problemas devido ao enorme crescimento verificado no número de variáveis do modelo para problemas observados na prática. A avaliação da complexidade do problema de seqüenciamento mostra que o esforço necessário para determinação da solução ótima cresce exponencialmente com o aumento das dimensões do problema. Isto quer dizer que somente para problemas de pequeno porte pode ser garantida, em tempos aceitáveis, a obtenção da solução ótima. Este fato sugere a utilização de métodos heurísticos de busca, que têm encontrado efetivamente grande ressonância na prática corrente.

Entre os métodos exatos pode-se destacar o modelo de MANNE e entre os métodos heurísticos, o método de GANTT, o método de HELLER/LOGEMANN e o uso das regras de prioridade associado aos dois anteriores.

a) Método de MANNE [Kistner/Steven, 1990,p.121]

O modelo de Manne é baseado na técnica de programação linear. Tem uma formulação elegante, porém sua aplicação é inviável pelo considerável aumento no número de variáveis, especialmente binárias. Para um problema com seis encomendas diferentes e cinco máquinas ($n=6$; $m=5$), ter-se-ia segundo o modelo de Manne, um problema de programação linear com 180 restrições, 135 variáveis sendo 75 variáveis binárias e conseqüentemente $2^{75} = 3,77 \times 10^{22}$ alternativas.

b) Método de GANTT [Kistner/Steven, 1990,p.119]

É uma técnica visual de geração e apresentação de planos de seqüenciamento. Sucessivamente são incluídas as operações subseqüentes num gráfico, sempre observando a seqüência de máquinas das encomendas [Figura 2.3]. O método de GANTT foi a primeira técnica usada para tratar problemas de seqüenciamento tendo se mostrado um meio auxiliar muito valioso para a geração de planos. As vantagens do método incluem a facilidade de operação e a grande flexibilidade, já que a eventual inclusão de novas encomendas ou a paralisação de máquinas pode ser facilmente incorporada aos planos já existentes. Por outro lado, as desvantagens do método podem ser relevantes: a subjetividade do planejador tem influência na qualidade dos planos (exige-se experiência); em situações complexas (com várias máquinas e vários tipos de encomendas), o planejador experiente tende a perder a visão geral do plano prejudicando eventualmente a qualidade do mesmo; e que nenhum critério é observado para orientar a geração dos planos, pois apenas planos viáveis são considerados.

Por exemplo, seja um problema do tipo *job shop* com cinco encomendas e quatro máquinas. As seqüências de máquinas das encomendas e os tempos de processamento de cada operação são dados no Quadro da Figura 2.3. Então um plano de seqüenciamento viável (e neste caso ativo), seria o que está representado na Figura 2.3.

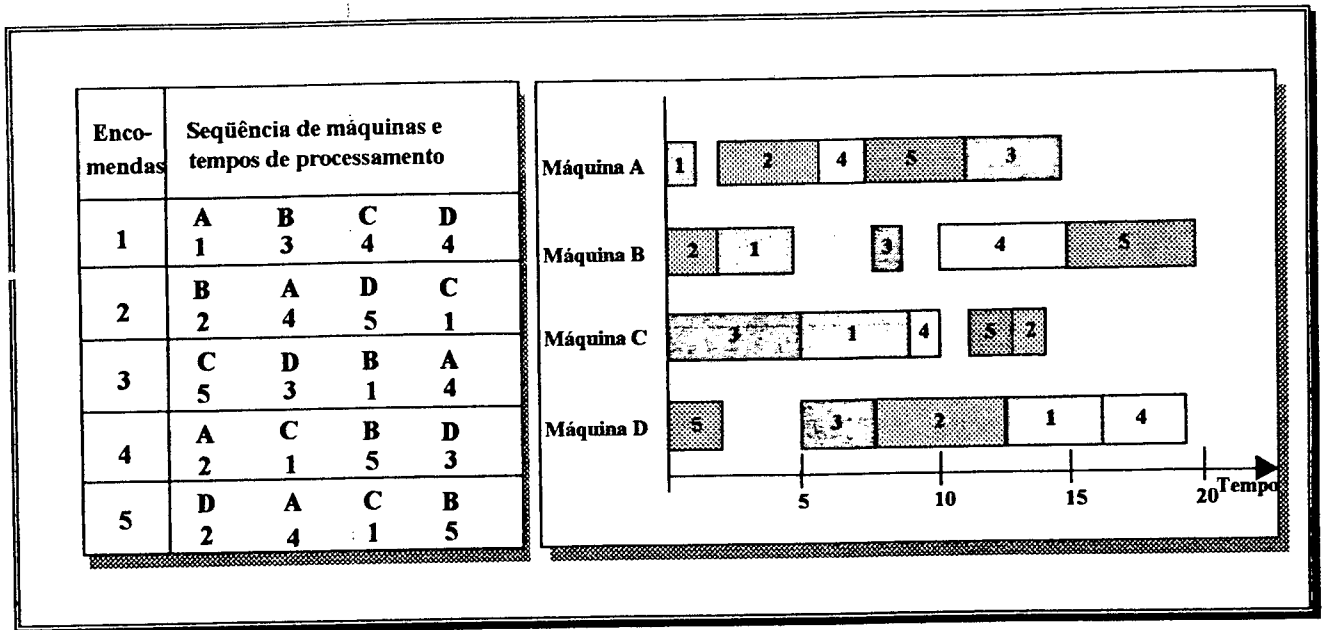


Figura 2.3 - Exemplo de um Plano de Seqüenciamento Representado Segundo a Técnica de GANTT

c) Método de HELLER/LOGEMANN [Kistner/Steven, 1990,p.126]

O objetivo deste método é a construção sistemática de planos viáveis de seqüenciamento. O algoritmo apenas formaliza o procedimento usado pela técnica de GANTT.

A idéia básica é a seguinte: partindo-se do início do período de planejamento, quando todas as máquinas ainda estão livres, são atribuídas, sucessivamente, encomendas às máquinas observando-se a seqüência de máquinas e a disponibilidade destas. Dificuldades de atribuição podem ocorrer quando duas ou mais encomendas podem ser alocadas a uma máquina que está momentaneamente livre. Nestes casos torna-se necessário priorizar a alocação das encomendas. Em geral, usa-se o critério de se dar maior prioridade àquela encomenda que está aguardando pelo processamento há mais tempo. Esta forma de priorização é também conhecida como a regra FIFO que será apresentada na seção seguinte. Outras regras podem ser utilizadas se outros critérios forem estabelecidos.

d) Regras de Prioridade

Regras de prioridade são as heurísticas mais usadas para gerar planos de seqüenciamento. Uma regra de prioridade dita a seqüência de processamento das encomendas frente a uma máquina. As prioridades são ditadas segundo um ou mais objetivos. Pode-se classificar o uso das regras de prioridade em regras elementares e regras combinadas.

Regras Elementares - é o uso intermitente de uma única regra durante o período de planejamento e geralmente tende a atingir só um objetivo. A seguir são apresentadas algumas das regras mais populares, sendo antes definidas algumas grandezas pertinentes ao uso destas regras.

Seja: -

- t - Instante do período de planejamento no qual deve ser decidida uma nova prioridade.
- n - Número de encomendas no período de planejamento.
- i - Índice das encomendas.
- j - Índice das operações.
- d_i - Prazo de entrega da encomenda i .
- $p_{i,j}$ - Tempo de processamento da operação j da encomenda i .
- TP_i - Tempo total de processamento da encomenda i .
- $RP_i(t)$ - Tempo restante de operação da encomenda i no instante t do período de planejamento.
- $R_{i,1}$ - Instante do período de planejamento em que a encomenda i está disponível para iniciar seu processamento.
- C_i - Instante do período de planejamento em que a encomenda i é concluída.
- $R_{i,j}$ - Instante do período de planejamento em que a encomenda i está disponível para a operação j .
- d_i - Prazo de entrega da encomenda i .
- F_i - Ciclo de fabricação da encomenda i , ou o tempo em que a encomenda permaneceu no sistema de manufatura.
- $S_i(t)$ - Folga da encomenda i no instante t do período de planejamento.
- $N_{i,j}(t)$ - Conjunto de encomendas que estão na fila correspondente à j -ésima operação da encomenda i , no instante t do período de planejamento.
- $Z_i(t)$ - Prioridade da encomenda i no instante t do período de planejamento.

Então:

O **ciclo de fabricação**, F_i , é definido como sendo o tempo decorrido desde a entrada da encomenda i no sistema de manufatura até sua conclusão. Logo,

$$F_i = C_i - R_{i,1}$$

O prazo de entrega da encomenda i , d_i , é definido geralmente pela administração de vendas, sendo portanto, uma variável externa ao planejamento da produção.

A folga, $S_i(t)$, é o tempo ainda disponível para a conclusão da encomenda i , no instante t do período de planejamento e quando a $(j-1)$ -ésima operação já estiver concluída, sem que o prazo de entrega seja prejudicado. Logo,

$$S_i(t) = d_i - R_{i,j} - RP_i(t)$$

Dentre as regras de prioridade de uso corrente destacam-se:

- SPT (Shortest Processing Time) - Seleciona a encomenda com o menor tempo total de processamento, isto é, seleciona o $Z_i(t)$ mínimo, onde $Z_i(t) = TP_i$. Esta regra prioriza aquelas encomendas cujo tempo de operação for mais curto, possibilita maior ocupação de máquinas e ciclos médios de fabricação menores. Um dos problemas que surgem quando se usa a regra SPT é que as encomendas cujo tempo de operação for longo, permanecem aguardando por muito tempo pelo processamento, prejudicando geralmente o atendimento do prazo de entrega das encomendas com longo tempo de processamento.
- SRPT (Shortest Remaining Processing Time) - Seleciona a encomenda com o menor tempo restante de processamento, isto é, seleciona o $Z_i(t)$ mínimo, onde $Z_i(t) = RP_i(t)$. Com a aplicação desta regra dá-se maior prioridade à encomenda que já está mais próxima do tempo de conclusão. Tem comportamento semelhante à regra SPT com relação aos objetivos já discutidos.
- SLACK (Least Amount of Slack) - Seleciona a encomenda com a menor folga, isto é, seleciona o $Z_i(t)$ mínimo, onde $Z_i(t) = S_i(t)$. Esta regra dá maior prioridade àquelas encomendas cuja diferença entre o prazo de entrega e a parcela ainda não completada do tempo de processamento, seja menor. Uma das vantagens desta regra é a possibilidade de obter um bom atendimento do prazo de entrega. A desvantagem desta regra é a tendência do ciclo médio de fabricação ser maior que o da regra SPT e assemelhadas.
- FIFO (First In, First Out) - Seleciona a encomenda de acordo com "a primeira encomenda a entrar é a primeira a sair", isto é, seleciona o $Z_i(t)$ mínimo, onde $Z_i(t) = R_{i,j}$ para $i \in N_{i,j}(t)$. Sua vantagem é a de levar ao bom atendimento do prazo de entrega e boa ocupação de máquinas, porém proporciona ciclos médios de fabricação maiores do que as regras SPT e assemelhadas.

- **EDT (Earliest Due Date)** - Selecciona a encomenda de acordo com a que tiver o menor prazo de entrega, isto é, selecciona o $Z_i(t)$ mínimo, onde $Z_i(t)=d_i$. Tem a propriedade de gerar planos que proporcionam bom atendimento do prazo de entrega.
- **SMT (Smallest multiplication: $Z_i(t)=p_{i,j}(t) \times TP_j$)** - Selecciona a encomenda com o menor valor obtido pela multiplicação do tempo de processamento na operação iminente pelo tempo total de processamento, ou seja, selecciona $Z_i(t)$ mínimo, onde $Z_i(t)=p_{i,j}(t) \times TP_j$.

Regras Combinadas - Regras elementares tendem a perseguir apenas um objetivo em detrimento de outros. Uma alternativa para contornar este problema seria combinar regras elementares, aproveitando as propriedades positivas de cada uma para atingir satisfatoriamente vários objetivos simultaneamente. A combinação pode ser:

- **Aditiva:** os valores das prioridades das regras elementares são somados formando um novo critério. Neste caso surge o problema de qual peso dar a cada regra elementar na composição final.
- **Multiplicativa:** a combinação se dá através do produto dos valores elementares.
- **Alternativa:** de acordo com a situação do sistema de manufatura, usa-se aquela regra que se supõe ser mais eficiente. Por exemplo: inicia-se com a regra SPT até que o prazo de entrega das encomendas com tempo de processamento mais longo seja prejudicado. Então passa-se para a regra SLACK que irá priorizar as encomendas mais críticas em relação ao prazo de entrega, ou seja, aquelas encomendas que foram proteladas pela regra SPT por terem tempo de processamento mais longo. O problema desta forma de combinação é estabelecer os critérios que devem definir o instante para a alteração da regra de prioridade a ser usada.

A desvantagem das regras prioridade é a "visão miópica" inerente ao uso destas regras. Regras de prioridade têm uma "visão muito curta" com relação ao futuro do horizonte de planeamento e em relação às outras unidades produtivas diretamente envolvidas. Por outro lado, todo plano de seqüenciamento gerado pelo uso de regras de prioridade é do tipo ativo, ou seja, é um plano que não dispõe de tempos de espera desnecessários, tendendo a maximizar, desta forma, a ocupação de máquinas e a minimizar o ciclo de fabricação.

2.3 - Considerações Finais

O objetivo do planejamento da produção é gerar planos de produção, que têm abrangência no curto e médio prazos. Os planos devem especificar quanto, quando e onde cada produto será fabricado de tal forma que os objetivos do planejamento da produção sejam atingidos tão bem quanto possível. Na prática comum determinam-se inicialmente as quantidades a serem produzidas para somente então determinar-se onde e quando estes lotes serão fabricados, ficando caracterizado na última etapa o problema do seqüenciamento.

A solução para o problema do seqüenciamento envolve métodos exatos cuja aplicação resume-se a pequenos problemas e métodos heurísticos, que têm encontrado efetivamente grande ressonância na prática corrente. Entre os métodos heurísticos a técnica mais usada é o uso das regras de prioridade.

No capítulo III serão discutidas algumas técnicas de Inteligência Artificial usadas no tratamento do problema de seqüenciamento, dentre as quais pode-se destacar os Sistemas Especialistas e as Redes Neurais.

CAPÍTULO III

3 - SIMULAÇÃO E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO

O uso de técnicas de Inteligência Artificial tem sido freqüentemente sugerido para tratar o problema da geração de planos de seqüenciamento, e assim superar algumas das dificuldades inerentes aos métodos descritos no capítulo anterior [*Pierreval/Ralambondrainy, 1990; Chandra/Talavage, 1991; Wu/Wysk, 1981; Bel et al, 1986; Chu/Portmann, 1991*].

Neste capítulo serão discutidas algumas técnicas de Inteligência Artificial que têm sido aplicadas na área do Planejamento da Produção e, em especial, no que toca à solução de problemas de seqüenciamento. Adicionalmente, é feita uma exposição das potencialidades do uso da Simulação como instrumento para realizar o levantamento do conhecimento necessário aos sistemas chamados "inteligentes".

3.1 - Inteligência Artificial e Simulação na Abordagem do Problema de Seqüenciamento

Segundo Waterman [1986,p.5], Inteligência Artificial é parte da ciência da computação cujo objetivo, entre outros, é desenvolver "programas inteligentes" para computadores. Para Widman *et. al* [1989,p.5], programas de Inteligência Artificial executam tarefas que, se executadas por humanos, seriam consideradas inteligentes. Dentre as aplicações mais populares da Inteligência Artificial destacam-se Sistemas Especialistas e Redes Neurais.

3.1.1 - Sistemas Especialistas

Sistemas Especialistas são programas que usam conhecimento e procedimentos de inferência para resolver problemas suficientemente complexos, e que requerem significativa experiência humana para o encaminhamento de alguma solução. Os principais componentes de um sistema especialista [Ver Figura 3.1] são :

- a base de conhecimento;
- e a máquina de inferência.

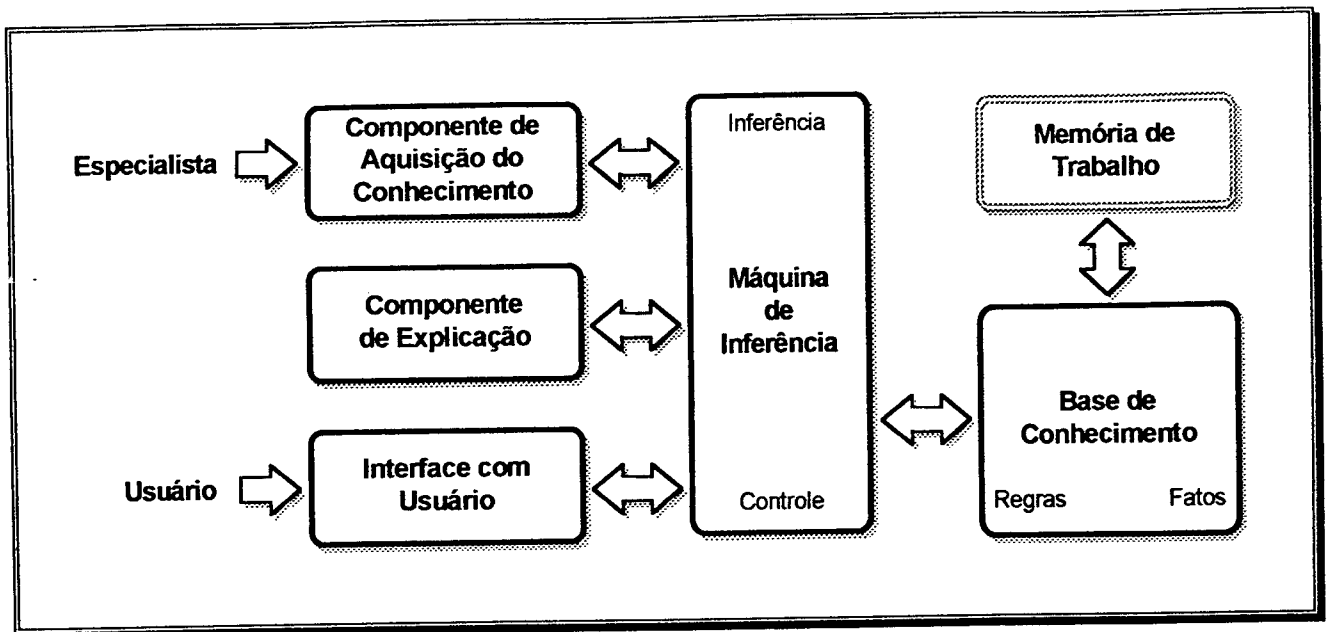


Figura 3.1 - Representação dos Componentes Básicos de um Sistema Especialista
 [Fonte:Harmon/King, 1985, p.34]

a) - Base de conhecimento

A base de conhecimento consiste de informações essenciais sobre o modelo em estudo, sendo o conhecimento representado geralmente, na forma de redes semânticas, regras de produção, frames e expressões lógicas [Brudnick et al, 1985, p.474].

- Uma rede semântica é uma coleção de objetos chamados *nós*. Os nós são conectados entre si por arcos chamados *links*. Os *nós* são usados para representar objetos e descritores, onde objetos podem ser objetos físicos ou podem ser entidades conceituais tais como atos ou eventos, e descritores proporcionam informações adicionais sobre os objetos. *Links* relacionam objetos e descritores. Um *link* (ligação) pode representar uma relação. Herança é outra característica das redes semânticas. Refere-se a habilidade de um nó de "herdar" características de outros nós que estão relacionados a ele.
- As regras de produção são usadas para representar relações. As regras de produção são compostas de um conjunto de premissas e um conjunto de conclusões que são verificadas somente se as premissas forem atendidas. Cada uma das partes da premissa é chamada de uma *expressão*, ou uma *if clause* (*cláusula*). A conclusão pode conter uma ou várias expressões e pode ser chamada de *then clause*. As cláusulas são conectadas com operadores lógicos do tipo *and*, *or*, *not*, etc.

- Um **frame** é uma forma de descrição de um objeto que contém *slots* para todas as informações associadas com o objeto. *Slots* podem estocar valores, que podem ser *default values* (valores padrões), ponteiros para outros *frames*, conjunto de regras, ou procedimentos através dos quais os valores podem ser obtidos. Cada objeto contém um conjunto de *slots*. Alguns *slots* contém propriedades associadas com o objeto do *frame*. Outros *slots* podem incluir *default values*, mostrar instruções, ou conjuntos de regras. Os *frames* são interligados para permitir a herança e são particularmente úteis para especificar todas as características de um objeto.
- **Lógica** proporciona outra maneira de representar o conhecimento. Existem várias notações usando lógica e as duas mais usadas, conforme Harmong/King [1985,p.35] são a lógica proposicional e o cálculo de predicados. Na lógica proposicional usa-se declarações que são falsas ou verdadeiras. Cálculo de predicados é uma extensão da lógica proposicional. Uma unidade elementar na lógica dos predicados é um objeto. As declarações sobre objetos são chamadas de predicados.

Segundo Waterman [1986, p.12], a aquisição do conhecimento e sua estruturação é uma das maiores dificuldades no desenvolvimento de sistemas especialistas. O conhecimento usado por um sistema especialista pode ter origem de várias fontes, tais como livros-texto, base de dados, simulação, estudo de casos, dados empíricos, e mesmo experiência pessoal. Dentre as técnicas mais difundidas para a aquisição de conhecimento sobressai-se o uso de algoritmos de indução.

Para grande parte dos sistemas inteligentes desenvolvidos para tratar o problema de seqüenciamento, a geração da base de conhecimento está fundamentada no uso de *algoritmos de indução*.

O processo de *indução* é a derivação de conclusões mais gerais a partir de fatos particulares. A fim de estar-se apto a usar a indução necessita-se dos seguintes pré-requisitos [Hart, 1989, p.120f]:

- *Exemplos* - o conjunto de exemplos ou conjunto de treinamento forma a base do processo de indução. Um conjunto de exemplos inadequado ou incompleto pode resultar em regras de baixa produtividade.
- *Atributos* - os exemplos têm conjuntos de características que os descrevem, e possibilitam a comparação dos mesmos com exemplos diferentes. Algumas destas características dos fatores influenciam as regras. As características podem ser:
 - categorias descritivas (por exemplo: pequeno, médio, grande)
 - medidas (por exemplo: medida da altura)

- valores inteiros (por exemplo: idade em anos)
 - descrições lógicas (por exemplo: falso, verdadeiro)
 - números especiais (por exemplo: datas).
- *Classes* - as classes representam a decisão ou classificação pelo especialista, por exemplo "sim, o paciente encontra-se enfermo"; ou, rejeita esta aplicação.
 - *Algoritmos Indutivos* - o algoritmo é o método que o sistema de indução usa para induzir regras do conjunto de treinamento. O mesmo depende da forma do conjunto de exemplos e das saídas desejadas. Geralmente, as descrições geradas por *algoritmos de indução* são mais compactas do que o conjunto original de informações [Muggleton, 1990, p.13ff].

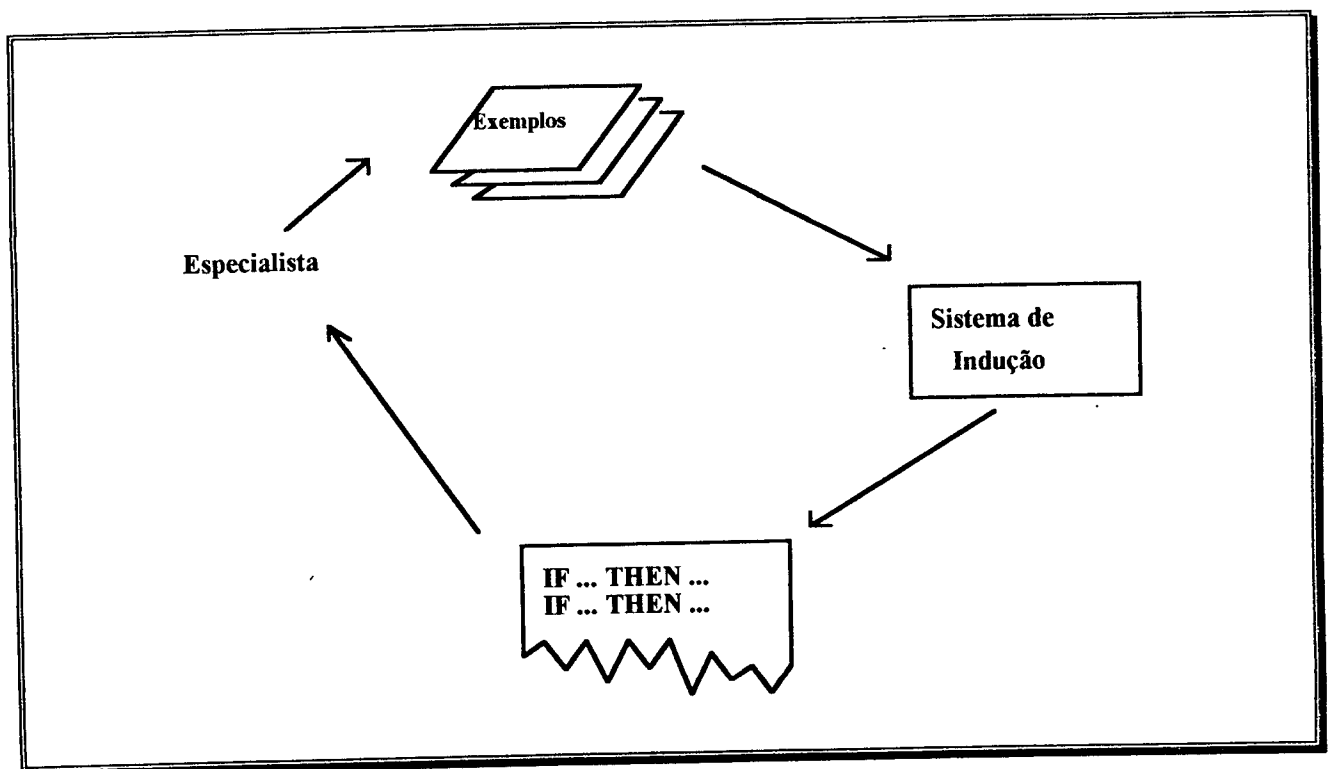


Figura 3.2 - Os Princípios de Indução [Fonte: Hart, 1986, p.124]

Os princípios de indução, representados graficamente na Figura 3.2 seguem a seguinte seqüência: o especialista define um conjunto de exemplos; em seguida, o sistema analisa estes exemplos, produzindo regras de produção do tipo "IF ... THEN ...", que descreverão os padrões dos exemplos. Os resultados induzidos serão examinados pelo especialista que pode, se for o caso, mudar o conjunto de exemplos.

Nos modelos desenvolvidos para geração de planos de seqüenciamento, freqüentemente o conjunto de *exemplos*, a partir dos quais são induzidas as regras de produção, é adquirido

através da simulação. Os *exemplos* podem ser o desempenho das regras de prioridade em relação aos critérios pré-estabelecidos. Na próxima seção será descrito o papel da simulação na extração do conjunto de *exemplos*.

b) - Máquina de inferência

No item anterior descreveram-se aspectos gerais sobre a base de conhecimento e sobre a aquisição desse conhecimento através de métodos de indução. O uso dessa base de conhecimento no sistema é feito pela máquina de inferência. As duas maiores tarefas da máquina de inferência são a de examinar fatos e regras existentes na base de conhecimento adicionando novos fatos quando possível, e decidir a seqüência em que esta inferência será feita. A máquina de inferência necessita seguir estratégias para extrair e controlar o processo de inferência.

A estratégia mais comum de inferência usada em sistemas com base de conhecimento é a aplicação da uma regra lógica chamada *modus ponens* [Harmong/King, 1985, p.49]. Esta regra diz que quando *A* é verdadeiro e quando uma regra diz "If *A*, then *B*", será válido concluir que *B* é verdadeiro. Pode-se considerar que o método *modus ponens* é usado para gerar novos fatos a partir de regras.

A estratégia de controle guia o sistema de conhecimento a usar os fatos e as regras que compõem a base de conhecimento, bem como as informações adquiridas através do usuário. Um sistema com base de conhecimento deve ter uma maneira de decidir por onde começar a inferência. Também existe a necessidade de resolver conflitos que ocorrem quando surgem linhas alternativas de inferência, como por exemplo, pode ser que num dado instante o sistema encontre cinco regras cujas premissas são atendidas. A máquina de inferência precisa decidir então por qual regra continuar a inferência. As duas maneiras de controle da inferência mais comumente usadas são a backward chaining (encademaneto regressivo) e a forward chaining (encadeamento progressivo).

Quando o procedimento de controle da inferência for do tipo backward chaining [Figura 3.3a] o sistema tenta achar objetivos recursivamente, primeiro enumerando as premissas que atendem o objetivo, e em seguida tentando achar ou estabelecer aquelas premissas que tenham como conclusão as premissas anteriores que atendiam ao objetivo [Roth et al., 1983, p.399ff]. Este processo continua até que uma questão é respondida ou um valor pré-definido é atingido.

Em sistemas que usam o procedimento de controle forward chaining [Figura 3.3b] as premissas das regras são verificadas para uma dada situação se são verdadeiras ou não. Em seguida, então as conclusões são adicionadas à lista de fatos conhecidos como

verdadeiros e as regras são analisadas novamente [Harmon/King, 1986, p.55]. O processo é repetido até que a inferência atinge um objetivo, ou nenhum objetivo possa ser atendido.

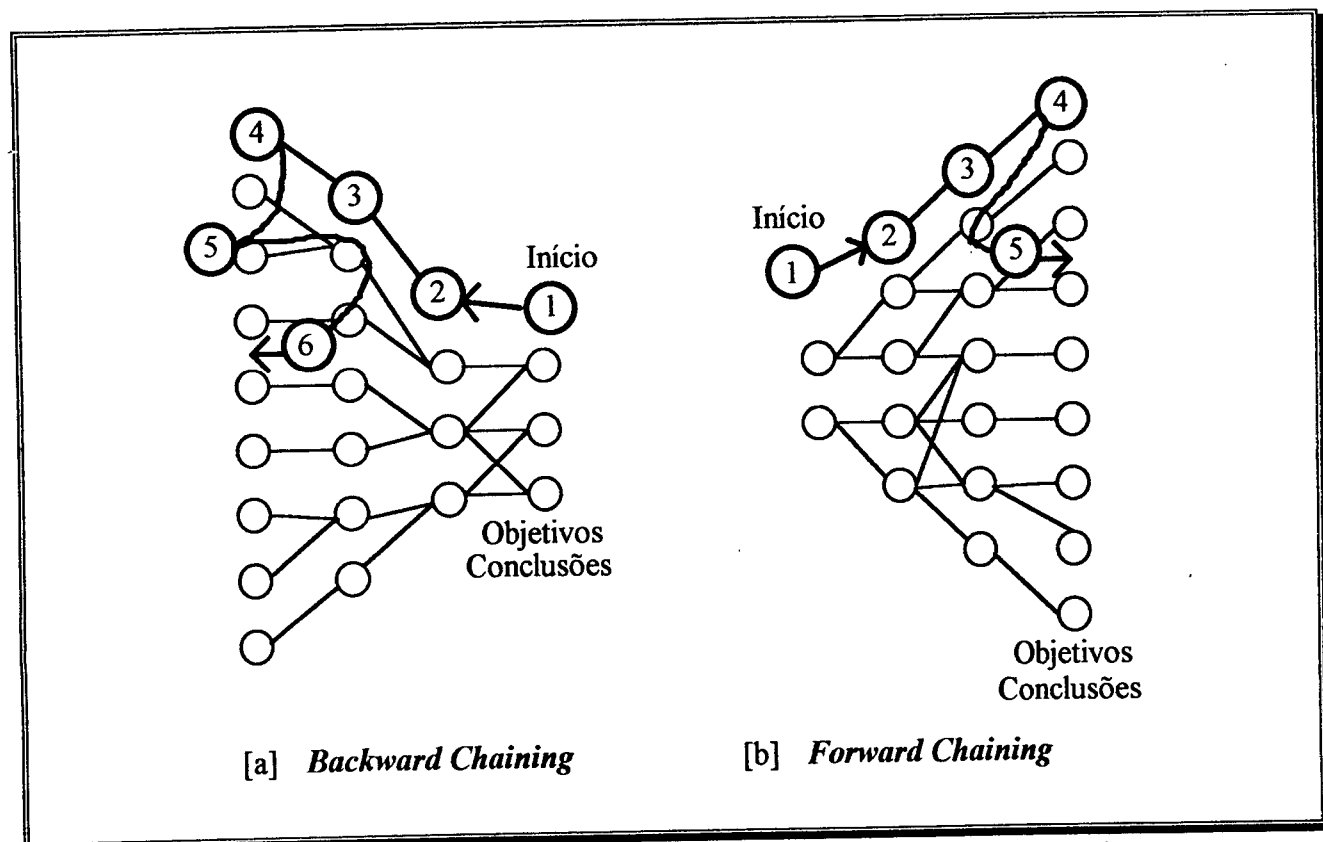


Figura 3.3 - Representação Esquemática das Estratégias de Busca *Backward Chaining* e *Forward Chaining*

3.1.2 - Redes Neurais

Esta arquitetura computacional - inspirada na estrutura do cérebro - é direcionada na abordagem de problemas intratáveis por métodos tradicionais. Além da grande gama de aplicações, sobressai-se na abordagem de problemas envolvendo previsões, reconhecimento e classificação de padrões [Dayhoff, 1990, p.1].

Redes Neurais utilizam uma estrutura de processamento paralelo constituído de um considerável número de processadores e várias interconexões entre eles. Estes processadores são muito simples e cada um é conectado a vários vizinhos.

A técnica de redes neurais é baseada no conceito de "aprendizagem", feita através da conexão de elementos processadores, chamados "neurônios". Cada neurônio consiste de entradas (*inputs*) de um ou mais neurônios, de uma saída (*output*), e de uma função transferência (*threshold*). Os *inputs* de cada elemento processador são determinados pela multiplicação dos "pesos variáveis" das conexões e dos valores transferidos dos outros

elementos processadores.

A rede neuronal "aprende" através da modificação dos seus pesos e/ou limiares, a partir de um conjunto de observações que alimentam a rede. A rede projetada e treinada, representada pelos pesos dos elementos processadores, pode ser vista como um mecanismo equivalente à base de conhecimento e máquina de inferência dos sistemas especialistas.

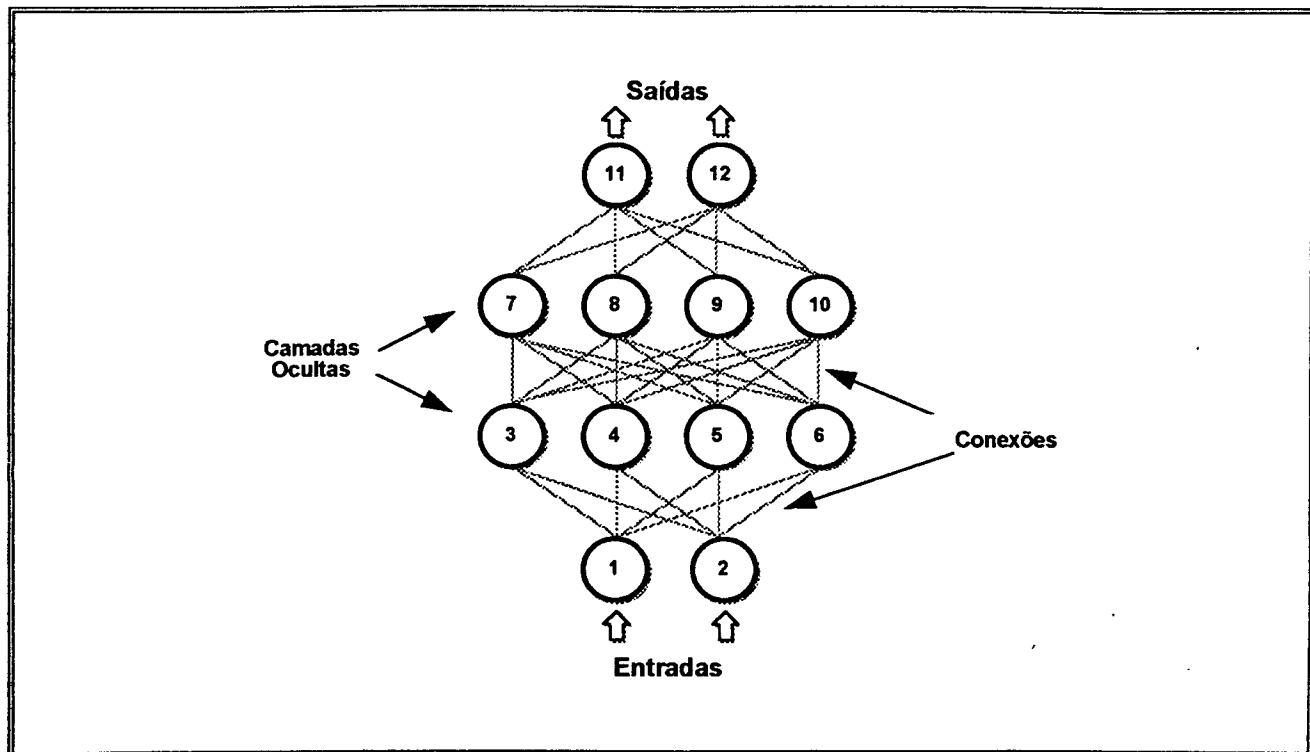


Figura 3.4 - Representação da Arquitetura de uma Rede Neuronal

Os principais componentes de uma rede neuronal são os elementos processadores e as conexões que os interligam. A função fundamental dos elementos processadores é a de receber os *inputs* e produzir um *output* quando a soma dos *inputs* for maior que um certo valor chamado de *threshold*. Os valores transferidos de um elemento processador a outro, são transformados através da multiplicação dos pesos associados às conexões correspondentes.

Inicialmente o elemento processador calcula a soma ponderada dos seus *inputs* da seguinte maneira: toma o primeiro *input* e multiplica-o pelo peso da conexão entre o elemento processador de origem do *input* e o elemento processador de destino, e assim sucessivamente para todos os *inputs* que chegaram a ele. Em seguida esta soma ponderada será transformada por meio de uma "função transferência" gerando um *output* que será propagado aos outros elementos processadores ligados a este elemento processador.

3.2 - O Papel da Simulação no Estudo de Problemas de Seqüenciamento

A simulação é uma ferramenta poderosa, particularmente útil na análise de sistemas muito complexos para serem submetidos a uma análise matemática.

Simulação é "... o processo de predizer o estado futuro de um sistema real através do estudo de modelo computacional idealizado deste sistema" [Waterman, 1989, p.15]. Uma vantagem no uso da simulação é a capacidade de capturar as trocas que ocorrem no sistema modelado. Devido às dificuldades envolvidas com métodos analíticos e a não possibilidade de acompanhar a dinamicidade do sistema, a simulação computacional é um recurso interessante para pesquisadores, proporcionando-lhes flexibilidade de descrever situações reais e a habilidade de manipular diferentes fatores do experimento com facilidade.

O propósito de muitos estudos de simulação é determinar que decisões alternativas resultam na melhor medida para dado critério de eficiência. Um exemplo seria a determinação de uma regra de prioridade de um conjunto de regras alternativas, com o objetivo da minimização do tempo ocioso das máquinas (critério de eficiência) para um dado período de planejamento num sistema de produção [Shamblim/Stevens, 1979, p.199].

A simulação de um sistema de manufatura proporciona resultados que são importante fonte de conhecimento sobre o comportamento dinâmico do sistema de manufatura, permitindo avaliar os efeitos de vários cenários no sistema. Um modelo de simulação pode ainda ser empregado diretamente pelo mecanismo de controle da máquina de inferência de um sistema especialista. Neste caso o modelo de simulação é considerado como um tipo especial de conhecimento, podendo ser usado no processo de decisão [Pierreoal, 1992, p.8].

Observa-se que com pouca freqüência encontram-se referências sobre estudos com simulação que fazem a avaliação de regras de prioridade de forma sistemática, ou seja, para vários contextos. Geralmente nas simulações não são considerados vários parâmetros de um sistema de manufatura, como por exemplo, a taxa de chegada das encomendas e o tempo médio de operação, o que seria desejável para um sistema inteligente de geração de planos de seqüenciamento. No modelo proposto neste trabalho, e apresentado no próximo capítulo, a simulação deverá proporcionar uma base de informações sobre o desempenho das regras de prioridade aplicadas a várias situações de operação de um sistema típico de manufatura.

3.3 - Alguns Procedimentos para o Seqüenciamento Inteligente

Nesta seção serão apresentados alguns métodos encontrados na literatura recente para geração de planos de seqüenciamento usando técnicas de Inteligência Artificial. Estes métodos apresentam as seguintes características comuns:

- a geração dos plano de seqüenciamento é feita exclusivamente pela utilização de *regras de prioridade*;
- a questão central destes procedimentos é a técnica proposta para a geração da base de conhecimento pertinente ao problema;
- o ponto de partida para a geração da base de conhecimento é um *modelo de simulação* representativo do sistema de manufatura desejado. Com este modelo são efetuadas várias simulações gerando *observações* de interesse sobre o comportamento - considerando-se os objetivos clássicos do planejamento e controle da produção - das regras de prioridade em situações normais de operação do sistema de manufatura. O conjunto de observações gerado pelas simulações será o ingrediente básico para a formação da base de conhecimento.

a) GENREG

O procedimento *GENREG* proposto por [Pierre/Ralambondrainy, 1990, p.46ff] procura tratar a problemática de aquisição de conhecimento para problemas específicos da área de manufatura. A proposta consiste de um algoritmo que, partindo de uma base de treinamento obtida por meio de simulação, tenha condições de gerar automaticamente uma base de conhecimento através de técnicas de *indução*, usando o método de *aprendizagem por exemplos*. Os *exemplos* são resultados obtidos por simulação que levaram a bons desempenhos para o critério considerado. Resultados cujos desempenhos são desfavoráveis para o critério considerado constituem a classe de *contra-exemplos*.

O procedimento proposto divide-se em quatro etapas. Inicialmente são definidas as configurações possíveis para o sistema de manufatura (Etapa 1), as quais são simuladas num modelo de simulação apropriado (Etapa 2). A seguir, na terceira etapa, os resultados obtidos são preparados para compor a base de treinamento, composta dos exemplos. A última etapa compreende o algoritmo proposto propriamente dito (Quadro 3.1). O resultado esperado com a aplicação deste algoritmo sobre a base de treinamento é a base de conhecimento, constituída de regras de produção do tipo:

```
IF [configurações do sistema de manufatura]
AND [estratégia de controle]
THEN [conclusão sobre a performance do sistema de manufatura] <fator de certeza>
```

Passo 1: Montagem de um conjunto de regras que generaliza os exemplos obtidos pela simulação. Isto é feito através de duas regras de generalização: a "dropping rule" e a "hill-climbing rule". A regra "dropping" toma os termos comuns de duas regras para criar uma regra mais geral. Por exemplo, sejam as regras:

R1: IF [*tempo de processamento*=*médio*]^[*estratégia*=SPT] ⇒[*ciclo de fabricação*=*bom*]
 R2: IF [*tempo de processamento*=*curto*]^[*estratégia*=SPT] ⇒[*ciclo de fabricação*=*bom*]

Então, a aplicação da regra "dropping" resultaria na nova regra abaixo:

R3: IF [*estratégia*=SPT] ⇒[*ciclo de fabricação*=*bom*]

A regra "hill climbing" consiste em substituir dois valores de uma variável por um termo mais geral. Seja, por exemplo, a variável de estado *tempo de processamento* poder assumir qualquer valor no intervalo [20,110], e que os sub-intervalos [20,40], (40,80] e (80,110] sejam atribuídos, respectivamente aos termos *curto*, *médio* e *longo* para a variável *tempo de processamento*. Sejam ainda as seguintes regras perfeitas:

R4: IF [*tempo de processamento*=90]^[*estratégia*=SPT] ⇒[*ciclo de fabricação* *bom*]
 R5: IF [*tempo de processamento*=110]^[*estratégia*=SPT] ⇒[*ciclo de fabricação*=*bom*]

Então, a aplicação da regra "hill-climbing" resultaria na nova regra abaixo:

R6: IF [*tempo de processamento*=*longo*]^[*estratégia*=SPT] ⇒[*ciclo de fabricação*=*bom*]

Passo 2: Teste e seleção daquelas regras que classificam os exemplos de acordo com os critérios de *discriminação* e de *reconhecimento*.

O critério de *discriminação* estabelece que o número ou a porcentagem de contra-exemplos reconhecidos seja inferior a um dado valor limite estabelecido a priori η_1 .

O critério de *reconhecimento* estabelece que o número ou a porcentagem de exemplos reconhecidos seja superior a um dado valor limite estabelecido a priori η_2 .

Quadro 3.1 - Processo de aprendizagem do método GENREG.

O método foi testado para tratar do problema de seqüenciamento em um sistema de manufatura do tipo *flow-shop*. Este sistema é composto de duas estações de trabalho que as encomendas devem percorrer para sua fabricação. Como possíveis estratégias de controle foram analisadas cinco regras de prioridade (FIFO, SLACK, SPT, LPT, FASFO) com relação a alguns critérios tradicionais (ciclo médio de fabricação, tempo de espera médio, atraso médio, número de encomendas completadas, etc). GENREG gerou trinta regras que reconheceram 100% dos exemplos e 9% dos contra-exemplos. Nenhuma menção é feita com relação a resultados obtidos com a aplicação da base de conhecimento para gerar planos de seqüenciamento, nem como o problema de múltiplos critérios poderia ser abordado.

b) - ARTIFICIAL MEMORY (MEMÓRIA ARTIFICIAL)

Esta abordagem proposta por [Chu/Portmann, 1991] fundamenta-se na hipótese de que decisões idênticas aplicadas a situações idênticas devam conduzir a conseqüências similares para os objetivos considerados.

Memória Artificial é a denominação dada a uma base de conhecimento que contém uma síntese dos desempenhos de várias regras de prioridade sobre conjuntos de situações, denominadas *instâncias*. Os desempenhos das regras de prioridade são apurados através de simulação. A proposta divide-se em duas componentes: a *Geração do Conteúdo da Memória Artificial* e da *Utilização do Sistema da Memória Artificial*.

A componente *Geração do Conteúdo da Memória Artificial* compreende os procedimentos que geram a base de conhecimento do método da *Memória Artificial* para um problema qualquer. O processo de geração envolve três fases:

- i) Fase 1: Obtenção e normalização dos resultados através da simulação de um conjunto de regras de prioridade para um conjunto de instâncias.
- ii) Fase 2: Agrupamento das instâncias em "classes": aquelas instâncias que levaram a desempenhos similares para uma dada regra de prioridade são agrupadas na mesma classe.
- iii) Fase 3: Desmembramento das classes em "regiões". As classes obtidas na fase 2, podem não ser convexas nem conexas. Isto impede o uso de proximidade de uma nova instância ao centro de gravidade de uma classe para verificar se a nova instância pertence à classe considerada ou não. Esta dificuldade é superada através do desmembramento das classes em "regiões" convexas e conectadas. Uma "região" é caracterizada pelo seu *centro de gravidade*, a *classe de modalidade* e os *raios mínimo e máximo*. O raio mínimo é a menor distância entre o centro de gravidade da região e instâncias fora dela. O raio máximo da região é a maior distância entre seu centro de gravidade e as instâncias no interior da região.

A segunda componente da proposta consiste da *Utilização do Sistema da Memória Artificial*. Uma vez que o conteúdo da *Memória Artificial* foi gerado, ele pode ser utilizado para resolver problemas a que ele se propõe solucionar. Quando uma nova instância é verificada, o sistema tenta atribuí-la, para cada regra de prioridade, à região mais próxima. Para tanto faz uso de conceitos de *forte* e de *fraca vinculação* a uma região. Uma instância *I* é definida como sendo *fortemente* (ou *fracamente*) vinculada a uma região *S*, se e somente se, a distância entre *I* e o centro de gravidade de *S* for menor ou igual que o raio mínimo (respectivamente máximo) da região *S*.

Definida a região "*mais próxima*", pode-se então determinar qual é a melhor regra de prioridade que melhor atende o objetivo considerado para o contexto em questão.

O modelo proposto foi aplicado ao problema de seqüenciamento para um caso simulado de *job shop* estático. Foram usados vinte indicadores de estado para caracterizar as

instâncias (o número de encomendas, o número total de operações, a média e o desvio padrão da data de liberação, da data de entrega, do tempo de processamento, do número de operações das encomendas, entre outros). Como regras de prioridade foram usadas vinte e quatro regras tradicionais (SPT, LPT, FIFO EDT, entre outras).

Os experimentos realizados consideraram duas situações distintas para os objetivos considerados: minimização do atraso médio e minimização do ciclo médio de fabricação. Os resultados obtidos com o método da *Memória Artificial* foram comparados com a regra de prioridade padrão - aquela que melhores resultados apresentava para cada uma das situações de objetivos. Apesar de grandes promessas que o método apresentado sugere, pôde-se constatar que houve apenas uma leve melhora em relação à regra de prioridade padrão utilizada.

c) - MULTI-PASS SCHEDULING

Este mecanismo, proposto por [Wu/Vysk, 1989, p.1606ff] consiste de um procedimento para gerar planos de seqüenciamento, que varia dinamicamente a utilização de regras de prioridade baseando-se em informações obtidas com simulação. Este mecanismo baseia-se na conjectura de que combinando-se seletivamente diferentes regras de prioridade, poder-se-ia obter melhores resultados do que com a aplicação intermitente de uma única regra. Esta suposição tenderia a ser mais fortemente aceita em sistemas altamente dinâmicos como é o caso de sistemas flexíveis de manufatura.

O mecanismo proposto é aplicado repetitivamente em intervalos de tempo dt , quando da operação do sistema de manufatura. Em cada intervalo dt é feita inicialmente a avaliação de desempenho das regras de prioridade através de simulação. A seguir é escolhida a melhor regra, considerando o critério desejado, sendo a mesma aplicada na geração de planos de seqüenciamento para o sistema flexível de manufatura físico por um período de tempo real de operação dt . Este processo é repetido indefinidamente, porém com o mecanismo criando, para a avaliação do início de um novo período, um modelo de simulação que considera as condições atuais do sistema real, e incluem: o objetivo a ser atingido, o *mix* de encomendas, o estado do sistema, o intervalo dt e a regra de prioridade que deve ser aplicada.

Testes com a simulação de um sistema flexível existente consideraram três objetivos diferentes: ciclo médio de fabricação, atraso médio de entrega das encomendas concluídas e uma composição ponderada dos dois anteriores. Também três comprimentos de intervalo dt foram considerados nos testes: uma, duas e três vezes o tempo total de processamento das encomendas disponíveis no instante inicial do intervalo dt . Os

resultados obtidos permitiram afirmar que o comprimento do intervalo dt é um fator significativo para a performance do mecanismo proposto, porém não apresentado um procedimento geral para determinar dt para uma situação qualquer. Na maioria dos casos testados foram obtidos resultados superiores - de 2,3% a 29,3% - àquelas planos gerados por regra de prioridade aplicada intermitentemente.

d) - OPAL

O sistema OPAL proposto por [Bel et al., 1986, p.207ff] e [Bensana et al, 1986], utiliza a interação entre três tipos de conhecimento para a geração dos planos de seqüenciamento:

- conhecimento teórico: é o conhecimento sobre a administração dos recursos e do tempo provindo da teoria do seqüenciamento;
- conhecimento empírico: é o conhecimento sobre as regras de prioridade e sua influência nos objetivos da produção através de simulação;
- conhecimento prático: é o conhecimento adquirido a partir dos administradores e supervisores de produção, consistindo das restrições tecnológicas e das restrições originadas a partir dos recursos humanos a serem respeitados pelo planejador.

O sistema guia a pesquisa a fim de evitar seqüenciamentos inviáveis e também proporciona planos que o planejador estaria disposto a aceitar. O uso de técnicas de Inteligência Artificial faz com que o modelo seja altamente flexível para adaptação a problemas reais. Este sistema não é um sistema especialista convencional pois integra tanto conhecimento do tipo bem estruturado como do tipo mal estruturado. O conhecimento bem estruturado, é aquele estudado e disponível na Pesquisa Operacional.

A arquitetura do OPAL pode ser dividida em quatro módulos principais:

- 1 - um módulo contendo a base de dados sobre a descrição do sistema de manufatura (estações de trabalho, tipos de encomendas), do problema de seqüenciamento (produção, prazos de entrega, máquinas disponíveis) e do estado atual do plano de seqüenciamento;
- 2 - um módulo de análise de restrições que calcula as conseqüências da restrição do tempo sobre a seqüência das operações. O módulo pode gerar novas relações entre operações e propaga as novas restrições;
- 3 - um módulo de suporte à decisão que auxilia no seqüenciamento das operações, baseado em conhecimento mal estruturado de origem prática e/ou heurística;
- 4 - um supervisor controla o diálogo entre o módulo de análise de restrições e o módulo de suporte às decisões, construindo o plano de seqüenciamento passo a

passo de acordo com as decisões feitas por estes módulos.

O módulo de suporte à decisão é acionado toda vez que uma situação de conflito for verificada durante a geração do plano. Uma situação de conflito ocorre quando as premissas básicas para o problema de seqüenciamento não forem atendidas no módulo de análise de restrições, ou seja, uma máquina não pode processar simultaneamente duas encomendas e uma encomenda não pode ser processada simultaneamente em duas máquinas. O módulo de suporte à decisão contém cerca de 15 estratégias de controle, classificadas em três categorias:

- 1 - regras de prioridade extraídas de sistemas de filas;
- 2 - regras envolvendo a utilização de recursos auxiliares;
- 3 - regras consistindo de tempos dinâmicos de folga das operações.

A cada uma das regras é associado um grau de relevância em relação a um dado objetivo. Este grau de relevância pode ser visto como o grau de pertinência da regra ao conjunto difuso das regras relevantes para o dado critério. O objetivo deste coeficiente é criar uma ordem de preferência dentro do conjunto das regras, permitindo assim, escolher a regra mais apropriada.

O OPAL foi aplicado a um sistema de manufatura composto de 23 máquinas e 47 tipos de encomendas. Dos resultados obtidos observa-se que:

- 80% do tempo computacional é direcionado à análise das restrições;
- decisões tomadas pelo módulo de suporte à decisão, são elementares demais para ajudar a aumentar a velocidade do processo de solução quando houver uma grande folga em relação ao prazo de entrega.

3.4 - Considerações Finais

As abordagens tradicionais para tratamento do problema de seqüenciamento têm encontrado resistência de aplicação por trazerem dificuldades práticas ou desvantagens na sua utilização. As técnicas de Inteligência Artificial difundidas nas últimas duas décadas têm gerado grandes expectativas para a abordagem do problema de seqüenciamento.

Neste capítulo foram apresentados (GENREG, MULTI-PASS SCHEDULING, ARTIFICIAL MEMORY e OPAL) para ilustrar a aplicabilidade das técnicas de Inteligência Artificial ao problema do seqüenciamento.

No capítulo IV será apresentado o modelo proposto neste trabalho para a geração de planos de seqüenciamento.

CAPÍTULO IV

4 - O MODELO PROPOSTO

No capítulo anterior foram apresentadas e discutidas algumas propostas recentes envolvendo o uso de técnicas de Inteligência Artificial para o problema geral de seqüenciamento. Dessa exposição pode-se concluir que a conceptualização de um sistema inteligente de geração de planos de seqüenciamento deveria dispor de elementos capazes de captar, inicialmente, o contexto em que o sistema de manufatura está inserido para, a seguir, inferir sobre qual deveria ser a próxima estratégia a adotar.

Neste capítulo é apresentado um modelo para criação de um sistema inteligente de geração de planos de seqüenciamento. O sistema é denominado *inteligente* por dispor de elementos funcionais que permitam ao mesmo inferir sobre qual é a melhor estratégia de operação para um dado contexto, a partir de uma base de conhecimento do comportamento das várias estratégias disponíveis para vários contextos operacionais possíveis. Apesar do objetivo do sistema ser gerar planos de seqüenciamento, a busca de soluções do mecanismo de inferência se dá no espaço de estratégias e não como poderia parecer à primeira vista, diretamente no espaço de planos viáveis.

4.1 - Considerações Gerais

Para uma apresentação detalhada do modelo torna-se necessário formalizar algumas variáveis do sistema de manufatura em estudo:

- Estados do Sistema

Um estado do sistema é caracterizado por um vetor de variáveis que caracterizam uma situação de decisão do sistema, $X=(x_1, x_2, \dots, x_p)$. Cada x_i tem seu valor num domínio I_i (muitas vezes um intervalo de R), e portanto $X \in I$, onde $I=I_1 \times I_2 \times \dots \times I_p$. As coordenadas do vetor representam os valores dos indicadores de estado do sistema de manufatura durante a operação. Por exemplo, comprimento de filas,

criticidade média de encomendas com relação ao prazos de entrega, ocupação média dos equipamentos, etc;

- Estratégias de Controle

Seja $S = \{r_1, r_2, \dots, r_s\}$ um conjunto de estratégias que permitem ao sistema controlador direcionar a geração de planos de seqüenciamento de acordo com o contexto atual do sistema - caracterizado pelos indicadores de estado - e os critérios considerados. No modelo proposto as estratégias permitidas assumem a forma de regras de prioridade.

- Critérios de Desempenho

O desempenho do sistema é caracterizado por um vetor de critérios $C_i = (c_1^i, c_2^i, \dots, c_m^i)$, onde o k -ésimo c_k^i representa o desempenho do critério quando a i -ésima estratégia for aplicada, com $i=1, 2, \dots, s$. Alguns exemplos típicos de c_k^i para o planejamento da produção podem ser:

- minimização do ciclo de fabricação;
- maximização da ocupação das máquinas;
- maximização do atendimento do prazo de entrega;
- minimização dos níveis de estoque.

A geração dos planos de seqüenciamento deve ser criteriosa, ou seja, atingir os critérios pré-estabelecidos, considerando o contexto atual do sistema de manufatura. Infelizmente inexiste uma regra de prioridade que seja globalmente mais eficiente [Pierreal/Ralambondrainy, 1990, p.464]. Os resultados obtidos com uma dada regra diferem de acordo com as condições da produção e dos objetivos considerados. Em outras palavras, certo r_j proporciona melhores resultados que outros, em relação a certo c_k^j para um determinado estado X . Portanto, seria interessante apurar sistematicamente os desempenhos de algumas regras de prioridade para uma série de configurações do sistema de manufatura. Posteriormente utilizar-se-ia aquela regra de prioridade que melhor desempenho apresentou para uma dada situação operacional do sistema de manufatura. As situações operacionais variam com muita freqüência em um sistema de manufatura, o que indica que determinadas regras de prioridade devam proporcionar melhores resultados que outras para uma determinada situação.

Esta observação sugere a formulação do modelo proposto que consiste em inicialmente apurar os desempenhos de algumas regras de prioridade para vários estados operacionais do sistema de manufatura. Posteriormente, na fase operacional do modelo, é feito uso destas informações com o objetivo de determinar qual regra de prioridade proporciona

melhores resultados para o contexto atual do sistema de manufatura. Estas duas etapas estão formalizadas em duas fases do modelo proposto:

- a fase de avaliação de estratégias
- e fase de operação do sistema proposto,

descritas a seguir.

4.2 - Fase de Avaliação de Estratégias

Na fase inicial faz-se uso de simulação para criar uma base de informações contendo os desempenhos de algumas regras de prioridade para vários estados operacionais do sistema de manufatura. A fase de avaliação das regras de prioridade é feita em dois passos:

Passo 1: *Definição de uma amostra representativa de estados operacionais possíveis do sistema de manufatura, isto é, um conjunto de vetores X , que representem a situação de decisão.*

Passo 2: *Avaliação do vetor de critérios de desempenho C_i , através de simulação, usando as diferentes regras de prioridade r_i com $i=1,2,\dots,s$, e os estados do sistema definidas no passo 1. Neste passo colhem-se os resultados da simulação a fim de constituir a base de informações sobre o comportamento do sistema.*

A seguir serão descritos detalhadamente os estados operacionais do sistema, o conjunto de estratégias e os critérios de desempenho definidos anteriormente.

4.2.1 - Estados do Sistema

No modelo, para cada situação de decisão é necessário definir variáveis indicadoras de estado que representem a situação de decisão. Como exemplo, seja o problema de definir a abertura de um ventil numa caldeira que se encontra sob pressão. A decisão de quanto este ventil deverá ser aberto está baseada usualmente nos valores de temperatura e de pressão da tubulação. Neste caso, as variáveis nível de pressão e temperatura seriam as variáveis indicadoras de estado desta situação de decisão.

A idéia é variar os valores das variáveis de estado para o sistema de manufatura através da variação sistemática e gradual no domínio viável destas variáveis.

Seja o caso de um sistema de manufatura, onde geralmente encomendas aguardam pelo processamento frente às máquinas. A situação de decisão é definir a próxima encomenda a ser processada por uma máquina que acabou de ser liberada. Neste caso, as variáveis indicadoras de estado representativas para esta situação poderiam ser:

- o número de encomendas aguardando processamento frente a máquina,
- a ocupação média das máquinas nas últimas duas horas,
- a criticidade da fila de espera em relação ao prazo de entrega, entre outros.

Para esta situação, o modelo sugere que sejam definidos valores altos, baixos e alguns valores intermediários às variáveis indicadoras de estado. Isto seria feito forçando indiretamente estas variações através da escolha apropriada de parâmetros da simulação. Por exemplo, para a obtenção de diferentes valores para o comprimento médio de fila poder-se-ia aumentar ou diminuir a taxa de chegada de encomendas ao sistema de manufatura.

4.2.2 - Conjunto de Estratégias

O conjunto de estratégias considerado neste trabalho é composto de regras de prioridade. Regras de prioridade ditam a ordem das encomendas frente a uma máquina segundo critérios de desempenho definidos pela gerência.

As cinco regras de prioridade consideradas no modelo, envolvem basicamente as grandezas do tempo de processamento das operações e o prazo de entrega:

- FIFO (*First In First Out*) - a próxima encomenda a ser processada é a que primeiro entrou no sistema.
- EDT (*Earliest Due Date*) - a próxima encomenda a ser processada é a que tem o menor prazo de entrega.
- SPT (*Shortest Processing Time*) - a próxima encomenda a ser processada é a que tem menor tempo de processamento.
- SMT (*Smallest multiplication $r=p*TP$*) - a encomenda com menor valor obtido pela multiplicação do tempo total de processamento e o tempo de operação na próxima máquina é a primeira a ser processada (onde: p é o tempo de processamento iminente e TP o tempo total de processamento).
- SSLACK (*Least Amount of Slack*) - a próxima encomenda a ser processada é a que tem menor folga em relação ao prazo de entrega.

4.2.3 - Critérios de Desempenho

Os critérios de desempenho mais comumente usados na avaliação de planos de produção são a minimização do ciclo médio de fabricação, a minimização do nível médio do estoque e a maximização de nível de atendimento do prazo de entrega.

A consideração simultânea destes critérios caracteriza um problema de múltiplos critérios. O estabelecimento de um "ranking" de preferência para os planos de produção exige a agregação dos critérios considerados em uma função, normalmente denominada de função utilidade. A forma mais comum para a função utilidade é a função aditiva ponderada das utilidades individuais de cada critério [Zimmermann/Gutsche, 1991, p.115]:

$$U_i = \sum_{j=1}^k p_j \times c_j^i$$

onde: U_i - utilidade da i -ésima estratégia (ou regra de prioridade), com $i=1,2,\dots,3$;

p_j - peso de importância do critério j ;

c_j^s - valor do desempenho do critério j quando a s -ésima estratégia (ou regra de prioridade) for aplicada);

k - número de critérios de desempenho considerados.

A fim de permitir a soma ponderada das funções individuais de utilidade, torna-se necessário que estas funções utilidades sejam definidas nas mesmas unidades. Assim, é necessário estabelecer escalas de medida uniformizadas para cada um dos critérios considerados. O modelo propõe a criação dos índices de avaliação de cada um dos critérios considerados anteriormente:

- índice de avaliação do critério de minimização do ciclo de fabricação;
- índice de avaliação do critério de maximização do atendimento do prazo de entrega;
- índice de avaliação do critério de minimização do nível médio do estoque.

A definição destes índices é apresentada detalhadamente a seguir.

a) Índice de avaliação do critério de minimização do ciclo médio de fabricação

O ciclo de fabricação é definido como o tempo decorrido desde a entrada da encomenda no sistema de manufatura até sua conclusão. Na definição do índice do ciclo de fabricação usou-se o conceito de "tempo ideal no sistema" que seria igual ao tempo médio total de processamento, pois as encomendas não dispenderiam tempo aguardando pelo processamento, ou seja, tempo médio de espera igual a zero.

O índice de avaliação do critério de minimização do ciclo de fabricação é então definido pela razão entre o tempo médio total de processamento e o tempo médio gasto no sistema para as encomendas fabricadas no período de planejamento (período de planejamento pode ser entendido como um determinado período de produção). Logo,

$$IC = \frac{TP}{TS} \quad (1)$$

onde: IC - índice do ciclo médio de fabricação no período de planejamento [*adimensional*].

TP - tempo médio de processamento no período de planejamento [*em minutos*].

TS - tempo médio gasto no sistema no período de planejamento [*em minutos*].

Uma alternativa usada para a avaliação do critério de minimização do ciclo médio de fabricação é a forma ponderada em relação ao tempo total de processamento. O índice de avaliação do ciclo médio de fabricação ponderado é definido como:

$$IF = \frac{\sum_{i=1}^n (TP_i \times TP_i)}{\sum_{i=1}^n (TS_i \times TP_i)} \quad (1a)$$

onde: IF - índice do ciclo médio de fabricação ponderado no período de planejamento [*adimensional*].

TP_i - tempo total de processamento da encomenda i no período de planejamento [*em minutos*].

TS_i - tempo gasto no sistema pela encomenda i no período de planejamento [*em minutos*].

Um índice igual a um, IC=1,0 (ou IF=1,0), indicaria que o ciclo médio de fabricação (ponderado) das encomendas é igual ao tempo médio de processamento no período de planejamento. Este seria o caso ideal que se poderia desejar, porém dificilmente atingido na prática. Um índice de IC=0,30 (ou IF=0,30), indica que as encomendas gastaram, em média, 30% do ciclo médio de fabricação (ponderado) com tempos de processamento e 70% com tempos de espera nas filas frente às máquinas de processamento no período de planejamento.

Como o objetivo é reduzir o ciclo médio de fabricação ou o ciclo médio de fabricação ponderado, o modelo deve obviamente gerar planos que tendem a maximizar o valor destes índices, isto é, que cheguem o mais próximo de 1.

b) Índice de avaliação do critério de maximização do atendimento do prazo de entrega

O prazo de entrega da encomenda é geralmente definido pela administração de vendas, sendo, portanto, uma variável externa ao planejamento da produção. Neste caso, procura-se minimizar a diferença média entre a data de conclusão e a data de entrega das encomendas, sem que o prazo de entrega seja prejudicado no período de planejamento.

O índice de avaliação do critério de maximização do atendimento médio do prazo de entrega é definido como sendo:

$$IN = \frac{1}{1 + DE} \quad (2)$$

com:
$$DE = \frac{\sum_{i=1}^n |PE_i - DC_i|}{n}$$

onde: IN - índice do atendimento do prazo de entrega para o período de planejamento [em 1/dias].

DE - valor médio do desvio em relação ao prazo de entrega para o período de planejamento [em dias].

PE_i - data de entrega da encomenda i para o período de planejamento [em dias contados a partir do início do período de planejamento].

DC_i - data de conclusão da encomenda i para o período de planejamento [em dias contados a partir do início do período de planejamento].

n - número de encomendas concluídas no período de planejamento.

Uma forma alternativa para avaliar o grau de atingimento do atendimento do prazo de entrega, é através da ponderação do desvio médio entre a data de conclusão e a data de entrega da encomenda. Como encomendas com tempo de processamento mais longo tendem a representar maiores receitas à empresa seria, portanto, interessante que estas tivessem maior influência na medida do desvio médio do prazo de entrega e isto pode ser alcançado através da ponderação deste desvio como definido na equação (3). O índice de avaliação do critério de maximização do atendimento médio do prazo de entrega ponderado, é definido como sendo:

$$IP = \frac{1}{1 + DP} \quad (2b)$$

onde: IP - índice do atendimento do prazo de entrega ponderado para o período de planejamento [em 1/dias].

DP - valor médio ponderado do desvio em relação ao prazo de entrega para o período de planejamento [em dias].

$$DP = \frac{\sum_{i=1}^n DE_i \times TP_i}{\sum_{i=1}^n TP_i} \quad (3)$$

com: $DE_i = |PE_i - DC_i|$ - para $i = 1, 2, \dots, n$

onde: DE_i - diferença entre a data de conclusão e a data de entrega da encomenda i para o período de planejamento [em dias].

TP_i - tempo total de processamento da encomenda i para o período de planejamento [em minutos].

PE_i - data de entrega da encomenda i para o período de planejamento [em dias, contados a partir do início do período de planejamento].

DC_i - data de conclusão da encomenda i para o período de planejamento [em dias, contados a partir do início do período de planejamento].

n - número de encomendas concluídas no período de planejamento.

Um índice $IN=1,0$ (ou $IP=1,0$), indica que todas as encomendas foram concluídas exatamente no seu prazo de entrega (ponderado) o que seria considerado geralmente ideal, porém não atingível na prática. Um índice de $IN=0,50$ (ou $IP=0,50$), indica que houve no período de planejamento um desvio médio (ponderado) de um dia em relação ao prazo de entrega. Um índice $IN=0,33$ (ou $IP=0,33$), indica que houve um desvio médio (ponderado) de dois dias em relação ao prazo de entrega das encomendas no período de planejamento.

c) Índice de avaliação do critério de minimização do nível médio do estoque

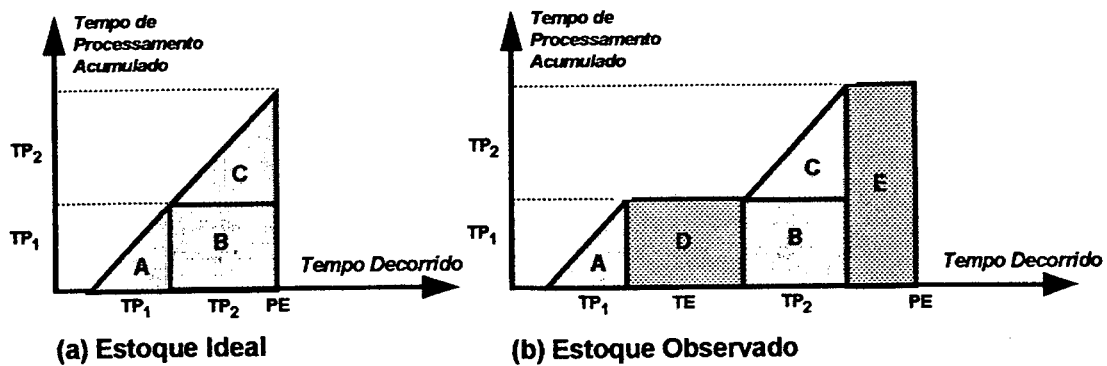
O índice do nível médio de estoque tem definição análoga à do índice do ciclo de fabricação no que tange à razão entre o valor ideal e o valor efetivamente observado.

Define-se como valor ideal do nível de estoque aquela quantidade de capacidade produtiva utilizada para processar as encomendas concluídas no período de planejamento caso as encomendas:

- não necessitem aguardar em filas de espera (tempos de espera igual a zero, ou seja, não formam estoques intermediários);
- tenham sido concluídas exatamente no prazo de entrega previsto, ou seja, não formam estoques de produto acabado.

O nível de estoque observado é o estoque efetivamente verificado quando da realização de um plano de produção. O nível de estoque observado é dado pela soma do nível de estoque ideal, das quantidades de capacidades produtivas utilizadas naquelas encomendas em processamento que aguardam frente às máquinas e daquelas quantidades de capacidade produtiva empregadas nas encomendas que foram concluídas antes do prazo de entrega, no período de planejamento.

No Quadro 4.1 encontram-se representados os níveis dos estoques ideal e efetivamente observado durante o processamento de uma única encomenda com duas operações.



onde: TP_1 - Tempo de processamento na primeira operação.

TP_2 - Tempo de processamento na segunda operação.

PE - Prazo de entrega.

TE - Tempo de espera para execução da segunda operação.

O estoque ideal é formado gradualmente durante o processamento da encomenda. Adicionando-se a parcela do estoque formada pelo tempo de espera TE e o estoque E correspondente à conclusão antecipada tem-se o nível do estoque observado.

$$A = (TP_1 \times TP_1) / 2$$

$$B = (TP_1 \times TP_2) \quad (5)$$

$$C = (TP_2 \times TP_2) / 2$$

$$D = TE \times TP_1$$

Logo:

$$\text{Estoque Mínimo} \quad EM_i = A + B + C \quad (6)$$

$$\text{Estoque Observado} \quad EO_i = A + B + C + D + E$$

Quadro 4.1 - Descrição dos Níveis de Estoque Ideal e Observado para o Caso de uma Encomenda de duas Operações

Assim, o índice de avaliação do critério de minimização do nível de estoque é definido pela razão entre o nível de estoque ideal e o nível de estoque efetivamente observado:

$$IE = \frac{EI}{EO} \quad (4)$$

onde: IE - índice de avaliação do critério de minimização do nível de estoque, [adimensional].

EI - nível de estoque ideal realizável no período de planeamento [*em horas-máquina/unidade de tempo*].

EO - nível de estoque observado no período de planeamento [*em horas-máquina/unidade de tempo*].

Um índice de IE=1,0 indica que o plano de produção não forma qualquer tipo de estoque no período de planeamento além daquele valor mínimo necessário. Um desempenho de IE=0,5 indicaria que o nível de estoque formado pelo processo é o dobro do nível mínimo, ou valor ideal que seria hipoteticamente possível de se obter.

4.2.4 - Considerações Finais

Existe um certo comportamento destes índices relacionado com a carga média submetida ao sistema de manufatura.

- Aumentando-se a carga média no sistema, aumenta a ocupação de máquinas. Assim, com o aumento gradual da carga do sistema verifica-se um aumento gradual na ocupação de máquinas aumentando o tempo de espera das encomendas para processamento.
- O aumento da carga média no sistema e o conseqüente aumento na ocupação das máquinas tende a aumentar o ciclo médio de fabricação, devido à espera das encomendas nas filas frente às máquinas. Esta situação já caracteriza um problema de múltiplos critérios o que sugere que a solução a ser encontrada deve ser uma solução de compromisso entre o máximo da ocupação de máquinas e o mínimo do ciclo médio de fabricação.
- O índice de avaliação do critério de maximização do prazo de entrega, como definido anteriormente, tem os seguinte comportamento: para cargas médias e baixas, um número relativamente grande de encomendas é concluído antes do prazo de entrega, pois o sistema está pouco carregado e as encomendas fluem com maior rapidez pelo sistema de manufatura; com o aumento na carga média de trabalho, as encomendas esperam mais e, com isto, tende a aumentar o tempo de espera no sistema. A partir de um determinado ponto de carga média de trabalho do sistema de manufatura, as encomendas começam a serem concluídas após o seu prazo de entrega, prejudicando o índice. Portanto, existirá uma determinada carga média do sistema que maximizará o valor do índice do prazo médio de entrega das encomendas pré-estabelecido.

- A análise para o índice de avaliação dos níveis de estoques é análoga para o índice do critério do atendimento do prazo de entrega. Quando o sistema encontra-se pouco carregado, as encomendas são concluídas antes do prazo de entrega formando o estoque do produto acabado, diminuindo o índice definido na Seção anterior. Aumentando gradualmente a carga média no sistema, as encomenda esperam mais tempo nas filas formando, assim, o estoque de produto semi-acabado. Após uma determinada carga média no sistema, o índice dos níveis de estoques começa a decrescer devido ao aumento do tempo de espera das encomendas nas filas de espera.

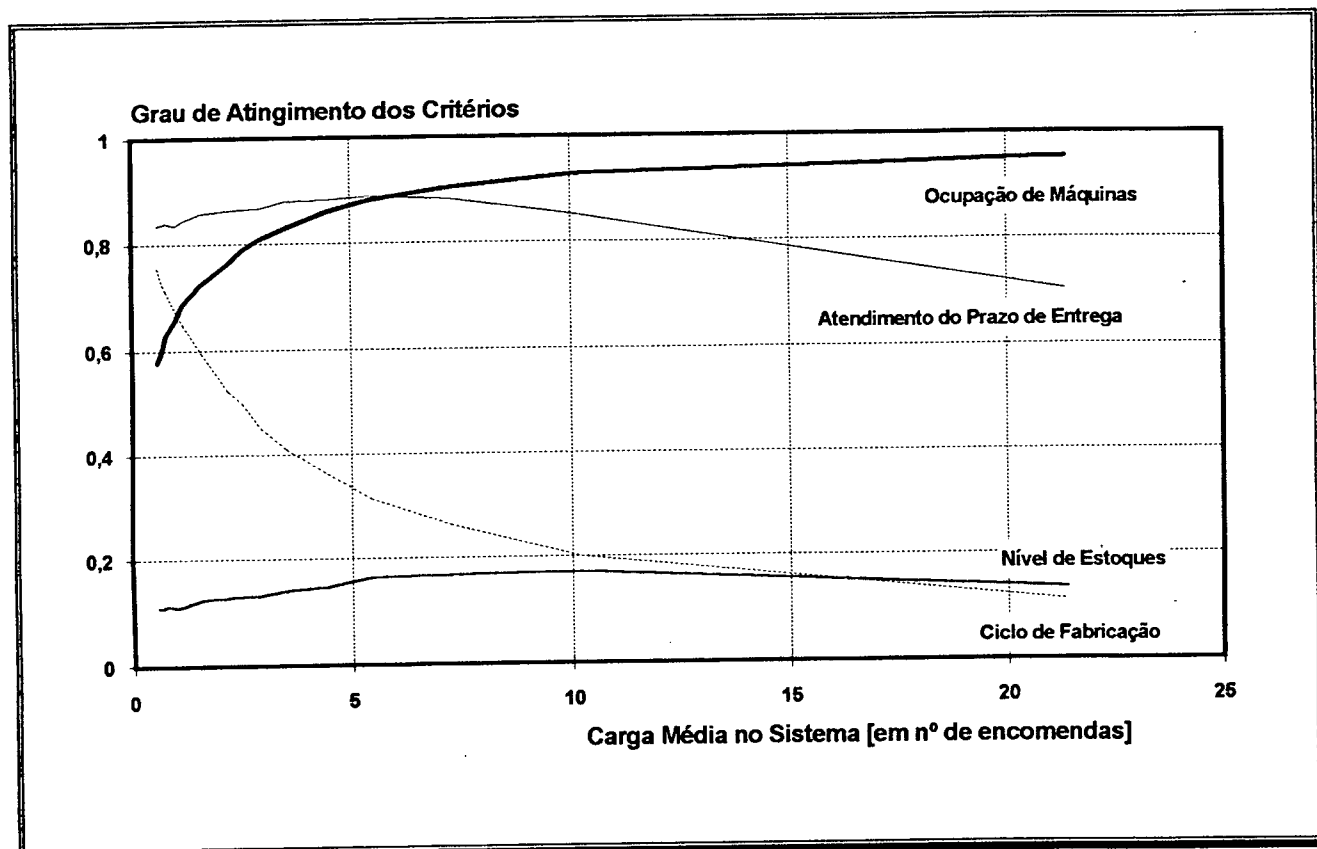


Figura 4.1 - Representação Gráfica dos Desempenhos dos Critérios em Função da Carga Média no Sistema de Manufatura

Na Figura 4.1 encontram-se, apresentados graficamente, os valores dos índices obtidos através da simulação de um sistema de manufatura do tipo *flow shop*. Observa-se que a ocupação máxima das máquinas ocorre aproximadamente a partir do ponto onde a carga média no sistema de manufatura é de 20 encomendas. O valor máximo do índice do ciclo médio de fabricação ocorre no início, quando a carga do sistema é mínima. Para os índices do atendimento do prazo de entrega e dos níveis de estoques, também há cargas diferentes relacionados com seus máximos.

Concluindo, pode-se afirmar que não existirá uma carga no sistema onde exista simultaneamente onde seja simultaneamente maximizado a ocupação de máquinas, minimizado o ciclo médio de fabricação, maximizado o atendimento do prazo de entrega e minimizado os níveis de estoques. Este problema é chamado de "polilema" do planejamento da produção que sugere a busca de soluções somente compromissadas entre os critérios considerados.

4.3 - Fase de Operacionalização do Modelo

A fase de avaliação das regras de prioridade gera uma grande massa de informações sobre o desempenho destas regras para vários contextos do sistema de manufatura. Numa abordagem tradicional de aquisição de conhecimento, essa massa de informações poderia constituir o conjunto de exemplos de alguma técnica de indução como mencionado no capítulo anterior. Neste trabalho, considerarm-se dois procedimentos alternativos - apresentados a seguir - para tratar esta massa de informações.

A aplicação do modelo como sistema gerador de planos de seqüenciamento deve ser feita acompanhando a execução do próprio plano. O modelo deverá sempre ser solicitado quando uma situação de decisão for caracterizada, ou seja, uma máquina acaba de ficar livre e duas ou mais encomendas aguardam processamento nesta máquina. Em cada situação de decisão que ocorrer durante a operação do sistema de manufatura, o modelo deverá indicar a regra de prioridade que melhor desempenho proporciona para o contexto atual. O melhor desempenho é ditado pela expressão da função utilidade, estabelecida pela gerência na forma de pesos, que indicam o grau de importância de um critério em relação aos outros. O contexto atual é caracterizado pelos valores assumidos pelas variáveis de estado, quando uma situação de decisão estiver caracterizada.

A fase operacional do modelo pode ser formalizada no algoritmo descrito no Quadro 4.2.

Seja: Uma situação de decisão caracterizada pela variável indicadora de estado X

m - número de critérios considerados;

s - número de regras utilizadas;

C_i - vetor de desempenho dos critérios quando a i -ésima regra de prioridade for aplicada, com

$$i=1,2,\dots,s - C_i=(c_1^i,c_2^i,\dots,c_m^i);$$

p_i - peso associado ao critério de desempenho c_j^i , $\forall i, i=1,2,\dots,s$;

U_i - valor da função utilidade para a i -ésima regra de prioridade, com $i=1,2,\dots,s$;

G - conjunto de índices das regras de prioridade, com $G = \{1,2,\dots,s\}$.

Então:

INÍCIO

para $i = 1$ até s , faça

inferir o valor de C_i para a i -ésima regra de prioridade através de algum método de inferência.

$$\text{determinar } U_i = \sum_{j=1}^m p_j \times c_j^i$$

fim (para)

selecionar aquela r^* -ésima regra de prioridade para a qual $U_{r^*} = \text{Max}_{i \in G} \{U_i\}$

definir prioridades para a situação de decisão atual, segundo a r^* -ésima regra.

FIM

Quadro 4.2 - Algoritmo para Seleção da Melhor Regra

4.3.1 - O Procedimento de Inferência

Na fase inicial coletou-se uma amostra significativa de vetores de estado relacionados com o desempenho de cada regra de prioridade em relação aos critérios pré-estabelecidos. Seja α o conjunto formado pelos valores das variáveis indicadoras de estado e β o conjunto formado pelos valores do desempenho das regras de prioridade em relação aos m critérios considerados. Como não se conhece uma função entre todos os valores possíveis das variáveis de estado e os possíveis valores do desempenho das regras de prioridade, sugere-se o uso de métodos aproximativos para inferir esta função a partir da relação entre α e β obtidos com a simulação na fase anterior. Então, para qualquer vetor de estado X_0 relacionado a uma dada situação de decisão, pode-se inferir o vetor de critérios C_i para cada regra de prioridade $r_i \in S$, com $i=1,2,\dots,s$, usando os valores $X \in \alpha$ e seus respectivos valores $C_i \in \beta$.

Duas abordagens de inferência, foram consideradas neste trabalho:

- a utilização de Redes Neurais,
- e a utilização do mecanismo de inferência *Geometrical Approximate Reasoning*, apresentados a seguir.

4.3.1.1 - Inferência Usando a Técnica de Redes Neurais

Redes Neurais são conhecidas pelo seu carácter interpolativo [Ver seção 3.1.2], prestando-se assim, como método de aproximação para o problema de inferência citado anteriormente. O conjunto dos vetores α representando os estados do sistema constituem as entradas da rede. Cada rede é constituída de uma saída que corresponde a uma componente do vetor de critérios C_i , (logo, se $C_i=(c_1^i, c_2^i, \dots, c_m^i)$, têm-se m diferentes redes para cada regra de prioridade $r_i \in S$, com $i=1,2,\dots,s$).

Na figura 4.1 está representada a rede utilizada na fase de operacionalização do modelo. As entradas, que descrevem a situação de decisão, são caracterizadas por quatro variáveis indicadoras de estado:

X_1 - comprimento médio da fila 1;

X_2 - criticidade média da fila 1 em relação ao prazo de entrega;

X_3 - comprimento médio da fila 2;

X_4 - criticidade média da fila 2 em relação ao prazo de entrega.

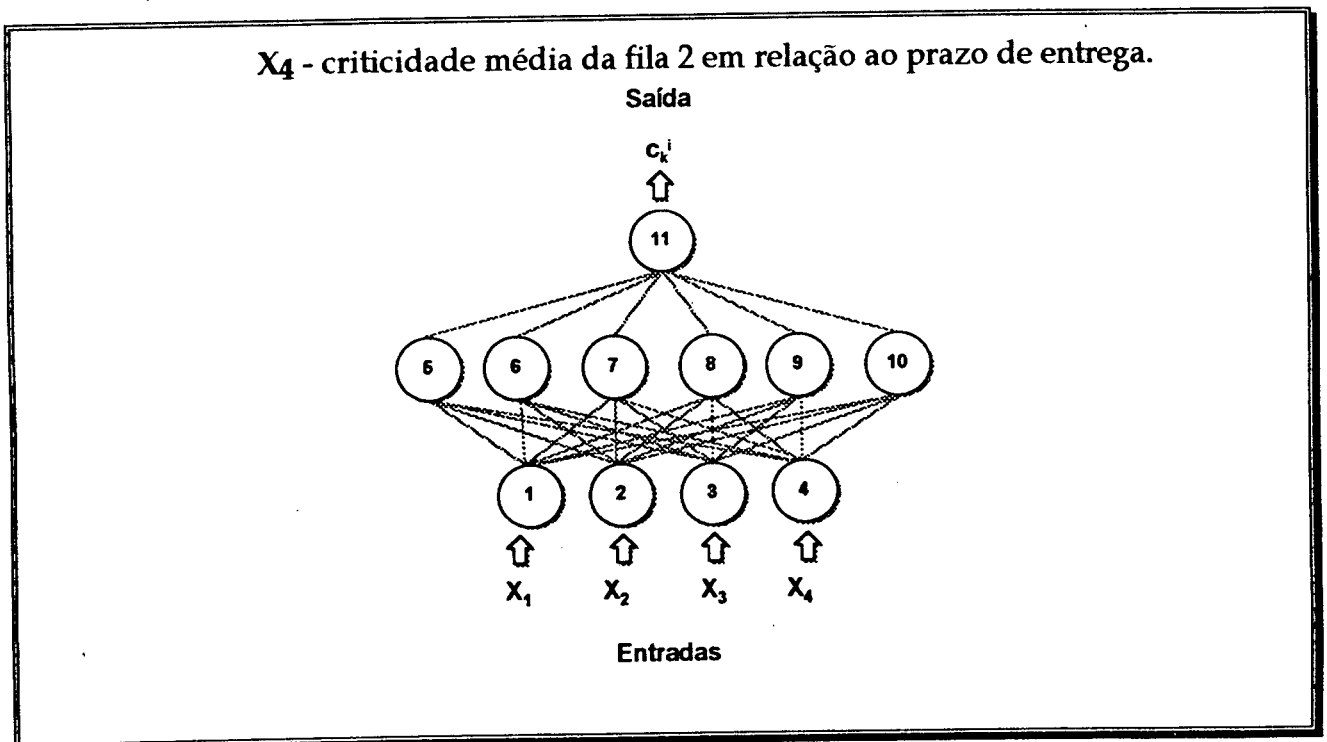


Figura 4.2 - Representação da Arquitetura da Rede Neuronal Utilizada na Operacionalização do Modelo

A saída da rede corresponde ao valor do desempenho do critério relacionado aos valores das entradas. Então, quando ocorrer uma situação de decisão durante a operação do sistema proposto, as redes treinadas relativas a uma regra de prioridade, estariam em condições de inferir o valor (para esta regra) dos desempenhos dos critérios, para um determinado estado X qualquer.

4.3.1.2 - Inferência Usando o Método *Geometrical Approximate Reasoning*

Numa etapa posterior, usou-se uma forma alternativa de inferência denominado *Geometrical Approximate Reasoning*, proposto por [Li/Fries, 1993, p.5]. O método pode ser usado para aproximar uma informação não conhecida completamente a partir de informações conhecidas e "próximas" da informação que se deseja inferir [Ver Anexo I]. A finalidade do *Geometrical Approximate Reasoning*, é a de interpolar o valor do desempenho das regras numa dada situação de decisão. Portanto, apresentando algum vetor indicador de estado X_0 , o método deveria ser capaz de inferir o desempenho c_k^i para a regra de prioridade $r_i \in S$, com $i=1,2,\dots,s$.

Seja, por exemplo, uma situação de decisão caracterizada pelo indicador de estado com apenas duas componentes, ou seja, duas variáveis. Então, o produto cartesiano destas duas variáveis de estado gera um sub-espaço de R^2 . Os valores obtidos com as várias simulações para uma regra de prioridade podem ser representadas num plano [Ver exemplo na Figura 4.3], formando uma região discreta, em que os desempenhos para os critérios são conhecidos. Esta região tem estrutura bem caracterizada e é definida como sendo a "malha" da regra de prioridade $r_i \in S$, com $i=1,2,\dots,s$.

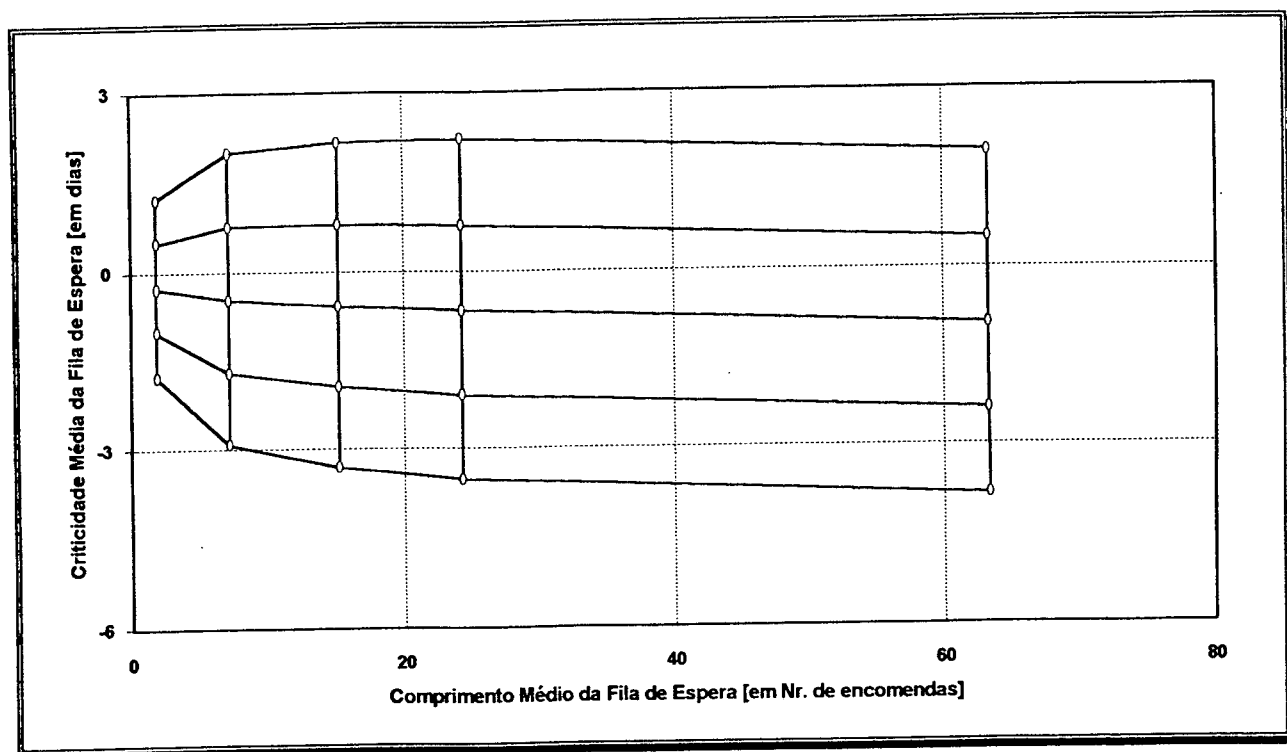


Figura 4.3 - Representação da "Malha" Obtida com a aplicação da regra FIFO

A "malha" formada pelos vetores de estado pode ser, então, definida como sendo o resultado das combinações dos valores que estas variáveis indicadoras de estado assumiram durante a avaliação do desempenho da regra. Cada ponto caracterizado na "malha" indica a posição no espaço de estados, para o qual os valores dos desempenhos dos critérios considerados são conhecidos. No exemplo, as variáveis indicadoras de estado consideradas foram a criticidade da fila em relação ao prazo de entrega e o número de encomendas na fila que aguardam processamento no instante em que é caracterizada uma situação de decisão.

4.4 - Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado o modelo proposto para a aquisição de conhecimento e operacionalização de um sistema inteligente gerador de planos de seqüenciamento. A aplicação do sistema e os resultados obtidos com um sistema de manufatura simulado, serão apresentados detalhadamente no próximo capítulo.

CAPÍTULO V

5 - APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

O modelo proposto prevê a aplicação seletiva de regras de prioridade. A escolha para a aplicação de uma determinada regra de prioridade depende do contexto do sistema de manufatura e das preferências estabelecidas pela gerência quanto aos critérios a serem observados.

Com o objetivo de verificar se a proposta deste trabalho leva efetivamente a melhores resultados em relação à aplicação intermitente de uma regra de prioridade, fez-se a aplicação do modelo proposto a um sistema padrão de manufatura do tipo *flow-shop* [ver definição na Seção 2.2] sugerido por [Barret/Barman, 1986]. Este sistema de manufatura é considerado pelos seus idealizadores, como suficientemente abrangente para permitir a generalização dos seus resultados a sistemas de manufatura mais complexos.

5.1 - Descrição do Sistema de Manufatura Utilizado

O sistema de manufatura utilizado é constituído de duas estações de trabalho, sendo cada estação composta de duas máquinas idênticas [Figura 5.1]. As operações na estação de trabalho 1 são diferentes daquelas executadas na estação de trabalho 2. As encomendas devem, inicialmente, visitar a estação de trabalho 1 e, em seguida, a estação de trabalho 2. Quando a encomenda chega ao sistema de manufatura, ela vai à primeira máquina livre da estação de trabalho 1. Se ambas as máquinas encontrarem-se ocupadas, a encomenda aguarda em uma única fila (fila 1) até que uma máquina da primeira estação seja liberada.

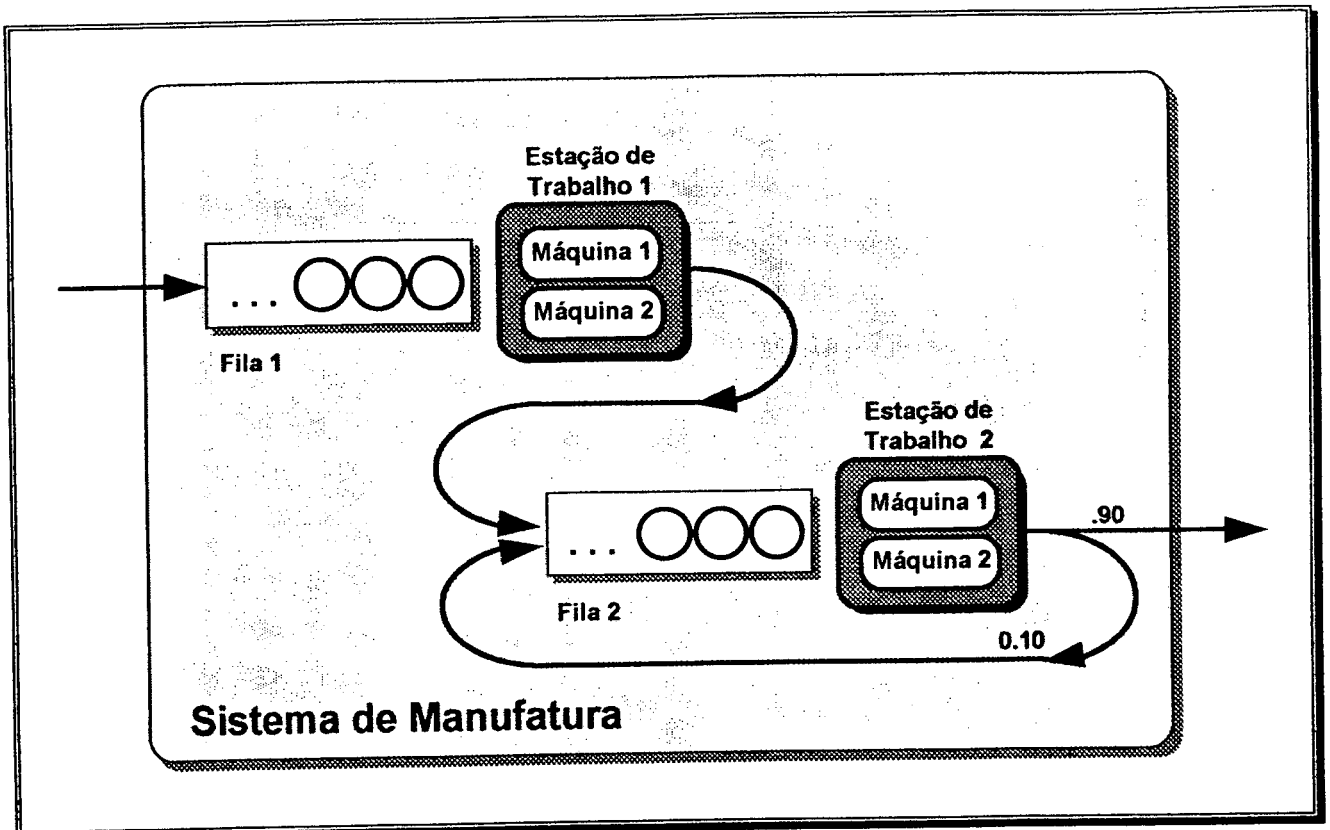


Figura 5.1 - Representação Esquemática do Fluxo no Flow-shop Usado na Avaliação do Modelo. [Fonte: Barret/Barman, 1986, p.184]

Após ser processada na estação de trabalho 1, a encomenda é despachada à estação de trabalho 2, onde é levada à primeira máquina livre. Caso as máquinas estejam ocupadas, a encomenda aguarda na fila 2. A transferência da encomenda da estação 1 para a estação 2 é feita por uma esteira de transporte que requer 1,5 unidades de tempo para ser efetivada.

Qualquer máquina de uma estação de trabalho é parada para inspeção por 3,0 unidades de tempo após ter processado 50 encomendas. Assume-se que 10% das encomendas completadas na estação de trabalho 2 necessitam ser reprocessadas. O tempo de reprocessamento é fixado em 3,0 unidades de tempo. A distribuição do tempo de processamento para qualquer estação de trabalho é exponencial com médias de 10,7 e 11,0 para a primeira e a segunda estação de trabalho, respectivamente.

5.2 - Fase de Avaliação das Estratégias

A fase de avaliação visa apurar os desempenhos das estratégias para um conjunto representativo de estados do sistema de manufatura. Para a execução desta fase é necessário definir as seguintes componentes:

- a) o modelo de simulação do sistema de manufatura;
- b) o conjunto de critérios, para os quais serão avaliados os desempenhos;
- c) o conjunto de situações de decisão e os vetores de estado correspondentes;
- d) e o conjunto de estratégias a ser avaliado.

a) O modelo de simulação é uma representação do sistema de manufatura a ser estudado. Para os propósitos deste trabalho foi programado um modelo de simulação [Anexo II] na linguagem SIMAN. O modelo computacional é constituído de comandos na forma de blocos que são conectados segundo a lógica operacional do sistema de manufatura especificada na seção anterior.

b) O conjunto de critérios considerados compreende:

- minimização do ciclo de fabricação, c_1 ;
- maximização do atendimento do prazo de entrega c_2 ;
- e a minimização dos níveis de estoque, c_3 .

A valoração dos desempenhos destes critérios foi feita segundo os índices definidos na Seção 4.2.3.

c) O conjunto de situações de decisão considerado na aplicação decorre de o sistema de manufatura ser constituído de duas estações de trabalho distintas. Assim, a situação de decisão 1 envolve a definição de prioridades na fila de espera da primeira estação e a situação de decisão 2 envolve a definição de prioridades na fila de espera da segunda estação. Para cada situação de decisão devem ser definidas as variáveis indicadoras de estado correspondentes. As variáveis indicadoras de estado permitem caracterizar um estado relativo a uma situação de decisão. Neste trabalho foram consideradas duas variáveis indicadoras de estado para cada situação de decisão:

- o comprimento da fila no instante da definição das prioridades;
- e a criticidade média da fila no instante da definição das prioridades.

O comprimento da fila é dado pelo número de encomendas que aguardam pelo processamento em uma fila. Esta variável indica a carga de trabalho a que a máquina em questão está submetida, num determinado momento. Para uma situação em que a fila for bastante curta, ou seja, poucas encomendas aguardam processamento nesta fila, o comprimento de fila, neste caso, seria um indicador de que a máquina se encontra pouco solicitada naquele momento.

A criticidade média de uma fila é definida como sendo a média das criticidades das encomendas que estão aguardando numa fila, num determinado momento. A criticidade de uma encomenda é dada pela diferença entre o prazo de entrega previsto para esta

encomenda [*em dias*] e a data atual [*em dias*].

d) O **conjunto de estratégias** é constituído de cinco regras de prioridade [ver Seção 4.2.2] que podem ser aplicadas nas duas situações de decisão especificadas anteriormente. Com o objetivo de apurar o efeito de uma regra de prioridade para uma situação de decisão específica, estabeleceram-se prioridades aleatórias na outra situação de decisão. Por exemplo, para o caso de avaliação da regra SPT na fila 1, fixa-se uma prioridade aleatória na fila 2.

5.2.1 - Definição de Parâmetros de Controle para as Variáveis Indicadoras de Estado

Um dos objetivos do trabalho é avaliar o desempenho das estratégias nos mais variados domínios das variáveis indicadoras de estado. Assim, torna-se necessário definir parâmetros de controle que possam levar à simulação do sistema de manufatura nos domínios das variáveis indicadoras de estado, permitindo a avaliação dos desempenhos das estratégias neste trabalho, no estado de equilíbrio.

A seguir são definidos os parâmetros de controle para as variáveis indicadoras de estado consideradas: o comprimento de fila e a criticidade média de fila.

a) O comprimento da fila 1, resultante com a operação do sistema de manufatura, é função da taxa de chegada das encomendas ao sistema de manufatura, do tempo de processamento médio da estação de trabalho 1 e da regra de prioridade empregada na situação de decisão 1. O tempo médio de processamento da estação de trabalho 1 segue uma distribuição exponencial cuja média é conhecida [ver Seção anterior]. Supõe-se adicionalmente que o tempo médio de processamento da estação de trabalho 1 seja independente da taxa de chegada de encomendas no sistema de manufatura. Isto conduz à afirmação de que a variação do comprimento da fila 1 depende unicamente da taxa de chegada das encomendas. Ou seja, se em média poucas encomendas são introduzidas no sistema, a fila 1 tende a ter um comprimento menor do que se em média muitas encomendas fossem introduzidas no sistema.

Portanto, para avaliar o desempenho das regras em uma faixa representativa do domínio da variável de estado "comprimento de fila 1", é necessário apenas variar a taxa de chegada de encomendas ao sistema do manufatura. O processo de chegada de encomendas no sistema de manufatura é considerado ser um processo de Poisson.

b) O comprimento da fila 2, resultante com a operação do sistema de manufatura, é função do processo de atendimento da estação 1 (pois as encomendas chegam na fila 2 depois de serem processadas naquela estação), do processo de atendimento na estação 2 e da regra de prioridade utilizada na situação de decisão 2. Os tempos de processamento

seguem distribuições exponenciais com média definida. O comprimento da fila 2 pode ser influenciado caso a carga da estação de trabalho 1 estiver, em média, abaixo de sua carga máxima possível. Isto pode ser atingido com o uso de taxas menores de chegada de encomendas no sistema do que aquela taxa mínima que conduz à ocupação máxima da estação de trabalho 1.

Portanto, a variável de estado "comprimento da fila 2" pode ser influenciada diretamente pelo uso de taxas apropriadas de chegada de encomendas no sistema de manufatura.

c) A criticidade média da fila 1 (ou da fila 2), resultante com a operação do sistema de manufatura, depende dos valores estabelecidos para o prazo de entrega no momento em que as encomendas são geradas e da regra de prioridade usada em cada situação de decisão. Portanto, vários níveis de criticidade em ambas as filas podem ser obtidos com a utilização de vários níveis de prazos de entrega durante a geração de encomendas.

5.2.2 - Descrição dos Experimentos

A fase de levantamento do desempenho das regras de prioridade está baseada na variação sistemática e gradual dos parâmetros definidos na Seção 5.2.1. Como foi descrito anteriormente, cada uma das duas situações de decisão consideradas no trabalho, é caracterizada pelo comprimento da fila que antecede a estação de trabalho e pela criticidade média desta fila. Para que a avaliação das regras seja feita para um conjunto representativo de diferentes estados do sistema, basta variar os parâmetros:

- taxa de entrada das encomendas
- e o prazo de entrega das encomendas.

5.2.2.1 - Análise do Parâmetro "Taxa de Entrada de Encomendas"

A fixação de valores específicos para este parâmetro permite a obtenção, no estado de equilíbrio, de maiores ou menores cargas no sistema de manufatura.

Com o objetivo de avaliar o comportamento das regras de prioridade para o sistema de manufatura submetido a altas, médias e baixas cargas de trabalho, foi necessário realizar algumas simulações preliminares para conhecer a faixa de valores da taxa de chegada de encomendas que conduz o sistema àquelas cargas de trabalho. Nesta análise, foi empregada uma regra de prioridade aleatória, nas duas situações de decisão, a fim de não incorporar tendências específicas das regras de prioridade a serem avaliadas. Os resultados obtidos mostram que:

- um tempo médio entre chegadas de 9,1 unidades de tempo gera uma carga de trabalho para o sistema de manufatura que se manifesta num comprimento médio de fila de

aproximadamente 4 encomendas. Este valor indica uma pequena carga de trabalho para o sistema de manufatura;

- um tempo médio entre chegadas de 7,1 unidades de tempo conduz a um comprimento médio de fila de aproximadamente 65 encomendas, o que configura uma grande carga de trabalho para o sistema de manufatura.

Estes resultados permitem estabelecer a faixa de variação do tempo médio entre chegadas de encomendas que conduz a pequenas, médias e grandes cargas de trabalho.

Para a fase de avaliação foram considerados cinco níveis de valores para o tempo médio entre chegadas: 9,1, 8,5, 7,5, 7,3 e 7,1 unidades de tempo.

5.2.2.2 - Análise do Parâmetro "Prazo de Entrega das Encomendas"

A fixação dos valores específicos para esta variável permite a obtenção, no estado de equilíbrio, de filas de espera com maior ou menor criticidade em relação ao prazo de entrega.

Com o objetivo de avaliar o comportamento das regras de prioridade numa faixa representativa para as criticidades médias das filas 1 e 2, fixou-se cinco níveis de valores para o prazo de entrega das encomendas. Para a obtenção destes cinco níveis variou-se o parâmetro C da seguinte função:

$$PE = T + C$$

onde: PE - prazo de entrega da encomenda [em dias];

T - data de entrada da encomenda no sistema [em dias do período de planejamento];

C - constante [em dias].

A constante C assume cinco valores distintos durante a avaliação do desempenho de cada regra. Estes valores foram definidos como sendo: -3,0, -1,5, 0,0, 1,5 e 3,0. Um valor C=-3,0 indica que a encomenda já chegou ao sistema com um atraso de três dias, o que pode ser considerado uma situação bastante crítica em relação ao prazo de entrega. Um valor de C=3,0 faz com que a encomenda entre no sistema de manufatura com uma situação pouco crítica em relação ao prazo de entrega. Neste caso a encomenda tem seu prazo de entrega estabelecido para três dias após sua entrada no sistema.

5.2.2.3 - Número de Simulações Realizadas

O número de simulações realizadas na fase de avaliação é dado pela combinação dos vários níveis considerados para os parâmetros de controle das variáveis indicadoras de estado. Dado que cinco níveis de valores foram considerados para cada parâmetro de

controle, foi necessário realizar 25 (5 níveis para o primeiro parâmetro \times 5 níveis para o segundo parâmetro) simulações para avaliar o desempenho de uma regra de prioridade em uma situação de decisão. Como foram avaliadas cinco regras de prioridade em duas situações de decisão, o total de experimentos realizados na fase de avaliação foi de 250 simulações (25 combinações de parâmetros \times 5 regras de prioridade \times 2 situações de decisão).

5.2.2.4 - Análise do Estado de Equilíbrio

A utilização de técnicas de simulação para a realização de experimentos implica na validação dos resultados obtidos através da análise do estado de equilíbrio.

Em qualquer simulação, os resultados somente podem ser considerados válidos para análise futura, se os mesmos forem obtidos nas condições de regime estacionário, ou seja, quando os resultados obtidos independem das condições iniciais utilizadas. Como é geralmente imprevisível definir o regime estacionário para iniciar a simulação neste estado, faz-se uso de algumas estratégias que procuram minimizar os efeitos das condições iniciais nos resultados finais [Shamblim/Stevens, 1979, p.199]. A estratégia mais comum é realizar uma simulação relativamente longa, ignorando as estatísticas da fase inicial, que geralmente consiste da fase de transição do estado inicial até o estado de equilíbrio. A questão é definir o ponto no tempo simulado em que se deve iniciar a coleta das estatísticas desejadas.

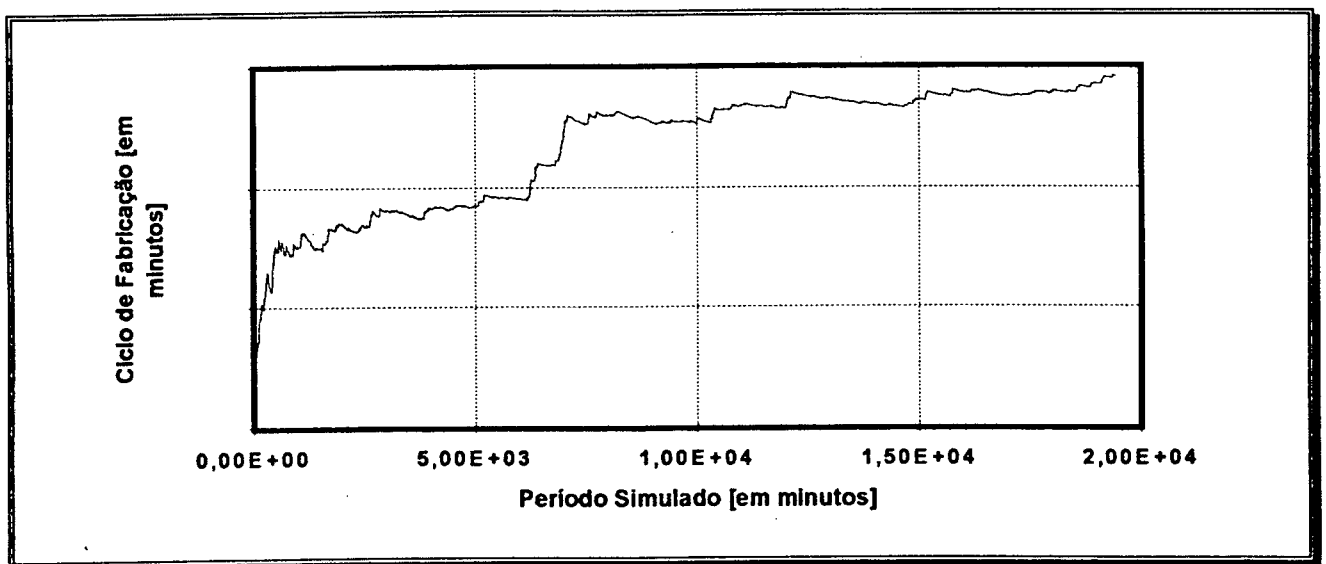


Figura 5.2 - Resultado da Análise do Estado de Equilíbrio do Sistema Simulado

Para os propósitos deste trabalho, realizou-se uma simulação com o modelo do sistema de manufatura com duração de 100.000 unidades de tempo, utilizando a regra de prioridade SPT. Na Figura 5.2 é apresentado a variação do ciclo de fabricação obtido durante as primeiras 20.000 unidades de tempo deste experimento.

Pode-se observar que após a simulação de 8.000 unidades de tempo, a variação do ciclo de fabricação é mínima, indicando que as condições iniciais da simulação não devem mais estar interferindo de forma significativa no valor do ciclo de fabricação e, por isso, pode ser considerado o ponto de início do regime estacionário.

5.2.3 - Resultados da Fase de Avaliação

A fase de avaliação gera uma quantidade relativamente grande de informações sobre o desempenho das regras de prioridade. Os resultados obtidos de uma regra de prioridade para cada situação de decisão, podem ser representados graficamente na forma de uma malha, onde os nós representam os valores médios das variáveis indicadoras de estado obtidos com a simulação, no estado de equilíbrio [Figura 5.3].

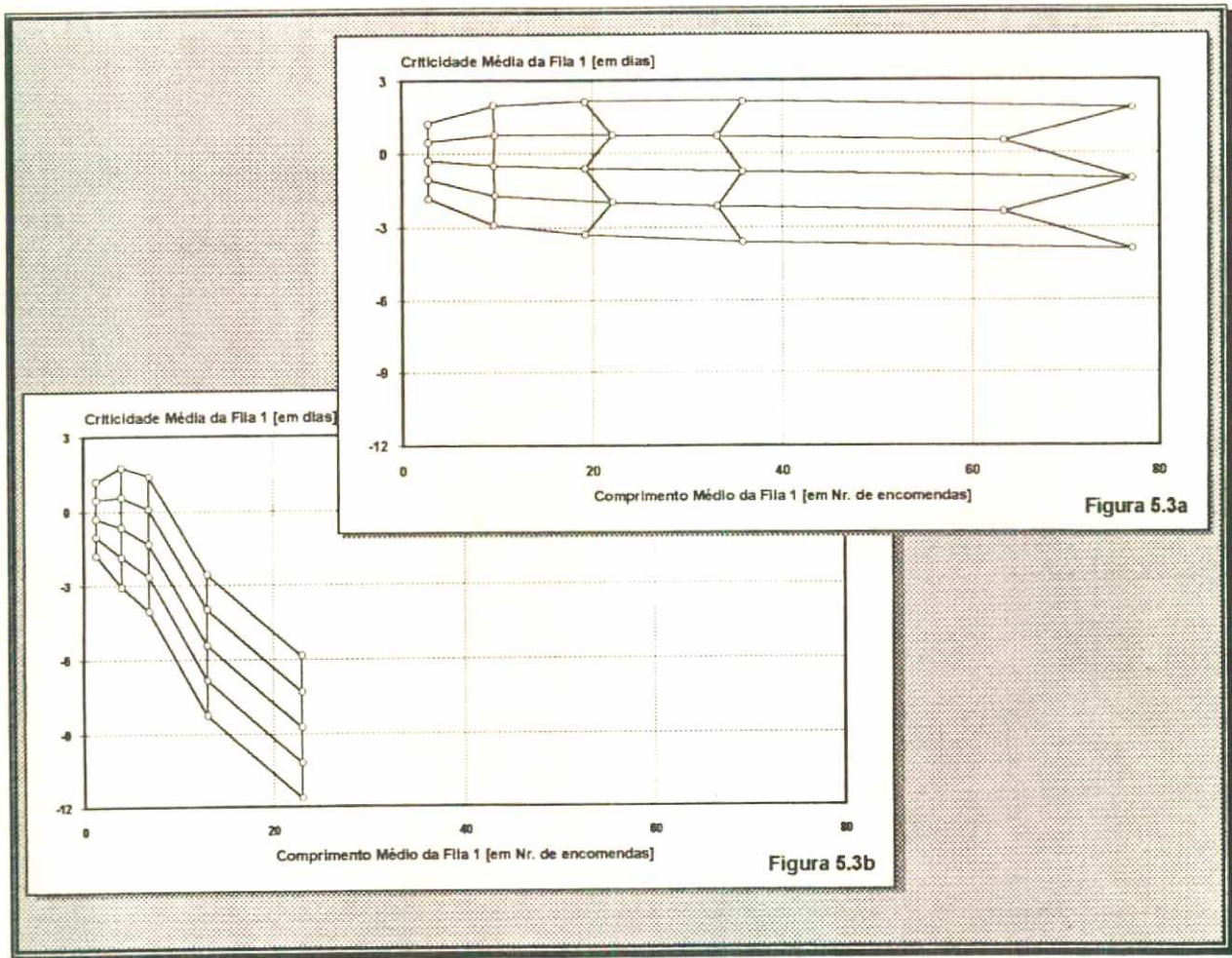


Figura 5.3 - "Malhas" Obtidas com a Aplicação das Regras de Prioridade SLACK (Figura 5.3a) e SPT (Figura 5.3b), na Fila 1 do Sistema de Manufatura

Nas Figuras 5.3a e 5.3b estão representadas as malhas obtidas com as regras SLACK e SPT, respectivamente. Por construção, as simulações permitem determinar os valores dos desempenhos dos critérios exatamente nos nós da malha. Estes valores não estão representados diretamente nas Figuras 5.3a e 5.3b.

As ligações entre os nós representam a direção do aumento (ou decréscimo) dos níveis estabelecidos para o parâmetro de controle da taxa de chegada que influencia diretamente no comprimento médio de fila, e o parâmetro do prazo de entrega, que influencia a criticidade média de fila.

A observação mais detalhada das malhas apresentadas na Figura 5.3, permite verificar que:

- os valores do comprimento médio de fila correspondente aos nós da malha da regra SPT são consideravelmente menores que aqueles da malha SLACK, apesar dos valores

para os parâmetros de controle serem iguais para ambas as regras. Isto decorre da regra SPT priorizar o processamento das peças mais curtas da fila, induzindo a conclusão de um número maior de peças do que a regra SLACK, no mesmo período, tornando menor o comprimento médio da fila de espera;

- as ligações entre os nós da malha relacionados à regra de prioridade SPT que correspondem às variações dos níveis do prazo de entrega são sempre ortogonais em relação ao eixo do comprimento médio de fila. Este fato decorre da independência entre a variável de estado "comprimento de fila" e a variável de estado "criticidade média da fila" quando a regra SPT for aplicada, já que esta regra SPT prioriza as encomendas baseando-se somente no seu tempo de processamento, desconsiderando o valor relacionado ao prazo de entrega (que tem influência direta na criticidade média da fila). A aplicação da regra SLACK cria uma relação de dependência entre as variáveis de estado consideradas por priorizar encomendas segundo os seus valores de prazo de entrega e tempo de processamento.

A simulação pode ser vista neste processo de avaliação de desempenho como um mecanismo de apuração das relações de dependência entre de variáveis de estado para um conjunto pré-determinado de valores de parâmetros de controle. O conjunto de valores dos parâmetros pode ser igualmente representado numa malha, que neste caso será sempre ortogonal. A simulação de um sistema de manufatura com a aplicação de uma regra de prioridade pode ser vista como uma transformação do espaço de parâmetros no espaço de estados.

5.3 - Fase de Operacionalização do Modelo

A fase de operacionalização do modelo consiste da utilização da base de informações adquirida na fase inicial do modelo. Nesta fase será utilizado o algoritmo do Quadro 4.2. Cada vez que ocorrer uma situação de conflito, ou seja, duas ou mais encomendas estiverem aguardando processamento numa fila relacionada a uma situação de decisão, o modelo deverá calcular a criticidade média da fila em relação ao prazo de entrega [*em dias*] e o comprimento da mesma [*em número de encomendas*] e "passar" estes valores ao algoritmo. Em seguida, através do algoritmo será determinada qual das regras utilizar para priorizar as encomendas.

Usou-se os três critérios clássicos do planejamento da produção, a função utilidade correspondente à regra de prioridade r , U_r , é

$$U_r = p_1 \times c_1^r + p_2 \times c_2^r + p_3 \times c_3^r.$$

5.4 - Avaliação do Desempenho do Modelo Proposto

A avaliação do desempenho do modelo proposto foi realizada utilizando-se o mesmo modelo de simulação desenvolvido para a fase de avaliação. Para a avaliação foram testadas duas abordagens:

- o método *Geometrical Approximate Reasoning*;
- e a técnica de redes neuronais.

Para cada uma destas abordagens realizou-se três séries de simulações. Em cada série visou-se otimizar somente um dos três critérios isoladamente, desconsiderando-se portanto, qualquer combinação entre eles. Assim, os critérios considerados em cada série foram:

- Série 1: Critério de minimização do ciclo médio de fabricação, c_1 ;
- Série 2: Critério de maximização do atendimento do prazo de entrega, c_2 ;
- Série 3: Critério de minimização dos níveis de estoques, c_3 .

Segundo esta sistemática fixou-se, para a primeira série $p_1=1$, $p_2=0$ e $p_3=0$, ou seja, fixou-se o grau de importância relativa ao primeiro critério (minimização do ciclo médio de fabricação) igual ao seu valor máximo e os demais igual ao valor mínimo. Para a segunda série fixou-se $p_1=0$, $p_2=1$ e $p_3=0$, e para a terceira série fixou-se $p_1=0$, $p_2=0$ e $p_3=1$.

5.4.1 - Descrição dos Experimentos da Fase de Operacionalização

Para as simulações realizadas considerou-se treze níveis de carga no sistema de manufatura e três níveis de criticidade média na primeira fila do sistema de manufatura.

Os níveis de carga no sistema considerados nos testes, induziram a variações em praticamente todo o domínio da ocupação das máquinas do sistema: de 0,03% a 95%. A criticidade média considerada na simulação para a primeira fila do sistema de manufatura, foi categorizada *a priori* em três níveis distintos:

- muito críticas, com atraso médio em relação ao prazo de entrega de dois dias;
- medianamente críticas, sem atraso médio em relação ao prazo de entrega;
- pouco críticas, com folga média de um dia para o prazo de entrega.

A simulação de um nível de carga e um nível de criticidade de cada série teve duração pré-fixada de 40.000 unidades de tempo, sendo que as primeiras 10.000 unidades de tempo não foram consideradas nas estatísticas devido ao problema do estado de equilíbrio [ver Seção 5.2.2.4].

a) - Utilização do *Geometrical Approximate Reasoning* como máquina de inferência

Como descrito na Seção 4.3.1.2, os resultados obtidos na fase de avaliação das regras de prioridade podem ser descritos graficamente sob forma de "malhas". Cada regra formará uma "malha", obtendo-se, portanto, dez "malhas". Na fase de operacionalização, sempre que necessário escolher qual a próxima encomenda processar, é calculado e informado ao *Geometrical Approximate Reasoning* o vetor indicador de estado x_0 composto pelo comprimento da fila onde deve ser feita a escolha e pela criticidade média desta fila em relação ao prazo de entrega.

Após informado o valor do vetor indicador de estado x_0 , será determinado em qual região de cada uma das dez "malhas" x_0 está situado. Após determinada a posição do ponto x_0 , isto é, após situado numa sub-região de área de influência de vários elementos da "malha", será construído o grau de influência para cada elemento vizinho de x_0 com uma função pertinência da teoria dos conjuntos difusos. Assim, poderá ser obtido o valor c_0 (valor da função utilidade) pela soma ponderada destes graus de pertinência, que são normalizados, e dos correspondentes valores da função utilidade nestes pontos. Após isto será escolhido a regra que otimizou o valor da função utilidade, determinando a próxima encomenda a ser processada segundo esta regra.

b) - Utilização de uma Rede Neuronal como máquina de inferência

A segunda abordagem usada na fase de operacionalização do modelo foi a técnica de redes neurais para substituir máquina de inferência. O tipo de rede escolhido foi *backpropagation*, disponível no Sistema de Redes Neurais *NeuralWorks* [1990].

Inicialmente treinou-se uma rede consistindo de seis elementos processadores na camada de entrada, de três elementos processadores na camada de saída (e de um número variado de camadas escondidas e respectivos elementos processadores). As entradas da rede foram:

- X_1 : número da situação de decisão ($X_1=1$ ou $X_1=2$);
- X_2 : número da regra de prioridade ($X_2=1, \dots, 5$);
- X_3 : comprimento médio da fila 1;
- X_4 : criticidade média da fila 1;
- X_5 : comprimento médio da fila 2;
- X_6 : criticidade média da fila 2;

E as saídas da rede foram:

- C_1 : índice do nível médio dos estoques;
- C_2 : índice do ciclo médio de fabricação não ponderado;
- C_3 : índice do atendimento do prazo de entrega não ponderado;

Numa etapa posterior separou-se a rede de seis elementos processadores na camada de entrada, em duas redes, uma rede para cada situação de decisão. Neste caso o número de entradas foi reduzido a cinco:

- X_1 : número da regra de prioridade ($X_1=1,\dots,5$)
- X_2 : comprimento médio da fila 1;
- X_3 : criticidade média da fila 1;
- X_4 : comprimento médio da fila 2;
- X_5 : criticidade média da fila 2;

Em seguida subdividiu-se cada rede em cinco redes, uma para cada regra de prioridade aplicada numa situação de decisão, resultando em dez redes (5 regras \times 2 situações de decisão). As entradas da rede foram:

- X_1 : comprimento médio da fila 1;
- X_2 : criticidade média da fila 1;
- X_3 : comprimento médio da fila 2;
- X_4 : criticidade média da fila 2;

Cada rede neuronal consistindo das três saídas descritas acima foi subdivida em outras três redes consistindo de uma saída. Ou seja, treinou-se uma rede onde a saída é o índice do nível de estoque, outra rede onde a saída é o índice do ciclo médio de fabricação e uma terceira rede onde a saída é o índice do atendimento do prazo de entrega. Observou-se que as redes que consistem de uma saída, treinaram melhor, apresentando o menor erro entre as saídas desejadas e as obtidas. A arquitetura de rede que proporcionou melhores resultados na fase de treinamento é composta de quatro elementos processadores na camada de entrada, de uma camada escondida com cinco elementos processadores e de um elemento processador na camada de saída [Figura 4.1]. Assim, treinou-se 30 redes (5 regras \times 3 critérios \times 2 situações de decisão) que posteriormente foram incorporadas no modelo de simulação através de um programa feito na linguagem FORTRAN.

5.4.2 - Resultados Obtidos

A seguir são apresentados os resultados obtidos utilizando as duas abordagens de inferência. Além disso, será feita uma breve discussão da frequência de chamada para algumas situações de carga média no sistema para o uso do *Geometrical Approximate Reasoning*. Os resultados obtidos com a aplicação do modelo, tanto para o método *Geometrical Approximate Reasoning* como para a técnica de redes neurais, foram comparados com aqueles que seriam obtidos se cada uma das regras de prioridade consideradas fosse aplicada intermitentemente.

5.4.2.1 - Critério de Minimização do Ciclo Médio de Fabricação

A primeira série considerada envolveu a minimização do ciclo médio de fabricação. Os resultados obtidos usando o *Geometrical Approximate Reasoning* e a Rede Neuronal como máquinas de inferência, estão representados graficamente na Figura 5.4, que apresenta três gráficos correspondentes aos três níveis de criticidade analisados. A Figura 5.4a ilustra os resultados obtidos considerando-se o sistema de manufatura submetido a treze níveis crescentes de carga de trabalho e encomendas com prazos de entrega que induzem uma alta criticidade com relação ao prazo de entrega na primeira fila. A Figura 5.4b ilustra os resultados obtidos para os treze níveis de carga, porém para um nível médio de criticidade na primeira fila. Finalmente, na Figura 5.4c são apresentados os resultados correspondentes a um nível de criticidade mais baixo.

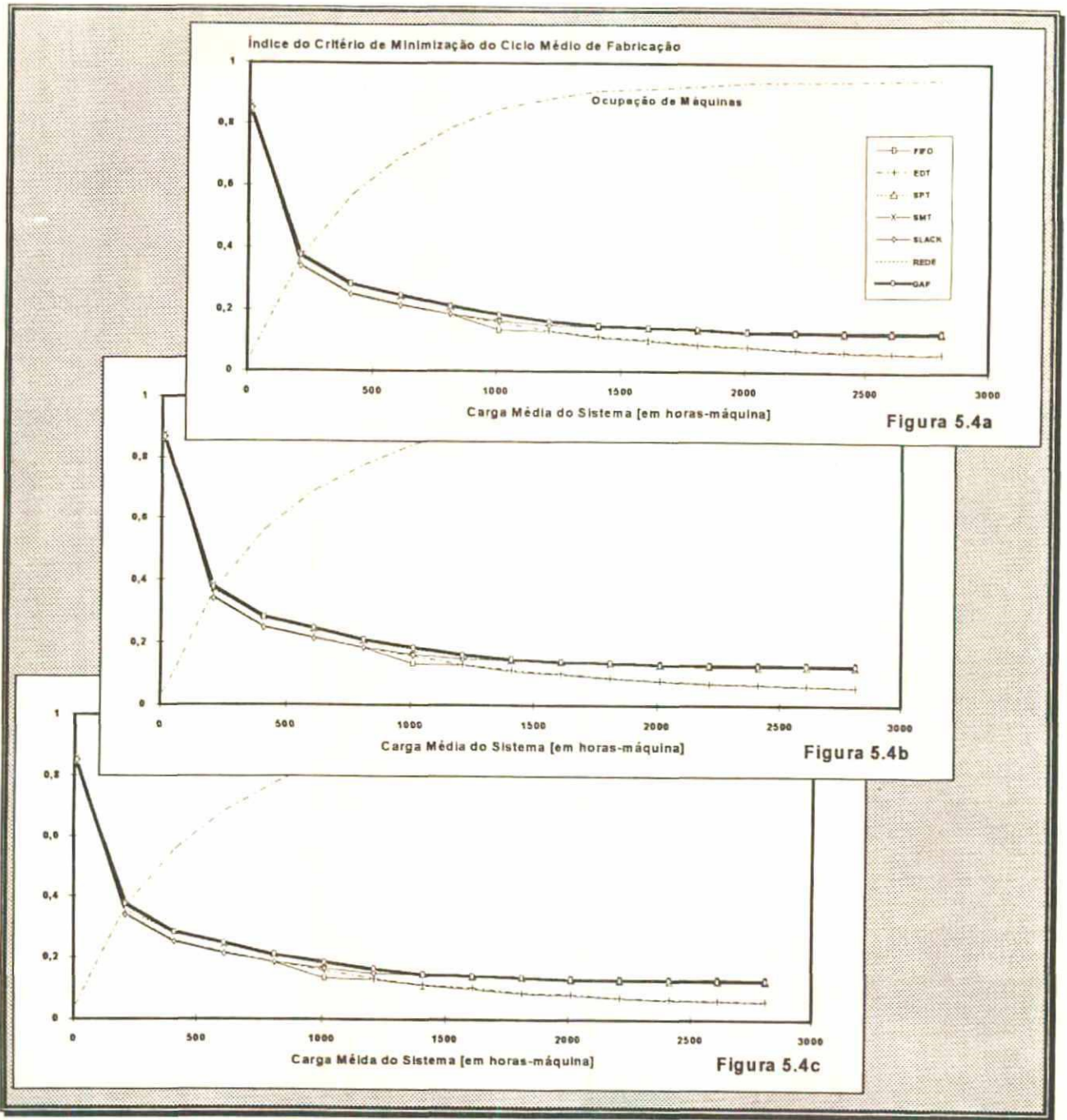


Figura 5.4 - Resultados Obtidos para a Minimização do Ciclo Médio de Fabricação (Figura 5.4a - Nível Alto de Criticidade, Figura 5.4b - Nível Médio de Criticidade, Figura 5.4c - Nível Baixo de Criticidade)

Os gráficos da Figura 5.4 mostram que o modelo proposto tanto usando *Geometrical Approximate Reasoning* como a Rede Neuronal apresentou resultados tão bons quanto aqueles obtidos pela aplicação intermitente das regras de prioridade consideradas. Com o aumento da ocupação das máquinas, o modelo proposto tende a proporcionar resultados 100% superiores àqueles obtidos através das regras FIFO e EDT, e resultados tão bons

quanto os obtidos pelas regras SPT, SMT e SLACK.

A frequência com que as regras de prioridade foram selecionadas e aplicadas pelo modelo usando o *Geometrical Approximate Reasoning* com máquina de inferência, são apresentados para níveis pontuais de ocupação média de 85% e 95% e níveis alto e baixo de criticidade, na Figura 5.5.

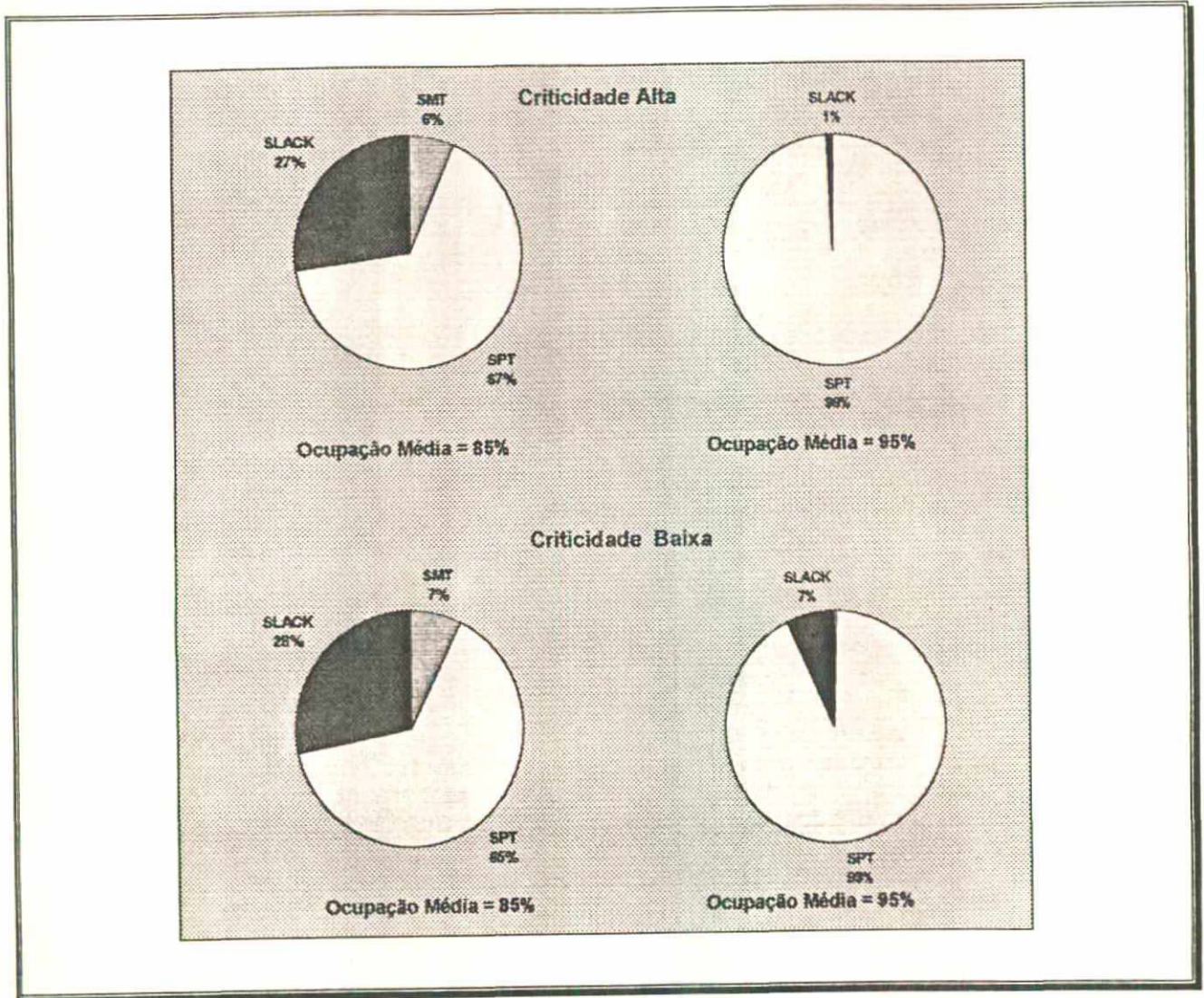


Figura 5.5 - Frequência de Chamada das Regras de Prioridade para o Caso de Minimização do Ciclo Médio de Fabricação

Observa-se que a regra SPT foi a regra mais aplicada pelo modelo nesta série. Este fato já era esperado pois esta regra é conhecida por gerar planos que tendem a diminuir o ciclo médio de fabricação. Quando a ocupação de máquinas é menor, a regra SLACK tem participação mais ativa no modelo do que quando a ocupação é maior. Esta constatação decorre da tendência que a regra SLACK tem de priorizar as encomendas que têm prazo

de entrega mais crítico. As frequências de chamada das regras de prioridade com o uso da Rede Neuronal são semelhantes aos descritos para *Geometrical Approximate Reasoning* diferenciando-se somente para o nível alto de criticidade quando o modelo utilizou somente a regra de prioridade SPT.

5.4.2.2 - Critério de Maximização do Atendimento do Prazo de Entrega

A segunda série de simulações envolveu a maximização do atendimento do prazo de entrega. Os resultados obtidos, usando *Geometrical Approximate Reasoning* e Redes Neurais como máquinas de inferência, são ilustrados graficamente na Figura 5.6. A apresentação segue a mesma sistemática adotada para a Figura 5.4, ou seja, na Figura 5.6a estão representados os resultados considerando-se um nível de criticidade alto na primeira fila, enquanto a Figura 5.6b apresenta os resultados para um nível de criticidade médio e a Figura 5.6c apresenta os resultados para níveis de criticidade mais baixos.

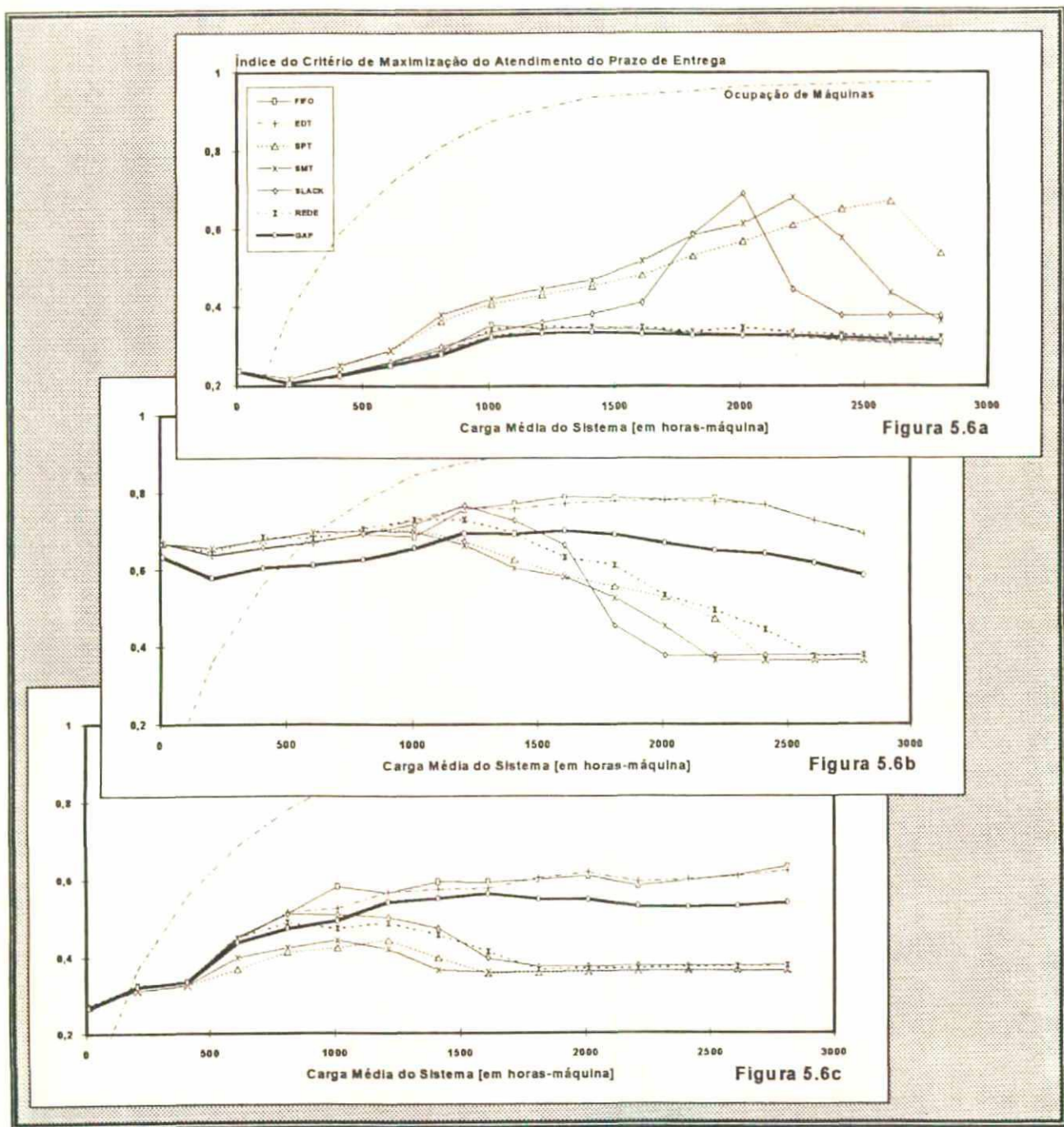


Figura 5.6 - Resultados Obtidos Para a Maximização do Atendimento do Prazo de Entrega. (Figura 5.6a - Nível Alto de Criticidade, Figura 5.6b - Nível Médio de Criticidade, Figura 5.6c - Nível Baixo de Criticidade)

Para esta série de resultados, observa-se que o modelo usando o *Geometrical Approximate Reasoning*, apresentou resultados inferiores àqueles obtidos pela aplicação das regras de prioridade SPT, SMT e SLACK, quando o nível médio de criticidade é elevado [Figura 5.6a]. Esta desvantagem do modelo diminui consideravelmente com a diminuição dos níveis de criticidade. Assim, quando a criticidade da primeira fila do sistema de

manufatura for média [Figura 5.6b] e a ocupação das máquinas tender ao valor máximo, o modelo proporciona resultados tão bons quanto aqueles obtidos pelas regras FIFO e EDT, que para esta situação produzem resultados bem superiores àqueles das regras SPT, SMT e SLACK, que haviam se saído melhor quando a criticidade média for elevada. Com a diminuição da criticidade, o modelo proporciona resultados superiores a qualquer um daqueles obtidos com as regras de prioridade consideradas [Figura 5.6c].

O modelo, usando a Rede Neuronal, para níveis altos de criticidade, não proporcionou bons resultados, acompanhando a pior regra para a situação. Para níveis menores de criticidade e de ocupação, o modelo obteve resultados aproximadamente iguais aos das melhores regras para a situação que foram as regras FIFO e EDT. Para os demais níveis de ocupação do sistema, o modelo apresenta resultados superiores ou iguais aos das regras SPT, SMT e SLACK.

Na Figura 5.7 encontram-se representadas as frequências de chamada das regras de prioridade obtidas pelo modelo usando *Geometrical Approximate Reasoning* como máquina de inferência, em situações críticas e menos críticas, e com ocupação média das máquinas de 85% e 95%.

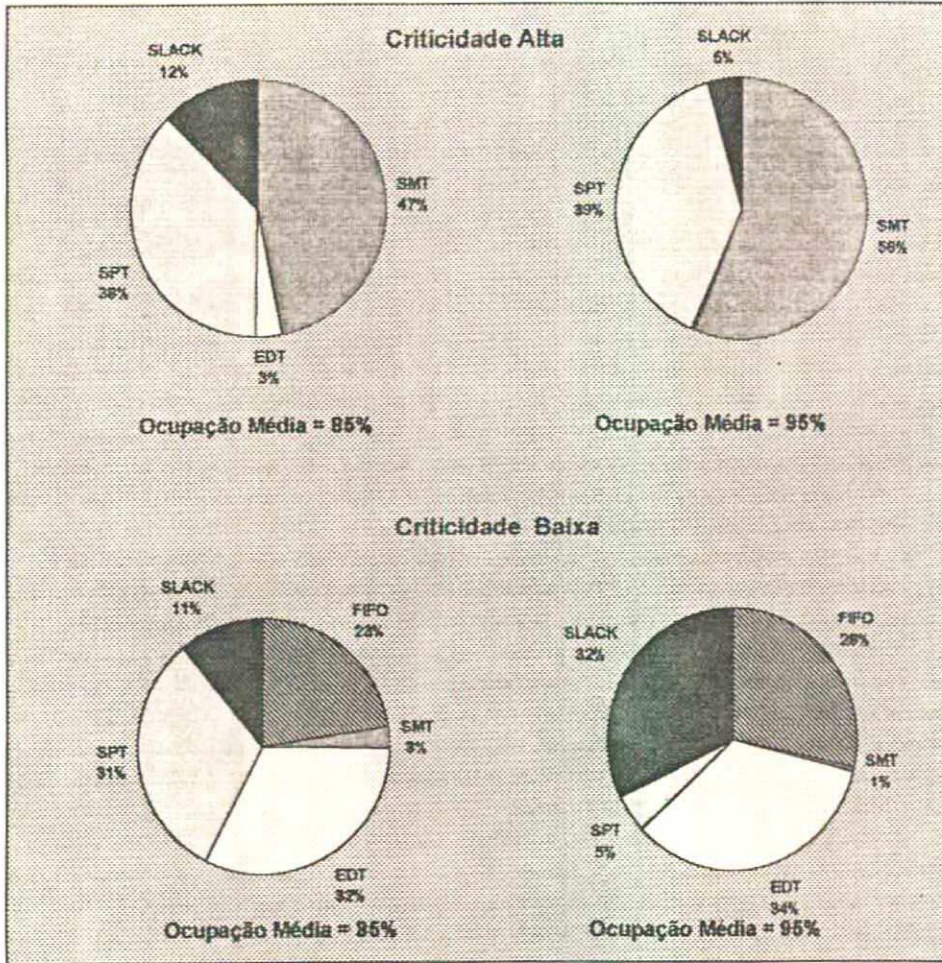


Figura 5.7 - Frequência de Chamada das Regras de Prioridade para o Caso de Maximização do Atendimento do Prazo de Entrega

Pode-se observar, que as regras SPT, SMT e SLACK foram as mais chamadas pelo modelo usando o *Geometrical Approximate Reasoning*, quando o sistema foi operado sob criticidade alta confirmando o resultado apresentado na Figura 5.6a, onde observa-se que as regras SMT, SPT e SLACK foram as que obtiveram melhor desempenho na maximização do atendimento do prazo de entrega. Quando a criticidade da primeira fila for menor, observa-se que, as regras mais chamadas quando o sistema operado sob criticidade baixa, principalmente a regra SMT, cederam lugar as regras EDT e FIFO. Quando usou-se a Rede Neuronal, a frequência de chamada das regras diferenciou-se basicamente na diminuição do número de chamadas da regra FIFO, e no aumento de chamada das regras SPT e SMT, o que pode ter piorado o desempenho do modelo.

5.4.2.3 - Critério de Minimização dos Níveis de Estoques

A terceira série de simulações considerou o critério de minimização dos níveis de estoques. Os resultados obtidos para os três níveis de criticidade, alto, médio e baixo, são apresentados nas Figuras 5.8a, 5.8b, 5.8c, respectivamente.

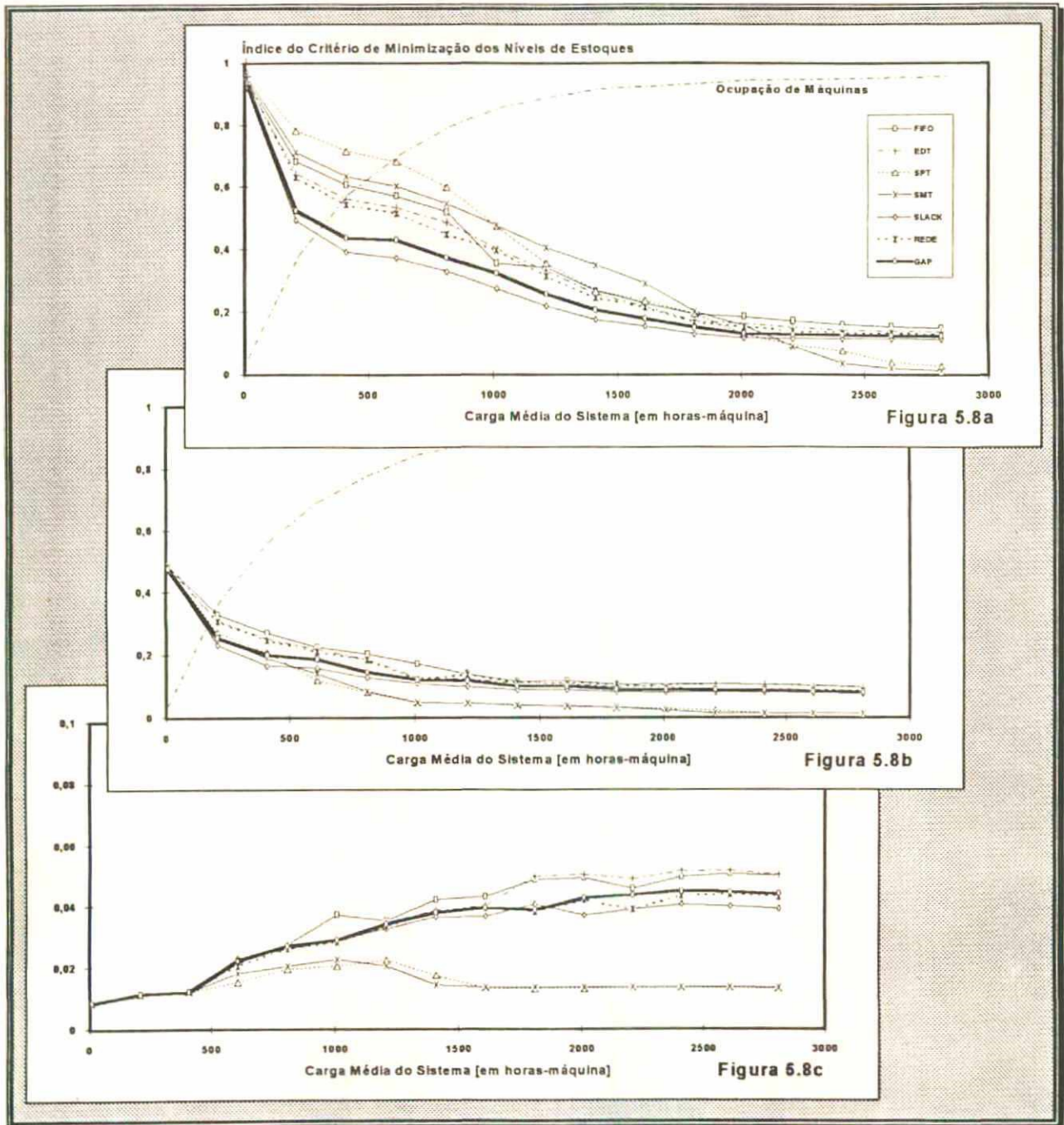


Figura 5.8 - Resultados Obtidos para a Minimização dos Níveis de Estoques. (Figura 5.8a - Nível Alto de Criticidade, Figura 5.8b - Nível Médio de Criticidade, Figura 5.8c - Nível Baixo de Criticidade)

Neste caso o modelo, usando o *Geometrical Approximate Reasoning*, proporcionou resultados sensivelmente inferiores àqueles obtidos pelas regras FIFO, EDT, SPT e SMT quando a ocupação do sistema de manufatura for baixa e a criticidade for alta [Figura 5.8a]. Com o aumento da ocupação, o desempenho das melhores regras é menor até praticamente se igualar àqueles resultados obtidos pelo modelo. Com a diminuição do nível de criticidade [Figura 5.8b], as vantagens obtidas pelas regras EDT e FIFO em relação ao modelo são mínimas para uma baixa ocupação de máquinas. Com o aumento da carga do sistema, e conseqüentemente da ocupação de máquinas, o modelo produz resultados semelhantes aos daqueles obtidos pelas regras que melhor se classificaram. Para níveis de criticidade mais baixos [Figura 5.8c], os índices obtidos para o critério de minimização dos níveis de estoque, se reduziu drasticamente (comprar escalas da Figura 5.8a com as da Figura 5.8c). Isto se deve ao fato que os estoques de produto acabado são, para este nível baixo de criticidade, bastante elevados, já que a grande maioria das encomendas são concluídas antes da data do prazo de entrega. O modelo proporciona, para estes níveis de criticidade, resultados tão bons quanto aqueles produzidos por aquelas regras que melhor se classificaram quando a ocupação foi baixa. Com o aumento da ocupação das máquinas, o modelo produz resultados inferiores aos daqueles resultados das regras FIFO e EDT, porém sensivelmente melhores que aqueles obtidos pelas regras SPT, SMT e SLACK.

Quando do uso da Rede Neuronal, para o níveis altos de criticidade e baixa ocupação, o modelo apresenta resultados inferiores, porém próximos aos das melhores regras que foram SPT, SMT e FIFO. Para níveis maiores de ocupação do sistema, o modelo proporciona resultados quase tão bons quanto os das melhores regras. Para níveis médios de criticidade, o modelo apresenta resultados tão bons quanto os da melhor regra de prioridade. Para níveis baixos de criticidade, o modelo apresenta resultados inferiores aos das melhores regras que foram EDT e FIFO, porém significativamente superiores aos das regras SALCK, SPT e SMT. Observa-se que o modelo usando a rede obteve resultados superiores quando do uso do *Geometrical Approximate Reasoning* para níveis de criticidade alto e médios.

A freqüência de chamada para níveis altos e baixos de criticidades e níveis de ocupações de máquina de 85% e 95%, são apresentadas na Figura 5.9 com o modelo usando o *Geometrical Approximate Reasoning*.

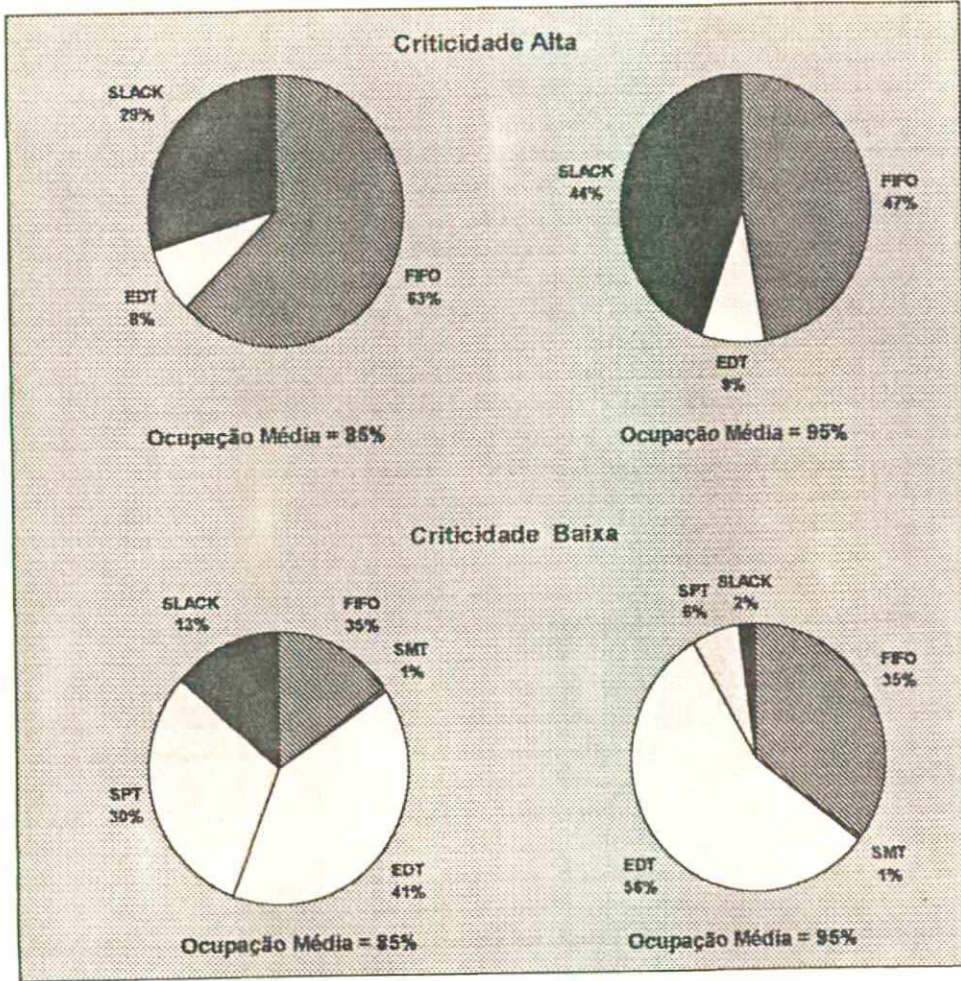


Figura 5.9 - Frequência de Chamada das Regras de Prioridade para o Caso de Minimização dos Níveis de Estoques

Observa-se que no caso de criticidade alta, a regra FIFO foi a mais chamada pelo modelo, confirmando a tendência desta regra ser a que melhor desempenho proporciona para a minimização dos níveis de estoques [Figura 5.8a]. Para o caso de uma criticidade baixa na primeira fila, observa-se que o modelo, além de chamar com muita frequência as regras EDT, FIFO e SLACK, que obtiveram bom desempenho na avaliação do índice do nível médio de estoques, chamou também, a regra SPT que apresentou resultados inferiores as demais regras [Figura 5.8c]. Quando a ocupação das máquinas for maior, o uso das regras EDT e FIFO predomina no modelo. Estas duas regras são aquelas que levaram ao melhor desempenho quando aplicadas intermitentemente [Figura 5.8c] para esta situação.

Na análise da frequência de chamada das regras resultante do uso da Rede Neuronal, verifica-se maior frequência de chamada das regras que apresentam melhor desempenho para a situação. Assim, para um nível alto de criticidade, o modelo chama com maior frequência as regras EDT, FIFO e SPT em detrimento da regra SLACK que apresentou os piores resultados para a situação. Para níveis maiores de criticidade, a frequência de chamada das regras é semelhante àquela apresentada com o uso do *Geometrical Approximate Reasoning*.

5.4.2.4 - Resultados Usando a Forma Ponderada do Ciclo Médio de Fabricação e do Desvio Médio do Prazo de Entrega

Uma forma alternativa recomendada [Wiendahl, 1987, p.70] na otimização dos critérios do ciclo médio de fabricação e do atendimento do prazo de entrega, é a ponderação destes valores em relação ao tempo de processamento de cada encomenda. Na obtenção dos índices do ciclo médio de fabricação e do atendimento do prazo de entrega não ponderados, as encomendas com tempo total de processamento mais curto têm a mesma influência das encomendas com tempo total de processamento mais longo. As encomendas com tempos maiores de processamento, geralmente representam maiores lucros para as empresas. A ponderação dos valores do ciclo médio de fabricação e do desvio médio do prazo de entrega em relação ao tempo de processamento, como descrito na Seção 4.2.3, insere maior importância às encomendas mais longas na avaliação do desempenho das regras de prioridade, e conseqüentemente na posterior utilização destes valores de desempenho na fase operacional do modelo.

A definição dos índices do ciclo médio de fabricação ponderado e do desvio do prazo de entrega ponderado é apresentada na Seção 4.2.3. Após a avaliação dos três critérios - minimização do ciclo médio de fabricação, maximização do atendimento do prazo de entrega e minimização dos níveis de estoques - fez-se uma análise de desempenho do modelo considerando-se a forma ponderada para compor o ciclo médio de fabricação e o prazo de entrega e utilizando-se o *Geometrical Approximate Reasoning*.

a) Resultados Obtidos com a Minimização do Ciclo Médio de Fabricação Ponderado

Nas Figuras 5.10a, 5.10b e 5.10c estão apresentados os resultados obtidos para a minimização do ciclo médio de fabricação ponderado, considerando níveis altos, médio e baixos de criticidade, respectivamente.

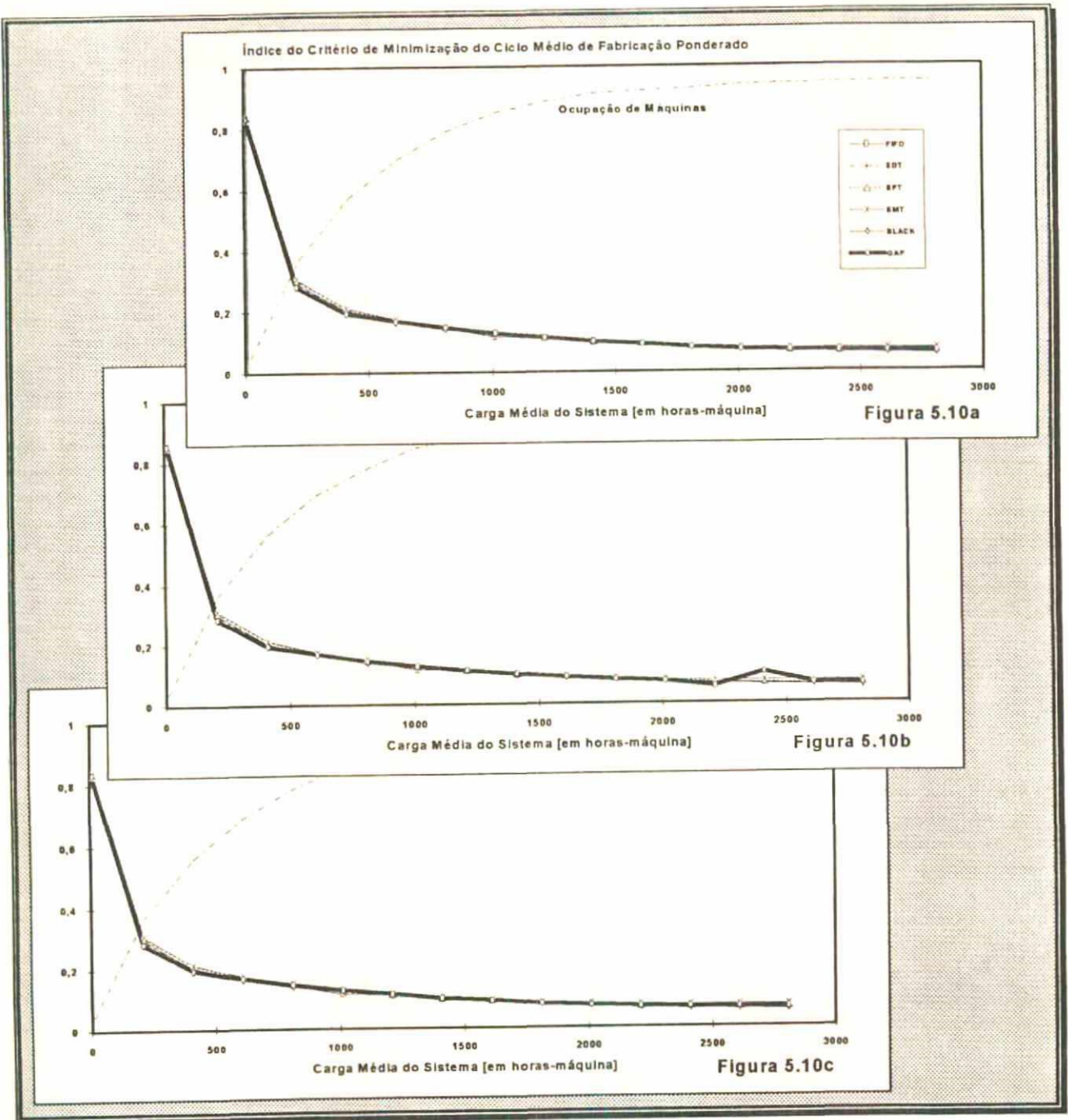


Figura 5.10 - Resultados Obtidos Para a Minimização do Ciclo Médio Ponderado de Fabricação. (Figura 5.10a - Nível Alto de Criticidade, Figura 5.10b - Nível Médio de Criticidade, Figura 5.10c - Nível Baixo de Criticidade)

A aplicação do modelo usando o *Geometrical Approximate Reasoning*, e a aplicação intermitente das regras isoladamente proporcionaram resultados semelhantes, não havendo mudanças significativas no comportamento do modelo em relação ao ciclo médio de fabricação não ponderado.

Observa-se, a partir da Figura 5.10, que não houve uma alteração significativa em relação aos resultados apresentados nos gráficos da Figura 5.4 que ilustram os resultados obtidos para a minimização do índice do ciclo médio de fabricação não ponderados.

Os valores dos índices obtidos usando a ponderação são geralmente inferiores aos obtidos com os índices sem ponderação. Por exemplo, quando o sistema encontra-se com carga máxima (cerca de 2000 horas-máquina) o valor do índice do ciclo de fabricação não ponderado é praticamente o dobro do índice do ciclo de fabricação ponderado. Este fato é devido a maior influência que se dá às encomendas com maior tempo de processamento na obtenção do índice de avaliação. Encomendas com maior tempo de processamento tendem a diminuir sensivelmente o valor do índice quando usa-se a ponderação, tanto para o ciclo médio de fabricação como para o atendimento do prazo de entrega.

b) Resultados Obtidos com a Maximização do Atendimento do Prazo de Entrega Ponderado

Os resultados obtidos para a maximização do atendimento do prazo de entrega ponderado encontram-se representados nas Figuras 5.11a, 5.11b e 5.11c, considerando níveis altos, médio e baixos de criticidade, respectivamente.

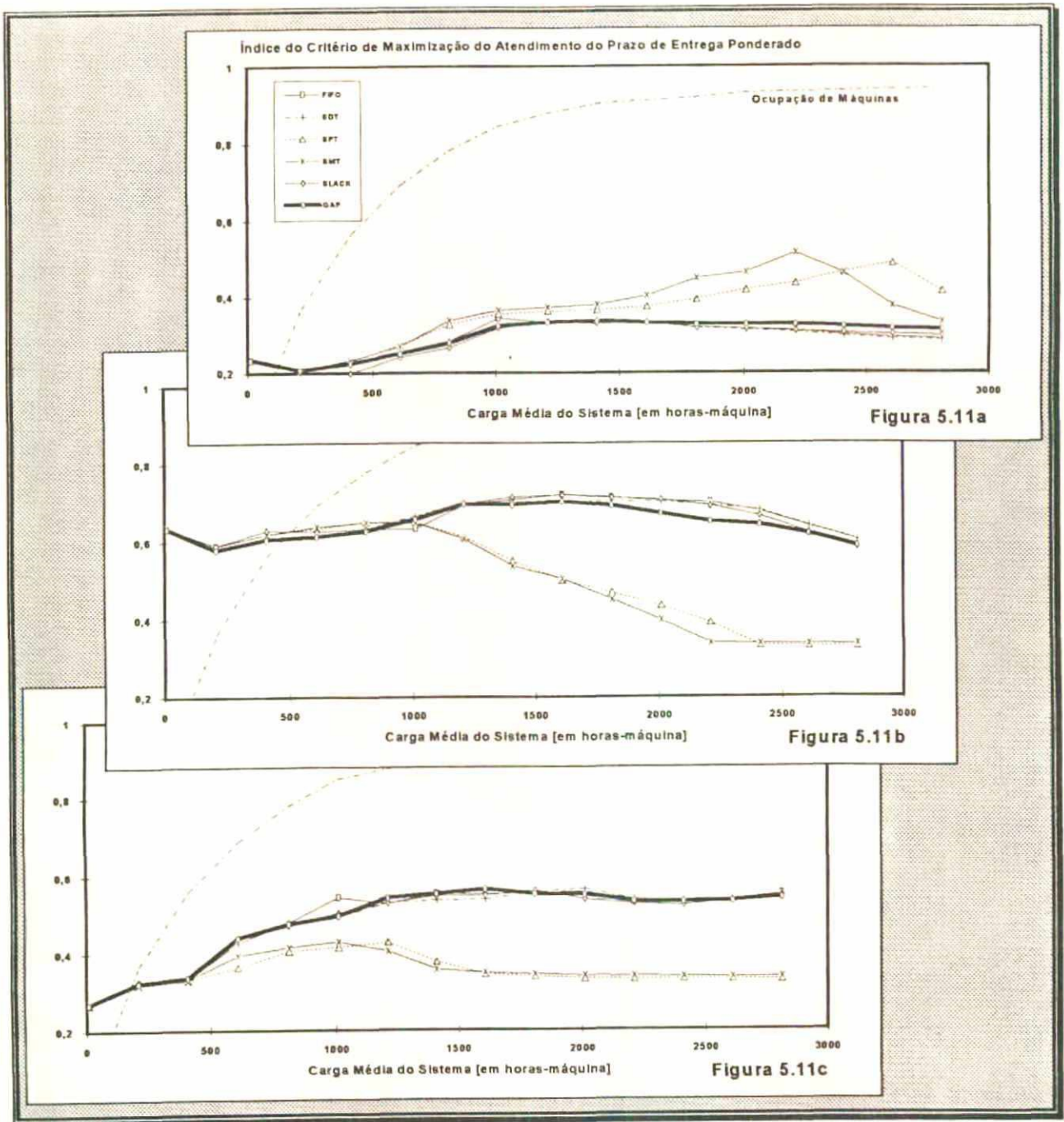


Figura 5.11 - Resultados Obtidos Para a Maximização do Atendimento do Prazo de Entrega Ponderado. (Figura 5.11a - Nível Alto de Criticidade, Figura 5.11b - Nível Médio de Criticidade, Figura 5.11c - Nível Baixo de Criticidade)

Neste caso, o modelo usando o *Geometrical Approximate Reasoning* apresentou resultados inferiores àqueles obtidos pela aplicação das regras de prioridade SPT e SMT [Figura 5.11a], porém, apresenta resultados superiores aos das regras FIFO, EDT e SLACK quando a ocupação das máquinas for elevada. Quando a criticidade da primeira fila do sistema de manufatura for média e o nível médio de criticidade for menor [Figura 5.11b] e [Figura

5.11c], o modelo proporciona resultados próximos ou iguais aos resultados das regras FIFO, EDT e SLACK, que produziram resultados superiores aos das regras SPT, SMT, que haviam se saído melhor com a criticidade elevada.

5.5 Considerações Finais

A avaliação do sistema proposto foi feita para um sistema de manufatura tipo *flow-shop*, considerando-se três objetivos clássicos do planejamento da produção: a minimização do ciclo médio de fabricação, a minimização do nível médio de estoques e a maximização do nível de atendimento do prazo de entrega. Na aplicação da fase de operacionalização do modelo testou-se duas abordagens de inferência:

- o método *Geometrical Approximate Reasoning*;
- e a técnica de Redes Neurais.

a) Utilização do *Geometrical Approximate Reasoning* como máquina de inferência

O modelo, geralmente, não apresentou desempenho superior ao resultado obtido pela aplicação intermitente da melhor regra para a situação.

- No caso de minimização do ciclo médio de fabricação, o modelo tem desempenho aproximadamente igual ao das melhores regras para a situação. O modelo apresenta resultados sempre superiores aos das regras FIFO e EDT.
- Para a maximização do atendimento do prazo de entrega, o modelo não apresentou bons resultados para um nível de criticidade alta da primeira fila [Figura 5.6a] apesar de chamar com mais frequência as melhores regras (SMT, SPT e SLACK) para a situação. Para níveis menores de criticidade, o modelo obteve resultados aproximadamente iguais, ou mesmo superiores ao desempenho das melhores regras (FIFO e EDT), para esta situação.
- Na minimização dos níveis médios de estoques, o modelo obteve resultados inferiores para níveis altos de criticidade, porém na análise da frequência de chamada das regras verifica-se que o modelo utiliza com maior frequência as regras que apresentaram melhor desempenho para a situação. Para níveis de criticidade menores, o modelo é tão bom quanto as melhores regras, chamando com maior frequência as regras FIFO e EDT que apresentaram melhores resultados para a situação.

b) Utilização de uma Rede Neuronal como máquina de inferência

- Para a avaliação do índice do ciclo médio de fabricação os resultados são semelhantes aos resultados obtidos com uso do *Geometrical Approximate Reasoning* como máquina de

inferência, ou seja, o modelo apresenta resultados tão bons quanto aos das melhores regras e apresentando resultados sempre superiores aos das regras FIFO e EDT.

- Na maximização do atendimento do prazo de entrega, para níveis altos de criticidade, o modelo apresentou resultados inferiores a todas as regras. A performance do modelo melhora com a diminuição dos níveis de criticidade, obtendo resultados sempre superiores aos das regras SPT, SMT e SLACK.

A partir das Figuras 5.6 e 5.13 pode-se constatar que o modelo, usando o *Geometrical Approximate Reasoning* como máquina de inferência, apresentou resultados ligeiramente superiores aos resultados obtidos com o uso das Redes Neurais. Um dos motivos do pior desempenho das Redes foi a dificuldade de treiná-la para algumas regras, ou seja, para determinadas regras o erro médio entre as saídas desejadas e as atingidas foi superior aos de outras regras. Assim, a rede "melhorou" o desempenho de algumas regras e "piojou" o desempenho de outras regras em relação ao critério de maximização do atendimento do prazo de entrega inferindo assim, valores superiores ou inferiores para a função utilidade das regras.

- No caso da minimização dos níveis de estoques, o modelo, para o níveis altos de criticidade, apresentou resultados inferiores aos das melhores regras. Porém para níveis menores de criticidade, o desempenho do modelo melhorou sensivelmente, apresentando resultados aproximadamente iguais aos das melhores regras. Para níveis de criticidade altos e médios o modelo usando Redes Neuronaos como máquina de inferência [Figura 5.14], apresentou resultados superiores aos do modelo usando o *Geometrical Approximate Reasoning* [Figura 5.8]. Para o caso da maximização do atendimento do prazo de entrega, o modelo usando a Rede Neuronal apresentou resultados ligeiramente superiores aos do modelo usando *Geometrical Approximate Reasoning*.

A partir da análise da frequência de chamada das regras, verifica-se a flexibilidade do modelo. Nota-se uma grande variação de chamada das regras nos diferentes níveis de criticidade. Por exemplo, na maximização do atendimento do prazo de entrega o modelo, para níveis altos de criticidade, utiliza com maior frequência as regras SMT, SPT e SLACK, porém para níveis menores de criticidade o modelo, em detrimento das regras SMT e SPT, chama com maior frequência as regras FIFO e EDT. Para um nível alto de criticidade, na minimização dos níveis de estoques, o modelo chama com maior frequência as regras FIFO e SLACK e para níveis baixos de criticidade, o modelo chama com maior frequência a regra FIFO e EDT.

CAPÍTULO VI

6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo deste trabalho foi o de propor um sistema inteligente de geração de planos de seqüenciamento. A proposta para a criação deste sistema divide-se em duas fases: a fase inicial, compreendendo a avaliação de estratégias para formar uma base de informações, e a fase operacional, que trata da aplicação destas informações.

Na fase inicial fez-se uso de simulação para criar uma base de informações contendo os desempenhos de regras de prioridade para alguns critérios segundo vários contextos operacionais do sistema de manufatura. Na fase operacional avaliou-se duas abordagens de inferência: a utilização de Redes Neurais e a utilização do procedimento interpolativo *Geometrical Approximate Reasoning*.

A avaliação do sistema proposto foi feita para um caso de sistema de manufatura do tipo *flow shop*, considerando-se os três objetivos clássicos do planejamento da produção: a minimização do ciclo de fabricação, a minimização do nível de estoques e a maximização do nível de atendimento do prazo de entrega.

A seguir são delineadas algumas conclusões e recomendações pertinentes ao trabalho.

6.1 - Conclusões

Da análise dos resultados apresentados no capítulo V conclui-se que nem sempre o modelo apresenta resultados superiores aos das aplicações intermitentes das regras de prioridade. O sistema não é nada mais do que "uma soma" das regras de prioridade e espera-se, portanto, que o todo não seja melhor do que suas partes. Por exemplo, a regra de prioridade SPT é considerada uma das melhores regras para a minimização do ciclo médio de fabricação [Montazieri/Wassenhove,1990]. Portanto, se o sistema utilizar com certa freqüência alguma regra que não tende a minimizar o ciclo médio de fabricação,

apresentará resultados inferiores aos resultados obtidos pela aplicação intermitente da regra SPT.

Conclui-se também que nem sempre verificam-se os resultados obtidos por outros autores de sistemas inteligentes para geração de planos de seqüenciamento. Os resultados apresentados por estes autores referem-se somente ao desempenho do modelo para situações isoladas sem apresentar resultados relacionados a uma variação gradual das variáveis que interferem no sistema de manufatura. Assim, geralmente os resultados obtidos são superiores aos das aplicações intermitentes das regras de prioridade.

Na avaliação dos resultados tem-se que os planos gerados observam os objetivos estabelecidos pela gerência. Pode-se observar também a flexibilidade do modelo em se adaptar às situações do contexto de manufatura. Por exemplo, na minimização do ciclo médio de fabricação o modelo usando a Rede Neuronal como máquina de inferência, utiliza com maior freqüência a regra de prioridade SPT sem utilizar as demais regras e apresentado melhor desempenho que as regras FIFO e EDT. Para o caso de minimização dos níveis de estoques, o modelo em detrimento da regra SMT, usa com maior freqüência as regra FIFO e EDT que apresentaram o melhor desempenho para a situação.

6.2 - Recomendações

A seguir são enumeradas algumas considerações para trabalhos futuros inerentes ao modelo:

- a estrutura do sistema de manufatura do tipo *flow shop* é considerada muito simples o que pode ter contribuído no baixo rendimento do modelo. Sugere-se que o modelo seja aplicado a manufaturas com estrutura mais complexas e dinâmicas tais como *job shop* e *open shop*;
- sugere-se o aumento do espectro de critérios a serem "perseguidos" pelo sistema inteligente e combinações variadas entre os critérios definidos não utilizando somente um único critério na fase de operacionalização do modelo. Sugere-se também a definição de escalas de medida diferentes para os índices de avaliação dos critérios;
- o uso de um número maior de variáveis de estado para caracterizar as situações de decisão é sugerido. Supõe-se que a dificuldade de treinamento da rede é devido ao pequeno número de variáveis de estado para descrever cada situação de decisão. O aumento do número de variáveis de estado aumentaria o poder de discriminação das situações de decisão pela rede.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARRET, R. T.; BARMAN, S., (1986): **A SLAM II simulation study of a simplified flow shop**, *Simulation*, v.47. n.5. p.181 - 189.
- BEL, G.; BENSANA, E.; DUBOIS, D.; ERSCHLER, J.; ESQUIROL, P., (1986): **A Knowledge-based approach to industrial job-shop scheduling**, in *Knowledge-based Systems in Manufacturing*, ed. por Andrew KusiakIowa-USA: Taylor & Francis Inc., 1989.
- BRUNDICK, F. *et al.* (1985): **An Inference Engine With Diverse Applications**, The Second Conference on Artificial Intelligence Applications, Florida, IEEE Computer Society, Dezembro 11-13 1985.
- CHANDRA, J.; TALAVAGE, J. (1991): **Intelligent Dispatching of Flexible Manufacturing**, *International Journal of Production Research*, v.29,n.11. p.2259-2278.
- CHU, C.; PORTMANN, M. C. (1991): **Aplicação de the Artificial Memory approach to scheduling problems**, artigo apresentado no XI EURO, Julho 1991.
- CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N. (1993): **Just In Time, MRP II e OPT Um enfoque Estratégico**, São Paulo: Editora Atlas.
- FRIES, C. E. (1994): **CLEVER - Um Sistema Inteligente de Controle de Manufatura**, Monografia a ser apresentada no Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, UFSC.
- HARMONG, P.; KING, D. (1985): **Expert Systems: Artificial Intelligence in Business**. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- HART, A, (1989): **Knowledge Acquisition for Expert Systems**, London: Kogan Page
- KING, J.R.; SPACHIS, A. S. (1980): **Heuristics for flow-shop scheduling**, *Internarional Journal Production Research*, v.18, n.3, p.345-357.
- KISTNER, K. P.; STEVEN, M. (1990): **Produktionsplanung**, Heidelberg, Physica.

- LI, B.; FRIES, C. E. (1993): **Geometrical Approximate Reasoning in Processing Incomplete Information**, Working Paper, 93/1, Lehrstuhl für Unternehmensforschung, RWTH Aachen.
- MONTAZERI, M.; WASSENHOVEN, L.N. Van (1990): **Analysis of Scheduling Rules for as FMS**, International Journal of Production Research, v.28, n.4, p.785-802
- MUGGLETON, S. (1990): **Inductive Acquisition of Expert Knowledge**, New York, Addison-Wesley Publishing Company.
- PEDGEN, C. D. (1983): **Introduction to SIMAN**, Systems Modeling Corporation, State College, PA.
- PIERREVAL, H. (1992): **Rule-based Simulation Metamodels**, European Journal of Operational Research, v.61, n.6, p.6-17.
- PIERREVAL, H.; RALAMBONDRAINNY, H. (1990): **A Simulation and Learning Techique for Generating Knowledge about Manufacturing System Behavior**, Journal of the Operational Research Society, v.41, n.6, p.461-474.
- ROTH, F. H. *et al.* (1983): **Building Expert Systems**. New York, Addison-Wesley Publishing Company.
- SHAMBLIM, J. E.; STEVENS, Jr, G. T., (1979): **Pesquisa Operacional - Uma abordagem básica**, São Paulo: Editora Atlas.
- ZIMMERMANN, Hans-Jügen; GUTSCHE, L. (1991): **Multi-Criteria Analyse Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzezielsetzungen**, Heidelberg, New York, Berlin: Springer-Verlag.
- WATERMAN, D. A. (1986): **A Guide to Expert Systems**, New York, Addison-Wesley Publishing Company.
- WIENDAHL, Hans-Peter (1987): **Belastungsorientierte Fertigungssteuerung**, München, Hanser.
- WU, Szu-Yung D.; WYSK, R. A. (1981): **An aplication of discrete-event simulation to on-line control and scheduling in flexible manufacturing**, International Journal of Production Research, v.27, n.9, p.1603-1623.
- _____, **Sistema de Redes Neuronais NeuralWorks**, (1990), NeuralWare, Inc.

ANEXO I

Neste anexo será feita uma explanação do funcionamento do *Geometrical Approximate Reasoning* baseado no trabalho publicado pelos autores [Li/Fries, 1993, p.5].

Seja: A^* o conjunto dos estados X e B^* o conjunto dos vetores dos critérios de performance C , associados àqueles estados adquiridos na fase de aquisição da base de informações.

Seja: x_0 um estado do sistema então deseja-se conhecer o desempenho do critério de performance C_0 quando o sistema for operado no estado x_0 .

Inicialmente determina-se em que região x_0 está situado. Se x_0 estiver situado numa região fechada que é construída por 2^n elementos de A^* (onde n é o número de componentes do vetor estado), sua saída C_0 será determinada por estes 2^n elementos e seus elementos correspondentes em B^* . A idéia central é que cada elemento x_i de A^* pode influenciar somente na sua definida vizinhança que é de x_i até outros elementos ou até um limite construído por outros elementos em A^* . Levando isto em consideração, construímos o grau de influência para cada elemento em A^* com uma função pertinência da teoria dos conjuntos difusos. Um princípio intuitivo de construir funções pertinência é que o grau de pertinência de cada elemento em A^* é 1 em si mesmo e gradualmente decresce até 0 à vizinhança de sua área de influência. Após determinada a posição do ponto x_0 , isto é, é situado numa sub-região de área de influência de vários elementos em A^* , então são determinados geometricamente os graus de pertinência de x_0 com respeito a estes elementos. Estes elementos em A^* constroem um hiper-plano no espaço R^n . Então poderá ser obtido o valor C_0 pela soma ponderada destes graus de pertinência, que são normalizados, e dos correspondentes valores dos elementos em B^* .

O algoritmo do funcionamento do *Geometrical Approximate Reasoning* encontra-se esquematizado no quadro abaixo.

Inicialização do Sistema

Seja $f: A^* \rightarrow B^*$ uma função injetora, onde $A^* \subset R^n, B^* \subset R$;

Seja conhecida a relação entre os conjuntos (A^*, B^*) ;

$A^* = \{x_i \mid i=1, \dots, m; x_i \in R^n\}$ e $B^* = \{y_i \mid i=1, \dots, m; y_i \in R\}$;

Seja $S = \{s \mid \text{Card}(s) = 2^n, s \subset A^* \text{ e cada } s \text{ constrói uma sub-região}\}$.

BEGIN

Importe um novo ponto $x \in R^n$;

Determine em qual subregião s o ponto x está situado;

Calcule o grau da função de pertinência de x com um método geométrico;

for $i=1$ to 2^n do

Calcule o grau da função pertinência de x pertencente a x_i com a seguinte função:

$$\mu_i(d) = \left(1 - \frac{d}{D}\right)^\alpha \quad \{d: \text{distância de } x \text{ a } x_i; D: \text{Distância de } x \text{ até } a\}$$

{vizinhança desta região; $\alpha \in R^+$ }

end {for}

Calcule os pesos w_i com a função de pertinência obtida;

for $i=1$ to 2^n do

$$w_i = \frac{\mu_i}{\sum \mu_j} \quad \{j = 1 \dots 2^n\}$$

end {for}

Calcule o valor de y :

$$y = \sum w_i \times y_i \quad \{i = 1 \dots 2^n\}$$

END (Li/Ernani, 1993, p.6)

Algoritmo do *Geometrical Approximate Reasoning*

ANEXO II

Neste anexo serão apresentados os principais módulos da simulação programada na linguagem SIMAN. O primeiro módulo, denominado "Simul.Mod", descreve as características do sistema de manufatura bem como a seqüência de visitaçao às máquinas das encomendas durante o processo de manufatura. As declarações do tipo "Event1;" estão relacionados a alguma subrotina feito na linguagem de programação FORTRAN e "linkada" ao modelo de simulação no momento da compilação.

```

Begin;
    Create:Ex(4,1):Mark(1);          cria a encomenda
    Event:1;                          definicao da encomenda
Fila11
    Queue,11,150;
    Event:2;                          prioridade da encomenda
    Seize:System:next(NCasa);        controle de encomendas
;
NCrit
    Queue,1;                          Centro de Trabalho 1
    Seize:Machine(1);
    Queue,3;
    Select,Por:Opera1:Opera2;
Opera1
    Seize:Opera(1);
Assign:M=1:Next(Vai);
Opera2
    Seize:Opera(2);
Assign:M=2:Next(Vai);
;
Fila3
    Queue,2;                          Centro de Trabalho 2
    Seize:Machine(2);
    Queue,4;
    Select,Por:Opera3:Opera4;
Opera3
    Seize:Opera(3);
Assign:M=3;
Assign:A(6)=2:Next(Vai);
Opera4
    Seize:Opera(4);
Assign:M=4;
Assign:A(6)=2:Next(Vai);
;
Vai
    Assign:X(9)=X(9)+1;              numero de Maq ativas
    Branch,1:
        If,X(M).Eq.51,Brack:
            Else,ContT;              quebra da Maquina
;

```

```

Brack      Assign:X(M)=52;           parar a maquina
           Release:Opera(M);
           Assign:M=A(6);
           Alter:Machine(M),-1;
           Release:Machine(M);
           Branch,1:
             If,A(6).LT.2,NCasa:
             Else,Fila3;

;
ContT      Branch,1:
           If,X(5).Eq.1,FimTu:
           Else,Job;           ver se acabou o turno

;
FimTu      Release:Opera(M);       fim do turno
           Assign:X(9)=X(9)-1;
           Assign:M=A(6);
           Assign:X(M+9)=X(M+9)+1;
           Alter:Machine(M),-1;
           Release:Machine(M);
           Branch,1:
             If,A(6).Eq.1,NCasa:
             Else,Fila3;       volta peca inicio da fila

;
Job         Event:8;               calculo da criticidade
           Event:6;               calculo do Estoque
           Delay:A(2);            tempo de processamento
           Release:Opera(M);
           Assign:X(M)=X(M)+1;
           Assign:M=A(6);
           Assign:X(9)=X(9)-1;
           Event:3;               regra SLACK
           Assign:M=A(6);
           Release:Machine(M);
           Event:7;               quando vai para fila 2
           Branch,1:
             If,A(6).LT.2,Volta:
             Else,Ramo;         se passou pelo WC2

;
Volta      Delay:1.5:Next(Fila3);  delay esteira transportad

;
Ramo       Branch,1:
           With,0.1,Rew:          necessita de retrabalho
           With,0.9,Fim;         sem retrabalho

;
Rew        Assign:A(2)=3.;
           Assign:A(10)=1;
           Assign:A(5)=A(5)+3.:Next(Fila3); Dealy no retrabalho

;
Fim        Event:4;               calculo de estatististica
           Tally:1,X(32);          criticidade fila 1
           Tally:2,X(34);          criticidade fila 2
           Tally:3,X(28);          ciclo de fabricacao
           Release:System:Dispose;

;
           Create;               cria novo turno

```

```

Turno      Event:5;
           Delay:480;
           Assign:X(5)=1;
           Queue,5;
           Scan:X(9).Eq.0;
           Assign:M=1;
           Assign:A(6)=1;
           Event:3;
           Alter:Machine(1),+X(10);           libera maquinas do CT 1
           Assign:A(6)=2;
           Assign:M=2;
           Event:3;
           Alter:Machine(2),+X(11):Next(Turno); libera maq. do CT 2
;
Maq1      Create;
           Queue,6;           usado qdo quebra maq 1
           Scan:X(1).Eq.52;
           Delay:3.0;
           Event:11;
           Alter:Machine(1),+1:Next(Maq1);
;
Maq2      Create;
           Queue,7;           usado qdo quebra maq 2
           Scan:X(2).Eq.52;
           Delay:3.0;
           Event:12;
           Alter:Machine(1),+1:Next(Maq2);
;
Maq3      Create;
           Queue,8;           usado qdo quebra maq 3
           Scan:X(3).Eq.52;
           Delay:3.0;
           Event:13;
           Alter:Machine(2),+1:Next(Maq3);
;
Maq4      Create;
           Queue,9;           usado qdo quebra maq 4
           Scan:X(4).Eq.52;
           Delay:3.0;
           Event:14;
           Alter:Machine(2),+1:Next(Maq4);
End;

```

