

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

UMA ABORDAGEM HÍBRIDA
BUSCA HEURÍSTICA/SISTEMA ESPECIALISTA
PARA SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO
EM SISTEMAS DE MANUFATURA

Aleardo Manacero Junior

orientador: André Luiz Morelato França†
co-orientador: Alcir J. Monticelli ~

*Esta é a redação final da tese.
Campinas, 16/09/91.*

[Assinatura]

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica - UNICAMP,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Elétrica

Campinas - setembro - 1991

BC 944.10.17

À minha família

AGRADECIMENTOS

- a André Luiz Morelato França pela orientação final deste trabalho.
- a Alcir J. Monticelli pela sugestão do tema e pela orientação no começo deste trabalho.
- aos meus pais pelos esforços que fizeram para que eu pudesse chegar até este ponto.
- a Ciça pela paciência e carinho que teve comigo nestes anos.
- ao DSEE-FEE-UNICAMP e ao DCCE-IBILCE-UNESP pelo apoio.

SUMÁRIO

Neste trabalho propõe-se uma abordagem ao problema de sequenciamento de produção em sistemas de manufatura pelo uso de um modelo híbrido busca heurística / sistema especialista com a finalidade de obter um sistema onde desapareçam a maior parte dos problemas apresentados pelos métodos clássicos de abordagem ao problema de sequenciamento, como a complexidade não-polinomial completa dos métodos analíticos ou a lentidão da grande maioria dos sistemas especialistas.

A abordagem proposta consiste em fazer com que a maior parte do esforço computacional seja executado durante a busca heurística, através de uma regra de busca bastante simples, orientando o sequenciamento para a minimização do atraso relativo de cada um dos pedidos de produção. O sistema especialista passa a atuar então apenas para que seja mantida a factibilidade da resposta fornecida pela busca heurística e para que o sistema consiga obter um grau de flexibilidade maior do que o que seria obtido sem o seu uso, buscando atingir a adequação a uma gama bastante ampla de sistemas de manufatura e também ao atendimento dinâmico às mudanças no sistema.

A implementação da abordagem proposta é resolvida com o uso de apenas uma linguagem de programação, sendo que a escolha da linguagem foi um dos pontos críticos para se obter um sistema que fosse rápido e eficiente. A linguagem escolhida foi o C, por motivos de portabilidade e velocidade, sendo que o modelo obtido a partir das definições sobre como seria a composição da abordagem híbrida apresentou desempenho bastante satisfatório em relação aos requisitos de velocidade e factibilidade como demonstram os resultados de simulação, além de exibir um alto grau de flexibilidade e de independência do sistema de manufatura, revelando uma grande capacidade de adaptação ao ambiente.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	O sequenciamento de produção	2
1.2	Objetivos do trabalho	3
1.3	Descrição da dissertação	4
2	Sequenciamento de produção em sistemas de manufatura	5
2.1	Sistemas de manufatura	6
2.1.1	Tipos clássicos de missão de fábrica	6
2.1.2	Os arranjos físicos do sistema de produção	8
2.1.3	Sistemas convencionais e flexíveis	10
2.1.4	Planejamento de processos e controle de produção	12
2.2	Sequenciamento de produção	14
2.2.1	Definições ligadas ao sequenciamento de produção	14
2.2.2	Implicações do modelo de manufatura no sequenciamento de produção	17
2.2.3	Estratégias de sequenciamento	19
2.3	Métodos de sequenciamento	22
2.3.1	Métodos analíticos	22
2.3.2	Métodos heurísticos	23
2.3.3	Sistemas especialistas	24
2.3.4	Métodos híbridos	25
3	A Abordagem Híbrida Proposta	27
3.1	O modelo híbrido	28
3.1.1	Porquê busca heurística	28
3.1.2	Porquê sistema especialista	29
3.1.3	Visão global do sistema	29
3.2	O Subsistema Heurístico	32
3.2.1	A regra de busca	32
3.2.2	Conexão com o sistema especialista	33
3.2.3	Estrutura geral	35
3.3	O sistema especialista	39
3.3.1	Estrutura básica	39
3.3.2	Capacidade de adaptação	40

3.3.3	Atuação no sequenciamento preditivo	41
3.3.4	Atuação no sequenciamento reativo	43
3.4	Implementação do modelo híbrido	45
3.4.1	Representação de conhecimento	45
3.4.2	Estratégia de resolução	51
4	Testes e resultados	54
4.1	Descrição dos sistemas de manufatura utilizados	55
4.1.1	Descrição do sistema A	55
4.1.2	Descrição do sistema B	58
4.2	Testes de validação do sequenciamento preditivo	62
4.3	Testes de validação da capacidade de adaptação	67
5	Conclusões	73
5.1	Análise dos resultados	74
5.2	Direções de pesquisa	76
A	Aquisição de conhecimento	78
A.1	Aquisição de conhecimento em tempo de execução	79
A.2	Aquisição de conhecimento em repouso	82

Capítulo 1

Introdução

A revolução tecnológica que a informática vem impondo a todos os setores da economia tem sido bastante profunda no setor de produção de bens de consumo e de capital. No caso específico das indústrias de manufatura isto se reflete através do uso maciço de computadores nos setores de desenvolvimento e projeto (CAD, CAPP, etc.) e na administração do fluxo de informações na empresa (bancos de dados, redes de computadores, etc.). Além disso, ocorre a informatização dos equipamentos utilizados para produção, com o uso de máquinas CNC, robôs, AGV's, sistemas automáticos de armazenagem, etc., que permitem um elevado grau de automação e flexibilidade.

Entretanto, existe ainda uma inércia nas empresas para a adoção de toda esta tecnologia, por motivos ligados a tradição e ao custo do equipamento a ser utilizado. Isto leva a coexistência de sistemas de manufatura modernos com sistemas antigos, gerando então uma variedade de técnicas de gerenciamento o que dificulta muito qualquer analogia entre os mesmos e conseqüentemente a criação de sistemas informatizados comuns a todos.

Dentro do processo de informatização da manufatura encontra-se a busca por técnicas de controle de produção que possam ser executadas em computadores, ou seja, buscam-se algoritmos eficientes para se fazer o controle de produção. Neste trabalho será descrita uma proposta para a execução de uma das principais atividades do controle de produção, que é o **sequenciamento de produção**.

1.1 O sequenciamento de produção

O processo de sequenciar a produção é apenas um caso particular do problema mais geral de sequenciar tarefas. Uma excelente definição para o problema de sequenciamento é fornecida em Conway et alii [7], onde se afirma que este problema surge sempre que se quiser escolher uma ordem para a execução de um certo conjunto de tarefas. Para o sequenciamento de produção a escolha de uma ordem significa otimizar a produção segundo algum objetivo pré-estabelecido, enquanto que o conjunto de tarefas é o conjunto de pedidos de produção a serem ordenados.

Com a existência de diversos modelos de produção torna-se difícil a geração de algum modelo de sequenciamento que seja facilmente adaptável ao contexto de aplicação, pois o objetivo a ser atingido pelo sequenciamento é diferente em cada sistema de manufatura, além do que a própria estrutura do sistema e das possibilidades que o mesmo oferece em função de sua flexibilidade não permitem um tratamento comum a todos.

Um outro aspecto que dificulta a resolução do sequenciamento através de um modelo abrangente é o fato de que, independentemente da existência de modelos de manufatura diferentes devido a inércia grande para alterações na planta de fábrica, ainda tem-se que os mesmos tem o seu sistema produtivo orientado pelo que será produzido, o que, como se sabe, é muito diferente de caso para caso.

Esta diferenciação no tipo de produção ainda é reforçada pelo objetivo da empresa, isto é, pela definição de sua missão. A missão de fábrica pode ser entendida como sendo o método pelo qual a empresa deseja atingir o mercado e isto acarreta a definição de estratégias de produção, estratégias de marketing e especificação de equipamentos e de mão-de-obra, o que é em resumo a constituição de um sistema de manufatura.

Além disto, um outro ponto de perturbação na obtenção de sequenciamentos ótimos é a complexidade natural do problema, isto é, a natureza combinatória do problema de ordenar tarefas para a escolha daquela que melhor atenda ao objetivo proposto. Isto leva naturalmente à existência de explosão combinatória e de um crescimento não polinomial na complexidade do problema em função do seu tamanho.

Outra característica de sistemas de manufatura, que deve ser apontada aqui é a sua natureza dinâmica, isto é, o estado do sistema varia aleatoriamente com o tempo, devido à mais variadas causas, como quebra de máquinas, falta de operários, cancelamento de pedidos, etc.. Portanto, qualquer modelo de sequenciamento aplicável a sistemas reais de manufatura deve prever esta possibilidade, quer seja através de técnicas estocásticas quer seja por atendimento em tempo-real, o que dificulta ainda mais a formulação de um modelo.

1.2 Objetivos do trabalho

Dada a complexidade do problema de sequenciamento de produção, existe uma grande variedade de métodos de resolução propostos, seguindo diversas formas de abordagem. O que se pretende aqui é a apresentação de uma proposta de abordagem onde se procura minimizar os problemas levantados na seção anterior.

O primeiro ponto a abordar é quanto a variedade de sistemas de manufatura existentes. Com esta proposta pretende-se atender a uma grande parte destes sistemas sem dificuldade de adaptação ao contexto de aplicação.

O segundo ponto refere-se à característica dinâmica do estado do sistema, isto é, fazer com que o método de resolução consiga manipular a produção independentemente de variações no sistema.

Finalmente, quanto à complexidade do sequenciamento propriamente dito, deseja-se conseguir um método de sequenciamento que tenha complexidade polinomial, mas consiga obter soluções ótimas ou sub-ótimas.

Em linhas gerais, propõe-se atingir os objetivos descritos acima através de um modelo híbrido **busca heurística / sistema especialista** onde o sistema especialista se incumbe de atender aos aspectos de adaptabilidade e sequenciamento dinâmico, enquanto que a busca heurística visa atender ao requisito de evitar a explosão combinatória.

1.3 Descrição da dissertação

Obviamente, antes de formular um modelo é necessário que se tenha um bom conhecimento sobre os problemas que o mesmo deverá resolver. Para isso deve-se fazer uma análise sobre o problema de sequenciamento e de suas relações com os sistemas de manufatura.

No Capítulo 2 apresenta-se uma descrição do problema de sequenciar a produção e de algumas das abordagens utilizadas para cumprir esta tarefa. Para tornar esta descrição mais clara faz-se antes uma apresentação dos sistemas de manufatura existentes.

O modelo híbrido proposto está descrito no Capítulo 3, onde se analisa cada um de seus componentes, com ênfase no sistema especialista e na busca heurística. Também estão incluídas justificativas para o uso de ambos e uma breve discussão sobre algumas questões relativas à implementação do modelo híbrido.

No Capítulo 4 são apresentados alguns testes que visam a comprovação da viabilidade do modelo proposto. Para isso foram executados testes preparados para verificar a flexibilidade e a velocidade do modelo a partir de produção por lotes dentro de um sistema convencional de manufatura.

O quinto e último capítulo contém análises sobre os resultados obtidos nos testes do capítulo anterior e uma breve discussão sobre os possíveis passos para futuras pesquisas com o problema de sequenciamento.

Finalmente, existe um apêndice onde se descreve a forma de captura de conhecimento pelo sistema especialista, o que permite ao mesmo aprender com a resolução de problemas novos e adaptar-se com facilidade ao contexto de aplicação.

Capítulo 2

Sequenciamento de produção em sistemas de manufatura

Neste capítulo será feita uma análise da atividade de sequenciamento de produção em uma indústria de manufatura, bem como dos principais métodos propostos para cumprir esta função, relacionando ainda os problemas típicos de cada método às características dos sistemas de manufatura. Como foi mencionado no capítulo anterior, esta análise se dará após uma revisão modelos de manufatura, onde se apontarão as suas especificidades em função da missão de fábrica.

2.1 Sistemas de manufatura

Antes de se pensar na classificação de sistemas de manufatura, deve-se entender porque os mesmos são determinados pela escolha da missão de fábrica pela empresa. Para isto, basta ter-se em mente que um sistema de manufatura é apenas uma composição de estratégia de produção, pessoal, de equipamentos e de estratégia de colocação no mercado.

Como será demonstrado adiante, todas as características acima são condições impostas à empresa no instante em que se decide qual é a missão da mesma. Assim o sistema de manufatura adotado é função da missão, a qual deve ser compreendida antes que se queira entender aquelas características do sistema de manufatura (SM) que sejam importantes no processo de sequenciamento de produção.

2.1.1 Tipos clássicos de missão de fábrica

Segundo Agostinho [1] existem seis tipos clássicos de missão de fábrica, cuja denominação sugere a forma pela qual a empresa pretende se impor no mercado. Os seis tipos são *custo unitário baixo*, *alta qualidade de produto*, *alto nível de serviço*, *linha ampla de aplicações*, *serviços a clientes* e *inovação de produtos*. O objetivo de cada uma destas missões é visto a seguir, junto com uma descrição superficial das características dos SM impostas pela missão.

Custo unitário baixo

É a missão onde a empresa busca atingir o mercado através de produtos de custo menor do que os oferecidos pela concorrência. Para isto, deve obter um custo de produção unitário baixo. Entretanto, como qualquer empresa possui certos custos fixos, que independem do nível de produção, isto é, custos como a depreciação do equipamento, este objetivo só é atingido se existir uma produção altamente automatizada (o que diminui a responsabilidade da mão-de-obra diretamente relacionada com a produção), bem como um nível de produção alto (o que rateia os custos fixos de produção entre muitas unidades).

Das condições acima tiram-se certas características do meio produtivo, como por exemplo a exigência de produção em massa com fluxo contínuo, o que torna o trabalho repetitivo, pouco flexível e com baixa diversificação de produtos em uma mesma linha de produção. Para as demais missões podem ser tiradas conclusões semelhantes e assim na Tabela 2.1 resumem-se as principais características de um sistema de manufatura em relação à missão escolhida.

Alta qualidade

Tem o objetivo de atender à segmentos de mercado interessados em equipamentos dedicados e de alto desempenho (alta qualidade). Isto caracteriza níveis de produção baixos e com custo unitário alto. Exige ainda equipamentos de elevada precisão e pessoal especializado na produção, de modo a obter a qualidade desejada no produto.

Alto nível de serviço

Característica de empresas que se propõem a atender aos clientes no menor prazo possível. Deve ter um excelente controle de estoque, de modo a diminuir os tempos gastos com produção. Quanto ao equipamento, esta missão não determina níveis de produção e automação, apenas tenta conservar folgas na utilização de cada máquina para poder atender instantaneamente a eventos (requisições de clientes) inesperados.

Linha ampla de aplicações

É a missão de empresas que visam o atendimento de uma gama de segmentos de mercado bastante ampla, através de uma linha de produtos diversificada. Isto leva a uma grande variação nos processos industriais e exige um alto nível de flexibilidade do equipamento utilizado.

Serviços a clientes

Típico de empresas cujo produto é prestação de serviços à outras empresas. Com isso, a diversificação do produto é muito alta, pois faz-se o que o cliente quer, porém com níveis de produção baixíssimos (até mesmo unitário), já que cada cliente é um caso diferente, o que leva a equipamentos versáteis mas em geral não automatizados.

Inovação de produtos

É a missão de empresas que procuram atingir a liderança de um segmento ou novos segmentos de mercado através do desenvolvimento de novos produtos e tecnologias. Isto implica em ter-se um grande contato entre os setores de projeto e de produção, além de intensas pesquisas de mercado. Quanto aos equipamentos, eles devem ser versáteis e flexíveis, uma vez que se busca o desenvolvimento de novos produtos, os quais podem ser bastante diferentes daqueles anteriormente produzidos.

MISSÃO	Tipo de equipamento	Nível de automação	Variedade do produto	Exigências de mão-de-obra	Objetivo buscado
Custo unitário baixo	convencional	alto	baixa	trabalho repetitivo	competição em preço
Alta qualidade	flexíveis/convencionais	baixo	média	qualificada e responsável	segmentos especiais
Alto nível de serviço	flexíveis ou convencionais	médio	média	qualificada, quantidade variável	entrega rápida ao cliente
Linha ampla de aplicações	flexíveis	baixo	alta	capacidade de adaptação	cobertura ampla do mercado
serviços a clientes	flexíveis e de uso geral	baixo ou inexistente	alta	qualificada e flexível	atendimento rápido ao cliente
Inovação de produtos	flexíveis e de uso geral	médio	média	qualificada e trabalho em equipe	obtenção de novos mercados

Tabela 2.1 - Características de um sistema de manufatura em função da missão de fábrica.

2.1.2 Os arranjos físicos do sistema de produção

Uma outra consequência da escolha da missão de fábrica é o arranjo físico (lay-out) do equipamento na fábrica, sendo que este, por sua vez, é um fator de grande relevância na determinação das estruturas de planejamento de processos e controle da produção. A relação entre estas estruturas e o arranjo físico dá-se através dos fluxos de produção, os quais, como será visto adiante, determinam o que deve ser controlado e a forma em que se dará a produção. A seguir tem-se a descrição dos três tipos de arranjo físico e dos fluxos por eles gerados.

LINHA DEDICADA :

É o arranjo físico típico de quando se quer custo unitário baixo. Consiste em um conjunto de máquinas de funções diferentes destinadas a executar operações pré-determinadas sobre uma peça, com distribuição espacial de modo a tornar contínuo o fluxo de peças através das máquinas. Um exemplo simples de linha dedicada pode ser observado na figura 2.1.

GRUPO DE MÁQUINAS :

Esta categoria de arranjo físico aparece em empresas que desejam ter alta diversificação de produtos ou ainda desejam obter atendimento rápido ao cliente. A sua formação é dada por conjuntos de máquinas de mesma função, gerando setores definidos de produção na fábrica (tornearia, retificação, etc.). O fluxo de material dentro do setor produtivo é mais complexo com o surgimento de um tráfego inter-setores intenso, conforme pode ser visto na figura 2.2, que apresenta um exemplo de um sistema arranjado por grupo de máquinas.

GRUPO DE PEÇAS (célula de manufatura) :

Trata-se do arranjo utilizado quando se tem uma diversificação média de produtos e produção por lotes que não sejam demasiado grandes. O arranjo do equipamento é feito de modo que peças semelhantes (as famílias de peças) tenham a sua produção realizada, sempre que possível, dentro de um único setor de máquinas. Isto restringe o fluxo de materiais ao setor, diminuindo a complexidade do mesmo. Na figura 2.3 pode se ver um sistema com arranjo por grupo de peças.

Atualmente, o arranjo por grupo de peças tem se tornado de grande interesse para a indústria pois é a partir dele que se obtém uma redução dos tempos de preparação para peças de mesma família e é introduzido o conceito de células de manufatura, as quais concentram boa parte dos esforços no desenvolvimento das tecnologias para sistemas de manufatura e, em especial, na aplicação de sistemas flexíveis. Na figura 2.3 cada um dos grupos de peças pode ser considerado como uma descrição parcial de uma célula.

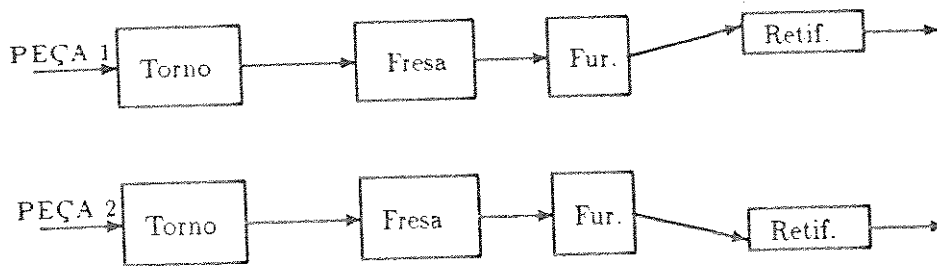


Figura 2.1 - Linha dedicada.

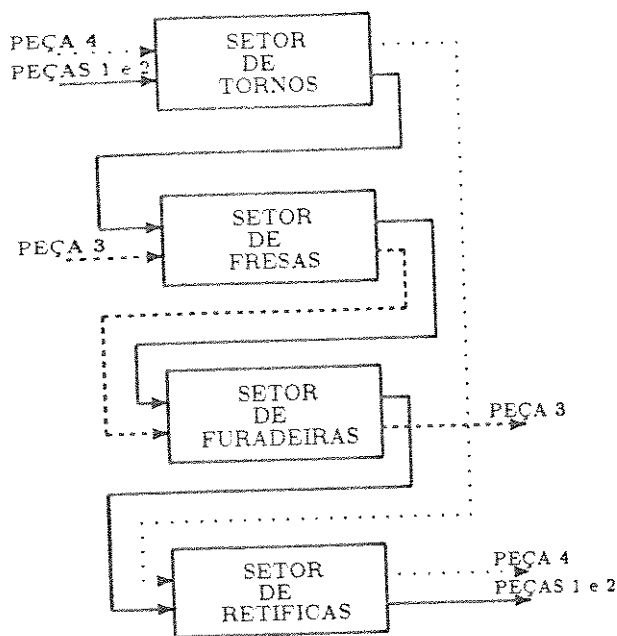


Figura 2.2 - Grupo de máquinas.

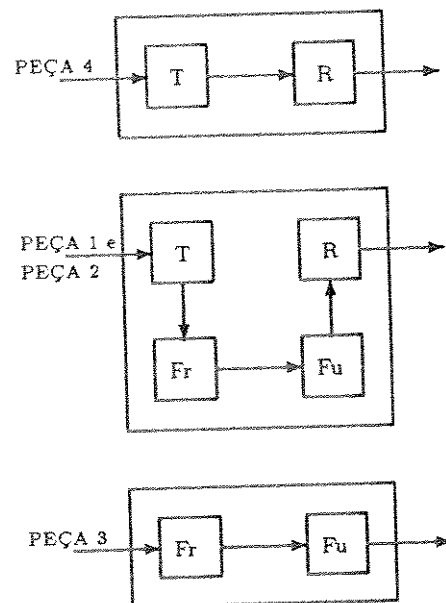


Figura 2.3 - Grupo de peças.

2.1.3 Sistemas convencionais e flexíveis

Até este ponto discutiu-se como a escolha da missão de fábrica influencia na configuração do sistema produtivo. Um outro aspecto importante determinado pela escolha da missão é a caracterização do sistema produtivo com relação a capacidade do equipamento se adaptar frente à mudanças no conjunto de peças a ser produzido, e esta capacidade é extremamente importante para a determinação dos métodos de sequenciamento de produção a serem implementados pelo controle de produção.

Quanto à capacidade de adaptação os sistemas podem ser divididos em **sistemas flexíveis**, onde existe uma grande capacidade de adaptação com um baixo esforço, e **sistemas convencionais**, onde a capacidade de adaptação é pequena e tem um alto custo de implantação. A capacidade de adaptação é determinada pelo grau de flexibilidade

do equipamento utilizado, de onde se originam as denominações acima, e também pelo grau de diversificação desejado na produção com um mesmo equipamento. Este último fator não será considerado por fazer com que a capacidade de adaptação seja função da habilidade da mão-de-obra disponível e não do equipamento, o que seria necessário para o estabelecimento da divisão entre sistemas convencionais e flexíveis.

Como consequência, a diferenciação entre os sistemas convencionais e flexíveis passa necessariamente por uma distinção dos equipamentos utilizados por ambos. Neste sentido, pode-se estabelecer que a capacidade de atender às mudanças nos itens a serem fabricados obriga aos sistemas flexíveis o uso de equipamentos complexos, com automação flexível e com uso intenso de computadores nos seus mecanismos de gerência. Já os sistemas convencionais possuem equipamentos ditos convencionais por serem simples e de automação rígida, dispondo de intrincados mecanismos de gerência, usualmente com transmissão de informações por meios não-eletrônicos.

O tipo de equipamento utilizado acarreta aos sistemas flexíveis um baixo fluxo de materiais entre as diversas estações de trabalho, o que só é possível devido ao alto grau de flexibilidade das estações, habilitando a formação de células de manufatura e, posteriormente, a implantação de estratégias de manufatura integrada por computador (CIM). Quanto aos sistemas convencionais, o fluxo de materiais é intenso, pois usualmente cada estação é responsável por apenas uma operação sobre cada peça. Este grande fluxo determina a necessidade de se ter um controle de estoque eficiente e complexo, uma vez que o risco de se perder informações e portanto produção ao longo da fábrica é bastante provável.

Uma outra diferença a ser apontada entre os dois tipos de manufatura é o volume de produção adequado a cada um deles. A partir das características dos equipamentos utilizados, em geral os sistemas convencionais buscam atender grandes volumes de produção com baixa diversificação de produtos, isto é, produção em massa ou em grandes lotes, sendo anti-econômico pensar-se em lotes pequenos ou numa grande variedade de itens. Entretanto, para sistemas flexíveis o que se busca é o atendimento de lotes pequenos, até mesmo unitários, com uma grande variedade de itens de uma forma economicamente produtiva.

Estas características determinam como são os mecanismos de planejamento de processos e de controle de produção, afetando portanto a estratégia de sequenciamento de produção a ser adotada, uma vez que o fato do sistema possuir ou não flexibilidade vai determinar a sua capacidade de suportar mudanças no seu estado, tais como alterações nos pedidos de produção ou mudanças nos equipamentos.

Apenas antecipando a descrição sobre os problemas de sequenciamento feita na seção 2.2 pode ser comentado que, dada a complexidade dos fluxos de material envolvidos em sistemas convencionais, o sequenciamento de produção não é uma atividade simples, pois envolve um grande número de relações de dependência. Já para sistemas flexíveis não existem fluxos complexos, entretanto, a grande capacidade de reação dos mesmos obriga a aproveitar-se ao máximo esta flexibilidade, criando inúmeras alternativas para o sequenciamento, que transforma-se também numa atividade complexa.

2.1.4 Planejamento de processos e controle de produção

Nas seções anteriores mostrou-se que os mecanismos de planejamento de processos e controle de produção são afetados pela definição de características do sistema tais como missão de fábrica e flexibilidade dos equipamentos utilizados. Uma das consequências desta relação é a complexidade existente nestes mecanismos e mais especificamente a complexidade da atividade de sequenciamento de produção. Nesta seção será analisada a influência destas características nos mecanismos de sequenciamento.

Inicialmente pode-se afirmar que o planejamento de processos, que pode ser definido como a atividade de definir sequências de operações sobre uma peça sob restrições de ordem tecnológica (por exemplo, não se pode rosquear um furo antes de se fazer o furo) visando a sua produção com o mínimo esforço de transporte, vai influenciar diretamente o sequenciamento de produção, uma vez que a forma em que se dará a produção deverá obedecer a algumas restrições de precedência impostas pelo planejamento de processos.

Portanto, quanto mais rígido for o processo menor será a possibilidade de conseguir-se flexibilidade no modelo de sequenciamento, embora o mesmo se torne bastante simples. Já com processos pouco rígidos existe uma grande variedade de opções para se utilizar no processo de sequenciamento, mas isto trás junto uma enorme complicação para o tratamento de tantas possibilidades.

Como a complexidade do planejamento de processos é tanto maior quanto menor for a sua rigidez e, como já visto, também sofre influência do tipo de arranjo físico da fábrica, pode-se concluir que o sequenciamento de produção é simples e rígido para arranjos em linha dedicada; complexos e flexíveis para grupos de máquinas; e, para grupos de peças, a sua complexidade está ligada ao fluxo necessário entre grupos, enquanto que a sua flexibilidade está ligada à flexibilidade do equipamento utilizado.

Esta descrição dos problemas do sequenciamento de produção em relação ao planejamento de processos serve apenas como introdução à descrição dos problemas relacionados ao controle de produção. Sendo assim, não será dada aqui uma maior ênfase aos problemas inerentes ao planejamento de processos, que fugiriam ao escopo deste trabalho. Já quanto aos problemas do controle de produção, tem-se que a sua complexidade está atrelada a dois pontos: primeiro, ao arranjo físico do sistema e segundo, à natureza não-determinística do sistema produtivo. Este último ponto será examinado em particular quando da descrição dos problemas de sequenciamento na seção 2.2, deixando por agora apenas o primeiro ponto para ser analisado.

A relação arranjo físico-controle de produção é determinada pelo fato de que o controle irá ajustar os níveis instantâneos de produção aos níveis globais previstos no planejamento da produção, baseando-se na disponibilidade imediata que o inventário oferece. Agora, para se obter tal ajuste é necessário que se conheça o estado do inventário, incluindo a localização de cada item, e os fluxos necessários para produzir-se a quantidade desejada de cada item dentro do prazo previsto no planejamento da produção.

Como se pode observar, a estratégia de controle de produção a ser adotada terá que considerar o modelo de arranjo físico existente (determinação das localizações intermediárias) e o planejamento de cada processo (determinação dos fluxos de material). Como

o planejamento de processos também depende do arranjo físico, fica bastante claro que a complexidade do controle de produção é fortemente correlacionada com a disposição dos equipamentos pela fábrica.

Quanto à relação controle de produção-sequenciamento de produção basta saber que o sequenciamento de produção é apenas uma das diversas atividades executadas dentro do controle de produção. Portanto como integrante do controle, o sequenciamento herda várias das características deste, principalmente as relacionadas aos aspectos de implementação da produção, isto é, a execução do que o planejamento de produção especificar como necessário ao atendimento das requisições de produção.

Além disso, existe uma intensa troca de informações entre o agente do sequenciamento de produção e os demais agentes do controle de produção, por exemplo, para permitir que se planeje um dado volume de produção é necessário que se conheça o que está sendo produzido, o que está estocado e o que está sendo requisitado, ou ainda, para se sequenciar uma dada produção planejada é necessário saber onde estão os estoques de cada peça e como eles podem ser utilizados. Assim, a complexidade dos mecanismos de controle de produção é transferida para o mecanismo de sequenciamento de produção e ainda acrescenta-se o problema de ser necessário uma constante troca de informações entre os vários mecanismos do controle de produção.

2.2 Sequenciamento de produção

Após esta breve introdução aos conceitos de diferentes modelos de manufatura já é possível fazer-se uma análise do que seja realmente o problema de sequenciamento de produção. Para isto, é necessário antes de mais nada, definir-se o que é sequenciamento de produção, o que foi feito no capítulo anterior e pode ser encontrado em vários dos trabalhos citados. Outro aspecto a ser considerado é quanto às relações entre os diversos modelos de manufatura e os modelos de resolução do sequenciamento, onde estarão apresentados todos os obstáculos que surgem das características do problema. Finalmente, servindo como uma introdução às técnicas de sequenciamento, serão vistas as duas estratégias básicas para executar-se a atividade de sequenciamento.

2.2.1 Definições ligadas ao sequenciamento de produção

Neste ponto é aconselhável recordar-se da definição dada ao problema de sequenciamento em Conway et alii [7] e a partir dela apontar outras definições que estão intimamente relacionadas. Conway diz que o problema de sequenciamento surge sempre que se deseja escolher uma ordem para a execução de tarefas. Matematicamente pode-se formular esta definição como sendo um problema de otimização, com restrições usualmente lineares e inteiras, com o seguinte equacionamento:

Maximizar:	A escolha da ordem de execução	(equação 1)
sujeito à:		
	1. Restrições de precedência entre tarefas; 2. Disponibilidade de recursos.	

Partindo-se desta definição já se nota um primeiro problema na definição das tarefas a serem executadas. Conway não faz nenhuma restrição quanto ao tipo de atividade sobre a qual será feito o sequenciamento, mas como o modelo a ser proposto trata de atividades ligadas à produção de itens em sistemas de manufatura, tem-se que as tarefas a serem executadas são atividades típicas destes sistemas, tais como usinagens, montagens, transportes e inspeções de qualidade, além de atividades laterais tais como manutenção preventiva e emergencial dos equipamentos instalados.

Com a definição das tarefas e consequentemente do problema a ser sequenciado resta ainda um segundo problema, que é o critério para se escolher a ordem de sequenciamento ou produção neste caso. Infelizmente este não é um problema com solução simples. uma vez que é este critério que define a função de otimização do sistema, ou ainda o objetivo buscado pela produção. Conforme a análise realizada na seção anterior, o objetivo de um sistema, e portanto o que se deseja otimizar, é definido quando da escolha da missão

de fábrica adotada pela empresa, o qual difere muito entre as diversas empresas. Esta diferenciação de objetivos pode ser constatada por uma simples revisão de alguns poucos trabalhos sobre o problema, onde se vê claramente que o que se deseja otimizar não é uma função padronizada como seria desejável e sim funções diversas de aspectos disjuntos como tempos de preparação, atrasos, etc..

Voltando-se agora ao modelo matemático para o problema de sequenciamento, tem-se que a função objetivo é a meta buscada pela empresa e em geral assume a forma de função multi-objetivo. Isto complica a elaboração de um modelo, levando à existência de compromissos que estabelecem a transformação de vários dos objetivos em restrições, permitindo que apenas um deles permaneça realmente como objetivo. A relação de compromisso a ser assumida deve ser de tal forma que se consiga atender a todas as restrições do problema através de uma solução que esteja ao menos próxima da ótima para cada um dos objetivos iniciais em separado.

Ainda deste modelo tem-se que as duas classes de restrições, precedência e suficiência, levam a restrições inteiras e lineares quando se trata de sistemas de manufatura, uma vez que as relações de precedência são sempre binárias. ou seja, uma atividade ou precede ou não precede outra atividade, sem qualquer outra possibilidade, e os recursos são medidos sempre em unidades, nunca em frações destas. A dificuldade no estabelecimento das restrições é que certas condições são de difícil modelamento, como manutenção emergencial por exemplo, embora tenham de ser levadas em conta no instante da elaboração do sequenciamento. Na Tabela 2.2 podem ser encontradas alguns dos objetivos usualmente buscados e algumas das restrições que dificultam o estabelecimento de um modelo para sequenciamento que funcione bem para a maioria dos sistemas de manufatura sem alterações onerosas.

OBJETIVOS	Tempo médio em fluxo; Tempos improdutivos em máquinas; Numero médio de tarefas (ou lotes) no sistema; Atraso médio na entrega das tarefas; Tempo de espera médio; Tamanho dos estoques; Tempos de preparação do equipamento.
RESTRICÇÕES	Disponibilidade de ferramentas; Disponibilidade de equipamento; Disponibilidade de mão-de-obra; Tipo de equipamento; Disponibilidade de componentes em tempo de montagem.

Tabela 2.2 - Objetivos e restrições do sequenciamento de produção em sistemas de manufatura.

Observando a Tabela 2.2 é fácil concluir que uma ferramenta matemática simples não consegue resolver o problema e nem ao menos identificá-lo. Para esta última tarefa é definida uma notação [8], semelhante à encontrada em teoria de filas, onde cinco fatores são utilizados para descrever e classificar o problema a ser tratado. Esses fatores são respectivamente: o número de tarefas sequenciadas, o número de máquinas utilizadas, o tipo de arranjo físico existente, o modo de chegada de tarefas e critério de avaliação do sequenciamento, ou como são representados, $n/m/f/r/c$. Mais adiante será mostrado que não existe algoritmo polinomial para o problema com n e m grandes, caso que é definido como $N/M/-/-/-$, e que isso leva a aproximação do sistema de manufatura para se obter um sequenciamento. Além disto, como o objetivo deste trabalho é a obtenção de um modelo que atue sem estar condicionado ao arranjo físico nem ao critério de avaliação ou modo de chegada, a notação acima será utilizada apenas para definir situações específicas nos valores de n e m .

2.2.2 Implicações do modelo de manufatura no sequenciamento de produção

Das características dos vários modelos de manufatura e dos objetivos do modelo de sequenciamento podem ser levantadas algumas considerações a respeito da exatidão de uma solução e da manutenção da factibilidade da mesma ao longo do processo produtivo. Para isso serão analisadas inicialmente as características dos sistemas de manufatura que os tornam imprevisíveis e extremamente dinâmicos e a seguir as características da atividade de sequenciamento que a tornam numericamente intratável.

O problema é não-determinístico

Esta característica não-determinística do problema de sequenciamento deve-se ao fato que os sistemas de manufatura são dinâmicos e compostos por elementos também dinâmicos. Portanto qualquer previsão feita sobre o seu estado durante o processo de elaboração de um sequenciamento pode não ocorrer durante a sua execução devido à ocorrência de eventos inerentes à esta dinâmica. Os eventos que podem ocorrer são de dois tipos: primeiro, aqueles que na sua ocorrência levam a uma diminuição dos recursos existentes no sistema e segundo, aqueles que aumentam os recursos do sistema quando ocorrem.

As formas de tratar-se esta imponderabilidade no sistema também são duas. Uma onde se procura prever estes acontecimentos de modo a não inviabilizar a solução em execução, usualmente através de um modelo estocástico que, embora não represente fielmente a realidade, representa uma boa aproximação para o ambiente real ao levar em conta o seu histórico. A outra forma de se tratar o problema é reagindo-se à alteração do mesmo apenas e tão somente quando esta ocorrer, numa estratégia "just-in-time", o que representa fielmente a realidade do sistema.

Como se pode observar, a segunda forma resolve de uma forma definitiva o problema mas, em contrapartida, é em geral muito complexa para ser implementada exatamente desta maneira. Adiante será feita uma análise mais apurada destas formas de tratar as ocorrências do sistema, uma vez que aqui apenas será apontada a existência do problema.

Voltando-se agora aos tipos de ocorrências, tem-se que aquelas que diminuem os recursos disponíveis devem ser tratadas de uma forma mais efetiva, qualquer que seja a forma de tratamento, uma vez que a diminuição de recursos pode facilmente levar à uma situação de infactibilidade da solução. Dentre os eventos desta categoria podem ser citados: a quebra de máquinas, a falta momentânea de ferramentas, faltas ou greves de operários, rejeições de produtos pelo controle de qualidade, aumento nas quantidades de produção requeridas ou diminuição dos prazos de entrega. Estes eventos levam à diminuição de recursos de forma direta (quebras e faltas) ou indireta (rejeições ou alterações nos pedidos), onde os recursos diminuem pelo aumento das exigências, mas sempre exigindo uma rápida reação ao que ocorrer.

Quanto aos eventos que aumentam os recursos do sistema, não existe uma obrigatoriedade no seu tratamento, uma vez que qualquer solução factível para uma certa quantidade

de recursos também o será para uma quantidade maior destes mesmos recursos, embora talvez não seja mais ótima neste estado. Alguns destes eventos podem ser: chegada de uma nova máquina, contratação de novos funcionários, aumento da produtividade do sistema ou cancelamento de pedidos. Em qualquer dos casos vale a observação acima de que, embora não inviabilize a solução, a ocorrência deste tipo de evento tira a solução do ponto ótimo.

O problema é não-polinomial completo (NP-completo)

Finalmente tem-se que as características de qualquer problema de sequenciamento quando aliadas às características típicas de sistemas de manufatura tornam o problema numericamente intratável ou, em linguagem algébrica, com complexidade de ordem não-polinomial completa. Isto leva a novas aproximações nos modelos feitos para o sistema de modo a torná-lo tratável e com soluções aproximadas aceitáveis.

Sabe-se que qualquer problema de sequenciamento consiste em encontrar uma ordenação ótima para a execução de um determinado conjunto de tarefas. Como o problema é encontrar uma ordem ótima, ou seja, de escolher entre todas as possíveis ordens aquela que melhor se enquadra nos objetivos propostos, vê-se claramente que o problema é de natureza combinatória e, como qualquer problema desta classe, possui o risco de explosão combinatória.

Dada a natureza combinatória do problema de sequenciamento foi demonstrado que não existe solução numérica exata para o caso $N/M/-/-/-$ sem um custo computacional de ordem não-polinomial, [11, 12, 21, 18, 9], existindo apenas soluções para casos particulares do problema, como situações onde n e m são inferiores a três.

Entretanto, os casos reais possuem em geral mais do que uma máquina e mais do que uma tarefa a ser executada por estas máquinas, e também nem sempre é possível agrupar-se estas máquinas ou tarefas em conjuntos maiores (contendo todas se possível) fazendo portanto que o problema real torne-se definitivamente NP-completo.

Consequências

Do exposto acima tem-se uma consequência direta que é a complexidade do problema, uma vez que é bastante difícil tratar-se de um problema que já se anuncia naturalmente complexo e que possui um fator de incerteza elevado devido a sua dinâmica não-determinística. Indiretamente surge uma consequência deste aspecto que é o fato que qualquer que seja a forma de se proceder o sequenciamento, dificilmente existem condições para se garantir a que a solução proposta seja ótima sem um elevadíssimo custo computacional.

Sendo assim, a enorme quantidade de métodos aproximados para a obtenção do sequenciamento justifica-se plenamente, principalmente quando são considerados os problemas de reação a eventos não previstos.

2.2.3 Estratégias de sequenciamento

Quando foi analisado o problema de que os sistemas de manufatura são não-determinísticos, ou imprevisíveis, mencionou-se a existência de duas estratégias de abordagem: uma que faz previsões sobre as alterações possíveis de ocorrer, aqui chamada de **sequenciamento preditivo**, e outra que age quando da ocorrência do evento, aqui chamada de **sequenciamento reativo**. Naquele ponto evitou-se uma análise destas estratégias, o que será feito aqui relacionando-as aos modelos de manufatura flexível e convencional.

Sequenciamento preditivo

O sequenciamento preditivo é aquele que, baseado em técnicas estocásticas, faz previsões sobre os estados futuros do sistema de manufatura e a partir delas faz o sequenciamento das diversas tarefas constantes dos pedidos de produção. Também já foi apontado que estas previsões podem não corresponder efetivamente aos eventos ocorridos por basearem-se no cálculo de probabilidades.

Uma outra característica importante do sequenciamento preditivo é o fato de ser estático, isto é, uma vez proposto e em execução não é alterado, e é sobre esta característica que faz-se a correlação com os diferentes tipos de sistemas de manufatura. Como o sequenciamento é estático, ou seja, rígido, tem-se que a sua aplicação em sistemas flexíveis não é adequada, pois estes possuem uma grande capacidade de adaptação à alterações no seu estado.

Por outro lado, a simplicidade do tratamento numérico desta estratégia e a rigidez dos equipamentos em um sistema convencional tornam-no adequado para este caso, onde a possibilidade de reação a algum evento é bastante pequena, quando não inexistente, e deve portanto ser prevista com antecedência.

Sequenciamento reativo

Em oposição ao sequenciamento preditivo tem-se o reativo, que é aquele que reage apenas às alterações efetivas no estado do sistema. Logo, toda e qualquer solução proposta para o problema leva sempre em consideração o estado real do sistema, o que o torna mais realista que o preditivo.

Novamente em oposição à estratégia anterior tem-se que o sequenciamento reativo é dinâmico, ou flexível, o que o torna adequado à aplicação em sistemas flexíveis. De outro lado, não é vantajosa a sua aplicação em sistemas convencionais, uma vez que na maioria das vezes o próprio sistema produtivo não terá condições de executar, ou absorver, as alterações propostas em reação ao evento.

Entretanto, a aplicação do sequenciamento reativo sofre restrições em sua forma de implementação, uma vez que não se sabe a frequência de eventos inesperados e ainda por cima o problema a ser tratado é sempre complexo (NP-completo). Estas restrições levam a três táticas de levar em conta a reação ao evento, que são:

1. Refazer o sequenciamento toda vez que ocorrer uma alteração.

2. Refazer o sequenciamento periodicamente, incluindo então todas as alterações ocorridas.
3. Fazer a associação de recursos ainda não utilizados às tarefas que tenham encontrado problemas no seu processamento, sempre que isto ocorrer.

A escolha por uma destas táticas deverá levar em consideração fatores como a frequência de alterações, a necessidade de operação em tempo-real e a precisão dos resultados (quanto à solução ótima), mas em uma análise superficial podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- A operação em tempo-real é obtida através das táticas 1 e 3.
- A precisão dos resultados é maior com o uso da tática 1 e menor com a tática 3, uma vez que esta não se preocupa com a melhoria de uma solução.
- O uso em tempo-real da tática 1 pode levar a um conflito de operação quando a frequência de eventos inesperados for tal que o tempo necessário para a elaboração da sequência é maior que o período entre eventos.
- De outro lado, o sequenciamento intervalado da tática 2 pode levar a uma inconsistência se ocorrerem eventos críticos à manutenção da factibilidade da solução.
- A tática 3 ainda apresenta o problema do não estabelecimento de prioridades no uso de recursos, criando a possibilidade de que recursos ocupados por tarefas pouco prioritárias não sejam liberados para tarefas com maior prioridade quando necessário.
- Em termos de complexidade computacional tem-se que a última é a mais simples e as duas primeiras possuem mesma complexidade, diferenciando-se apenas na intensidade de uso, que é proporcional à frequência de ocorrências inesperadas.

O que é realizado na prática

A escolha por uma destas estratégias (preditiva ou reativa) nem sempre é a opção correta, sendo que na maior parte dos métodos de sequenciamento, principalmente em sistemas flexíveis, o que ocorre é a junção das duas estratégias em um método preditivo/reativo, onde é feita uma previsão sobre o que será sequenciado e depois corrige-se a previsão quando aparecem eventos inesperados.

Tal junção é possível apenas pelo fato de que as estruturas básicas de ambas estratégias são similares, como afirma Smith [29], o que permite que usar os sequenciamentos preditivo e reativo com o mesmo modelo.

Entretanto esta não é a prática utilizada em todos as situações, havendo casos onde é usado somente o sequenciamento preditivo e outros onde é usado apenas o sequenciamento reativo. Dentre estes casos devem ser citados os sistemas baseados em técnicas “just-in-time”, onde o sequenciamento é puramente reativo e feito por demanda, que se tornaram tendência bastante forte na última década em virtude do uso cada vez mais intenso de

computadores na fábrica, através da introdução de redes de computadores em ambientes industriais e da manufatura integrada por computador (CIM).

2.3 Métodos de sequenciamento

A simples escolha entre os sequenciamentos preditivo e reativo ou junção destes não resolve o problema básico de sequenciamento, que é a forma como se resolve a equação 1. Para isto existem diversas abordagens propostas que fazem várias considerações a respeito do sistema real, de modo a torná-lo um modelo tratável computacionalmente. Estas abordagens podem ser classificadas em quatro grupos de métodos, que aqui são chamados de métodos analíticos, métodos heurísticos, sistemas especialistas e métodos híbridos. A seguir são descritos estes métodos e algumas das abordagens utilizadas.

2.3.1 Métodos analíticos

Estes métodos são ditos analíticos por basearem-se exclusivamente em critérios algébricos para a obtenção da ordem ótima de produção, através de uma busca guiada por alguma das estratégias clássicas de otimização ou por variações destas. É nesta categoria que se enquadram grande parte das abordagens para o sequenciamento e a razão para isto é a existência de um extenso ferramental numérico para se trabalhar com os mesmos.

Em geral, tais métodos têm a desvantagem de fazer grandes simplificações no sistema para a obtenção do modelo, tais como assumir disponibilidade infinita de recursos, desconsiderar tempos de preparação, assumir rotas fixas de produção, etc.. Estas simplificações acabam por comprometer a factibilidade e até o ótimo da solução proposta, o que acaba sendo crítico se for feito apenas o sequenciamento preditivo.

Um outro, e mais sério, problema destes métodos é a grande complexidade dos modelos de otimização envolvidos, os quais levam a um grande esforço computacional na resolução de problemas de maior porte, como no caso $N/M/-/-/-$, quase sempre exigindo tempos de uso de cpu e espaços alocados em memória bastante elevados, devido a natureza essencialmente combinatória do problema.

A vantagem destes métodos é que tendo-se obtido um bom modelo para o sistema, qualquer solução apresentada é irrefutável, uma vez que para se chegar até ela foram utilizados apenas e tão somente argumentos algébricos. Dentre as diversas abordagens desta classe devem ser citadas:

Abordagens clássicas

Entre as abordagens clássicas tem-se PERT, MRP e CPM, [8, 6], os quais foram inicialmente desenvolvidos para propósitos diferentes do sequenciamento de produção (MRP para o planejamento de produção, PERT e CPM para sequenciamento de projetos) e depois adaptados para este fim. São abordagens baseadas em fluxo em redes e fazem a otimização em grafos. Também são os métodos que mais fazem simplificações no modelo do sistema para a obtenção de grafos operacionais.

Teoria de controle (proposto por Kimemia e Gershwin)

Faz a aplicação de toda a teoria clássica de controle ao problema de sequenciamento, supondo um regime contínuo com produção em massa a ser estocada. Com o uso de teoria de controle consegue abordar os problemas de rotas congestionadas e máquinas sub-utilizadas, entretanto só é aplicável para sistemas de pequeno porte.

Métodos de programação inteira

São métodos que utilizam as técnicas e algoritmos da teoria de otimização de problemas inteiros, principalmente algoritmos "Branch-and-Bound". Existem diversas implementações destes métodos, sempre adotando algumas simplificações no modelo e variando o tipo de restrição ou objetivo adotado. Dentre estas implementações citam-se [27, 14, 17, 16, 2].

Métodos de programação dinâmica

Os métodos baseados em programação dinâmica fazem uso da possibilidade de particionar o problema em estágios de resolução, através de uma representação adequada das tarefas e máquinas nos espaços de estado que o definem. Deste modo conseguem obter resultados semelhantes aos da programação inteira. Neste grupo citam-se [15, 3], onde são feitas análises quanto ao grande esforço computacional a ser desenvolvido em sistemas de maior porte, tal qual para os métodos de programação inteira.

2.3.2 Métodos heurísticos

Os métodos heurísticos ou métodos de busca heurística baseiam-se em regras de busca (as heurísticas) que guiam o processo de resolução através de um método simples de otimização em busca de um ótimo que, em geral, é apenas um valor próximo do ótimo efetivo do problema.

As heurísticas são formuladas a partir de objetivos de produção definidos pela escolha da missão de fábrica. Sendo assim, existe uma grande variedade de regras, cada qual melhor se adaptando a determinadas situações de produção. Na literatura existem diversos trabalhos relacionando heurísticas, onde se destaca o de Panwalkar e Iskander [26] com 118 heurísticas classificadas. Da mesma forma, também são encontrados diversos trabalhos analisando a aplicação de diversas destas heurísticas em diferentes sistemas produtivos, [13, 20, 22].

A vantagem no uso de heurísticas é a diminuição no esforço computacional que os métodos analíticos exigem. Isto se dá pelo simples fato de que a busca heurística pode ser considerada como uma busca em grafos onde se supõe que existe apenas um único caminho e este é seguido com poucas decisões a serem tomadas a cada passo de busca.

Se ainda forem feitas relaxações quanto a manutenção da factibilidade da solução, por exemplo admitindo atrasos na entrega de alguns pedidos, o caminho de busca será realmente único, gerando então apenas uma de todas as ordenações possíveis, o que facilita

a ocupação de espaço na memória e também agiliza o processo de decisão.

Entretanto, esta simplicidade no processo de resolução é contraposta pelo fato de que não se pode garantir em nenhum momento que a solução seja ótima e, se relaxações forem feitas, também não se garante a factibilidade da mesma. Com isto, a solução será tão melhor quanto mais adaptada ao sistema real estiver a heurística adotada, o que introduz o maior problema no uso de heurísticas, que é escolher a heurística a ser adotada para o modelo de sequenciamento, o que não é uma tarefa simples, como aponta Gere [13] entre outros.

A dificuldade para a escolha da heurística a usar não impediu entretanto que se formassem vários modelos baseados em heurísticas, uma vez que a simplicidade dos cálculos envolvidos no processo de busca permitem a utilização de mais do que uma heurística para a obtenção de uma solução, as quais são confrontadas para se obter uma solução mais próxima do ótimo. Dentre os vários modelos heurísticos pode-se citar:

Redes de avaliação

Método proposto por Nof onde são realizadas alterações na estrutura da rede de Petri de modo a torná-las redes de representação de conhecimento, as quais denomina E-nets (redes de avaliação). Com isso, consegue-se guiar a busca através de um grafo dirigido por heurísticas, numa estrutura bastante eficiente se existirem poucos nós.

Combinações de heurísticas

São métodos onde se procuram combinar diferentes heurísticas de forma a obter uma solução cada vez mais próxima do ótimo e com garantias de factibilidade. Em geral são utilizadas para problemas onde existem limitações de recursos, como nos métodos propostos por Morse e Whitehouse [23] e por Norbis e Smith [24], para poder atender tais restrições através da ação simultânea das heurísticas.

2.3.3 Sistemas especialistas

Acompanhando a tendência em sistemas de computação, também existem propostas de resolução do problema de sequenciamento utilizando-se do ferramental oferecido pelas técnicas de inteligência artificial. O uso destas técnicas é, em parte, refutado por Tipnis [30], que julga ser temerário o uso indistinto de IA em sistemas que não necessitam necessariamente deste tipo de inovação. Entretanto, já pode-se observar uma geração crescente de sistemas de IA aplicados ao controle de produção e mais especificamente ao sequenciamento de produção.

O uso de IA tem-se dado em geral através de sistemas especialistas, os quais agem de certa forma como os sistemas baseados em técnicas heurísticas, isto é, a partir de um conhecimento prévio (que pode ser um conjunto de heurísticas) o sistema busca uma solução sem se preocupar com o ótimo estrito para o problema.

Assim como para a busca heurística, aqui não existe a garantia de solução ótima e a

busca é, em geral, rápida. Entretanto, a garantia da factibilidade é obtida agora com a introdução de novos conhecimentos para se guiar a busca através de um caminho factível. O problema aqui é que com o uso de muitas regras para se dirigir a busca o sistema chega a um conflito de sentido de busca, pois podem haver várias direções possíveis a partir de um certo estado, inclusive opostas, além de que se existirem muitas regras será necessário manter um mecanismo elaborado de validação das mesmas, pois duas delas podem se contradizer. Finalmente, a introdução deste mecanismo de validação pode tornar o sistema de resolução lento em relação ao que se podia esperar.

Os problemas mencionados acima são balanceados com a complexidade polinomial dos métodos de resolução, abrindo então a possibilidade do uso de sistemas especialistas no controle de produção. Este uso tem-se dado através de duas abordagens diferentes: uma onde o sistema gera soluções a partir de um conhecimento prévio e as valida em um processo de resolução invertido e outra onde o sistema gera uma solução pouco a pouco ao mesmo tempo em que a valida em um processo direto. Estas estratégias são usualmente conhecidas por encadeamento para trás ("backward chaining") e encadeamento para frente ("forward chaining") respectivamente.

Na literatura encontram-se diversos trabalhos a este respeito, destacando-se um trabalho de O'Leary [25] onde é feita uma revisão sobre sistemas especialistas existentes aplicados ao gerenciamento de produção, abrangendo atividades diversas como treinamento, manutenção, sequenciamento e projeto. Além deste trabalho pode ser citado o de Canzi et alii [5], onde se busca um sistema abrangente para sequenciamento, além de outros onde se aborda o problema de sequenciamento sob diferentes óticas, tais como análise econômica, falhas, lotes pequenos, etc., dos quais [4, 28], representam uma pequena amostra.

2.3.4 Métodos híbridos

Os métodos vistos até o momento apresentam vantagens e desvantagens que impedem a opção definitiva por um deles. A partir disto surge a idéia de juntar-se dois ou mais deles de modo a obter-se uma compensação nas desvantagens individuais. Tal proposta é chamada aqui de método híbrido e as diferentes composições possíveis são determinadas pela performance que se pretende obter do sistema de sequenciamento.

A compensação das desvantagens individuais de cada elemento de um método híbrido faz-se através da imposição de que cada parte execute apenas as tarefas para as quais está melhor adaptado, eliminando assim um conjunto das restrições para a aplicação solitária de cada elemento.

Neste trabalho será proposto um modelo híbrido, descrito no Capítulo 3, onde existem duas componentes: a primeira delas é um método heurístico e a segunda é um sistema especialista. A parte heurística é destinada a cumprir o sequenciamento preditivo e a parte sistema especialista deve cuidar da factibilidade da solução preditiva e fazer o sequenciamento reativo, gerando então uma estratégia de sequenciamento preditivo/reativo e contando ainda com a adoção de um sequenciamento reativo em tempo-real por acomodação da produção ao evento ocorrido. Isto corresponde a modificar-se a tática 3 da

seção 2.2.3 de modo a habilitá-la a melhorar uma solução prévia quando ocorrer aumento de recursos no sistema.

Capítulo 3

A Abordagem Híbrida Proposta

O modelo proposto usa uma abordagem híbrida sistema especialista/busca heurística, onde não existirá de forma exaustiva a busca por um ótimo do problema e sim a busca dirigida ao ótimo por uma solução (uma ordenação) que satisfaça todas restrições do problema (ou a maior parte delas caso o problema seja infactível) e que seja obtida dentro de um intervalo de tempo curto. Neste capítulo será feita a descrição do modelo híbrido, iniciando-se por uma visão geral do mesmo para então descrever com maiores detalhes os seus dois componentes, isto é, o subsistema heurístico (SSH) e o sistema especialista (SE).

3.1 O modelo híbrido

A escolha por um modelo usando as abordagens de sistemas especialistas e de busca heurística deu-se em virtude dos seguintes aspectos:

1. As diferenças entre cada estratégia de manufatura impedem o uso generalizado de um modelo computacional único para diversos sistemas de manufatura sem que ocorram profundas alterações no mesmo.
2. A necessidade de operação reativa durante a produção exige rapidez no processamento de uma solução para o problema.
3. Sendo o problema NP-completo não é interessante realizar uma busca pela solução ótima, bastando caminhar por uma direção que esteja próxima do ótimo teórico.

Como o que se deseja é um sistema rápido, relativamente exato (no sentido de solução ótima) e capaz de adaptar-se ao contexto da fábrica, optou-se por uma abordagem híbrida onde o sistema especialista responde pela capacidade de adaptação e pela rapidez do sequenciamento reativo, enquanto que a busca heurística é a responsável pela resolução eficiente do problema preditivo, buscando o caminho ótimo.

3.1.1 Porquê busca heurística

O uso de busca heurística para a obtenção de uma solução para o problema preditivo (e em algumas circunstâncias para o problema reativo) se justifica em relação às demais técnicas por questões de natureza de implementação e de velocidade de execução.

Quanto aos modelos algébricos, pode-se observar que os mesmos são mais lentos que a busca heurística pelo fato de que em geral buscam ótimos estritos a partir de algumas relaxações no sistema. Como acabam por não garantir a solução ótima e até mesmo a factibilidade da solução em virtude das relaxações feitas, não se justifica o seu uso apenas para obter uma melhoria na solução em relação à que seria obtida muito mais rapidamente através da busca heurística.

Em relação aos sistemas especialistas, o que se pode notar é que os mesmos já se utilizam de heurísticas para gerar diversas soluções, das quais será escolhida uma após algum processo de decisão. Como já se usou heurísticas durante a geração destas soluções é melhor que se utilize apenas uma delas, sem interação com as demais, para obter uma solução rápida e que esta seja dirigida ao atendimento de um certo objetivo pela heurística adotada.

Por isso, a busca heurística é a técnica que melhor atende aos requisitos de velocidade e de otimalidade quando vistos em conjunto. Quanto aos problemas da busca heurística descritos na seção 2.3, pode-se notar que os mesmos se relacionam basicamente ao fato de que a missão de fábrica escolhida determina qual o objetivo a ser atendido e consequentemente qual deve ser a característica determinante da heurística a ser utilizada.

Como o tratamento da missão de fábrica é feito pelo sistema especialista, basta escolher uma heurística que funcione bem para uma gama razoável de problemas, contornando o

problema de ter-se de atender toda e qualquer estratégia de manufatura através dos serviços do sistema especialista, como será esclarecido durante a análise realizada sobre a adaptabilidade do modelo.

3.1.2 Porquê sistema especialista

Na introdução à esta seção foi apontado que o uso de um sistema especialista visa a atender os requisitos de velocidade e adaptação ao contexto. Quanto à capacidade de adaptação, fica bastante claro que o uso de um sistema especialista é a única solução viável, pois para cada estratégia de manufatura seria necessário alterar-se o modelo computacional de modo a absorver as alterações da forma em que se situa o sistema em relação ao conhecimento prévio (a base de conhecimento) utilizado inicialmente pelo sistema.

Já quanto ao item velocidade, esta opção parece contraditória se forem consideradas apenas implementações tradicionais de sistemas especialistas, onde usualmente não existe preocupação demasiada com o tempo de resposta. Entretanto, ao observar-se as características do sequenciamento reativo e, ainda mais, ao adaptar-se os métodos de resolução à estas características, consegue-se obter um sistema rápido, onde a busca se dá apenas por uma solução viável, o que é a única coisa necessária quando se trata da recuperação de um sequenciamento em atendimento a uma alteração no estado do sistema produtivo.

Com esta redução do universo de aplicações passa a ser razoável ter-se um sistema especialista trabalhando em conjunto com a busca heurística, fazendo uma divisão de esforços que tenta em primeiro lugar resolver o problema de uma forma rápida e em segundo lugar resolver de forma ótima, mas em ambos os casos sempre mantendo a factibilidade da solução, se esta for factível evidentemente. A descrição do sistema especialista e o detalhamento necessário para a sua compreensão está na seção 3.3, onde se apresenta a sua forma de atuação durante os sequenciamentos reativo e preditivo.

3.1.3 Visão global do sistema

Antes de passar para a descrição de cada uma das componentes principais do modelo híbrido proposto, é interessante tecer alguns comentários sobre o sistema como um todo. A figura 3.1 apresenta a estrutura global do modelo híbrido.

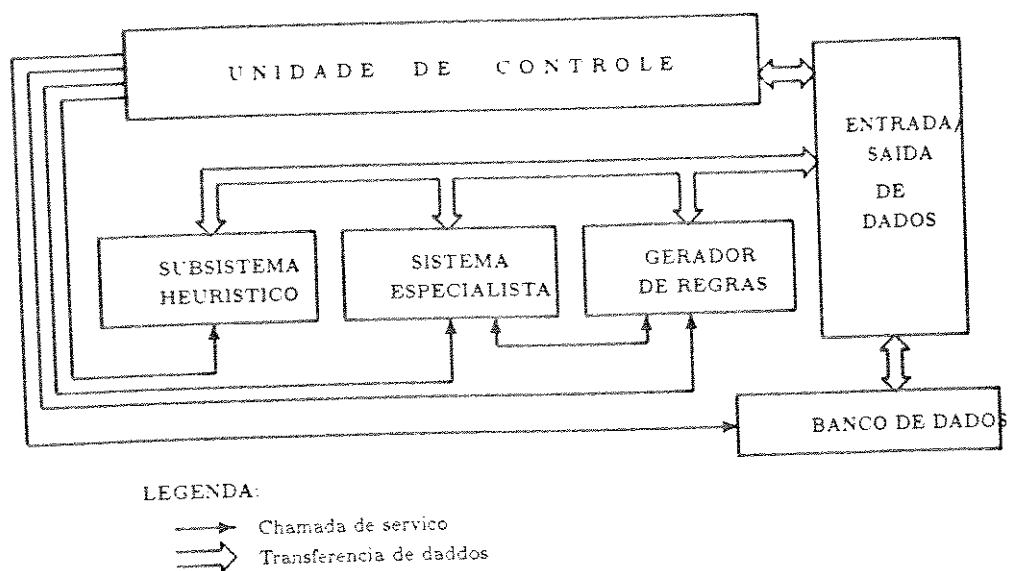


Figura 3.1 - Estrutura geral do modelo híbrido.

Da figura pode-se observar que todo o processo de comunicação com o usuário e de acesso a dispositivos de armazenamento de dados é feito através do módulo de Entrada/Saída, que é também o único que não sofre intervenção da Unidade de Controle. O módulo de Entrada/Saída não será analisado aqui por se tratar apenas de um componente acessório ao modelo híbrido e também por não influir de forma direta na eficiência do sistema. Apenas serão feitos alguns comentários sobre o mesmo quando da descrição dos mecanismos de aquisição de conhecimento no apêndice A.

Por sua vez, a Unidade de Controle assume o controle de ativação de todos os demais módulos, ou seja, é na Unidade de Controle que se decide se o problema é preditivo, reativo, ou ainda de simples aquisição de conhecimento. Como se baseia apenas em requisições do usuário e portanto não influencia no desempenho do sistema, também não será descrito neste trabalho.

O módulo Gerador de Regras é responsável pela aquisição de conhecimento a ser utilizado pelo sistema especialista. Trata-se de um módulo fundamental para caracterizar o processo de aprendizagem do sistema e embora não tenha o poder de influenciar diretamente o desempenho do sistema, o seu conteúdo, isto é, as regras de produção, determinam como funciona e qual a precisão do sistema especialista. Entretanto, como também pode ser considerado um módulo acessório e não tem relação direta com o objetivo do sistema, que é sequenciamento de produção, será descrito no apêndice A para evitar-se uma quebra de continuidade neste momento do texto.

O Banco de Dados é composto por informações de dois tipos: primeiro, por dados de

caráter tecnológico, ou seja, dados quantitativos sobre o sistema de manufatura tais como tempos de produção, tempos de transporte entre estações, tempos de preparação, etc., e por último existem os dados de caráter descritivo, ou seja, dados qualitativos sobre o sistema tais como rotas alternativas, soluções para eventos inesperados, etc.. A descrição do Banco de Dados será feita junto com a descrição dos módulos sistema especialista e subsistema heurístico.

3.2 O Subsistema Heurístico

Os aspectos relevantes dentro do subsistema heurístico e portanto da busca heurística são a forma pela qual se dirige a busca em torno de um caminho ótimo e a forma pela qual se garante a factibilidade do caminho escolhido. Neste modelo o último aspecto é resolvido através de uma conexão com o sistema especialista, que tentará encontrar uma saída para tornar factível a solução proposta. Já o primeiro aspecto, como não poderia deixar de ser, é resolvido através da escolha da regra de busca (a heurística) a ser utilizada.

3.2.1 A regra de busca

Existe na literatura uma extensa lista de trabalhos discutindo a eficiência de cada heurística na solução de problemas de sequenciamento [22, 26, 20]. Entretanto, a conclusão que se pode tirar destes esforços é a de que não existe uma heurística superior às demais para qualquer sistema de manufatura, existindo apenas heurísticas que estão melhor adaptadas a determinadas condições de cada sistema produtivo. Sendo assim, a decisão sobre qual heurística utilizar passa a ser uma questão de preferência particular do especialista responsável pela implementação do sistema de sequenciamento. Para o modelo híbrido em questão resolveu-se que:

1. O objetivo principal a ser buscado durante o sequenciamento é a minimização das datas de entrega do pedido de produção.
2. Para atender este objetivo seria necessário que a heurística levasse em conta o prazo de entrega e o tempo necessário para a produção de cada pedido.
3. Uma primeira aproximação seria usar como critério de escolha a diferença entre o prazo (D_i) e o tempo de produção (t_{p_i}), ou seja, $D_i - t_{p_i}$. Entretanto, esta diferença (a folga) não considera a desproporcionalidade possível entre os vários D_i e t_{p_i} .
4. Uma segunda aproximação seria utilizar a razão entre a folga ($D_i - t_{p_i}$) e o prazo (D_i) como critério. Porém, estes valores são estáticos e portanto não levam em conta o avanço do processo de sequenciamento.

A consequência da análise acima é que a heurística preferida deveria basear-se numa relação como a acima, mas deveria manter, antes de mais nada, uma atualização do tempo de produção restante para fazer o cálculo desta relação. A partir disto, alterou-se a relação anterior trocando o tempo de produção estático (t_{p_i}) pelo tempo de produção atualizado (t_{p_i,k_i}), que pode ser lido como o tempo necessário para se produzir o pedido i após concluído o processamento da operação k sobre o pedido i .

Com isto, a regra de busca seria:

$$\min\left(\frac{D_i - t_{p_i,k_i}}{D_i}\right) \quad ; \quad i \in \text{conjunto de requisições};$$

ou ainda.

$$\min(1 - \frac{t_{p_i, k_i}}{D_i}) = \min(\frac{-t_{p_i, k_i}}{D_i})$$

Como se sabe que $\max(\mathcal{F}(x)) = \min(-\mathcal{F}(x))$, tem-se:

$$\min(\frac{D_i - t_{p_i, k_i}}{D_i}) = \max(\frac{t_{p_i, k_i}}{D_i})$$

Como a expressão de maximização opera sempre com valores positivos, que são valores mais fáceis de se compreender fisicamente, enquanto que a expressão de minimização trabalha com valores negativos e portanto com um sentido físico mais nebuloso, optou-se pela expressão de maximização para a implementação do subsistema heurístico. Concluindo, a heurística escolhida e implementada foi:

$$\max(\frac{t_{p_i, k_i}}{D_i}) \quad ; \quad i \in \text{conjunto de requisições.}$$

Um aspecto interessante sobre a heurística adotada diz respeito ao fato que o processo de busca é constituído de forma que a cada passo da resolução os valores de t_{p_i, k_i} podem ser alterados, o que possibilita ao sistema fazer o sequenciamento em bloco, evitando levar um pedido até o fim de sua produção para depois ir atender aos demais pedidos.

3.2.2 Conexão com o sistema especialista

A heurística adotada apenas procura minimizar os tempos proporcionais de entrega, não se importando se os mesmos são factíveis ou não, isto é, não verifica se t_{p_i, k_i} é maior que D_i , o que significa atraso na entrega do pedido. Para tratar deste aspecto do processo de resolução o artifício normalmente utilizado é o de voltar-se um passo no processo de busca, operação conhecida por “backtracking”, e prosseguir-se então por um outro caminho, até encontrar-se uma solução ou determinar-se que não existe caminho factível. Este processo pode ser resumido através da figura 3.2, onde o grafo representa os caminhos possíveis e uma situação onde ocorre “backtracking”.

Entretanto, este processo introduz a inconveniência de que a cada passo de “backtracking” não se afasta muito da solução anterior, ou seja, provavelmente o novo caminho escolhido levará também a uma situação de infactibilidade dentro de alguns passos. Se isso ocorrer, o processo de “backtracking” deverá ser aplicado repetidamente até se encontrar, se existir, um caminho que seja factível.

O efeito desta repetição de esforços é que acaba ocorrendo uma busca exaustiva, o que torna a atividade de sequenciamento um trabalho lento e desgastante. Também deve-se guardar os caminhos já percorridos, de modo a não percorrê-los novamente, o que leva a um grande uso de memória pelo programa, elevando assim os custos de sua implantação.

A solução encontrada para este problema foi o uso do sistema especialista, que permanece inativo enquanto o caminho escolhido se mostrar factível mas, ao chegar-se a uma infactibilidade entra em operação para, em um único passo, levar o sistema para um estado novo que esteja em um caminho bastante distante do anterior. Esta transformação

de estado é feita com o uso de regras de produção que representam conhecimentos sobre formas alternativas de se atribuir trabalho às máquinas. Na figura 3.3 é representado o que ocorre com o sistema durante o processo de ativação do sistema especialista.

Este processo de mudança utilizando o sistema especialista, apenas SE daqui em diante, dá-se em duas fases. Primeiro, quando o caminho percorrido tornar-se infactível ($t_{p_i, k_i} > D_i$ para algum i) o módulo de busca heurística ativa o SE e na segunda fase o SE faz a busca por uma solução para o problema apresentado, sempre procurando usar do conhecimento adquirido pelos especialistas humanos neste processo. A segunda fase será descrita com maior detalhamento na seção 3.3, onde se apresenta o SE.

Na primeira fase a conexão com o SE se dá através de uma simples chamada de função com passagem de alguns parâmetros, os quais são o que realmente importa na conexão. Os parâmetros passados são informações a respeito do pedido que está em atraso e da máquina onde está ocorrendo este atraso, o que já é suficiente para se proceder a resolução do problema pelo SE, durante a segunda fase.

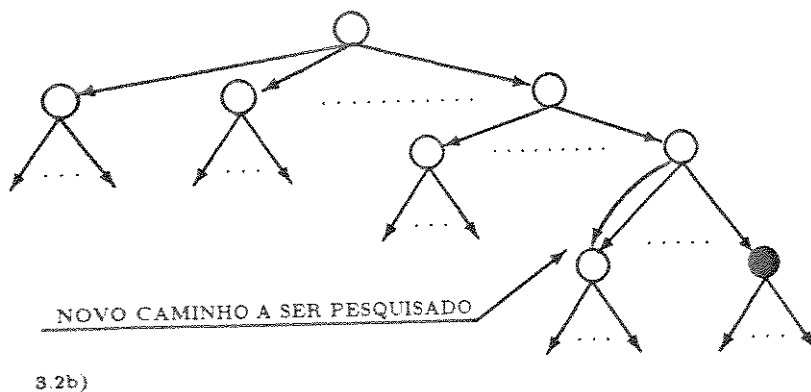
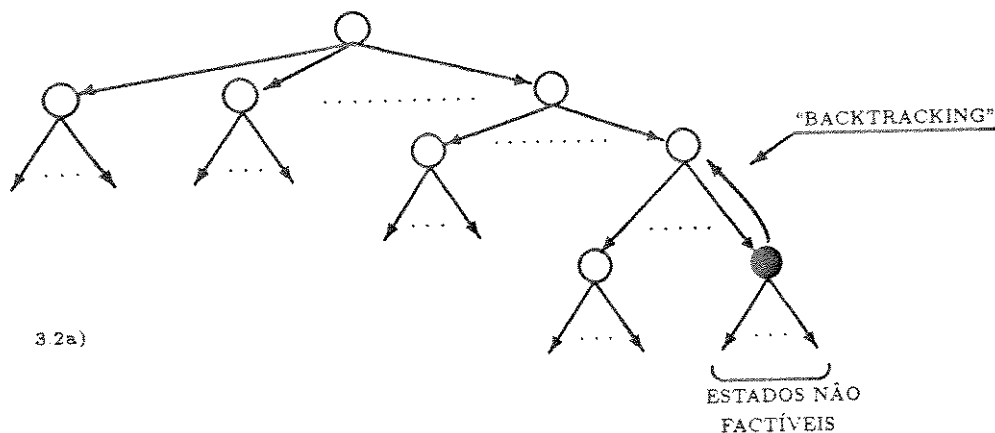


Figura 3.2 - O processo de "backtracking".

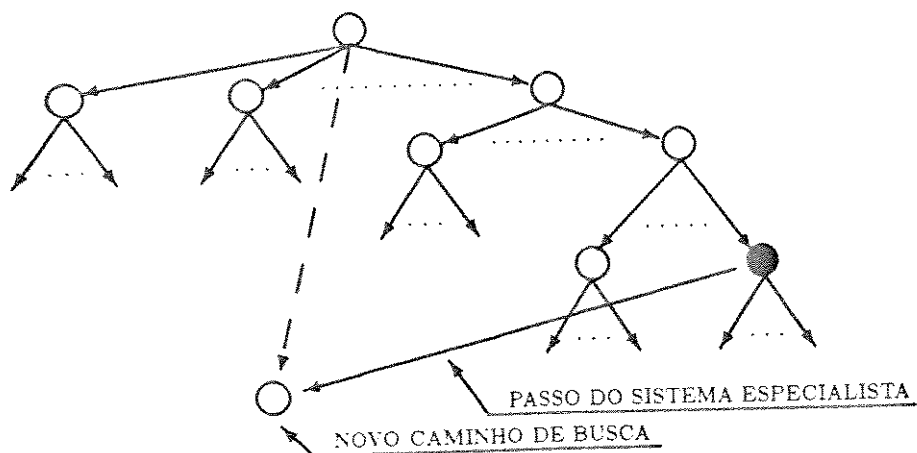


Figura 3.3 - Mudança de caminho usando o sistema especialista

Um segundo ponto de conexão entre o SE e o subsistema heurístico, apenas SSH daqui em diante, é o controle de estoque, ou seja, durante a verificação de que os pedidos de produção atendidos não levam a rompimentos nos limites permitidos de estoque ao longo da planta da fábrica. Para isto, a cada passo dado no grafo de caminhos verifica-se se o mesmo não viola algum destes limites. Caso isso ocorra, ativa-se o SE para que o mesmo trate deste novo tipo de infactibilidade usando regras pré-estabelecidas pelo usuário através de seu departamento de engenharia de produção.

Esta forma de conexão visa, principalmente, ao atendimento de empresas cuja missão de fábrica exige um controle rígido de estoque, o que não é explicitamente tratado quando se usa uma heurística que relaciona o prazo de entrega com a previsão de entrega de cada pedido. Com isto então, obtém-se um sistema heurístico eficiente, isto é, rápido e guiado em direção ao ótimo, além de seguro pois trata cuidadosamente todas as possíveis situações de infactibilidade no tempo (prazos) e no espaço (estoques).

3.2.3 Estrutura geral

Através de um exame nas duas sub-seções anteriores pode-se estabelecer um algoritmo básico para o funcionamento do modelo híbrido e a partir deste a estrutura interna do SSH quando da realização do sequenciamento preditivo. Tem-se inicialmente o algoritmo apresentado na figura 3.4.

Sequenciamento Preditivo

1. Receba os pedidos de produção.
2. Para cada pedido i , calcule
$$\text{latência} = \frac{t_{p_i, k_i}}{D_i},$$
3. Escolha o pedido j com maior latência,
4. $\text{latência}(j)$ é maior que o máximo atraso definido pela empresa?
Sim - Chame o sistema especialista (SE)
Não - Continue,
5. Realize a operação $k_j + 1$ no pedido j ,
6. Faça $K_j = K_j + 1$,
7. Os estoques continuam dentro dos limites?
Sim - Continue
Não - Chame o sistema especialista,
8. Existem pedidos ainda não completos?
Sim - Volte para o passo 2;
Não - Pare.

Figura 3.4 - Algoritmo básico do SSH.

O algoritmo mostra que, exceto o passo 2, todos os passos são simples e diretos, consistindo em sua maioria por testes. Com isto a estrutura do SSH fica reduzida a alguns poucos módulos de cálculo efetivo, como está apresentado na figura 3.5, que servirá de roteiro para a descrição da estrutura deste sistema.

Primeiro, pode-se notar que existem três tipos de sinais de chamada de serviço mantendo o seu contato com o exterior. Dois deles são sinais de requisição de seus serviços, um vindo da Unidade de Controle e outro vindo do SE, o qual é usado apenas durante o sequenciamento reativo; enquanto que o terceiro sinal é de requisição dos serviços oferecidos pelo SE, sinal este que poderá ser enviado quando da execução dos passos 4 e 6 do algoritmo da figura 3.4, caso ocorra alguma infactibilidade.

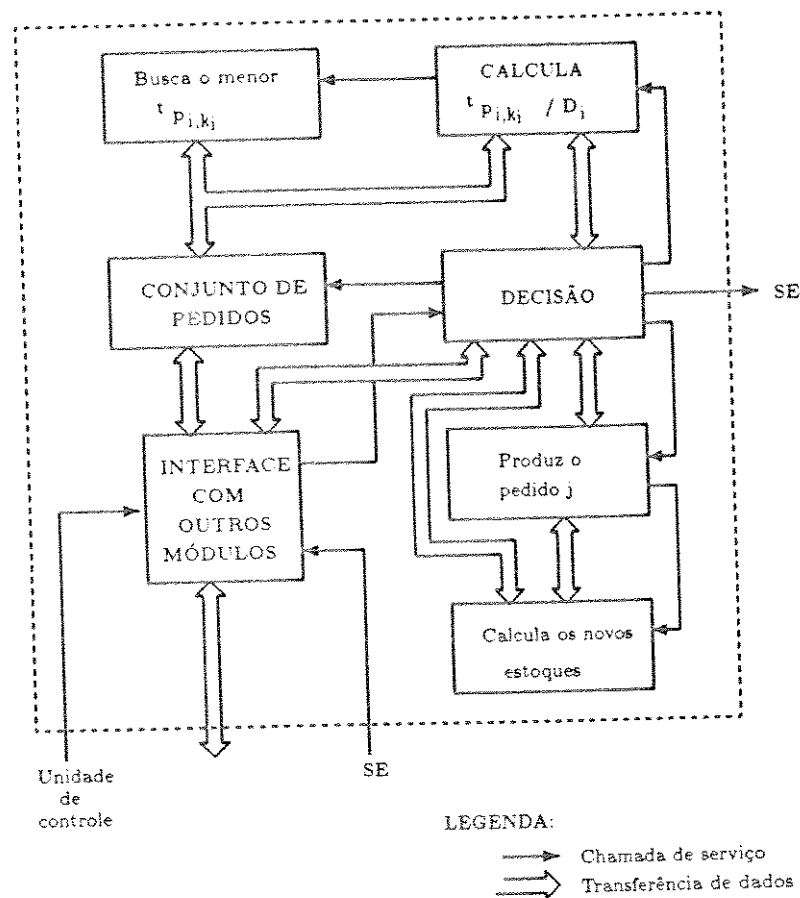


Figura 3.5 - Estrutura do sub-sistema heurístico.

Quanto aos módulos internos, tem-se que é o módulo de **Decisão** que controla o avanço do processo de sequenciamento, através do acionamento dos módulos de cálculo da latência e de controle do estoque além, quando necessário, de chamar os serviços do SE. O seu funcionamento segue estritamente o algoritmo da figura 3.4 e portanto não necessita de maiores esclarecimentos.

Os módulos de **Interface** e **Conjunto de pedidos** referem-se respectivamente a comunicação entre os módulos externos ao SSH e ao armazenamento de informações referentes ao processo de sequenciamento, isto é, os pedidos de produção e os estados parciais do processo. Por tratarem de aspectos que podem ser considerados laterais ao objetivo deste trabalho não terão aqui uma maior atenção do que a que já foi dada.

Para o cálculo da latência de cada um dos pedidos são utilizados dois módulos, inicialmente um módulo onde será feito efetivamente o cálculo da razão $\frac{t_{P_{i,k_j}}}{D_i}$ e que deverá passar ao segundo módulo os parâmetros necessários ao cálculo do menor $t_{P_{i,k_j}}$. O segundo módulo recebe os parâmetros acima e encontra para o pedido em questão qual é

o menor valor de t_{p_i, k_i} que satisfaça as restrições físicas de disponibilidade da máquina e do próprio pedido.

O controle de estoque é feito através dos módulos que produzem o pedido j e calculam os novos estoques após a produção deste pedido. O primeiro módulo faz a atualização das informações contidas no módulo de Conjunto de pedidos com base nas características relativas à produção do pedido i na máquina que realiza a operação $k + 1$ do roteiro deste pedido. O último módulo calcula a nova situação dos estoques e transmite esta informação ao módulo Decisão, o qual irá finalmente decidir sobre a factibilidade deste novo estado.

Desta descrição tiram-se as seguintes conclusões, no que diz respeito à implementação do sistema:

- (a) Como o processo é estritamente numérico e em certo sentido simples, a busca heurística é computacionalmente rápida.
- (b) A velocidade efetiva da busca dependerá basicamente da implementação dos módulos de cálculo de t_{p_i, k_i} , pois os demais módulos não apresentam dificuldade computacional.
- (c) A eficiência do cálculo de t_{p_i, k_i} é determinada pelo processo de busca do menor t_{p_i, k_i} , o qual é resultado da forma de representação das informações relativas aos pedidos de produção e às máquinas da fábrica.

Portanto, uma vez assegurada a factibilidade da solução através do SE, a eficiência do sistema é obtida a partir de uma representação de dados que seja adequada aos métodos de cálculo de t_{p_i, k_i} , o que pode ser facilmente assegurado com o uso de estruturas de dados clássicas (pilhas, filas, etc.).

3.3 O sistema especialista

Na seção 3.1 discutiu-se os motivos para utilizar um modelo híbrido e qual seria a estrutura básica deste modelo. Na seção anterior estudou-se a componente heurística deste modelo e nesta seção será feita a análise de sua segunda componente, o sistema especialista (SE). Nas discussões anteriores foi colocado que o SE seria responsável primeiro pela adaptabilidade do modelo e segundo pelo atendimento ao sequenciamento reativo. Além disso ele tem a função de manter a factibilidade da solução encontrada durante o sequenciamento preditivo. O que será feito agora é mostrar qual é a forma de atuação do SE para atender aos requisitos destas funções.

3.3.1 Estrutura básica

Para fazer uma análise coerente das funções exercidas pelo SE é necessário que se faça preliminarmente uma descrição de sua estrutura básica, que pode ser vista na figura 3.6, onde se tem uma idéia geral de sua constituição e das ferramentas que são utilizadas durante o processo de resolução.

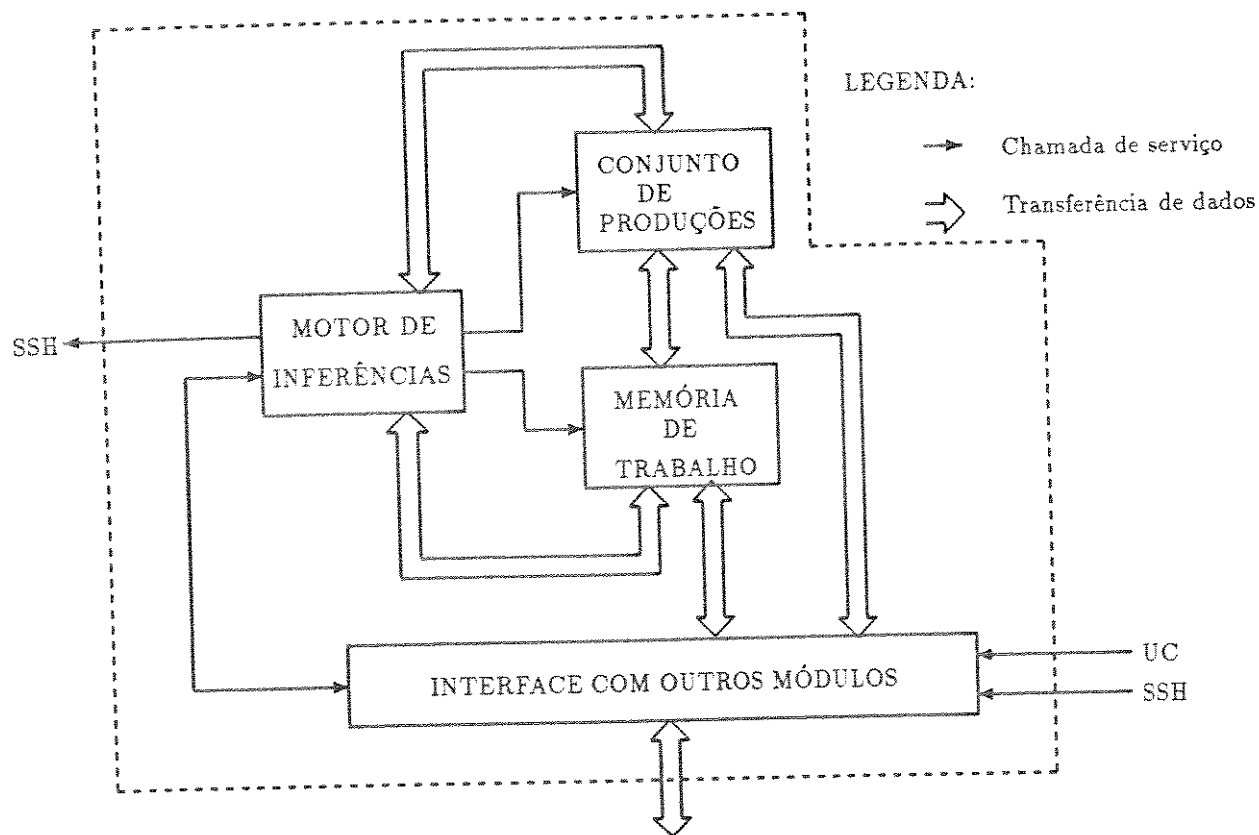


Figura 3.6 - Estrutura básica do SE.

Como pode ser observado, esta estrutura em nada difere da estrutura convencional de um sistema especialista. Resumidamente pode-se descrever seu processo de resolução como sendo controlado pelo motor de inferências, o qual é responsável pela administração das informações contidas no conjunto de produções e na memória de trabalho, que contem, respectivamente, as regras de produção que armazenam o conhecimento sobre o sistema de manufatura e as informações sobre o estado do sistema e da solução durante a resolução do problema.

Outra observação a ser feita da figura 3.6 é que o conhecimento será representado através de regras de produção, aproveitando-se então todo o instrumental matemático que a lógica de primeira ordem oferece na sua utilização. Este aspecto da representação de conhecimento será discutido na seção 3.4, onde será mostrado que esta é a forma mais prática para implementar o SE.

3.3.2 Capacidade de adaptação

A adaptabilidade ou flexibilidade do modelo híbrido refere-se à sua capacidade de ser utilizado em diferentes sistemas de manufatura (SM) a partir de alterações feitas pelo próprio usuário. Isto apenas pode ser feito se o modelo tratar características peculiares de cada SM como se fossem dados sobre os quais irá trabalhar, e portanto nada mais intuitivo do que fazer com que estes dados transformem-se em regras a serem tratadas pelo SE, ou seja, transformar estas características em regras de produção.

Assim, o processo de adaptar o modelo híbrido para um determinado SM consiste em inserir no conjunto de produções as regras relativas às características do SM em questão. Isto é feito através do **Gerador de Regras**, descrito no apêndice A, para que o usuário não tenha que se preocupar com a forma em que o conhecimento está armazenado, tarefa esta a cargo do gerador, e desse modo facilitando a inserção de regras pelo usuário.

Entretanto, como o modelo é híbrido e o usuário não pode modificar a estrutura do SSH com a mesma facilidade encontrada na modificação do SE, a flexibilidade do modelo não é total. Porém, existe no próprio SSH uma alternativa para escapar desta rigidez, que é o teste de factibilidade do prazo de entrega, pois o máximo atraso suportável é um parâmetro determinado pelo usuário e, através dele o mesmo pode forçar com que o SE seja ativado desde o primeiro passo do processo de sequenciamento (bastando para isso que o atraso suportável seja definido como sendo igual a zero); o SE por sua vez deve conter uma regra que faça com que seja ativado um outro esquema de busca heurística, onde a regra de busca seja aquela desejada pelo usuário.

É possível concluir portanto que o modelo híbrido tem a sua flexibilidade garantida por um uso intenso do SE, quer seja através da alteração do conjunto de produções quer seja forçando um novo método de busca heurística a partir de uma chamada feita pelo SSH. O que conseqüentemente leva à conclusão de que o grau de flexibilidade do modelo está relacionado ao grau de flexibilidade do próprio SE, que é função da sua capacidade de aprendizagem, discutida no apêndice A.

3.3.3 Atuação no sequenciamento preditivo

A flexibilização da busca heurística com o uso do SE só é possível pelo fato de que é o SE que procura manter a factibilidade do caminho percorrido pela busca. A atuação do SE durante o sequenciamento preditivo ocorre então primeiro para a manutenção da factibilidade da solução e depois, sob condições críticas, na flexibilização do modelo. Em qualquer das duas situações o SE atua segundo uma mesma sistemática, que é basicamente a mesma em qualquer sistema especialista.

No caso particular do sequenciamento de produção existem algumas peculiaridades que simplificam o processo de resolução, exigindo menos passos de busca, uma vez que limitam o tamanho dos encadeamentos de proposições. Isto é fácil de constatar apenas examinando algumas proposições típicas de sistemas de manufatura, como as listadas na figura 3.7.

- **P1** : Se a produção da peça **y** atrasar e a máquina **x** estiver livre então use a máquina **x**.
- **P2** : Se a produção da peça **y** atrasar então verifique a carga da máquina **x**.
- **P3** : Se o estoque em **dep_i** for maior que limite então passe alguma peça à frente.

Figura 3.7 - Exemplos de regras em sistemas de manufatura.

Examinando estas proposições percebe-se que elas levam sempre para pontos muito próximos da solução, quando não até a própria, como em P1 e P3. A partir desta constatação é possível concluir que a atuação do SE é em geral rápida, uma vez que não são necessários vários disparos de regras para se chegar até a solução. Desta maneira, os métodos de pesquisa na memória de trabalho e no conjunto de produções podem ser simplificados se a sua implementação for dirigida pelo conhecimento desta característica. Quanto ao modo em que se dá a atuação do SE, temos o encadeamento de eventos visto na figura 3.8.

Um detalhe importante ocorre durante os passos 6 e 7, ou seja, durante os passos onde existe a intervenção do especialista humano sobre o SE. Primeiro, isto se dá pela inexistência de qualquer solução conhecida factível para o problema em questão. A partir disto, no passo 6, é pedida a ajuda do especialista e, em um diálogo dirigido pelo SE, tenta-se obter uma nova solução para o problema. Depois, ao se obter uma solução qualquer o SE a toma como solução conhecida, caracterizando um processo de aprendizagem em tempo de execução, que é uma característica fundamental para sistemas especialistas.

1. Ocorre a ativação do SE pelo SSH, onde este último passa ao primeiro informações sobre o tipo do problema (data de entrega ou inventário) inserindo-as na memória de trabalho (MT).
2. O motor de inferências (MI), a partir de funções de busca e casamento de padrões, busca no conjunto de produções aquelas que satisfazem as condições do problema (contido na MT).
3. O processo de busca é interrompido se :
 - (a) Encontrar uma solução.
 - (b) Ficar determinado que não existe solução conhecida para o problema.
4. Se a interrupção no passo 3 for pela obtenção de uma solução, o SE devolve o controle ao SSH, incluindo como parâmetro nesta passagem qual é a solução obtida. Se a interrupção ocorrer pela inexistência de solução, o SE permanece com o controle e vai então buscar uma solução preferencial (ver observação a seguir).
5. Se a solução preferencial for factível e não conduzir a um círculo vicioso no processo de resolução, então o SE transfere o controle ao SSH, novamente incluindo a solução como parâmetro.
6. Se a solução preferencial não puder ser implementada recorre-se à ajuda de um especialista humano, o qual deverá tomar a decisão final sobre o problema.
7. A solução apresentada (se existir) é “aprendida” pelo SE, que novamente transfere o controle ao SSH.

Figura 3.8 - Processo de ativação do SE durante o sequenciamento preditivo.

Observação:

Para o sequenciamento de produção resolveu-se que a solução preferencial, ou “default”, seria realizar um passo de “backtracking”. Com isso vai existir a possibilidade de ocorrência de ciclos pois na ativação seguinte do SE pode ocorrer que a solução indicada seja a de fazer um novo “backtracking” sobre os mesmos elementos, o que significa desfazer o anterior. Isto leva ao cuidado adicional de verificar a existência de ciclos durante o passo 5.

Concluindo, tem-se que durante o sequenciamento preditivo o SE mantém a factibilidade da solução (quer seja por atraso ou por inventário), também é responsável pela flexibilização do modelo híbrido e ainda tem a característica de aprender novas soluções junto ao especialista humano. Tudo isso através de uma estrutura bastante simples e rápida conforme será visto a seguir, o que viabiliza a proposta de modelo híbrido para a obtenção de velocidade e flexibilidade na atividade de sequenciamento.

3.3.4 Atuação no sequenciamento reativo

A necessidade de ter-se um sequenciamento reativo de produção vem por motivos ligados tanto à manutenção da factibilidade do sequenciamento inicialmente proposto quando ocorre uma diminuição de recursos, quanto para a melhoria da solução quando o evento não esperado acrescenta recursos ao SM. Em ambos os casos, como ocorre o surgimento de imprevistos, a automação do processo de reação ao evento leva ao uso do SE, o qual tomará por ponto de partida o evento e a situação da produção no instante da ocorrência do mesmo.

Assumindo tal ponto de partida, tem-se que o SE deverá, em princípio, atuar sob condições de tempo-real, ou seja, a solução fornecida terá que levar em consideração os instantes de ocorrência do evento e de chamada do SE e, além disso, deverá responder dentro de um prazo de tempo mais curto possível, pois quanto mais tempo decorrer entre a ocorrência do evento e a apresentação de uma solução maior será a probabilidade da mesma tornar-se ineficaz, no caso de diminuição de recursos, ou inútil, no caso de aumento de recursos.

Entretanto, dadas as características das regras de produção envolvidas no contexto de manufatura e controle de produção, as restrições de tempo serão consideradas apenas no que se refere aos instantes de ocorrência do evento e de chamada ao SE. Portanto, o SE não necessitará de uma previsão do instante em que fornecerá uma resposta ao usuário, pois a sua resposta vem, em geral, dentro de um intervalo de tempo bastante pequeno quando comparado aos tempos gastos com atividades de produção.

1. O SE é ativado pela unidade de controle (UC), que passa ao SE as informações sobre o instante de ocorrência do evento, a hora atual, o estado previsto para o sistema e o tipo de evento ocorrido.
2. O MI inicia o processo de busca por uma solução a partir das informações acima e das produções no CP relativas ao sequenciamento reativo.
3. O processo termina quando:
 - (a) Encontrou-se uma solução.
 - (b) Determina-se que não existe solução conhecida.
4. Se for encontrada uma solução o SE retorna o controle à UC, que se encarrega da implementação da mesma.
Se não existir solução o SE passa o controle ao SSH, que deverá refazer o sequenciamento a partir do instante em que ocorreu o evento.

Figura 3.9 - Processo de atuação do SE no sequenciamento reativo.

O modo de atuação do SE durante o processo de sequenciamento reativo pode ser resumido através da figura 3.9, onde podem ser constatadas duas características essenciais do SE: primeiro que o mesmo diferencia os sequenciamentos preditivo e reativo apenas através de seu conjunto de produções, ou melhor, através das diferentes regras de produção aplicáveis a cada contexto; e segundo, que, embora tenha restrições de tempo de execução, não se importa com a duração do processo de resolução por ser este mais rápido do que as atividades de produção.

3.4 Implementação do modelo híbrido

Durante as duas seções anteriores foram discutidas algumas das características do modelo híbrido. Estas características, inclusive de funcionamento, é que permitem que se considere este modelo confiável e eficiente para o sequenciamento de produção. Porém, desta escolha surgem alguns problemas de implementação que não são comuns quando se trata de modelos “puros” como modelos de otimização, por exemplo. Estes problemas são relativos a integração entre os dois sistemas, uma vez que estes são conceitualmente bastante distintos.

A dificuldade de comunicação surge do fato de que sistemas especialistas são melhor implementados quando se usam linguagens funcionais, enquanto que a busca heurística adapta-se melhor à linguagens procedimentais. Então, se for realizada a implementação ideal de cada um destes sub-sistemas surge a barreira da tradução, isto é, como fazer a passagem de informações entre os dois sub-sistemas construídos sob diferentes paradigmas de programação.

Um outro fator que dificulta o uso de duas linguagens na implementação do modelo híbrido é que linguagens funcionais, como LISP por exemplo, têm um desempenho melhor em máquinas com arquitetura desenvolvida para elas, tal como LISP-machine, as quais tem um custo bastante elevado para o uso que teriam em ambientes industriais. Em máquinas convencionais, o que seria ideal pois já existem nas fábricas, sistemas desenvolvidos em linguagens funcionais são lentos para atender requisitos de uso sob restrições de tempo, como as que ocorrem no sequenciamento reativo, desabonando então esta solução.

Para solucionar este problema decidiu-se que os dois sub-sistemas deveriam ser programados em uma única linguagem, o que leva ao problema de decidir qual linguagem escolher. Baseando-se em aspectos como velocidade, portabilidade e em especial na intensidade de uso na construção de diferentes tipos de sistemas, entre os quais se pode citar UNIX, TurboProlog e TRC entre outros, a opção foi o uso da linguagem C, que é bastante eficiente para o paradigma de programação procedimental e pode ser bem adaptada para o uso em sistemas especialistas.

Com o uso de apenas uma linguagem e, ainda mais com o uso da linguagem C, são contornados simultaneamente os problemas de comunicação e do uso de máquinas com arquitetura dedicada. Entretanto surgem outros problemas, agora relacionados com a aplicação de C ao contexto de sistemas especialistas, como forma de representação e armazenamento de conhecimento, capacidade de aprendizagem e métodos de resolução, os quais serão discutidos a seguir.

3.4.1 Representação de conhecimento

Durante a seção 3.3 já foi dito que o conhecimento manipulado pelo SE estaria representado sob a forma de regras de produção. Esta opção deu-se por alguns fatores ligados à linguagem de programação, à natureza do problema e a correção formal das decisões a serem tomadas. O descarte outros modos de representação de conhecimento, como “frames” ou redes semânticas, fica compreendido quando se analisa estes três fatores acima

em conjunto.

Quanto a natureza do problema, tem-se que o conhecimento relacionado aos sistemas de manufatura, e em particular ao sequenciamento de produção, pode ser facilmente transformado em um conjunto de regras, que pode conter todo e qualquer conhecimento envolvido. Já mostrou-se anteriormente alguns exemplos destas regras e deles concluiu-se rapidamente sobre a simplicidade desta forma de representação.

Contrapondo-se à esta facilidade de representação ocorre que as regras dizem respeito a tipos de peças e de máquinas, enquanto que no ato do sequenciamento as informações tratam de pedidos de produção, que devem herdar logicamente as regras relativas ao tipo de peça a que se refere o pedido. Isto seria facilmente contornado com o uso de redes semânticas, entretanto como se usa uma linguagem procedimental, torna-se muito difícil obter uma implementação eficiente destas redes, por não se dispor de mecanismos de alteração dinâmica das estruturas de dados manipuladas. Para regras de produção este processo de herança vai exigir cuidados adicionais na conversão de parâmetros entre pedido e tipo de peça, dificultando os processos de resolução do SE. Quanto a estes processos, são necessários apenas métodos usuais de busca e de casamento de padrões, sobre os quais há uma extensa pesquisa realizada, e necessitam apenas de estruturas convencionais de programação.

A correção formal das decisões refere-se a existência ou não de um rigor matemático nas decisões tomadas durante o processo de busca. É fácil de ver que a lógica de primeira ordem, que é a principal ferramenta matemática aplicável à manipulação de regras de produção, atinge plenamente este rigor, uma vez que toda a análise lógica envolvida está embasada por uma teoria sólida e essencialmente completa, no sentido de não permitir interpretações dúbias. Como toda a lógica envolvida em linguagens procedimentais é de primeira ordem, pode-se concluir que não existem empecilhos para a sua utilização.

Os três fatores acima já podem justificar o uso de regras de produções para a representação de conhecimento. Porém, existe ainda um quarto fator que por si só justificaria tal uso. Este fator é a existência de um histórico anterior no uso de regras de produção em C, que é o caso da implementação de um sistema desenvolvido na Universidade de Dakota do Norte, [19], denominado **TRC**, ou **Translating Rules to C**, que é utilizado para a criação de sistemas especialistas em C a partir de regras construídas em linguagens funcionais e de cujas idéias surgiram parte das estruturas utilizadas neste sistema.

As idéias absorvidas do TRC dizem respeito à estratégia de resolução, que serão explanadas a seguir, e à forma de armazenamento do conhecimento, ambas visando ao uso de sistemas especialistas em aplicações onde o tempo de resposta é crítico, que é uma das restrições inicialmente impostas ao sequenciamento reativo.

Quanto à forma de armazenar conhecimento o TRC adota a divisão da memória de trabalho, denominada "short term memory" - STM, e do conjunto de produções, "long term memory" - LTM, em conjuntos de regras e objetos semelhantes, o que facilita o processo de busca pois com isso basta tentar fazer o casamento de padrões de mesma classe. Esta idéia é utilizada neste trabalho e, quando somada ao método de casamento de padrões proposta por Forgy, [10] no algoritmo RETE, permite um excelente grau de eficiência na manipulação das regras no SE. O algoritmo RETE está por trás da conhecida

eficiência das linguagens OPS5 e OPS83, largamente utilizadas para construir sistemas especialistas baseados em regras.

As diferenças existentes entre as propostas do TRC e do RETE e as deste modelo podem ser consideradas como sendo de implementação. Por ter-se apenas um SE em mente, não é preciso prever generalidades como os outros dois o fazem, e também se pode dirigir a implementação em função do contexto oferecido pelo problema. Sendo assim, pode-se apontar as seguintes características na implementação da representação de conhecimento e principalmente na forma de armazená-lo:

1. A memória de trabalho será composta por diversas classes de eventos, resumidas na tabela 3.1, que representam os possíveis tipos de objetos envolvidos em sistemas de manufatura.
2. A busca na memória de trabalho será dirigida pela classe do padrão a ser casado, o que diminui o tempo de busca e portanto de resolução.
3. O conjunto de produções é a chave de uma implementação eficiente e aqui é constituído por uma sequência de testes “se-então”, onde cada dupla formada por dois destes testes representa uma regra de produção.
4. A construção desta sequência é estática em tempo de execução e usa as próprias estruturas de teste que a linguagem oferece, sendo por isso extremamente rápidos.
5. A aparente rigidez introduzida por esta estrutura é corrigida através do módulo gerador de regras, que tem por finalidade modificar esta sequência de “se-então”, ou através de duas classes, LTR e STR, existentes na memória de trabalho. Portanto mantém-se a flexibilidade do sistema.
6. A divisão de cada regra de produção em duas partes (dois “se-então”) visa ao aumento da velocidade de resolução ao fazer inicialmente testes de simples viabilidade de disparo de uma regra e depois, se for viável, tenta-se fazer o disparo da mesma.
7. O primeiro teste, o de viabilidade, é composto pelos seguintes testes parciais:
 - Verifica se a regra já não foi disparada.
 - Verifica se a ação desencadeada pela regra disparada no passo anterior é compatível à ação esperada para o seu disparo.
 - Verifica se existem na MT tantos padrões em cada classe quanto os necessários para o seu disparo.
8. O segundo teste, o de disparo, é aquele que efetivamente vai realizar a operação de casamento de padrões, sendo então uma composição dos padrões necessários ao disparo da regra.
9. O segundo teste só é realizado se o primeiro resultar verdadeiro, o que alivia o trabalho de casamento de padrões.

10. Caso o segundo teste também resulte verdadeiro ocorre o disparo da regra, isto é, executam-se as ações previstas na região “então” da regra.

De uma forma mais objetiva, pode-se definir uma estrutura para a LTM e outra para a STM, de modo a aproveitar as características de cada contexto, isto é, da memória de trabalho e do conjunto de produções. Para a memória de trabalho a composição das classes é feita através de listas de objetos, onde uma lista principal contém as diferentes classes e cada uma destas classes contém uma sub-lista com os objetos pertencentes a ela, conforme está apresentado na figura 3.10.

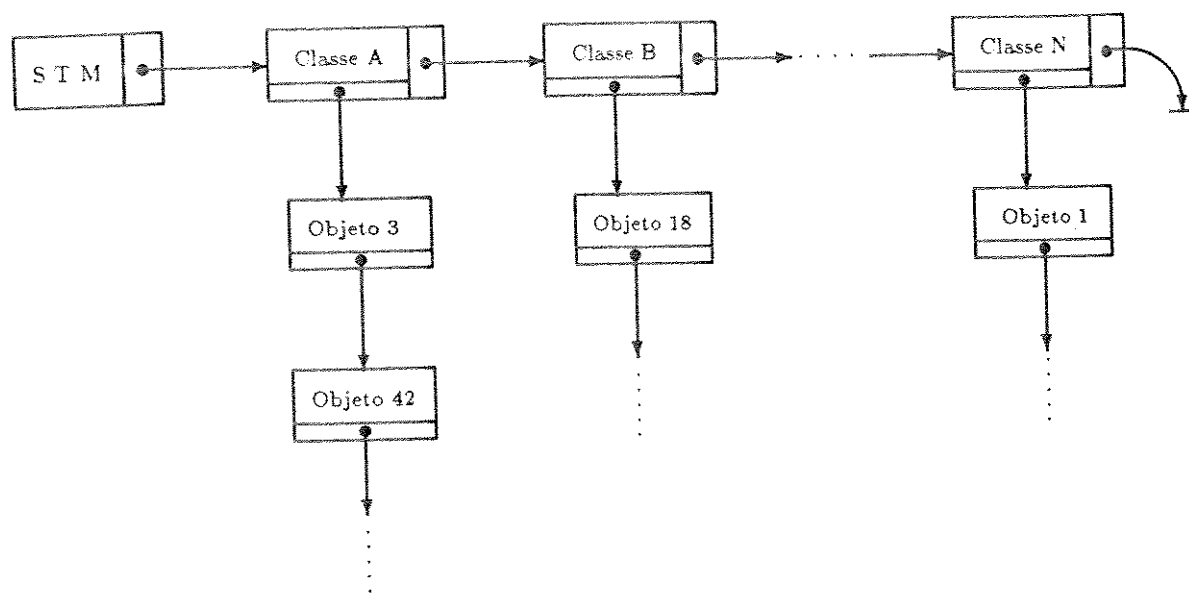


Figura 3.10 - Estrutura de armazenamento da memória de trabalho.

Cada objeto, em qualquer classe, é uma tripla **objeto-atributo-valor**, que é a forma mais simples de se representar o estado de qualquer entidade relativa ao problema de sequenciamento. Na tabela 3.1 é apresentada uma lista das classes previstas com os respectivos objetos associados.

CLASSE	TIPOS DE OBJETOS
Histórico	Soluções apresentadas pelo SE
Produção	Uma solução para o problema atual
Temp	O problema atual
Lote	Informações a respeito do lote com problemas
Máquina	Informações sobre a máquina onde há o problema
STR	Regras de validade temporária
LTR	Regras de validade permanente

Tabela 3.1 - Classes da MT e tipos de objetos associados.

Quanto a finalidade da cada uma das classes citadas acima, tem-se que:

Temp, STR, LTR

São classes utilizadas no processo de aprendizagem, onde Temp guarda uma imagem do problema inicial para que STR ou LTR possam armazenar a solução indicada pelo especialista. A opção entre LTR e STR é feita pelo próprio especialista, indicando se a regra terá ou não validade para qualquer instante futuro.

Lote , Máquina

Estas classes são as utilizadas efetivamente para o desenvolvimento do processo de resolução. É nelas que estarão as informações a respeito do problema e passagens por pontos intermediários da solução.

Histórico

É a classe que armazena todas as soluções propostas pelo SE para evitar que sejam introduzidos ciclos e com isso permitir a obtenção de uma solução dentro de um número finito de passos.

Produção

Com a obtenção de uma solução o SE deve interromper o processo de busca e isto é feito através da classe produção, a qual ficará vazia até encontrar-se uma solução.

O conjunto de produções é composto por uma única função, a qual é composta por **K** pares de teste conforme o pequeno trecho mostrado na figura 3.11, onde destacam-se os seguintes pontos:

- (a) O primeiro teste de cada par é composto apenas por testes de valores, o que agiliza muito o processo de resolução.
- (b) O segundo teste é composto pelas funções de casamento de padrões (**Matches()**) e por apontadores para os padrões já casados, para se evitar a duplicação de esforços nesta operação.
- (c) A ação disparada faz a atualização da memória de trabalho e das diversas componentes do primeiro teste, além de chamar recursivamente a função regra_de_produção.

```

funcao_regra_de_producao()
{
  Teste de      {
conclusão      if ((ultima_acao = put) and (cont_tipo_prod ≠ 0))
                return;
                if ((disparou_1 ≠ 1) and (ultima_acao = ?) and (cont_tipo_? ≥ n))
REGRA 1 {       if ((apont_padrao_1 ≠ NULL) or Matches(padrao_1)) and (...)
                { Atualiza_MT(acao);
                  disparou_1 = 1;
                  ultima_acao = tipo_da_acao;
                  funcao_regra_de_producao();
                  return;
                }
                .
                .
                .
                K - 1 regras
                .
                .
                .
                Acao_default();
  }

```

Figura 3.11 - Estrutura do conjunto de produções.

Destes pontos é possível observar que a estrutura de representação de conhecimento utilizada torna o processo de resolução bastante simples, deixando a sua eficiência presa somente à eficiência da função `Matches()`, durante o casamento de padrões, a qual será discutida a seguir.

3.4.2 Estratégia de resolução

Na seção anterior foi visto como se desenvolve o processo de resolução do SE quando se discutiu a estrutura da representação de conhecimento. Entretanto, ainda é necessário discutir-se como é feito o casamento de padrões, que conforme já apontado é o ponto-chave para a obtenção de um SE eficiente.

Revisando rapidamente o processo de resolução, agora sob a ótica das classes definidas na memória de trabalho, tem-se que:

1. Ocorre a chamada do SE.
2. Este inicializa as classes Temp, Lote e Máquina.
3. É ativada a função `regra_de_produção`.
4. É iniciado o processo de resolução pela função acima.
5. Implementa-se a solução proposta na classe Produção.

Do processo acima merecem destaque os passos 3 e 4, onde é possível melhorar o desempenho do sistema quanto ao esforço dispendido no processo de resolução.

No passo 3 é possível obter esta melhoria através de uma simples partição entre as regras componentes do conjunto de produções em dois sub-conjuntos, um referente ao sequenciamento preditivo e outro ao sequenciamento reativo. Assim, o espaço de busca em cada ativação do SE é reduzido a um sub-conjunto do espaço total de busca, reduzindo o tempo gasto durante a resolução.

Já o passo 4 é dependente da estrutura do conjunto de produções, ou mais explicitamente da estrutura da função `regra_de_produção`, e como já se sabe a eficiência desta função está ligada a da função `Matches()`.

Passando então a uma análise desta função, tem-se inicialmente que descrever a sua estrutura, o que é feito no algoritmo apresentado na figura 3.12.

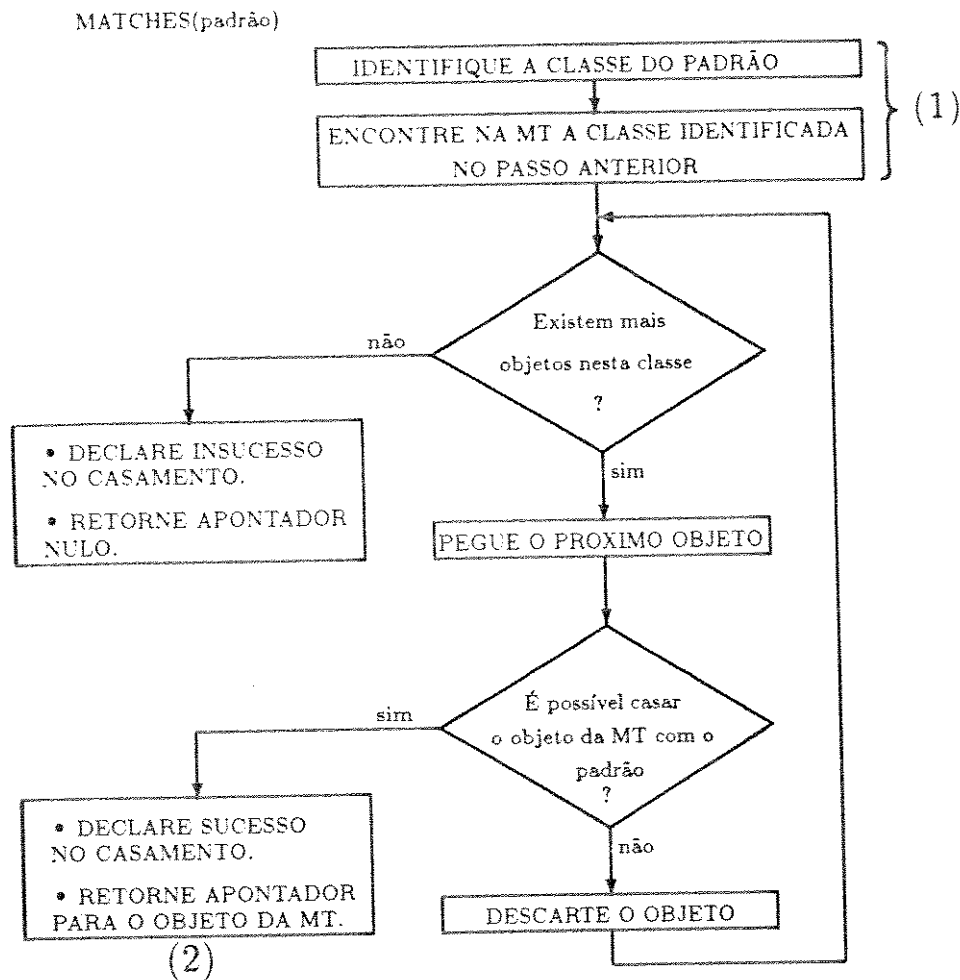


Figura 3.12 - Algoritmo da função Matches().

Para a análise do algoritmo da função Matches e de sua eficiência basta considerar os pontos (1) e (2) marcados na figura 3.12, os quais são a forma de iniciar e de concluir o processo de casamento de padrões. Todo o restante do algoritmo é simplesmente uma busca sequencial elementar, não exigindo a necessidade de estruturas complexas se for lembrado que nunca existirão muitos objetos na MT.

Quanto ao ponto (1), tem-se que o mesmo aproveita a estrutura de armazenamento de dados na MT para conseguir diminuir o espaço de busca para o casamento de padrões, isto é, só se faz o casamento de padrões aos objetos que possam efetivamente casar com o padrão de referência, o que torna o processo de resolução ainda mais rápido.

O passo (2) por sua vez, vai aliviar o esforço de busca nas próximas tentativas de disparo da regra, isto é, uma vez casado algum padrão, durante o passo (2) é criado um apontador para o objeto que casa este padrão e este apontador é passado para o conjunto de produções. Então, durante a próxima tentativa de disparo da regra não é

feito novamente o teste de casamento de padrões pois o apontador para o padrão já não é nulo, conforme pode ser visto na figura 3.11.

Com isto, o SE obtido é bastante rápido, como poderia ser previsto a partir de dados fornecidos na descrição do TRC, [19], onde o aumento de velocidade de sistemas especialistas seguindo a filosofia TRC, a qual é bastante similar a esta, em relação a sistemas especialistas equivalentes desenvolvidos em linguagens funcionais é da ordem de 1000 a 10.000 vezes. Portanto, conseguiu-se um SE capaz de atender às restrições de tempo-real do sequenciamento reativo e também capaz de não sobrecarregar o desempenho do SSH durante o sequenciamento preditivo.

Capítulo 4

Testes e resultados

A validação de qualquer proposta de abordagem para problemas de engenharia só pode ser obtida com a implementação de um modelo baseado na proposta e a aplicação de casos de teste ao modelo. Neste capítulo são descritos alguns casos de teste para o problema de sequenciamento de produção e os resultados obtidos com o modelo implementado a partir das definições apresentadas no capítulo 3.

Os casos de testes estão divididos em dois grupos, um onde o sistema de manufatura apresenta uma grande rigidez em relação a capacidade de reação a eventos não previstos e outro onde o sistema de manufatura embora convencional oferece algumas possibilidades de reação em relação a eventos não esperados.

Para o primeiro grupo é especificado um sistema convencional, apresentado na figura 4.1, onde aplicam-se dois casos de teste para verificar a velocidade do sistema em relação ao sequenciamento preditivo e também a factibilidade das soluções apresentadas.

Já para o segundo o grupo é especificado outro sistema convencional, apresentado na figura 4.2, onde aplicam-se outros dois casos de teste visando verificar a capacidade de adaptação do modelo e de forma implícita a sua capacidade de reação a eventualidades.

A descrição dos dois sistemas de manufatura é feita na seção 4.1, enquanto que nas seções subsequentes estão descritos os casos de teste para o primeiro grupo e para o segundo grupo (seções 4.2 e 4.3 respectivamente).

4.1 Descrição dos sistemas de manufatura utilizados

Para a validação da proposta em relação à sua capacidade de executar o sequenciamento de forma preditiva foram executados testes sobre o sistema de manufatura hipotético denominado sistema A, com três máquinas servindo quatro tipos de peças, como pode ser visto na figura 4-1.

Para verificar a capacidade de adaptação que esta abordagem apresenta foram executados alguns casos de teste sobre um outro sistema de manufatura hipotético, denominado sistema B, que é composto por quatro máquinas processando um total de cinco diferentes tipos de peças, como é apresentado na figura 4-2.

4.1.1 Descrição do sistema A

O sistema A é composto por três máquinas e atende a produção de quatro diferentes tipos de peças, como é visto na figura 4-1, e foi escolhido por se tratar de um exemplo bastante simples e de certa forma exigente, ao fazer com que uma das máquinas seja comum a todas as peças, criando-se então um gargalo de produção que implica em condições severas para atendimento dos prazos de entrega.

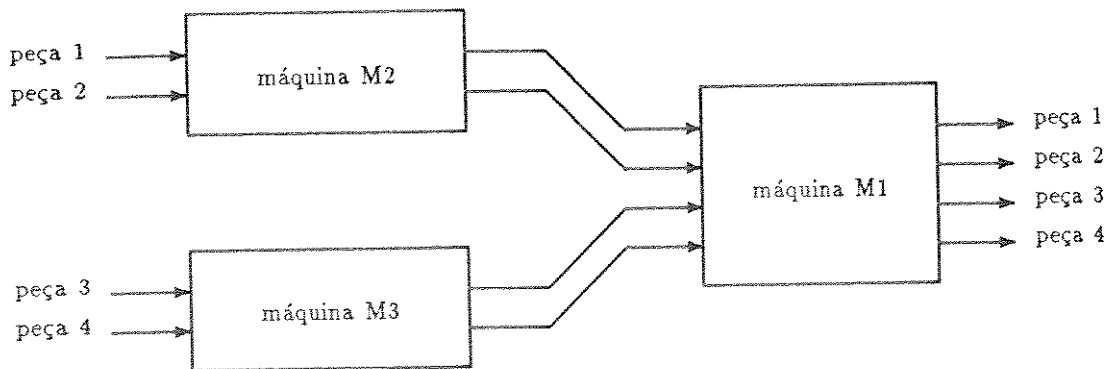


Figura 4-1. Configuração do sistema A.

As tabelas 4.1a, 4.1b e 4.1c apresentam os tempos de produção de cada uma das peças nas máquinas M1, M2 e M3 respectivamente, enquanto que as tabelas 4.2a, 4.2b e 4.2c apresnetam os tempos de preparação necessários para a produção de cada tipo de peça também respectivamente nas máquinas M1, M2 e M3.

PEÇA	TEMPO (min)
peça 1	3
peça 2	3
peça 3	6
peça 4	4

4.1a- Tempos de produção em M1
(por unidade)

PEÇA	TEMPO (min)
peça 1	4
peça 2	6

4.1b- Tempos de produção em M2
(por unidade)

PEÇA	TEMPO (min)
peça 3	6
peça 4	6

4.1c- Tempos de produção em M3
(por unidade)

Tabela 4.1- Tempos de produção nas máquinas M1, M2 e M3.

P A R A D E	peça 1	peça 2	peça 3	peça 4
peça 1	0	240	120	120
peça 2	120	0	240	120
peça 3	120	120	0	120
peça 4	240	240	120	0

4.2a- Tempos de preparação em M1 (em minutos)

P A R A D E	peça 1	peça 2
peça 1	0	480
peça 2	600	0

4.2b- Tempos de preparação em M2 (em minutos)

P A R A D E	peça 3	peça 4
peça 3	0	720
peça 4	480	0

4.2c- Tempos de preparação em M3 (em minutos)

Tabela 4.2- Tempos de preparação nas máquinas M1, M2 e M3.

4.1.2 Descrição do sistema B

O sistema B produz um total de cinco tipos de peças através de suas quatro máquinas, com a configuração mostrada na figura 4-2. A escolha deste sistema para a realização de testes para validação da capacidade de adaptação do modelo se deve a possibilidade de obtenção de paralelismo entre máquinas (M1 e M2) e a existência de um fluxo de material mais complexo que o sistema A, permitindo inclusive a inversão de roteiros de fabricação (peças 1 e 4), o que torna o problema mais complexo do que o caso anterior.

Com a definição de paralelismo entre as máquinas M1 e M2, existe de início uma maior flexibilidade no sistema B do que a existente no sistema A. Com isso, o número de alternativas a serem tratadas pelas regras de produção é maior do que no caso anterior. Abaixo estão citadas algumas das regras adotadas durante os testes realizados.

- Se M1 quebrar então use M2
- Se peça 1 estiver atrasada e M1 carregada então use M2
- Se peça 2 estiver atrasada e M1 carregada então use M2
- Se peça 5 estiver atrasada e M1 carregada então use M2
- Se peça 4 estiver atrasada e M1 carregada então use M2
- Se M4 estiver carregada e peça 4 estiver atrasada então inverta a rota

Como se pode observar, este sistema oferece algumas regras de uso no sequenciamento preditivo ao permitir que se façam alterações de rota (na peça 4) e que se aproveite o oferecimento de uma máquina extra ao sistema (a máquina M2). É a partir destas regras que se comprova de forma indireta a capacidade de reação do modelo em relação ao sequenciamento reativo, uma vez que com a aplicação de determinados casos de teste consegue-se verificar a utilização do conjunto de regras para a manutenção da factibilidade da solução apresentada.

As tabelas 4.3a, 4.3b, 4.3c e 4.3d apresentam os tempos de produção dos cinco tipos de peça nas máquinas M1, M2, M3 e M4 respectivamente, enquanto que as tabelas 4.4a, 4.4b, 4.4c e 4.4d apresentam os tempos de preparação entre os vários tipos de peças para as mesmas máquinas.

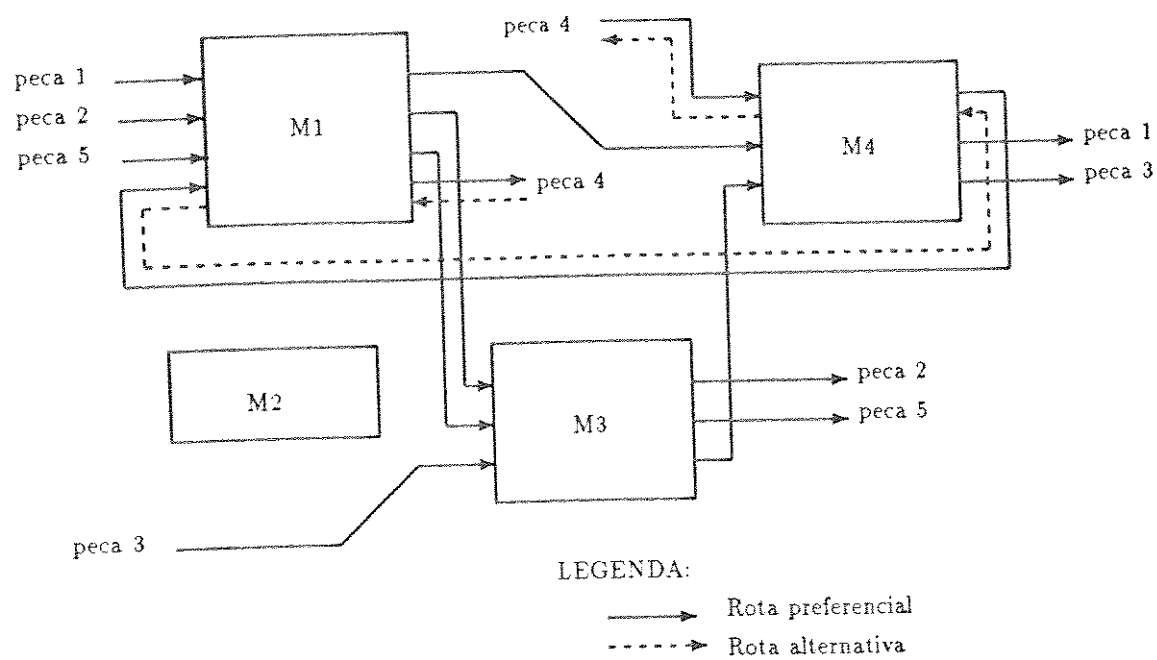


Figura 4-2. Configuração do sistema B.

PEÇA	TEMPO (min)
peça 1	4
peça 2	3
peça 4	4
peça 5	2

4.3a- Tempos de produção em M1
(por unidade)

PEÇA	TEMPO (min)
peça 1	4
peça 2	3
peça 4	4
peça 5	2

4.3b- Tempos de produção em M2
(por unidade)

PEÇA	TEMPO (min)
peça 2	4
peça 3	3
peça 5	4

4.3c- Tempos de produção em M3
(por unidade)

PEÇA	TEMPO (min)
peça 1	2
peça 3	2
peça 4	3

4.3d- Tempos de produção em M4
(por unidade)

Tabela 4.3- Tempos de produção nas máquinas M1, M2, M3 e M4.

P A R A D E	peca 1	peca 2	peca 4	peca 5
peca 1	0	40	60	30
peca 2	80	0	40	60
peca 4	50	20	0	40
peca 5	90	30	30	0

4.4a- Tempos de preparacao em M1

P A R A D E	peca 1	peca 2	peca 4	peca 5
peca 1	0	40	60	30
peca 2	80	0	40	60
peca 4	50	20	0	40
peca 5	90	30	30	0

4.4a- Tempos de preparacao em M1

P A R A D E	peca 2	peca 3	peca 5
peca 2	0	40	30
peca 3	60	0	30
peca 5	20	40	0

4.4a- Tempos de preparacao em M1

P A R A D E	peca 1	peca 3	peca 4
peca 1	0	50	30
peca 3	60	0	40
peca 4	50	40	0

4.4a- Tempos de preparacao em M1

Tabela 4.4- Tempos de preparação nas máquinas M1, M2, M3 e M4.

4.2 Testes de validação do sequenciamento preditivo

Para a validação do modelo na execução do sequenciamento preditivo foram executados dois casos de teste sobre o sistema A, indicados na tabela 4.5, sendo que estes testes foram escolhidos por representarem situações diferentes de produção, uma onde o sistema trabalha com folga em relação aos prazos de entrega e outra, onde os prazos de entrega estão bastante próximos de uma situação de infactibilidade para qualquer solução, mesmo com o turno de trabalho de 20 horas utilizado para os dois casos.

Os resultados para cada um destes casos estão listados nas tabelas 4.6 e 4.7, respectivamente para os casos de teste 1 e 2. Para cada um dos testes são apresentados os resultados segundo a ocupação das máquinas e segundo as operações em cada um dos pedidos de produção, respectivamente nas tabelas 4.6a, 4.7a e 4.6b, 4.7b.

Para os dois testes foi considerada a seguinte montagem inicial de cada máquina:

Máquina M1- Peça 4
Máquina M2- Peça 1
Máquina M3- Peça 4

LOTES		TESTE 1	TESTE 2
1	peça	peça 1	peça 1
	quantidade	100	100
	prazo	1 dia	2 dias
2	peça	peça 3	peça 2
	quantidade	100	220
	prazo	2 dias	3 dias
3	peça	peça 4	peça 4
	quantidade	100	220
	prazo	2 dias	2 dias
4	peça	_____	peça 4
	quantidade	_____	220
	prazo	_____	3 dias

Tabela 4.5- Conjunto de testes aplicados ao sistema A.

MÁQUINA 1

OPERAÇÃO	INÍCIO	TÉRMINO
setup	0	240
lote 1 (peça 1)	240	540
folga	540	966
setup	966	1086
lote 2 (peça 3)	1086	1686
setup	1686	1806
lote 3 (peça 4)	1806	2206

MÁQUINA 2

OPERAÇÃO	INÍCIO	TÉRMINO
lote 1 (peça 1)	0	400

MÁQUINA 3

OPERAÇÃO	INÍCIO	TÉRMINO
lote 3 (peça 4)	0	600
setup	600	1280
lote 2 (peça 3)	1280	1680

Tabela 4.6a- Resultados obtidos para caso de teste 1.
Listagem por máquinas (tempos em minutos).

LOTE 1

MÁQUINA	INÍCIO
M2	0
M1	240
entrega	540

LOTE 2

MÁQUINA	INÍCIO
M3	1080
M1	1088
entrega	1686

LOTE 3

MÁQUINA	INÍCIO
M3	0
M1	1806
entrega	2206

Tabela 4.6b- Resultados obtidos para caso de teste 1.
Listagem por peças (tempos em minutos).

MÁQUINA 1

OPERAÇÃO	INÍCIO	TÉRMINO
folga	0	444
lote 3 (peça 4)	444	1324
folga	1324	1764
lote 4 (peça 4)	1764	2644
setup	2644	2884
lote 1 (peça 1)	2884	3184
setup	3184	3424
lote 2 (peça 2)	3424	4084

MÁQUINA 2

OPERAÇÃO	INÍCIO	TÉRMINO
lote 1 (peça 1)	0	300
folga	300	663
setup	663	1143
lote 2 (peça 2)	1143	2443

MÁQUINA 3

OPERAÇÃO	INÍCIO	TÉRMINO
lote 3 (peça 4)	0	1320
lote 4 (peça 4)	1320	2640

Tabela 4.7a- Resultados obtidos para caso de teste 2.
Listagem por máquinas (tempos em minutos).

LOTE 1

MÁQUINA	INÍCIO
M2	0
M1	2884
entrega	3184

LOTE 2

MÁQUINA	INÍCIO
M2	1143
M1	3424
entrega	4084

LOTE 3

MÁQUINA	INÍCIO
M3	0
M1	444
entrega	1324

LOTE 4

MÁQUINA	INÍCIO
M3	1320
M1	1764
entrega	2644

Tabela 4.7b- Resultados obtidos para caso de teste 2.
Listagem por peças (tempos em minutos).

4.3 Testes de validação da capacidade de adaptação

Para verificar a capacidade de adaptação do modelo híbrido em relação ao oferecimento de recursos adicionais pelo sistema para uso em situações críticas de sequenciamento, foram aplicados dois casos de teste ao sistema B, que como já foi indicado oferece certas condições de adaptação ao estado do sistema. Os casos de teste aplicados estão apresentados na tabela 4.8, onde o turno de trabalho considerado foi de 16 horas.

Justifica-se a escolha pelos casos apresentados através das diferentes situações que os mesmos representam. Primeiro tem-se um caso onde a apresentação de quatro pedidos de fabricação pela mesma peça fazem com que seja necessária a utilização de um caminho alternativo representado pela máquina M2. O segundo caso faz com que se tente factibilizar a solução através da utilização da inversão de rota admitida na fabricação da peça P4.

Os resultados obtidos para cada um dos testes está apresentado nas tabelas 4.9 e 4.10, onde as tabelas 4.9a e 4.10a representam respectivamente os resultados obtidos para o primeiro e o segundo caso classificados por máquina, enquanto que as tabelas 4.9b e 4.10b apresentam os mesmos resultados classificados por pedido.

Para os dois conjuntos de pedidos foi considerada como montagem inicial a seguinte configuração:

Máquina M1 -	Peça 2
Máquina M2 -	Peça 1
Máquina M3 -	Peça 3
Máquina M4 -	Peça 3

LOTES		TESTE 1	TESTE 2
1	peça	peça1	peça4
	quantidade	200	200
	prazo	2 dias	2 dias
2	peça	peça1	peça4
	quantidade	300	300
	prazo	2 dias	2 dias
3	peça	peça1	peça4
	quantidade	100	100
	prazo	2 dias	2 dias
4	peça	peça1	peça4
	quantidade	200	200
	prazo	2 dias	2 dias

Tabela 4.8 - Conjunto de testes aplicados ao sistema B.

MÁQUINA 1

OPERAÇÃO	INÍCIO	TÉRMINO
setup	0	80
lote 2 (peça 1)	80	1280
lote 4 (peça 1)	1280	2080

MÁQUINA 2

OPERAÇÃO	INÍCIO	TÉRMINO
lote 3 (peça 1)	0	400
lote 1 (peça 1)	400	1200

MÁQUINA 4

OPERAÇÃO	INÍCIO	TÉRMINO
folga	0	142
setup	142	202
lote 3 (peça 1)	202	402
folga	402	602
lote 2 (peça 1)	602	1202
lote 1 (peça 1)	1202	1602
folga	1602	1682
lote 4 (peça 1)	1682	2082

Tabela 4.9a- Resultados obtidos para caso de teste 1.
Listagem por máquinas (tempos em minutos).

LOTE 1

MÁQUINA	INÍCIO
M2	400
M4	1202
entrega	1602

LOTE 2

MÁQUINA	INÍCIO
M1	80
M4	602
entrega	1202

LOTE 3

MÁQUINA	INÍCIO
M2	0
M4	202
entrega	402

LOTE 4

MÁQUINA	INÍCIO
M1	1280
M4	1682
entrega	2082

ATRASSO DE 162 min (8%)

Tabela 4.9b- Resultados obtidos para caso de teste 1.
Listagem por peças (tempos em minutos).

MÁQUINA 1

OPERAÇÃO	INÍCIO	TÉRMINO
setup	0	43
lote 2 (peça 4)	43	1243
folga	1243	1543
lote 3 (peça 4)	1543	1943

MÁQUINA 2

OPERAÇÃO	INÍCIO	TÉRMINO
setup	0	60
lote 1 (peça 4)	60	860
lote 4 (peça 4)	860	1743

MÁQUINA 4

OPERAÇÃO	INÍCIO	TÉRMINO
setup	0	40
lote 2 (peça 4)	40	940
lote 4 (peça 4)	940	1540
lote 3 (peça 4)	1540	1840
lote 1 (peça 4)	1840	2440

Tabela 4.10a- Resultados obtidos para caso de teste 2.
Listagem por máquinas (tempos em minutos).

LOTE 1

MÁQUINA	INÍCIO
M2	60
M4	1840
entrega	2440

ATRASO DE 520 min (26%)

LOTE 2

MÁQUINA	INÍCIO
M4	40
M1	43
entrega	1243

LOTE 3

MÁQUINA	INÍCIO
M4	1540
M1	1543
entrega	1943

ATRASO DE 23 min (1%)

LOTE 4

MÁQUINA	INÍCIO
M4	940
M2	943
entrega	1743

Tabela 4.10b- Resultados obtidos para caso de teste 2.
Listagem por peças (tempos em minutos).

Capítulo 5

Conclusões

Dos testes realizados sobre o modelo e apresentados durante o capítulo 4, podem ser tiradas algumas conclusões a respeito da validade da abordagem proposta. Neste capítulo serão apresentadas estas conclusões e também alguns dos caminhos para futuras pesquisas na área relacionada ao problema de sequenciamento de produção, e mais em específico na aplicação de sistemas especialistas neste campo. Na seção 5.1 são discutidos os resultados obtidos nos testes do capítulo 4, enquanto que a seção 5.2 contém as perspectivas para os novos avanços a serem almejados.

5.1 Análise dos resultados

Os resultados obtidos nos testes para a validação da proposta de abordagem híbrida ao problema de sequenciamento de produção foram bastante promissoras, uma vez que dos objetivos propostos neste trabalho apenas não se atingiu a contento o fornecimento de uma solução factível em todos os testes realizados.

A tabela 5.1 apresenta de forma resumida os resultados obtidos nos testes quanto ao atendimento dos prazos de entrega estipulados. Dela observa-se que o desempenho do modelo ainda deve ser melhorado em aplicações onde o sistema de manufatura apresente uma forte rigidez de processos, como é o sistema A. Já quando existe uma certa flexibilidade dentro do sistema de manufatura (o sistema B) o desempenho é excelente, uma vez que nos dois casos de teste apresentados não existe solução factível e as soluções fornecidas representam o máximo de esforço na busca por soluções alternativas.

SISTEMA	TESTE número	número de tarefas	tarefas atrasadas	máximo atraso (%)	atraso médio (%)
A	1	3	0	0	0
	2	4	2	32	11.5
B	1	4	1	8	2
	2	4	2	26	7

Quanto ao objetivo de obter flexibilidade, tem-se que os resultados apresentados pelo SE durante o próprio sequenciamento preditivo já indicam que o mesmo pode facilmente se adequar as condições do ambiente.

Não foram executados explicitamente testes de reação a eventos porquê o mecanismo de execução do sequenciamento reativo iria se utilizar exatamente dos mesmos recursos aproveitados pelo sequenciamento preditivo para a manutenção da factibilidade dos prazos de entrega, além do que isto só seria possível de ser executado para o sistema B. Sendo assim, basta examinar-se a atuação do sistema durante o sequenciamento preditivo para que se verifique a capacidade de adaptação do mesmo.

Por fim, a velocidade de resposta que o sistema apresentou é bastante satisfatória, sendo que em nenhum dos casos de teste apresentados a resposta veio em mais do que 1 segundo, utilizando-se de um microcomputador tipo IBM PC-AT com co-processador. Dentro deste tempo de resposta ainda se incluem os tempos gastos com acesso a arquivos de dados e de saída de resultados, o que representa um resultado excelente, uma vez que a implementação da proposta utilizada nos testes não foi otimizada em termos de redução de tempos de processamento.

Portanto, podem ser tiradas as seguintes conclusões sobre a proposta de abordagem híbrida descrita neste trabalho:

- As técnicas de representação de conhecimento e os métodos de busca e reconhecimento de padrões utilizados apresentaram uma excelente performance, tanto em velocidade quanto em flexibilidade, como os testes sobre o sistema B indicam através das mudanças de roteiro com o objetivo de atender aos prazos de entrega e os tempos de computação obtidos indicam a velocidade de resolução do sistema.
- A heurística adotada deve ser melhorada para que o desempenho em sistemas rígidos possa ser considerado satisfatório, pois na ausência de para uso pelo SE o atendimento aos prazos de entrega tornou-se uma atividade difícil sob condições críticas na relação prazo de entrega-tempo mínimo de produção.
- Em termos gerais o desempenho da abordagem se mostrou atraente para o uso dentro do ambiente fabril, uma vez que foram obtidas soluções com um algoritmo de complexidade polinomial e atingiu-se uma grande flexibilidade frente ao contexto de manufatura, o que o habilita ao atendimento de uma faixa bastante ampla de sistemas de manufatura.

5.2 Direções de pesquisa

Tem-se notado que recentemente existe uma quantidade cada vez maior de trabalhos aplicando sistemas especialistas ao problema de controle de produção, especialmente com o uso de sistemas baseados em conhecimento, criando portanto uma nova e bastante poderosa massa crítica operando sobre um problema que tem se tornado cada vez mais crucial dentro de uma sociedade consumista e exigente, que é o problema de como conseguir manter um alto nível de produção independentemente do sistema produtivo da empresa.

Entre os próximos possíveis passos a serem dados dentro do problema de sequenciamento de produção em sistemas de manufatura podem ser citados:

- A aplicação de sistemas de computação distribuída.
- Uso de sistemas especialistas velozes.
- Aplicação mais intensiva de técnicas Just-in-Time.

Sobre estes indicativos dos rumos do problema de sequenciamento é possível afirmar que o primeiro deles está justificado pelo uso cada vez mais intenso de redes de computadores em ambientes industriais, o que implica de início numa disponibilidade maior de recursos computacionais dentro da fábrica, próximos das máquinas, quando não dentro delas. Este conjunto vai permitir que se automatize em larga escala todo o processo de troca de informações dentro da empresa, e consequentemente a troca de informações que dizem respeito ao andamento da produção, que é o que interessa ao problema de sequenciamento.

Um outro ponto que se destaca na aplicação de sistemas de computação distribuída é o fato de que todos os algoritmos analíticos, que até o momento são quase que apenas de interesse teórico, podem passar a serem vistos com melhores olhos, uma vez que o maior aporte na capacidade computacional do sistema vai permitir que aqueles cálculos que eram considerados trabalhosos possam agora tornarem-se viáveis.

Quanto ao uso de sistemas especialistas mais velozes, existe uma grande tendência em usar-se linguagens orientadas a objeto, as quais possuem um poderio de representação de conhecimento superior ao das linguagens procedimentais. Explicitamente sobre o problema velocidade pode-se dizer que já partindo de implementações como TRC, existe uma forte tendência em manter nos sistemas especialistas velocidades compatíveis com as envolvidas nas decisões no mundo real, pois a sociedade moderna não admite que se perca tempo em atividades redundantes. Além disto, existe um grande interesse na obtenção de sistemas especialistas que operem dentro de ambientes de computação distribuída ou paralela, o que permite uma maior agilização do processo de resolução.

A aplicação de Just-in-Time nos novos sistemas de manufatura é apontada aqui como uma tendência, muito embora deva ser encarado mais como uma necessidade para se obter uma maior produtividade de um sistema. O uso de Just-in-Time em larga escala leva também a necessidade de um sistema de informações mais complexo e portanto a exigência de ter-se redes de computadores dentro do ambiente industrial, facilitando desta forma a implementação de sistemas distribuídos.

Portanto, pode-se observar que para qualquer direção que se pretenda seguir dentro do problema de controle de produção existe uma interação cada vez mais forte com o computador, o que vem ao encontro de um dos objetivos iniciais deste trabalho, que é permitir que um sistema implementado com base nesta proposta possa ser utilizado e até alterado por um usuário sem conhecimentos de computação, que terá que utilizar a máquina para poder executar o seu trabalho de forma eficiente.

Apêndice A

Aquisição de conhecimento

Uma das características essenciais em um sistema especialista é a de que o mesmo deve conseguir modificar a sua base de conhecimento sem a alteração do código de seu programa fonte por um agente externo, o programador. Isto é conhecido como a capacidade de aprendizagem do sistema especialista. O sistema apresentado durante o Capítulo 3 atende a esta condição através do módulo gerador de regras e de um intercâmbio de informações com o usuário quando o conhecimento previamente existente não for suficiente para a resolução de um problema específico. Então, existem dois momentos em que ocorre a aquisição de conhecimento pelo sistema, primeiro durante a execução de um sequenciamento qualquer o sistema aprende novas regras a partir de uma solicitação feita por ele mesmo; depois, a partir de uma solicitação feita pelo usuário, ao considerar que existe a necessidade de introduzir alguma nova regra no conjunto de produções utilizado pelo sistema especialista, sendo que isto é feito fora de qualquer atividade de sequenciamento, ou com o sistema em repouso.

A.1 Aquisição de conhecimento em tempo de execução

Durante o processo de resolução de um sequenciamento, reativo ou preditivo, o SE pode chegar a conclusão de que nenhuma solução conhecida é aplicável ao problema apresentado. Neste ponto, a única forma de escapar deste estado de imobilidade é através do uso de um conhecimento que, por alguma razão desconhecida (ou até conhecida e premeditadamente evitada), ainda não fizesse parte de sua base de conhecimento. Este processo de aprendizagem dá-se com a convocação de um especialista humano, que deverá tomar conhecimento do problema e indicar uma saída para o mesmo.

A solução apresentada pelo especialista humano (apenas especialista daqui em diante) ao SE pode obedecer duas condições distintas. A primeira delas é a de que este novo conhecimento já deveria fazer parte da base de conhecimento do SE, devendo portanto ser memorizada para sessões futuras de sequenciamento. A outra condição é de que a solução é apenas um paliativo, o qual não deve ser memorizado pelo SE, ou melhor, só pode ser utilizado enquanto durar a sessão onde ocorreu o problema em questão.

Formalmente a existência de conhecimento que não deve ser memorizado, aprendido, pode ser interpretada como sendo peças de conhecimento que contradizem outras peças que já fazem parte da base de conhecimento. O especialista deve considerar qual destas peças é a forma usual de conhecimento, isto é, a mais natural entre elas. A partir disto o conhecimento usual é colocado como regra permanente (ou memorizada) enquanto que o outro é assumido como sendo uma exceção que não deve estar na base de conhecimento, ou seja, deve ser premeditadamente esquecido, exceto no surgimento de situações emergenciais, as quais devem estar sob o controle do especialista e não do sistema.

A implementação do processo de aquisição de conhecimento em tempo de execução dá-se segundo o algoritmo da figura A-1, tanto para o caso de conhecimento a ser memorizado quanto para conhecimento a ser esquecido. No algoritmo pode-se observar alguns pontos cruciais para o desenvolvimento do processo de aprendizagem, que são os passos 2, 5 e 8, e que devem ter aqui uma melhor interpretação, à luz da estrutura do próprio sistema descrito durante o capítulo 3.

Quanto ao passo 2, o que se pode comentar é que o SE fará nele a apresentação formal do problema ao especialista. Isto será feito através da classe **temp** da memória de trabalho, a qual é inicializada a cada ativação do sistema especialista, e contém toda a informação necessária para que o especialista compreenda o problema atual, ou seja, a razão pela qual se iniciou um processo de busca por uma solução pelo SE. Este passo é na realidade o mais simples dos três indicados anteriormente, não trazendo nenhuma complicação ao nível de implementação do sistema.

O passo 8 também é bastante simples quanto à implementação, bastando que se faça uma cópia de todo o processo de conversação entre o especialista e o SE para a classe que tenha sido indicada para o armazenamento deste diálogo. O local onde será realizada a cópia acima é definido a partir do desejo do especialista em tornar a regra (resposta) encontrada permanente ou não.

1. O SE não encontra solução em sua base de conhecimento que seja aplicável ao problema. Se o uso de "backtracking" levar ao surgimento de ciclos chame o especialista.
2. Apresente o problema ao especialista, inquirindo-o sobre o mesmo.
3. Receba a resposta do especialista e analise-a.
4. A resposta é uma solução para o problema?
 Sim - Vá para 7.
 Não - continue.
5. Interprete o questionamento do especialista e responda ao mesmo, inquirindo-o sobre uma solução.
6. Volte ao passo 3.
7. Pergunte ao especialista sobre a perenidade da solução apresentada.
8. Segundo o especialista a regra deve ser permanente?
 Sim - Memorize-a no conjunto de produções.
 Não - Apenas anote-a para uso durante esta sessão.

Figura A-1. Processo de aprendizagem em tempo de execução

Para o caso em que a regra deverá se tornar permanente, o que se faz é uma cópia do que estiver armazenado em **temp** para a classe **LTR**, a qual já foi descrita no capítulo 3. Para o caso onde não se deseja ter permanentemente a regra em questão, o que se faz é copiar-se o conteúdo de **temp** na classe **STR**, também descrita no capítulo 3. Ao final da sessão onde se deu o problema pelo qual tornou-se necessário o auxílio do especialista procura-se na classe **LTR** por alguma regra que tenha sido definida como permanente. Encontrando alguma regra nesta classe ativa-se o processo de transcrição da regra para código fonte em C, o qual é adicionado ao conjunto de produções referente ao problema em questão, reativo ou preditivo.

O maior problema para a aquisição de conhecimento em tempo de execução localiza-se nos passos 4 e 5, que é efetivamente onde se dará todo o processo de intercâmbio de informações entre o especialista e o SE. No passo 4 é que se faz a interpretação da resposta do especialista, e portanto onde se identifica se o mesmo apresentou uma solução ou uma dúvida quanto ao estado do sistema. No segundo caso, deve-se processar a dúvida e respondê-la para que se possa continuar o diálogo. o que é uma atividade bastante complexa para ser desconsiderada. Entretanto, mesmo quando da apresentação de uma solução o trabalho não é simples, sendo necessário que se faça uma validação da resposta dada pelo especialista, uma vez que a mesma pode ser redundante, isto é, pode já ter sido tentada sem sucesso durante o processo de resolução anterior.

De qualquer forma, uma vez concluído o processo de conversação entre o especialista e o SE, o processo de aquisição de conhecimento só se dá de forma fixa ao final da sessão, como já mencionou-se anteriormente. Quando se passa o conhecimento armazenado temporariamente na classe LTR para código C, entretanto, pode-se considerar que existe conhecimento adquirido de forma fraca, ou tênue, durante toda a duração da sessão, e que este conhecimento desvanecerá se tiver sido considerado provisório ao final da mesma. Isto então caracteriza o processo de aprendizagem necessário para a definição de um sistema especialista, mesmo que ao final da sessão o mesmo não se recorde de nada do que ocorreu durante a mesma.

A.2 Aquisição de conhecimento em repouso

Como foi apontado durante a descrição dos objetivos deste trabalho, uma das metas é a possibilidade de aplicação do sistema de sequenciamento a uma ampla faixa de empresas, independentemente de sua missão e de suas estratégias de controle de produção ou planejamento de processos. Para que esta meta possa ser atingida, é necessário que se torne o sistema o mais flexível possível, permitindo que o próprio usuário, a empresa, possa modificá-lo tornando-o adequado para as suas condições. O primeiro item a ser considerado nesta adaptação de uso é quanto aos arquivos tecnológicos, ou seja, quanto aos arquivos referentes aos tipos de peças a serem produzidas e às máquinas que as irão produzir, enquanto que o segundo item é a alteração do conjunto de regras que serão tratadas pelo SE durante o processo de sequenciamento.

O tratamento dos arquivos tecnológicos é simples, consistindo apenas em inicializar-se um banco de dados referente ao ambiente da empresa, o que pode ser feito em tempo de execução, através de um processo de perguntas e respostas, onde o sistema guia o usuário na criação dos arquivos desejados. Outra forma de se obter estes arquivos é fazendo-se a sua criação fora do sistema, atendendo as restrições de formato do mesmo, e após isto apenas indica-se ao mesmo quais são os arquivos de dados que o mesmo deverá tomar como base de dados. De qualquer forma, não existe aqui nenhuma aquisição de conhecimento na forma em que se define a aprendizagem para sistemas especialistas, consistindo apenas em tradicionais processos de alteração de bancos de dados.

Já o segundo ponto para a obtenção da flexibilidade desejada é um processo de aquisição de conhecimento completo, onde se faz realmente a adaptação do sistema às condições particulares do ambiente de cada usuário, isto é, as regras introduzidas por cada usuário é que definirão realmente as disponibilidades e impossibilidades que o seu ambiente oferece, fazendo com que o sistema se adeque a tal ambiente. Portanto, apenas a alteração do conjunto de regras será tratada como forma de aquisição de conhecimento em repouso e será consequentemente o tema do restante desta seção. A figura A-2 apresenta os principais passos deste processo de aquisição de conhecimento.

No primeiro passo é que ocorre a introdução da regra do ponto de vista do usuário, pois nos passos seguintes todas as operações são invisíveis ao mesmo, exceto para casos onde ocorram erros na análise léxico-sintática. A gramática definida para a regra é um dialeto do português voltado para o problema de controle de produção, onde a frase de entrada deve assumir, por conveniência de implementação, a forma indicada abaixo:

Se condição₁ [e condição₂ [...]] então ação desejada.

onde os termos em **negrito** são palavras-chave para o entendimento semântico da regra, sendo portanto obrigatórios, enquanto que os termos contidos entre colchetes são opcionais ao usuário, sendo utilizados quando a regra contiver mais do que um único padrão a ser verificado para o disparo da ação a ela associada, quando o usuário deve também obedecer às exigências dos termos em **negrito**, que são os conectivos que indicam as conjunções e disjunções entre os padrões.

1. O usuário apresenta a regra ao sistema, em uma linguagem com gramática pré-definida bastante próxima da linguagem natural.
2. O sistema faz uma análise léxico-sintática da regra apresentada a partir de um dicionário de palavras e de uma carta sintática resumida, gerando transformações na frase de entrada.
3. O sistema faz a análise semântica da regra transformada pelo passo 2, utilizando-se de informações fornecidas pelo dicionário de palavras, gerando uma transformação na forma de armazenamento da regra para a forma aceita pela memória de trabalho do SE.
4. É concluído o processo de aprendizagem com a transcrição da frase apresentada pelo analisador semântico para código C, que é a forma final de armazenamento da regra e também a forma entendida pelo SE.

Figura A-2 Processo de aquisição de conhecimento em repouso.

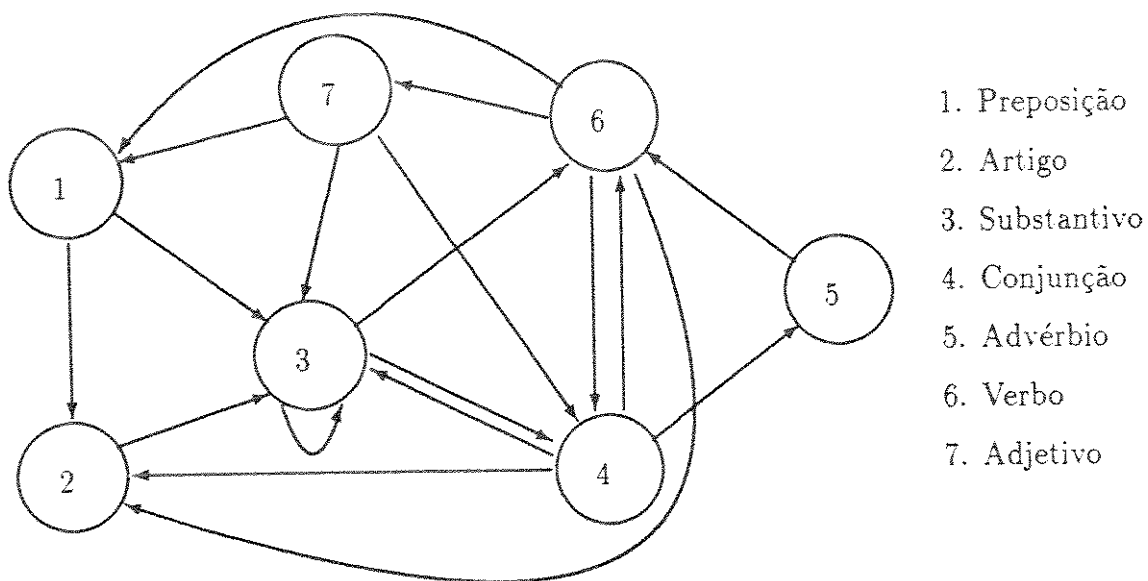


Figura A-3. Gramática definida para a análise sintática.

Todo o restante da frase de entrada é assumido como frases que isoladamente possuem sentido dentro do contexto de controle de produção, e mais especificamente dentro do contexto do ambiente do usuário, como nomes de máquinas e peças de seu sistema produtivo. A gramática indicada acima é um subconjunto da gramática da língua portuguesa, para o qual se define o automato de estados finitos apresentado na figura A-3, sendo desnecessário fazer um detalhamento do automato para que se possa compreender a gramática utilizada, o que seria indicado apenas para um manual de usuário do sistema e não em sua descrição funcional.

A análise léxico-sintática

Durante o segundo passo é realizada efetivamente a análise léxico-sintática da frase de entrada, sendo que neste passo é que ainda pode ocorrer a interação entre o usuário e o sistema, para os casos onde forem detectadas irregularidades quanto à correção da frase em termos léxicos ou sintáticos.

Inicialmente, realiza-se a análise léxica sobre a frase, onde é verificada a existência de cada palavra da frase no dicionário de palavras e no caso de sucesso um mapeamento entre a palavra e a classe gramatical para a qual está definida. Para o caso da palavra ainda não ser conhecida, não pertencer ao dicionário, questiona-se o usuário a respeito de sua correção ortográfica, e em caso de se tratar de um erro de digitação faz-se o reproprocessamento da palavra ou, em caso de ser uma palavra nova, faz-se a atualização do dicionário além do reproprocessamento da palavra.

Concorrentemente com a análise léxica realiza-se a sintática, onde as palavras aceitas pelo analisador léxico são aplicadas ao automato da figura A-3, devendo gerar uma sequência de eventos aceita por este. Caso a sequência não obedeça as regras gramaticais impostas pelo dialeto utilizado, avisa-se ao usuário, inclusive com informações sobre o que está errado e o que seria aceito como correto a partir da última palavra aceita, pedindo ao mesmo que realize as alterações na frase para que esta possa ser entendida como correta e reproprocessada integralmente após a correção.

Do exposto acima percebe-se que este passo, embora fundamental, não exibe dificuldades para implementação pois existe uma extensa literatura sobre analisadores léxico-sintáticos aplicados sobre dialetos restritos. Neste caso específico, o detalhe a ser observado é a construção do dicionário de palavras, o qual possibilita a realização de dois diferentes mapeamentos sem os quais ficariam mais difíceis as análises sintática e semântica. O primeiro deles é entre a palavra aceita pelo analisador léxico e a sua classe gramatical, que será utilizada durante a análise sintática; o segundo mapeamento é feito entre a palavra aceita pelo analisador sintático e o seu significado semântico. A forma como ocorrem estes mapeamentos é também simples, consistindo apenas na leitura destes significados no dicionário de palavras, quando das análises léxica e sintática, para o mapeamento dos signos sintático e semântico respectivamente.

A análise semântica

O passo mais complexo dentro do processo de aquisição de conhecimento em repouso é a análise semântica, onde deverá ocorrer efetivamente a explosão da frase de entrada em subconjuntos que isoladamente tenham sentido dentro de uma representação de conhecimento por regras de produção, que é a forma adotada para tratamento pelo SE. Estes subconjuntos são condições de ativação de uma ação a ser disparada e a própria ação disparada quando da existência das condições.

Esta explosão é feita a partir da identificação pelo analisador semântico das palavras-chave contidas na frase de entrada, as quais são tratadas como delimitadores dos subconjuntos mencionados acima. A construção destes subconjuntos é feita de modo que os mesmos tenham a mesma estrutura dos objetos contidos na memória de trabalho, para que se possa realizar o mesmo tratamento de transcrição de regras para código C, tanto para a aquisição de conhecimento em tempo de execução quanto para a aquisição em repouso, fazendo com que a única diferença entre as duas situações seja o fato de que as regras introduzidas em tempo de execução podem ser utilizadas imediatamente e podem também ter validade temporária.

O processo de análise semântica dá-se através da identificação dos substantivos e locuções adverbiais de cada um dos subconjuntos gerados, o que permite a identificação dos objetos contidos em cada subconjunto, bem como os atributos e valores de atributos relacionados a cada objeto. No caso do subconjunto ser um padrão, ainda ocorre a identificação do tipo de comparação a ser feita quando do processo de casamento de padrões. A identificação dos significados sintático e semântico de cada palavra é feito pelo mapeamento fornecido pelo dicionário de palavras, sendo portanto relativamente simples. A grande dificuldade na análise semântica está na classificação dos delimitadores, isto é, na especificação do contexto em que se interpretam os elementos de conjunção e disjunção na regra.

Este problema é resolvido limitando-se o grau de liberdade na especificação das regras, ou seja, não se permite uma grande variedade de combinações de conectivos para a geração das regras, além de se impor a exigência que o produto final de qualquer regra inserida pelo usuário não poderá ter conectivos de disjunção. Isto evita que se gerem duas ou mais regras com mesma ação disparada se existirem tais conectivos na frase inserida no sistema, como pode ser visto a seguir:

Se **A** ou **B** então **C**

É equivalente a:

Se **A** então **C**

e

Se **B** então **C**

Mesmo assim existe ainda o problema da definição de como estão combinados realmente os conectivos, pois

$A \text{ e } (B \text{ ou } C) \text{ é diferente de } (A \text{ e } B) \text{ ou } C,$

o que obriga que se faça a definição exata da regra para evitar possíveis enganos no instante da tradução para código C.

Este último problema é resolvido fazendo-se um relacionamento entre os padrões através de seu significado semântico, pois não são aceitáveis regras do tipo "*Se uma máquina x está quebrada ou uma peça y está atrasada então produza y*", o que implica em uma diminuição do grau de liberdade do usuário para tornar mais simples o processo de interpretação semântica e consequentemente o processo de aquisição de conhecimento.

Com as restrições impostas ao usuário é obtida uma redução no grau de complexidade do analisador que o torna relativamente simples, pois se pode tratá-lo como codificador entre os mapeamentos oferecidos pelo analisador léxico-sintático e o dicionário de palavras para objetos da memória de trabalho, os quais são a matéria-prima para o último passo dos dois métodos de aquisição de conhecimento que o sistema oferece, ou seja, o passo onde efetivamente ocorre a inserção da regra no conjunto de produções, através da transcrição do conteúdo da saída do analisador semântico para código C, na forma descrita no capítulo 3 (figura 3-11).

A transcrição regra-código C

Finalmente, no quarto e último passo do processo de aquisição de conhecimento em repouso, assim como em tempo de execução, dá-se efetivamente a geração do código C equivalente a regra inserida. A entrada para a transcrição é um conjunto de objetos equivalentes aos da memória de trabalho, ou da própria memória de trabalho quando da aquisição em tempo de execução, que são interpretados de forma a gerar uma sequência de comandos da linguagem C conforme a figura 3-11.

Todo este processo de transcrição ocorre de uma maneira bastante simples em termos computacionais, consistindo em simples mapeamentos entre os objetos gerados pelo analisador semântico e uma sequência de caracteres que representa estes objetos mais os comandos da linguagem C. Tudo isto é feito de forma que o único obstáculo criado é o da definição de variáveis que representam os objetos de cada regra, além de variáveis para conter os valores de disparo da regra e dos contadores de cada classe de objeto, o que é uma tarefa difícil pensando-se na característica dinâmica do processo de aprendizagem. Isto é contornado fazendo com que o próprio cabeçalho do arquivo que contém as regras de produção seja alterado a cada regra inserida, permitindo portanto que as variáveis sejam redefinidas sempre que assim for desejável.

Finalmente, é necessário realizar fisicamente a introdução da nova regra, o que é feito através da atualização do arquivo de regras através de funções de escrita e leitura em arquivos, o que também é uma operação simples, implicando a obtenção de um processo de aquisição de conhecimento simples e de certa forma eficiente, quando analisado em conjunto com a relativa rigidez de linguagens procedimentais.

Bibliografia

- [1] Agostinho, O.L. - notas de aula do curso Tópicos em Tecnologia Mecânica, 1988.
- [2] Ahluwalia, R.S. e Ji, P. - *A distributed approach to job scheduling*, Computers in Industrial Engineering, v.20, n.1, 1991.
- [3] Baker, K.R. e Schrage, L.E. - *Finding an optimal sequence by dynamic programming: an extension to precedence-related tasks*, Operations Research, v.26, n.1, 1978.
- [4] Bruno, G. , Elia, A. e Laface, P. - *A rule-based system to schedule production*, Computer, july 1986.
- [5] Canzi, U. , Guida, G. , Maifredi, G. , Paolucci, E. e Poggio, M. - *CRONOS-III: Requirements for a knowledge-based scheduling tool covering a broad class of production environments* in "Expert systems in engineering- Principles and application", (Gottlob, G. e Nejd, W., eds), Lecture notes in Artificial Intelligence, v.462, Springer-Verlag, 1990.
- [6] Chu, Chao-Hsien e Nilakanta, S. - *On the design of a micro-based MRP system: a relational database approach*, Computers in Industrial Engineering, v.15, n.1-4, 1988.
- [7] Conway, R.W. , Maxwell, W.L. e Miller, L.W. - "Theory of scheduling", Addison-Wesley, 1967.
- [8] Elsayed, E.A. e Boucher, T.O. - "Analysis and control of production systems", Prentice-Hall, 1985.
- [9] French, S. - "Sequencing and scheduling", Ellis Horwood Ltd., 1982.
- [10] Forgy, C.L. - *Rete: A fast algorithm for many pattern/ many object pattern match problem*, Artificial Intelligence, v.19, n.1, 1982.
- [11] Garey, M.R. , Graham, R.L. e Johnson, D.S. - *Performance guarantees for scheduling algorithms*, Operations Research, v.16, n.1, 1978.
- [12] Garey, M.R. , Johnson, D.S. e Sethi, R. - *The complexity of flowshop and job shop scheduling*, Mathematics of Operations Research, v.1, n.2, 1976.

- [13] Gere Jr., W.S. - *Heuristics in job shop scheduling*, Management Science, v.13, n.3, 1966.
- [14] Gertsbakh, I. e Stern, H.I. - *Minimal resources for fixed and variable job schedules*, International Journal of Production Research, v.16, n.1, 1978.
- [15] Held, M. e Karp, R.M. - *A dynamic programming approach to sequencing problems*, Journal of SIAM, v.10, n.1, 1962.
- [16] Hodgson, T.J. e Nuttle, H.L.W. - *A note on LP and single machine lot size scheduling problem*, International Journal of Production Research, v.24, n.4, 1986.
- [17] Huang, W.V. e Tang, J. - *A new scheduling method for manufacturing systems*, Computers in Industrial Engineering, v.19, 1990.
- [18] Karp, R.M. - *Reducibility among combinatorial problems* in "Complexity of computer computations", (Miller, R.E. e Thatcher, J.W., eds.).
- [19] Kary, D.D. - "TRC: an Expert System Compiler", PhD Thesis, North Dakota State University, 1986.
- [20] Kim, Yeong-Dae - *A comparison of dispatching rules for job shops with multiple identical jobs and alternative routings*, International Journal of Production Research, v.28, n.5, 1990.
- [21] Lenstra, J.K. e Rinnooy Kan, A.H.G. - *Complexity of scheduling under precedence constraints*, Operations Research, v.26, n.1, 1978.
- [22] Montazeri, M. e Van Wassenhove, L.N. - *Analysis of scheduling rules for an FMS*, International Journal of Production Research, v.28, n.4, 1990.
- [23] Morse, L.C. e Withehouse, G.E. - *A study of combining heuristics for scheduling projects with limited multiple resources*, Computers in Industrial Engineering, v.15, n.1-4, 1988.
- [24] Norbis, M.I. e Smith, J.M. - *Two level heuristic for the resource constrained scheduling problem*, International Journal of Production Research, v.24, n.5, 1986.
- [25] O'Leary, D.E. - *Expert systems in production management* in "Production Management: Methods and Studies", (Lev, B., ed), Elsevier Publishing Co., 1986.
- [26] Panwalkar, S.S. e Iskander, W. - *A survey of scheduling rules*, Operations Research, v.25, n.1, 1977.
- [27] Picard, J.C. e Queyranne, M. - *The time-dependent traveling salesman problem and its application to the tardiness problem in one-machine scheduling*, Operations Research, v.26, n.1, 1978.

- [28] Shaw, M.J.P. - *Knowledge-based scheduling in FMS: an integration of pattern-directed inference and heuristic search*, International Journal of Production Research, v.26, n.5, 1988.
- [29] Smith, S.F. - *A constraint-based framework for reactive management of factory schedules* in "Intelligent manufacturing", (Oloff, M., ed), 1988.
- [30] Tipnis, V.A. - *Computer-Aided process planning- A critique of research and implementation* in "Annals of 19th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems", 1987.