

UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

**Desenvolvimento de Células de Fabrico Flexível:
Simulação e Controlo**

Miguel Francisco Martins de Lima

(Licenciado)

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

Lisboa, Junho de 1996

Tese realizada sob a orientação de
Carlos Alberto Pinto Ferreira

Professor Auxiliar do
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

*“Ciência é o ponto de encontro de dois géneros de poesia:
a poesia do pensamento e a poesia da acção”*

Agostinho da Silva

À minha família

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar aqui expresso o meu reconhecimento às pessoas e entidades que, directa ou indirectamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Carlos Pinto Ferreira agradeço-lhe a orientação, as sugestões, a confiança demonstrada e o estímulo que sempre me deu.

Ao Eng. Luís Manuel Custódio gostaria de agradecer as sugestões e disponibilidade sempre demonstrada para a discussão dos temas envolvidos nesta dissertação.

Ao Eng. Hernâni Mourão pela disponibilidade demonstrada na passagem do “testemunho”.

Agradeço ao Instituto de Sistemas e Robótica pela disponibilização dos meios técnicos necessários à realização deste trabalho.

Agradeço à ANA, e.p. pelas facilidades que me concedeu durante o período em que decorreu a elaboração desta dissertação.

Agradeço ao INETI pelas facilidades que me concedeu na fase inicial do mestrado.

A todos os amigos de que abdiquei mas não esqueci, simplesmente por serem amigos.

Não podia terminar os agradecimentos sem referir a minha família, pela compreensão tida durante a realização deste trabalho que ocupou muito do tempo que lhe era devido. Agradeço, em especial, à Lena pela forma como encarou as limitações da nossa vida familiar durante o período em que decorreu o mestrado.

RESUMO

Nos sistemas modernos de fabrico, a flexibilidade — capacidade de produzir diversificadamente em resposta às solicitações do mercado — é um factor relevante. Esta característica dos novos sistemas de produção, como são as células de fabrico flexível (CFF), decorre da utilização do computador como elemento integrador básico nos processos de planeamento, sequenciamento e controlo da produção.

O presente trabalho teve por objecto uma CFF existente no Instituto de Sistemas e Robótica (IST) e por objectivo a flexibilização do seu funcionamento.

Para tal — e dada a complexidade dos problemas envolvidos — foi efectuada a simulação da CFF com vista a tomar decisões quanto a configurações alternativas, estratégias de controlo, cenários de avarias e, eventualmente, políticas de manutenção. A partir da experiência recolhida foram implementadas medidas no sentido de aumentar o nível de automatização e versatilidade. O trabalho incluiu a implementação do carregamento automático dos programas de maquinagem nos controladores das máquinas-ferramenta, a colocação de armazenadores temporários nas máquinas, a flexibilização dos fluxos de produção e a melhoria do controlo da célula de forma a evitar a ocorrência de bloqueios. Implementou-se um algoritmo para o sequenciamento que permitiu confirmar o funcionamento do sistema de controlo da CFF.

Palavras Chave: Sistemas de Fabrico Flexível, Células de Fabrico Flexível, Planeamento, Sequenciamento, Simulação, Robótica.

ABSTRACT

In modern manufacturing systems, flexibility — the ability of responding adequately to changes on the market demand — is a relevant issue. This characteristic of modern manufacturing systems (as for instance flexible manufacturing cells — FMC) results from the utilisation of the digital computer as the basic integrating element in what respects the production planning, scheduling and control.

This thesis reports the work on an existing FMC (belonging to the ISR-IST) and was aimed at improving its flexibility.

To achieve this result — and given the complexity of the problem involved — a simulation of the cell was performed in order to evaluate possible configurations, control solutions, equipment malfunctioning scenarios and maintenance policies.

From these simulation studies, some decisions were implemented, namely the automatic loading of CNC programs, the construction of physical buffers, the improvement of production flow and control capabilities in order to avoid deadlocks. A scheduling algorithm was also implemented to test the FMC functionality.

Keywords: Flexible Manufacturing Systems, Flexible Manufacturing Cells, Planning, Scheduling, Simulation, Robotics.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1 Automação dos sistemas de fabrico	1
1.2 Estrutura da dissertação.....	2
2. Sistemas de fabrico por computador.....	4
2.1 Estrutura dos sistemas de fabrico por computador.....	4
2.2 Categorias dos processos de fabrico.....	5
2.3 Níveis de planeamento	5
2.4 Área comercial	7
2.5 Concepção dos produtos.....	7
2.6 Planeamento da produção.....	7
2.6.1 O modelo MRP	8
2.6.2 Planeamento dos recursos da produção - MRP II.....	11
2.6.3 Tecnologia de produção otimizada OPT	13
2.6.4 Filosofia de produção JIT	16
2.6.5 Método KANBAN.....	20
2.7 Controlo da produção	21
2.8 Sequenciamento	22
2.8.1 Aspectos do sequenciamento da produção	23
2.8.2 Soluções construtivas	27
2.8.3 Métodos matemáticos.....	28
2.8.4 Métodos heurísticos.....	33
2.8.5 Inteligência Artificial.....	36
2.8.6 Simulação de acontecimentos discretos	37
2.9 Actividades de fabrico.....	38
2.10 Arquitecturas de controlo	39
2.10.1 Controlo hierárquico.....	39
2.10.2 Controlo heterárquico.....	42
2.11 Células de fabrico flexível.....	45
3. Implementação de uma CFF	46
3.1 Objectivos.....	46

3.2 Equipamento que constitui a CFF	47
3.3 Peças fabricáveis pela CFF.....	49
3.4 Fluxo de informação.....	50
3.4.1 Mensagens entre o computador pessoal e o controlador do robô BR1.....	51
3.4.2 Mensagens entre os controladores dos robôs BR1 e BR2	52
3.5 Bloqueios.....	53
3.5.1 Como surgem.....	54
3.5.2 Abordagem seguida	54
3.6 Armazenadores temporários.....	55
3.6.1 Necessidade da sua existência	55
3.6.2 Abordagem seguida	56
3.7 Carregamento automático dos programas de maquinagem.....	57
3.7.1 Limitações do sistema	57
3.7.2 Abordagem seguida	58
3.8 Sequenciamento	59
3.8.1 Algoritmo implementado.....	60
3.9 Gestão dos recursos	61
3.10 Descrição dos programas.....	62
3.10.1 Programa de gestão da CFF.....	62
3.10.2 Programas do controlador BR1	63
3.10.3 Programas do controlador BR2	65
3.11 Exploração da CFF.....	65
3.11.1 Informação fornecida à CFF.....	66
3.11.2 Informação de monitorização	66
3.11.3 Informação fornecida pela CFF	67
4. Modelo de simulação da CFF.....	69
4.1 SIMPLE++	69
4.1.1 Classes de objectos básicos	70
4.1.2 Objectos básicos	71
4.2 Modelo	73
4.2.1 Matéria prima e peça	73
4.2.2 Máquina-ferramenta	74
4.2.3 Robô	75
4.2.4 Transportador	77

4.2.5 Armazém	78
4.2.6 Controlo de qualidade.....	79
4.2.7 Fim de fabrico.....	80
4.2.8 Configuração	80
4.2.9 CFF	82
4.2.10 Resultados.....	85
5. Conclusões e trabalho futuro	86
Bibliografia	88
Apêndice A.....	92

1. Introdução

A humanidade procurou, desde sempre, uma melhoria das suas condições de vida. A primeira vez que aconteceu uma melhoria acentuada foi na idade da pedra, quando o homem aprendeu a usar os utensílios, permitindo-lhe assim realizar tarefas simples. Outra alteração assinalável no modo de vida do homem ocorreu com a revolução industrial.

Antes da revolução industrial existia uma procura reduzida de produtos e estes eram quase todos produzidos por encomenda. Após a revolução industrial, e até ao início deste século, as oficinas produziam lotes pequenos de produtos. Desde o início do século, até aos anos 50, o mundo sofreu uma transformação que converteu uma conjuntura, em que apenas poucas pessoas dispunham dos poucos produtos fabricados na indústria, numa outra, em que muitas pessoas dispõem de muitos produtos. A procura de produtos industriais cresceu rapidamente e, para responder a essa procura, desenvolveram-se técnicas de produção em massa. Por sua vez, os preços baixos dos produtos estimularam a procura. Contudo, o desejo de ter mais variedade transformou os volumes elevados de produção em lotes médios e pequenos. Finalmente, nos últimos anos, uma competição internacional intensa exigiu que os sistemas produtivos respondessem rapidamente à procura, com níveis de inventário reduzidos. Surgiu assim a necessidade de um ambiente de produção dinâmico. A tecnologia de produção resultante permite o fabrico de produtos melhores, em lotes pequenos e a preços reduzidos. Por outro lado, a procura conduz ao desenvolvimento de novas tecnologias de produção [Chang *et al.* 91]. Assim, a automatização dos sistemas de fabrico permite que a indústria moderna mantenha a sua competitividade e assegure simultaneamente flexibilidade, de forma a responder às exigências do mercado com produtos cujo ciclo de vida é cada vez mais curto.

Nos últimos anos tem-se verificado um progresso significativo nas tecnologias de fabrico, contribuindo para isso, de forma decisiva, o aparecimento do computador digital. As máquinas-ferramenta controladas por computador, os sistemas automáticos de manuseamento de material e os sistemas de controlo por computador têm sido amplamente usados na indústria. As tecnologias que envolvem os sistemas de fabrico e os computadores originaram novas alterações na concepção dos produtos, nos processos e nos sistemas, como também na sua gestão [Kusiak 90].

1.1 Automação dos sistemas de fabrico

Automação é uma tecnologia dinâmica, que se iniciou há várias décadas atrás, e apresenta um processo de evolução quase contínuo. Alguns autores argumentam, mesmo, que a automação principiou com a revolução industrial ocorrida no século XVIII, quando as máquinas

começaram a realizar o trabalho anteriormente executado pelo homem. A automação, numa perspectiva moderna, é uma tecnologia que se ocupa com a aplicação da mecânica, electrónica e sistemas baseados em computadores para operar e controlar a produção. Esta tecnologia envolve [Groover 87]:

- Máquinas-ferramenta automáticas de processamento de peças;
- Máquina automáticas de montagem;
- Robôs industriais;
- Sistemas automáticos para manuseamento e armazenagem de materiais;
- Sistemas automáticos de inspeção para controlo de qualidade;
- Controlo com retroacção e controlo de processos por computador;
- Sistemas computadorizados para planeamento, recolha de dados, e de suporte à decisão nas actividades de fabrico.

Por outro lado, os sistemas de produção automáticos podem classificar-se em três tipos fundamentais [Groover 87]:

- Automação fixa;
- Automação programável;
- Automação flexível.

A automação fixa é um sistema no qual a sequência de processamento ou montagem é fixa pela configuração do equipamento. Na automação programável, o equipamento de produção possui capacidade para alterar a sequência das operações, de forma a produzir produtos diferentes. A sequência das operações é controlada por um programa. A automação flexível é uma extensão da automação programável. Um sistema de automação flexível é capaz de produzir uma variedade de produtos em que o tempo de preparação necessário para o fabrico de um novo produto é pequeno.

1.2 Estrutura da dissertação

Nesta dissertação abordam-se os sistemas de fabrico discreto de volume médio e pequeno implementados segundo os conceitos de automação programável e flexível.

Assim, no capítulo 2 descrevem-se vários aspectos dos sistemas de fabrico por computador, abordando-se as várias actividades de fabrico e de processamento de informação. Destas, destacam-se as actividades de planeamento da produção, em que se descrevem as técnicas mais utilizadas, e do controlo da produção, em que se aborda o problema do sequenciamento. Descrevem-se também algumas arquitecturas de controlo dos sistemas de fabrico. No final do

capítulo introduzem-se as células de fabrico flexível (CFF). No capítulo 3 descreve-se o projecto desenvolvido, com base numa CFF, tendo em vista o aumento das suas potencialidades de automatização e versatilidade. No capítulo 4 descreve-se o modelo de simulação implementado para a mesma CFF. Finalmente, no capítulo 5 apresentam-se as conclusões e sugestões de desenvolvimentos futuros.

2. Sistemas de fabrico por computador

O computador teve, e continua a ter, um impacte determinante no desenvolvimento das tecnologias de automação da produção. Praticamente todos os sistemas modernos de produção utilizam sistemas de computadores. Apareceram assim os sistemas de fabrico integrado por computador¹, em que os computadores se utilizam na concepção dos produtos, no planeamento da produção, no controlo das operações e nas várias funções de gestão da produção.

2.1 Estrutura dos sistemas de fabrico por computador

Num sistema de fabrico por computador, as actividades físicas relativas à produção fabril distinguem-se das actividades de processamento de informação. As actividades de fabrico incluem as operações de processamento, montagem, transporte, armazenagem e controlo de qualidade. Estas operações estão em contacto directo com os materiais e com os produtos, durante a fase de fabrico. A relação entre as actividades de fabrico e as actividades de processamento de informação mostra-se no modelo conceptual da figura 2.1 [Groover 87].

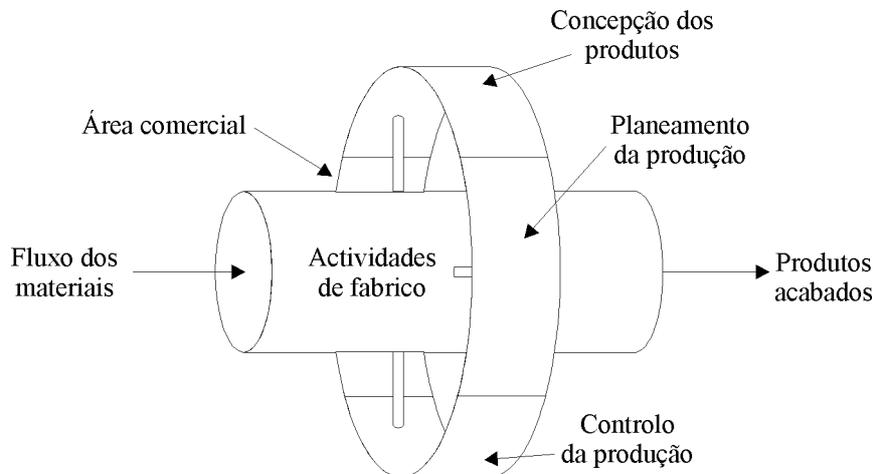


Figura 2.1 Modelo conceptual de um sistema de fabrico automatizado

As actividades físicas de fabrico desenrolam-se dentro da instalação fabril. As funções de processamento de informação formam um circulo que abrange a fábrica e fornecem os dados e o conhecimento necessário para o fabrico dos produtos. Estas funções de processamento incluem as actividades comerciais, a concepção dos produtos, o planeamento da produção e o

¹ CIM - *Computer Integrated Manufacturing* na literatura Anglo-Saxónica.

controlo da produção. As quatro funções formam um ciclo de acontecimentos que acompanham as actividades físicas de produção, mas não se relacionam directamente.

2.2 Categorias dos processos de fabrico

De acordo com a organização do fluxo da produção e da sua natureza, é possível identificar várias categorias [Morton *et al.* 93]. Seguidamente referem-se três categorias principais:

- Produção por lotes

Caracterizada pelo fabrico de um volume médio de produtos. Existe uma repetição de pedidos de encomendas ao longo do tempo.

- Produção continuada²

Conjunto de operações que têm a mesma sequência e permitem obter um produto final. Caracterizada pelo fabrico de um volume elevado de um conjunto restrito de produtos e tem subjacente um elevado grau de repetição. Todos os produtos são processados no mesmo conjunto de máquinas.

- Produção descontinuada³

Conjunto de operações em que o seu número pode ser variável e ter uma sequência diferente. Caracterizada pelo fabrico de produtos por encomenda, com pequeno volume, mas de uma gama bastante variada.

Na prática, muitas organizações têm actividades em cada uma das categorias. Por exemplo, o fabrico dos componentes pode produzir-se num ambiente de produção continuada, enquanto que a produção das submontagens se faz por lotes e a montagem final realiza-se de modo descontinuado.

2.3 Níveis de planeamento

Uma forma de lidar com a dimensão e a complexidade do problema do planeamento da produção é a sua decomposição em níveis interdependentes, agrupados de acordo com uma hierarquia de problemas de controlo [Ammons *et al.* 88]. O problema de controlo em cada nível na hierarquia é resolvido no momento apropriado, e a sua solução afecta os níveis acima e abaixo na hierarquia. O âmbito temporal do planeamento numa fábrica é bastante grande. O seu horizonte pode ir de dias a anos. Vários autores estudaram o problema e nem sempre o número de níveis resultante da decomposição proposta coincide [Ammons *et al.* 88],

² *Flow-Shop* na literatura Anglo-Saxónica.

³ *Job-Shop* na literatura Anglo-Saxónica.

[Gershwin *et al.* 86], [Kusiak 88], [Morton *et al.* 93]. Uma possível decomposição abrangente em níveis de todo o processo de fabrico poderá ser [Morton *et al.* 93]:

1. Planeamento a longo prazo

Vários tipos de tarefas diferentes são realizadas neste tipo de planeamento onde se incluem a expansão, dimensionamento, concepção e disposição física dos vários elementos que constituem o sistema de produção fabril. O seu horizonte temporal depende do sector de actividade; no entanto, na maioria dos casos vai de dois a cinco anos.

2. Planeamento a médio prazo

No âmbito deste tipo de planeamento inclui-se o estudo de mercado. Este estudo condiciona a reconfiguração dos recursos ao longo do tempo, de forma a obter-se uma capacidade de resposta adequada, face às solicitações sazonais do mercado. Um outro aspecto importante considerado neste nível de planeamento é a logística associada ao processo de produção. O seu horizonte temporal depende do sector de actividade; no entanto, na maioria dos casos vai de um a dois anos.

3. Planeamento a curto prazo

Neste nível de planeamento inclui-se a análise de requisitos, a atribuição de tarefas e a definição das datas de entrega. Assim obtém-se uma descrição temporal antecipada do que é necessário produzir por tipo de produto, quantidade e período de tempo. O seu horizonte temporal vai de três a seis meses.

4. Sequenciamento

Com os dados recebidos do planeamento a curto prazo, neste nível de sequenciamento, é possível definir o encaminhamento, o balanceamento das tarefas a executar pelos recursos existentes e o dimensionamento dos lotes. O seu horizonte temporal vai de duas a seis semanas.

5. Re-sequenciamento e controlo

Devido a factores diversos, como sejam, por exemplo, a ocorrência de avarias nas máquinas e atrasos, este nível é responsável por corrigir o sequenciamento resultante do nível anterior. O seu horizonte temporal vai de um a três dias.

Se bem que em todos estes níveis estão subjacentes problemas de sequenciamento, estes são mais intensos no nível 4.

2.4 Área comercial

Esta área é o principal meio de comunicação com o cliente. É, portanto, o princípio e o fim do ciclo de processamento de informação referido na secção 2.1. Constituem esta área as funções comercial, de vendas, gestão das encomendas, facturação, etc.. Os pedidos de produção, normalmente, são originados nos departamentos de vendas e comercial da empresa.

2.5 Concepção dos produtos

Numa empresa típica, o ciclo de acontecimentos que originam a concepção dos produtos inicia-se nos departamentos de vendas e comercial que pertencem à área comercial. As áreas da empresa que se ocupam do projecto do produto poderão envolver: a investigação, o desenvolvimento, a engenharia de projecto e, eventualmente, a construção de um protótipo.

A utilização de um programa de projecto assistido por computador⁴ é útil na definição geométrica do produto e seus componentes. O projecto pode ser implementado com base na tecnologia de grupo, que reúne os produtos em famílias com características semelhantes. A identificação de produtos semelhantes, descritos numa base de dados da fábrica, permite que o projecto seja executado por alteração, evitando grande parte do trabalho de desenho.

O projecto do produto é documentado através de desenhos do produto e dos seus componentes, das especificações e da árvore de decomposição de produtos⁵. Na fase do projecto, por vezes, consulta-se o departamento de engenharia de produção para determinar alterações possíveis ao projecto de forma a reduzir os custos de produção, sem sacrificar as características do próprio produto.

2.6 Planeamento da produção

A informação inerente ao projecto do produto entra na fase do planeamento da produção. As actividades de processamento de informação, que constituem o planeamento da produção, incluem o planeamento do processo, o plano director⁶, o planeamento das necessidades e o planeamento da capacidade de produção.

O planeamento da produção tipo produção descontinuada, normalmente, é efectuado por um operador humano experiente. Para o seu apoio na decisão e de forma a melhorar a qualidade e

⁴ CAD - *Computer Aided Design* na literatura Anglo-Saxónica.

⁵ BOM - *Bill Of Material* na literatura Anglo-Saxónica.

⁶ MPS - *Master Production Schedule* na literatura Anglo-Saxónica.

a consistência do planeamento da produção, surgiram várias técnicas. Entre estas, destacam-se o MRP⁷, o OPT⁸ e a filosofia JIT⁹. A técnica *Kanban* é, talvez, o exemplo mais conhecido de aplicação prática das ideias subjacentes ao JIT.

2.6.1 O modelo MRP

O modelo MRP é uma das técnicas de planeamento da produção mais utilizadas na indústria. De acordo com a decomposição em níveis feita anteriormente, o MRP situa-se no “Planeamento a curto prazo”. Assim recebe o plano de produção do “Planeamento a médio prazo” e, para um determinado horizonte temporal de planeamento, determina [Rodammer *et al.* 88]:

1. A quantidade de cada componente que será utilizada para um volume pré-definido de produtos finais.
2. Os instantes de tempo em que cada um destes componentes deve ser adquirido ou fabricado, de forma a que as datas de entrega dos produtos finais sejam cumpridas.

O fluxo de informação do sistema MRP apresenta-se na figura 2.2.

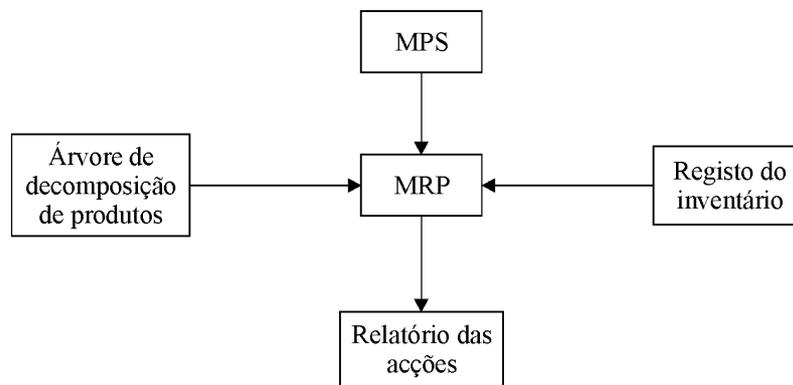


Figura 2.2 Fluxo de informação no sistema MRP

Após receber a informação do planeamento a médio prazo, utiliza os dados do plano director de produção, da árvore de decomposição de produtos e do registo do inventário para gerar um relatório das acções a efectuar. Em seguida apresenta-se uma descrição de cada uma destas tarefas.

⁷ *Material Requirements Planning* na literatura Anglo-Saxónica.

⁸ *Optimized Production Technology* na literatura Anglo-Saxónica.

⁹ *Just In Time* na literatura Anglo-Saxónica.

Plano director de produção

O MPS é um elemento essencial do sistema MRP. O seu objectivo é reunir o conjunto de necessidades de uma produção e estabelecer, para cada componente a fabricar, um calendário da produção em função das encomendas existentes, da previsão das vendas e da previsão do inventário de produtos acabados.

O conjunto de necessidades é formado por duas categorias: as *necessidades independentes* e as *necessidades dependentes*. As necessidades independentes são constituídas pelos componentes cuja procura é exterior à empresa. Do ponto de vista da empresa são considerados produtos finais. As necessidades dependentes são geradas pelas necessidades independentes e podem ser calculadas a partir da decomposição dos produtos finais em submontagens, componentes e matéria prima [Courtois *et al.* 94].

O MPS é feito para cada produto acabado e é actualizado em cada período, obtendo-se assim um “cálculo deslizante” através da introdução de novas informações disponíveis.

Árvore de decomposição de produtos

A árvore de decomposição de produtos é uma lista de todos os componentes, submontagens e matéria prima necessários para o fabrico de um produto final. Para as submontagens determinam-se, também, os componentes ou matéria prima necessários. Relativamente a cada artigo especifica-se qual o tempo de fabrico e a quantidade necessária. No caso de se referir a um artigo cuja aquisição é exterior à empresa, o tempo de fabrico refere-se ao momento da sua aquisição. Na figura 2.3 mostra-se um exemplo de uma estrutura da árvore de decomposição de produtos.

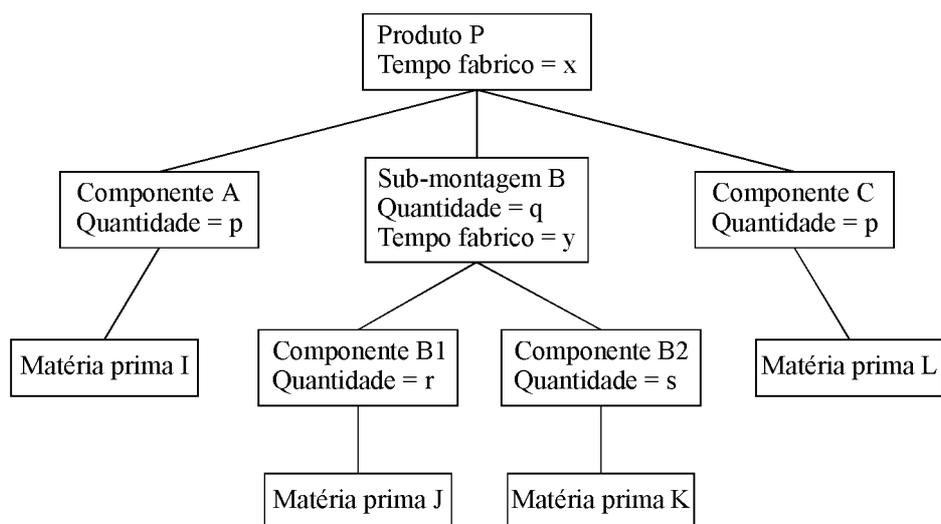


Figura 2.3 Exemplo de uma Árvore de decomposição de produtos

Registo do inventário

O registo de inventário contém informação sobre os artigos existentes, necessários ao fabrico dos produtos. A actualização desta informação é fundamental para o funcionamento efectivo do sistema MRP.

Relatório das acções

O resultado do MRP é um relatório com uma lista de acções necessárias efectuar por produto acabado. Em particular, determina-se a quantidade e a data de obtenção de cada componente necessário ao fabrico do produto. Os artigos a obter podem ser fabricados na própria empresa ou adquiridos no exterior.

Funcionamento do MRP

O sistema MRP começa com a execução do MPS e aplica um conjunto de procedimentos para gerar o planeamento dos requisitos necessários à obtenção do produto final. As etapas de funcionamento são as seguintes [Taborda 93]:

1. Cálculo das necessidades de componentes dos produtos finais a partir do MPS.
2. Cálculo, com base na árvore de decomposição de produtos, das quantidades de todos os componentes e submontagens necessários no fabrico.
3. Verificação da existência dos componentes em aprovisionamento, com base no registo de inventário.
4. Planeamento das operações necessárias utilizando os valores do tempo de processamento de cada componente e encadeando para trás a partir da data de entrega. Cálculo do instante em que deve ser dada a ordem de fabrico ou de compra para os componentes. Esse instante deve ser tal que as datas de entrega coincidam com o início das montagens, ou seja, os componentes devem estar disponíveis, apenas, na data de início da montagem.

O MRP é relativamente simples de compreender. No entanto, tem uma limitação importante: ignora a capacidade de fabrico necessária para a execução do planeamento obtido. Com efeito, o planeamento pode impor taxas de fabrico superiores a cem por cento para algumas máquinas, o que não é realizável. Assim para ultrapassar este problema devem utilizar-se técnicas auxiliares, uma das quais é a dilatação propositada dos tempos de fabrico.

O MRP é um sistema inteiramente determinístico e portanto não pode contemplar no seu planeamento o impacte de variações de tempo de processamento e a ocorrência de eventos aleatórios.

2.6.2 Planeamento dos recursos da produção - MRP II

Como foi anteriormente referido, o MRP ignora a capacidade de fabrico existente. De forma a ultrapassar esta limitação, o MRPII¹⁰, também conhecido como MRP em cadeia fechada, estende o seu âmbito de modo a incluir informação adicional sobre a produção. Esta informação permite gerar um plano director de produção realista.

O MRP II possui quatro elementos fundamentais: controlo de prioridade, planeamento de prioridade, controlo da capacidade e planeamento da capacidade. Na figura 2.4 apresenta-se a estrutura do MRP II.

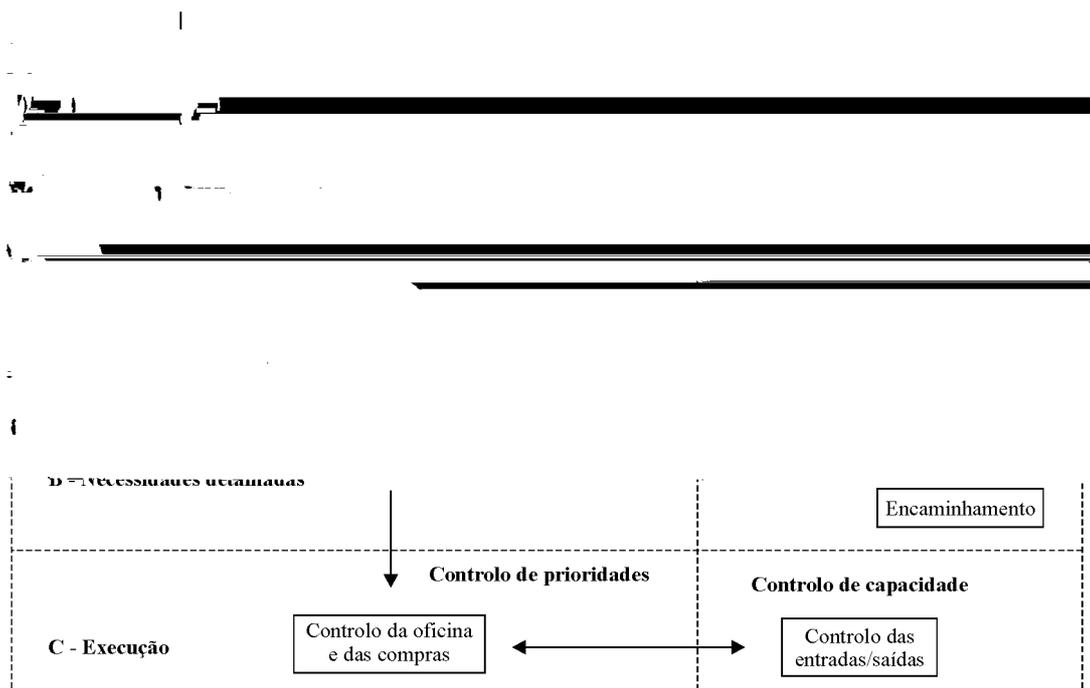


Figura 2.4 Constituição do MRP II

Todos os níveis do planeamento de prioridades têm uma ligação com os níveis correspondentes do planeamento de capacidade, o que permite relacionar estes dois tipos de planeamento.

Em primeiro lugar, o planeamento de prioridades deve definir o plano estratégico a adoptar. Este plano define-se com base na política de gestão da procura, ou pela forma como os produtos fabricados vão estar disponíveis no mercado. Uma decisão básica é definir se a organização produz a pedido dos clientes ou segundo a previsão das vendas.

¹⁰ *Manufacturing Resources Planning* na literatura Anglo-Saxónica.

Conhecido o plano estratégico pode-se definir o MPS. Como se pretende que o plano seja realista, este é avaliado segundo o planeamento aproximado da necessidade de capacidade¹¹. Conhecido o MPS realista, executa-se o MRP. Por sua vez, o MRP é ajustado em face do planeamento da necessidade de capacidade¹².

Como se pode observar na figura 2.4, ao MPS está ligado o RCCP. No RCCP, a cada artigo do MPS tem-se associado uma lista com as cargas em recursos importantes. Obtém-se um MPS exequível através de um processo iterativo de reajustamento com o RCCP.

A partir do momento que se tem um MPS exequível executa-se o MRP. Por sua vez, o MRP interage com o CRP, adaptando o plano à capacidade instalada.

O CRP, que é o segundo nível de planeamento de capacidade, recebe do MRP o conjunto de ordens de fabrico com a respectiva data de entrega. Cada ordem de fabrico tem um encaminhamento associado e um conjunto de operações necessárias para o realizar. Através de um encadeamento para trás, a partir das datas de entrega, é possível obter uma descrição temporal detalhada da capacidade exigida a cada máquina ou processo.

O MRP fornece uma lista de ordens de fabrico a realizar, onde se indica, para cada ordem de fabrico, a data de finalização respectiva. Assim com base nestes dados, o controlo de prioridades define qual a prioridade relativa de uma ordem de fabrico, em relação a outras já em fase de processamento.

Por sua vez, a função correspondente de controlo de capacidade verifica a produção actual e compara-a com a capacidade planeada. Os desvios detectados requerem acções correctivas, quer para fornecer a capacidade sugerida pelo plano quer para reajustar o plano, de forma a adequar-se à capacidade instalada.

No caso da capacidade exigida ultrapassar a capacidade instalada, o plano proveniente do MPS será refeito. Poderá ser necessário um processo iterativo até se conseguir um plano exequível.

Vantagens do MRP II

No caso de uma implementação efectiva do MRP II conseguem-se vários benefícios [New *et al.* 87]:

1. Redução de inventário.

¹¹ RCCP - *Rough Cut Capacity Planning* na literatura Anglo-Saxónica.

¹² CRP - *Capacity Requirements Planning* na literatura Anglo-Saxónica.

Pode-se atingir uma redução dos níveis de inventário da ordem dos 25 a 30%, o que permite uma poupança dos custos associados.

2. Aumento da produtividade.

O planeamento antecipado da capacidade necessária e as ordens de fabrico realistas geradas pelo MRP conduzem a uma utilização mais eficiente dos meios de fabrico.

3. Melhoria do serviço ao cliente.

O cumprimento das datas de entrega aumenta o grau de confiança dos clientes.

4. Controlo do negócio.

O MRP II, para além de conduzir a benefícios económicos importantes, impõe uma disciplina de comunicação e planeamento conjunto que permite um controlo dos custos de produção.

2.6.3 Tecnologia de produção otimizada OPT

O OPT é bastante semelhante ao MRP II no que se refere à utilização da árvore de decomposição de produtos e também tem como objectivo gerar um plano director de produção realista. O OPT pode ser visto como uma alternativa ao MRP para o planeamento da produção, dos materiais e dos recursos [New *et al.* 87].

O princípio fundamental em que se baseia o OPT reside no facto de considerar que, em qualquer organização, existe um número pequeno de recursos que limitam a capacidade, sendo estes considerados recursos críticos¹³.

Ao contrário do MRP que, para gerar o planeamento, geralmente usa encadeamento para trás, o OPT usa uma combinação de encadeamento para trás e para a frente, como se pode observar no exemplo mostrado na figura 2.5.

¹³ *Bottlenecks* na literatura Anglo-Saxónica.

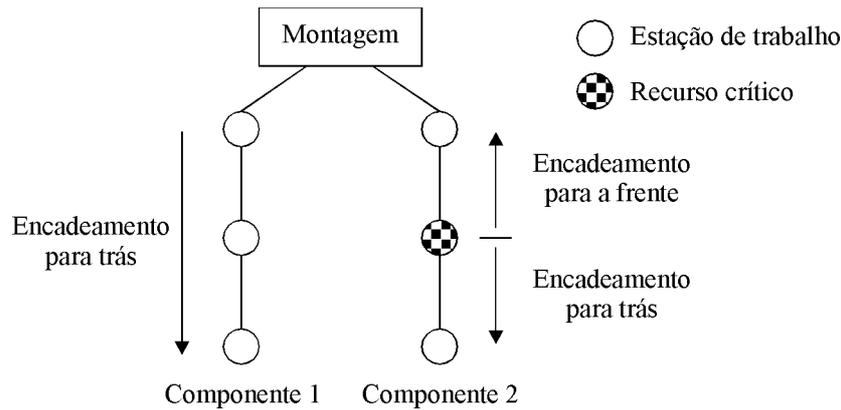


Figura 2.5 Exemplo do planeamento em OPT

Admita-se que o componente 1 é fabricado sequencialmente em três estações de trabalho cujas capacidades não são, geralmente, um factor limitativo. A partir da data de início da montagem executa-se o encadeamento para trás para calcular a data de início da produção desse componente.

O componente 2, contudo, é processado num recurso crítico. Segundo o OPT, em primeiro lugar determina-se o plano para o recurso crítico. Assim, a partir do recurso crítico, faz-se o encadeamento para a frente para obter a data de início da montagem. A data de início de fabrico do componente 2 obtém-se fazendo o encadeamento para trás a partir do ponto de congestionamento.

A geração do planeamento no OPT efectua-se recorrendo a uma técnica baseada em dez regras [Bauer *et al.* 91]:

1. O nível de utilização de um recurso não crítico é determinado, não pelo seu próprio potencial, mas por outras restrições do sistema.

Um recurso não crítico deve trabalhar apenas a uma taxa de utilização suficiente para responder ao recurso crítico, enquanto que este deve trabalhar a uma taxa de 100%.

2. A utilização e a activação de um recurso não são sinónimos.

Entenda-se activação como a necessidade de execução da tarefa e utilização como a execução duma tarefa que não tem necessariamente que ser realizada num dado instante.

3. Uma hora perdida num recurso crítico é uma hora perdida para todo o sistema.

4. Uma hora ganha num recurso não crítico é apenas uma miragem.

5. Os recursos críticos determinam o débito de saída e os níveis de inventário.

6. O lote de transferência pode não ser, e muitas vezes não deve ser, igual ao lote de produção.

O lote de transferência define o número de artigos transferidos conjuntamente entre operações. O lote de produção define o número de artigos a processar numa estação sem que seja necessário efectuar uma nova preparação.

7. Os lotes de produção devem ter dimensão variável e não fixa.

A dimensão do lote é definida dinamicamente.

8. A capacidade e a prioridade devem considerar-se simultaneamente e não sequencialmente.

Os planos de produção devem estabelecer-se considerando, simultaneamente, todas as restrições. Os tempos de fluxo não são pré-determinados, mas sim o resultado do plano de produção.

9. É necessário balancear o fluxo e não as capacidades.

Uma estação de trabalho só deve produzir o que é necessário para a próxima estação e assim sucessivamente, até se produzir o que é pedido pelos compradores. Assim reduzem-se os custos de inventário, não se efectuam operações desnecessárias e contribui-se para um maior débito da produção.

10. A soma dos óptimos locais não é igual ao óptimo do todo.

Os criadores do OPT identificaram a existência de um fenómeno causado pelo conflito de duas situações. No início de um ciclo da produção tende-se para a omissão da existência de recursos críticos e não críticos e privilegia-se a taxa de utilização das máquinas, o que conduz ao aparecimento de níveis de inventário desnecessários. No fim desse ciclo de produção, tende-se a privilegiar a venda dos produtos e a omitir os outros aspectos da produção.

As oito primeiras regras estabelecem os princípios básicos que conduzem à elaboração do planeamento, enquanto que as últimas duas são necessárias para prevenir que as ideias tradicionais de medidas de desempenho relacionadas com os custos interfiram na execução desse planeamento.

O OPT é indicado, sobretudo, em situações em que o encaminhamento é bastante idêntico para todos os produtos e portanto os recursos críticos são poucos, fixos e relativamente fáceis de identificar. Caso contrário, o OPT pode necessitar de muito tempo para gerar o planeamento e, por isso, pode ser inapropriado como ferramenta para ser usada em tempo real onde a produção pode ser bastante variável.

2.6.4 Filosofia de produção JIT

O JIT é uma filosofia de fabrico que tem como objectivo produzir o artigo pretendido com a qualidade e quantidade desejadas no momento adequado. Assim os volumes de inventário são mínimos, o que leva a que as fábricas possam ser mais pequenas devido ao reduzido espaço de armazenamento que é necessário.

O JIT pode ser visto segundo três perspectivas [Bauer *et al.* 91]:

1. A filosofia do JIT;
2. As técnicas usadas pelo JIT no projecto e planeamento de um sistema de fabrico;
3. O sistema de controlo utilizado na oficina.

A filosofia do JIT

Na abordagem da produção subjacente à filosofia JIT podem considerar-se três aspectos fundamentais.

1. Identificação entre a concepção dos produtos e as necessidades do mercado.

Os sistemas de produção actuais devem estar aptos a responder às constantes solicitações do mercado, em termos de variedade, rapidez, qualidade e preço. Para atingir este objectivo é necessário conceber os produtos de uma forma modular. Deve-se racionalizar a gama de produtos sempre que for possível e procurar similaridades em todos os componentes e submontagens com o objectivo de aumentar a modularidade.

2. Definição de famílias de produtos.

O JIT procura favorecer a disposição da instalação fabril com base nos produtos, através da definição de famílias de produtos que partilham as mesmas características de concepção e fabrico. Consequentemente, estes produtos podem produzir-se em células orientadas para o seu fabrico. Uma abordagem utilizada normalmente para a identificação de famílias de produtos é a Tecnologia de Grupo¹⁴.

3. Estabelecimento de boas relações com os fornecedores de forma a estes responderem atempadamente às solicitações.

¹⁴ GT - *Group Technology* na literatura Anglo-Saxónica.

Os fornecedores são solicitados a fazerem entregas frequentes de produtos de alta qualidade às linhas de produção. Aqueles são considerados como parte integrante do sistema, e não como meros intervenientes externos.

As técnicas usadas no projecto e planeamento de um sistema de fabrico

As técnicas utilizadas pelo JIT abrangem todo o sistema de produção, envolvendo aspectos como a divulgação comercial, as vendas, a concepção do produto, a engenharia do processo, a engenharia da qualidade, o projecto da instalação fabril e a gestão da produção.

Um dos propósitos do JIT é a diminuição dos tempos de fluxo da produção. Esta diminuição reduz a dependência da instalação fabril do exterior e permite terem-se menores horizontes temporais e, conseqüentemente, conseguirem-se MPS mais exactos. Os tempos de fluxo pequenos contribuem, também, para que a produção responda a alterações inesperadas de curto prazo do mercado. No âmbito da filosofia JIT existem vários aspectos que podem contribuir para melhorar o desempenho do sistema de produção com base na redução dos tempos de fluxo. Seguidamente descrevem-se esses aspectos:

1. Concepção do produto

A concepção do produto deve ser modular, simples e na perspectiva de facilitação do fabrico e montagem.

2. Técnicas de planeamento da produção

De forma a contribuir para que o sistema de produção responda efectivamente a pequenas variações de curto prazo do mercado, tenta-se organizar e adaptar as capacidades do modelo de produção, sem que se tenham de efectuar grandes alterações ao sistema. A técnica usada chama-se adaptação da produção¹⁵ e os seus componentes mostram-se na figura 2.6.

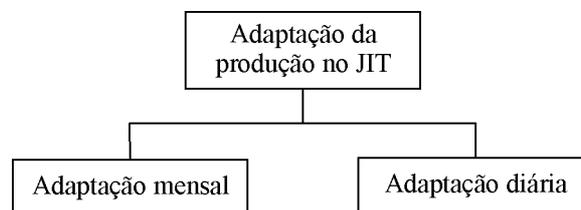


Figura 2.6 Componentes da adaptação da produção no JIT

¹⁵ *Production Smoothing* na literatura Anglo-Saxónica.

Esta técnica envolve duas fases distintas. A primeira adapta mensalmente a produção a alterações do mercado que ocorrem durante o ano e a segunda adapta diariamente a produção a alterações do mercado que ocorrem em cada mês. A adaptação mensal consegue-se através do planeamento de produção mensal, ou seja, a preparação do MPS. Desta forma sabe-se antecipadamente a composição dos produtos e as respectivas quantidades. Esta informação é disponibilizada aos fornecedores para facilitar a entrega oportuna dos materiais. O planeamento diário é então determinado a partir do MPS.

3. Técnicas para simplificar o processo de fabrico e redução dos tempos de fluxo

O tempo de fluxo de um produto num sistema de produção é composto fundamentalmente por quatro componentes: o tempo de processamento, o tempo de preparação, o tempo de transporte e o tempo de espera para ser processado. Na prática, geralmente, o tempo de espera é o maior.

A instalação fabril disposta em forma de U facilita o fluxo dos produtos e materiais contribuindo, desta forma, para uma diminuição dos tempos de fluxo.

Existem alguns procedimentos orientadores que conduzem a uma diminuição dos tempos envolvidos:

- Redução dos tempos de espera

O balanceamento das ordens de fabrico favorece a redução dos tempos de espera existentes entre os centros de processamento individuais. As variações na eficiência dos funcionários é minimizada pela existência de procedimentos normalizados e documentados.

- Redução dos tempos de processamento

O JIT pretende assegurar que os melhores métodos de fabrico sejam executados por equipas bem treinadas e eficientes. Os operadores num ambiente JIT são treinados para operar várias máquinas diferentes e efectuarem várias operações dentro do seu posto de trabalho.

- Redução dos tempos de transporte

O JIT pretende reduzir os tempos de transporte através da disposição conveniente dos postos de produção e de métodos rápidos de transporte entre os postos. A forma em U da instalação fabril minimiza a necessidade

de transporte entre as operações individuais associadas a um componente ou montagem.

- Redução dos tempos de preparação

O JIT considera que o maior obstáculo para redução dos tempos de fluxo é o problema dos tempos de preparação. Para reduzir estes tempos consideram-se quatro propostas:

- Separar os tempos de preparação internos dos externos. Os tempos de preparação internos referem-se às situações em que é necessário que a máquina esteja inoperativa para se realizar a preparação. Os tempos de preparação externos são independentes da máquina.
- Converter o mais possível tempos de preparação internos em externos.
- Eliminar os procedimentos de ajuste existentes dentro do tempo de preparação. Tipicamente estes procedimentos demoram bastante tempo.
- Abolir o tempo de preparação sempre que possível.

4. A utilização dos recursos de produção

A utilização que o JIT faz dos recursos de produção pode ser resumida na frase: não confundir ocupado com produtivo. Esta abordagem é sobretudo aplicada aos recursos humanos.

No caso de um pequeno aumento da procura, e assumindo a boa preparação dos recursos humanos, um operador pode simultaneamente ocupar-se de várias máquinas para fazer face à necessidade do pequeno aumento da produção. A adaptação à diminuição da procura pode fazer-se através da redução do trabalho extraordinário e da dispensa de operadores temporários.

O objectivo importante é ter-se um sistema de produção que esteja preparado para responder a flutuações da procura pequenas e curtas, recorrendo ao mínimo a recursos humanos. Isto não implica a existência de menor número de máquinas. As organizações que aplicam o JIT, normalmente, possuem alguma capacidade extra de equipamento, admitindo temporariamente operadores humanos quando se necessita de um aumento de produção.

5. Controlo de qualidade

Nos sistemas de produção tradicionais é comum utilizar-se o conceito de nível de qualidade aceitável. No JIT aplica-se o conceito de controlo de qualidade total onde o objectivo é eliminar todas as causas possíveis de defeitos. Como os volumes de inventário são reduzidos, não são suficientes para cobrir os erros e, deste modo, é necessária uma qualidade perfeita dos produtos.

O sistema de controlo utilizado na oficina

O JIT utiliza o método do *kanban* para controlo ao nível da oficina. Este método é descrito a seguir e visa assegurar que os artigos (componentes, submontagens e componentes comprados) são disponibilizados no local adequado, na quantidade e no momento desejados.

2.6.5 Método KANBAN

O método *Kanban* desenvolveu-se no Japão e tem como objectivo minimizar os níveis de inventário necessários para assegurar a produção. *Kanban* é uma palavra Japonesa que significa “etiqueta” e acompanha o lote no processo de produção. A etiqueta contém um certo número de informações, que pode variar consoante a empresa, onde se inclui necessariamente [Courtois *et al.* 94]:

- referência do tipo de peça fabricada;
- dimensão do lote;
- localização ou referência da estação a montante;
- localização ou referência da estação a jusante.

Na figura 2.7 ilustra-se a sua utilização.

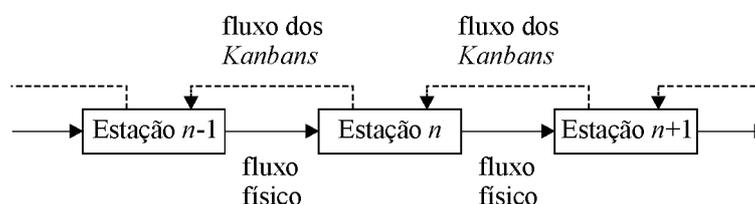


Figura 2.7 Representação esquemática do método *Kanban*

Ao analisar o fluxo físico e dos *kanbans* verifica-se que a estação a jusante consome as peças fabricadas pela estação a montante. Cada vez que a estação a jusante utiliza um lote de peças, retira-lhe o *kanban* e reenvia-o para a estação a montante. Este *kanban* constitui, para a

estação a montante, uma ordem de fabrico de um lote de peças. Quando a estação a montante termina o fabrico de um lote, coloca-lhe um *kanban* e envia aquele para a estação a jusante. Entre duas estações consecutivas circula um número fixo de *kanbans* que corresponde ao número de lotes. A estação a montante fabrica os lotes em função da necessidade da estação a jusante.

O método *Kanban* é adequado, apenas, para empresas de produção repetitiva. Estas empresas, ao utilizarem o método *Kanban*, apresentam as seguintes características [Courtois *et al.* 94]:

- circulação eficiente da informação entre as estações de trabalho;
- descentralização e simplificação da gestão, uma vez que não existe a necessidade de efectuar as ordens de fabrico;
- diminuição dos níveis de inventário com a correspondente vantagem financeira, aumento do espaço disponível e maior facilidade da gestão dos *stocks*;
- melhor adaptação da produção à procura, porque se produz, apenas, em função das encomendas;
- melhoria do serviço aos clientes, que se traduz numa diminuição dos prazos de entrega, entregas mais frequentes e em pequena quantidade.

2.7 Controlo da produção

O controlo da produção, com base na informação recebida do planeamento da produção, efectua a gestão e controlo das operações físicas da fábrica, tendo, por isso, uma grande interactividade com as diversas actividades de fabrico. Das diversas funções do controlo da produção destacam-se o controlo da oficina¹⁶, o controlo de inventário e o controlo de qualidade.

O controlo de inventário mantém actualizados os registos sobre as existências. O controlo de qualidade verifica se os produtos estão a ser fabricados de acordo com a qualidade especificada pelos projectistas. Este controlo pode ser efectuado nas peças e nos produtos encomendados a fornecedores [Groover 87].

O controlo da oficina ocupa-se dos problemas de controlo das actividades de fabrico, do sequenciamento e do despacho. O despacho encaminha as ordens de produção individuais para os locais de processamento. O controlo das actividades de fabrico determina e verifica se

¹⁶ *Shop floor control* na literatura Anglo-Saxónica.

a evolução da produção está de acordo com o previsto. O sequenciamento determina a sequência de passagem dos produtos nos recursos, bem como a alocação destes aos produtos, definindo os tempos de início e de fim das operações. Devido à importância que o sequenciamento apresenta nos sistemas de fabrico, este assunto é abordado na secção seguinte.

2.8 Sequenciamento

O sequenciamento da produção ocupa-se com a alocação eficiente de recursos ao longo do tempo, no processo de fabrico de produtos. Os problemas de sequenciamento surgem quando se utiliza um conjunto comum de recursos, que pode ser mão-de-obra, material e equipamento, para fabricar uma variedade diferente de produtos no mesmo período de tempo. O sequenciamento tem por objectivo encontrar uma forma de alocação e escalonamento do uso destes recursos, partilhados de tal forma que sejam satisfeitas as restrições da produção e com custos de produção mínimos. Assim, o sequenciamento é um processo de organização, decisão e utilização temporal de recursos de modo a executar todas as actividades necessárias à produção dos produtos pretendidos, no tempo desejado, satisfazendo um conjunto de restrições tecnológicas e temporais entre as actividades e os recursos [Custódio 92].

Considerações várias de natureza teórica e pragmática estimularam o interesse por novas abordagens do sequenciamento da produção. A primeira de todas foi o aumento de competição relativamente aos produtos fabricados nos mercados mundiais. Um sequenciamento da produção adequado conduz a uma vantagem competitiva, resultando em ganhos na produtividade dos recursos e na eficiência relacionada com as acções de gestão. A competição também motivou a introdução de novos sistemas de fabrico, sofisticados e de preços avultados, viabilizados pela redução do custo e aumento das potencialidades dos computadores e robôs industriais. Nas novas tecnologias de fabrico destacam-se os sistemas de fabrico automáticos, flexíveis e integrados por computador. Estes sistemas originaram a ocorrência de uma gama de problemas operacionais novos, estimulando, ainda mais, a investigação na área do sequenciamento [Rodammer *et al.* 88].

Entre os teóricos, o desenvolvimento de teorias complexas e a consolidação da Inteligência Artificial começou a re-direccionar a atenção da investigação na área do sequenciamento. A teoria do sequenciamento preocupou-se durante bastante tempo com a concepção de soluções construtivas e com a optimização. Os avanços teóricos legitimaram a investigação de procedimentos inovadores de procura heurística aplicados a problemas de sequenciamento mais realistas. Estes procedimentos parecem ser mais robustos do que o sequenciamento baseado na optimização e, por este motivo, são mais promissores para adaptação a aplicações comerciais.

Nos últimos anos, os avanços ocorridos na teoria e prática do sequenciamento da produção ultrapassou as fronteiras tradicionais. Começaram-se a estudar aspectos diferentes do problema trazendo à discussão uma variedade de tradições de investigação diferentes, perspectivas do problema e técnicas analíticas. Como consequência, a literatura na área do sequenciamento rompeu as suas fronteiras tradicionais da Investigação Operacional, ciências de gestão, e engenharia industrial. Nos últimos anos, os assuntos relativos à investigação da produção têm sido descritos na literatura que diz respeito sobretudo à Teoria do Controlo, Inteligência Artificial, simulação de sistemas, interação homem-máquina, sistemas de grande escala e outros ramos da engenharia e ciência da computação. Esta grande diversidade e momento de actividade originaram desenvolvimentos nas abordagens do sequenciamento da produção aumentando, por sua vez, a dificuldade do seu acompanhamento e da sua compreensão.

Na secção 2.8.1 formula-se o problema através da descrição das características importantes dos vários aspectos do sequenciamento da produção.

Na secção 2.8.2 e seguintes apresenta-se um resumo estruturado das abordagens relativas ao sequenciamento da produção mais relevantes, quer pelo seu significado histórico quer pelas suas características promissoras.

2.8.1 Aspectos do sequenciamento da produção

Como foi referido, o sequenciamento da produção consiste na alocação ao longo do tempo dos recursos de produção disponíveis de forma a conseguir-se um determinado grau de desempenho segundo o critério adoptado. Tipicamente o problema do sequenciamento envolve um conjunto de tarefas a realizar, onde cada tarefa compreende um conjunto de operações a efectuar. As operações requerem recursos das máquinas e do material e devem efectuar-se de acordo com uma sequência tecnologicamente realizável. O sequenciamento é influenciado por diversos factores tais como, prioridades, requisitos das datas de entrega, instantes de chegada, restrições de custo, níveis de produção, restrições na dimensão dos lotes, disponibilidade e capacidade das máquinas, precedências nas operações, requisitos dos recursos, e disponibilidade dos recursos. Um critério de desempenho envolve tipicamente compromissos entre assegurar o aprovisionamento necessário para a tarefa, alterações frequentes da produção, satisfação dos requisitos do nível da produção e satisfação das datas de entrega [Rodammer *et al.* 88].

Resumidamente pode-se afirmar que, definidos os produtos a fabricar, a sua sequência de operações e os recursos disponíveis, a preocupação fundamental da área do sequenciamento consiste na determinação da sequência de passagem dos produtos pelos recursos, bem como

na alocação destes aos produtos e na definição dos tempos de início e fim das operações, de modo a que um conjunto de critérios de desempenho seja otimizado [Custódio 92].

Exceptuando casos particulares e de reduzida dimensão, o problema do sequenciamento é conhecido como sendo de complexidade NP, isto é, o tempo necessário para resolver o problema de forma óptima aumenta exponencialmente com a sua dimensão.

Uma determinada abordagem do sequenciamento pode classificar-se de acordo com a forma como representa e trata o tipo de complexidades envolvidas. Visto que, em maior ou menor grau, todos os ambientes produtivos são especiais, a adequação de uma dada abordagem pode determinar-se pela forma como os seus pressupostos se correlacionam com os aspectos importantes de um ambiente produtivo particular.

Apresentam-se em seguida cinco atributos dos ambientes de sequenciamento da produção típicos que podem ser úteis na distinção das abordagens consideradas [Rodammer *et al.* 88].

Fronteiras entre estágios

O sequenciamento da produção deve ser implementado em determinado instante de tempo. Na maioria das situações reais, nem todos os produtos possuem um nível de inventário¹⁷ nulo, as máquinas não estão disponíveis ou prontas para processarem qualquer operação necessária para o fabrico do produto e nem todos os recursos de mão-de-obra e material estão completamente disponíveis. É comum observar-se que o problema do sequenciamento da produção é de facto um re-sequenciamento, isto é, um problema de alteração de um sequenciamento de produção já existente com a introdução de novos dados. Para se conseguir o re-sequenciamento, a abordagem utilizada deve ser capaz de considerar todos os estados iniciais relevantes para o sistema de produção [Rodammer *et al.* 88].

Da mesma forma, o sequenciamento da produção pressupõe geralmente um determinado espaço temporal finito. Para os ambientes de produção cíclicos, onde os mesmos produtos ou conjuntos semelhantes de produtos se repetem de forma cíclica, o horizonte temporal está relacionado com períodos do calendário, com os níveis de produção a ajustarem-se semanal ou mensalmente tendo em consideração a capacidade disponível. Para os problemas onde se desconhecem o número e a composição de encomendas futuras, este horizonte temporal pode corresponder à última data de entrega para algum produto em consideração ou ao tempo de finalização para todos os produtos em questão. Na maioria dos casos é indesejável que o sistema de produção esteja de facto parado e disponível no fim do horizonte temporal do

¹⁷ *Stock* na literatura Anglo-Saxónica.

sequenciamento. Um dos atributos desejável na abordagem do sequenciamento pode ser a possibilidade de considerar, ou mesmo especificar, o estado final do sistema.

Na secção 2.3 consideraram-se os vários estágios possíveis do planeamento, onde o sequenciamento também está incluído.

Dimensão dos lotes e acções de preparação

Os vários componentes que formam um produto final são agrupados em um ou mais lotes para processamento. Os lotes maiores reduzem o número de acções de preparação a considerar no sequenciamento, enquanto que os lotes pequenos diminuem os inventários dos produtos em fabrico e aumentam o número de opções a considerar no sequenciamento. Tipicamente, os tamanhos mínimos dos lotes definem-se a partir de decisões de gestão baseadas nos produtos, tecnologia e recursos envolvidos (até à possibilidade de lotes de componentes individuais, no caso de se utilizarem sistemas de fabrico flexível). Tipicamente, os tamanhos máximos dos lotes são estabelecidos por necessidades de desempenho e pela quantidade de trabalho por realizar. Um sequenciador mais geral e flexível deve determinar as dimensões dos lotes como resultado das restrições do sequenciamento e objectivos, deve contemplar as situações de tamanho fixo e variável dos lotes, deve poder considerar explicitamente as acções de preparação, e ter em atenção os tempos de preparação e custos dependentes das sequências.

Encaminhamento dos processos

No problema clássico do sequenciamento nas máquinas¹⁸, todos os componentes são processados em todas as máquinas exactamente uma vez, numa sequência tecnológica rígida. Nos ambientes industriais actuais, o encaminhamento dos processos pode ser mais complexo e mesmo dinâmico. Raramente todos os componentes são processados em todas as máquinas. Frequentemente, a sequência tecnológica é semi-ordenada com algumas escolhas limitadas entre as operações que podem ser efectuadas em seguida. O processo de encaminhamento pode alterar-se dinamicamente dependendo do estado do meio fabril (por exemplo, a disponibilidade dos recursos) ou das condições do componente (por exemplo, a necessidade de reprocessamento) [Rodammer *et al.* 88].

Normalmente, existe também um conjunto de máquinas onde certas operações podem realizar-se. Estas máquinas podem ser idênticas, com tempos de processamento semelhantes para uma dada operação. Por outro lado, as máquinas podem ser diferentes em termos dos tempos de processamento, características de processamento e recursos necessários. Exemplos destas situações podem verificar-se quando se tem que optar por equipamentos actuais e

¹⁸ *Job-Shop* na literatura Anglo-Saxónica.

equipamentos antiquados, equipamentos de fabrico manual e automático, e entre equipamento dedicado e equipamento não dedicado (exemplo, dos robôs). O processo de encaminhamento, e até a sequência tecnológica das operações, podem ser alteradas em função da escolha das máquinas. Idealmente, um sequenciador genérico deverá ser bastante flexível relativamente às possibilidades de encaminhamento dos processos que pode tratar [Rodammer *et al.* 88].

Ocorrência de situações aleatórias e perturbações

Na formulação clássica do sequenciamento, os tempos de processamento, os instantes de chegada, e as datas de entrega são determinísticos. Os vários recursos como sejam máquinas, trabalho e material estão disponíveis durante todo o tempo. No entanto, esta situação não traduz fielmente a realidade do ambiente produtivo actual. Um sequenciador genérico deverá considerar um ambiente de sequenciamento estocástico. Este ambiente inclui a ocorrência de eventos aleatórios e perturbações como sejam, por exemplo, as avarias das máquinas, a indisponibilidade dos operadores, roturas de inventário, como também variações nos tempos de processamento das operações, instantes de chegada e datas de entrega.

Critério de desempenho e objectivos múltiplos

A formulação tradicional do sequenciamento especifica, normalmente, apenas um critério de desempenho, como seja a minimização do tempo total de fabrico de todos os produtos¹⁹ ou a minimização do atraso no fabrico de todos os produtos. Estes critérios tendem implicitamente para uma optimização na utilização das máquinas durante o horizonte temporal do sequenciamento. No entanto, os ambientes produtivos actuais adoptam objectivos múltiplos de desempenho e restrições que são difíceis de conciliar e, por vezes, não mensuráveis, pelo menos, directamente. Enquanto que a gestão, normalmente, se preocupa com a minimização dos custos e a maximização da taxa de utilização das máquinas e dos recursos, o sequenciamento considera também, frequentemente, outros objectivos relacionados com a minimização da fadiga dos equipamentos. Assim pode-se considerar deliberadamente a redução das taxas de utilização das máquinas para provocar uma redução das filas de espera e dos inventários ou para assegurar fiabilidade. É desejável que um sequenciador genérico satisfaça e pondere uma grande variedade de critérios de desempenho [Rodammer *et al.* 88].

Não é expectável que apenas uma técnica simples de sequenciamento possa contemplar, de forma eficaz, todos estes aspectos complexos do problema. A tentativa de desenvolvimento de uma ferramenta de sequenciamento genérica, provavelmente, está condenada a delimitar-se nas suas possibilidades, impedida pela grande quantidade de dados necessários, complexidade dos resultados e lentidão de execução [Rodammer *et al.* 88]. A implementação de ferramentas

¹⁹ *Makespan* na literatura Anglo-Saxónica.

utilizáveis poderão contemplar apenas os aspectos mais importantes de um dado ambiente, ignorando os menos importantes e considerando, de forma conjunta, os aspectos de importância intermédia [Rodammer *et al.* 88]. Na maioria das situações, as abordagens referidas em seguida consideram apenas um subconjunto dos aspectos mencionados. A escolha de uma abordagem particular, a utilizar na implementação de uma ferramenta para o sequenciamento, na maioria das vezes, depende da forma como pode ser melhor estruturado o problema em causa.

2.8.2 Soluções construtivas

French [French 82] utilizou uma notação para classificar os problemas de sequenciamento que consiste em quatro parâmetros: $n / m / A / B$, onde:

- n é o número de produtos²⁰.
- m é o número de máquinas.
- A descreve o tipo de fluxo ou disciplina dentro da fábrica, ou seja:
 - F para o caso de produção continuada.
 - P para o caso de produção continuada de permutação. Nesta situação, o objecto do sequenciamento está limitado aos casos onde a ordem das tarefas é a mesma para cada máquina, ou seja, todas as máquinas processam as tarefas pela mesma ordem.
 - G para o caso de produção descontinuada.
 - Quando existe apenas uma máquina, ou seja $m=1$, A não é preenchido.
- B descreve a medida de desempenho pela qual o sequenciamento vai ser avaliado.

1. Soluções para uma máquina

Na prática, os problemas de sequenciamento para uma máquina aparecem com uma frequência maior do que se poderá pensar. Por exemplo, no caso da produção descontinuada, uma máquina pode aparecer como um recurso crítico, e pode fazer sentido sequenciar estas tarefas como um problema de uma máquina simples [French 82]. O formato deste tipo de problema é $n / 1 // B$ e dos resultados conhecidos destacam-se os seguintes:

²⁰ *Jobs* na literatura Anglo-Saxónica.

- A heurística do menor tempo de processamento²¹ minimiza o tempo médio de fluxo: $n / 1 // \bar{F}$. De notar que \bar{F} é usado para representar a minimização do tempo médio de fluxo, e o tempo médio de fluxo é uma outra forma de descrever o tempo médio que as tarefas demoram no sistema de fabrico.
- A heurística da menor data de entrega²² minimiza a demora máxima: $n / 1 // L_{\max}$.

2. Soluções para duas ou três máquinas

Baseados num algoritmo inicial desenvolvido por Johnson, existem três algoritmos em que cada um deles fornece uma solução óptima para um problema de sequenciamento específico, baseado nas datas de fabrico. Seguindo um determinado conjunto de regras determina-se uma ordem exacta de processamento para as tarefas. O objectivo do algoritmo de Johnson é minimizar o tempo de fluxo máximo, ou seja, F_{\max} . Os três problemas considerados são:

- $n / 2 / F / F_{\max}$, ou seja, um problema com n tarefas, duas máquinas e tipo produção continuada.
- $n / 2 / G / F_{\max}$, ou seja, um problema com n tarefas, duas máquinas e tipo produção descontinuada.
- $n / 3 / F / F_{\max}$, ou seja, um problema com n tarefas, três máquinas e tipo produção continuada.

Este algoritmo só é aplicável se se verificar o seguinte: para cada tarefa o tempo máximo de processamento na segunda máquina não é superior ao tempo mínimo de processamento na primeira ou terceira máquinas.

Os algoritmos referidos apresentam soluções óptimas para os respectivos casos considerados. A maior limitação desta abordagem é que a maioria dos problemas de sequenciamento não pode ser resolvida por qualquer destes três modelos.

2.8.3 Métodos matemáticos

Na secção 2.8.2 referiram-se algoritmos que permitem obter uma solução óptima para uma classe bastante restrita de problemas de sequenciamento. Contudo, sabe-se que os problemas de sequenciamento de maior dimensão são bastante complexos.

²¹ SPT na literatura Anglo-Sáxónica.

²² EDD na literatura Anglo-Sáxónica.

Devido à dimensão do espaço de soluções potenciais, desenvolveram-se técnicas com o objectivo de eliminar um grande grupo de soluções não óptimas. Nas secções 2.8.3.1 e 2.8.3.2 apresentam-se dois métodos que enumeram numa lista todas as possíveis combinações de sequenciamento e depois eliminam dessa lista as possibilidades não óptimas, restando assim apenas as óptimas. Estes métodos são a programação dinâmica e a técnica de ramificar e limitar²³. Devido ao facto de explorarem, de forma “inteligente”, a árvore de soluções, determinando, no seu caminho, quais os ramos que necessitam de ser analisados na totalidade, estes métodos consideram-se de *enumeração implícita*. Está implícito na sua lógica a verificação de todas as possíveis combinações de sequenciamento, mas ao contrário da *enumeração explícita* ou *completa*, não consideram todas as possibilidades explicitamente.

2.8.3.1 Programação matemática

São exemplos desta abordagem a programação linear, não linear, inteira e dinâmica. Destes métodos, a programação dinâmica é a mais referida na literatura, motivo pelo qual seguidamente se descreve o seu funcionamento.

Programação dinâmica

Esta técnica, criada por Bellman em 1957, aplica-se igualmente a problemas de optimização fora do âmbito do sequenciamento. Held e Karp em 1962 aplicaram as ideias da programação dinâmica aos problemas de sequenciamento e derivaram soluções para os problemas de uma máquina. Em [French 82] estudam-se as soluções matemáticas para o sequenciamento.

O funcionamento da programação dinâmica pode descrever-se da seguinte forma:

- Para cada tarefa, determina-se aquele que obtém melhor valor de desempenho, supondo que se trata de problemas de uma só tarefa;
- Em seguida, para cada um dos possíveis subconjuntos de duas tarefas, analisa-se qual a tarefa que deve ser sequenciada em segundo lugar, utilizando os dados do problema de uma tarefa.
- Procede-se assim sucessivamente até se alcançar a solução para o problema de n tarefas.

A implementação da programação dinâmica requer a utilização de bastantes cálculos. Para um problema de n tarefas existem $2^n - 1$ subconjuntos e, como a equação recursiva tem que ser resolvida para cada subconjunto, o cálculo computacional necessário é exponencial da ordem

²³ *Branch and Bound* na literatura Anglo-Saxónica.

de 2^n . Desta forma, a sua utilização não é apropriada para problemas de grande dimensão, como por exemplo, 50 tarefas. Conclui-se, portanto, que a programação dinâmica é indicada para problemas de pequena a média dimensão em que se deseja uma solução exacta e para os quais não existem algoritmos com estrutura particular.

A abordagem que se descreveu da programação dinâmica é *orientada para a frente*, no sentido em que os subconjuntos que se optimizam estão para a frente do sequenciamento. Existem outras implementações que são *orientadas para trás*. A programação orientada para a frente simplifica os cálculos e a análise de complexidade do problema. É adequada para problemas de horizonte deslizante.

2.8.3.2 Ramificar e Limitar

A ideia básica deste método é formalizar o problema como uma árvore de decisão. Utiliza dois procedimentos complementares: *ramificação* e *limitação*.

A partir de cada ponto de decisão, chamado nó, desenvolvem-se novos ramos, um para cada decisão possível. Estes novos ramos, por sua vez, tornam-se novos nós para nova ramificação, e assim sucessivamente. Os nós que já não podem ser mais ramificados representam soluções completas ou nós sem continuação. Os nós que ainda podem sofrer ramificação representam soluções parciais. Ao processo descrito anteriormente chama-se *ramificação*. Se esta ramificação se realizasse de forma exaustiva equivaleria a uma enumeração completa de todas as soluções. Assim aparece o procedimento de limitação que reduz substancialmente a carga computacional.

O procedimento de *limitação* avalia soluções parciais e compara-as com a avaliação de uma solução completa, tida como solução de referência. A avaliação consegue-se, através da utilização de uma medida de desempenho. Quando se encontram soluções parciais, cuja avaliação é pior do que aquela correspondente à solução de referência, então os ramos dessas soluções parciais são desprezados.

Numa fase inicial, a solução de referência pode obter-se através da execução de uma heurística, ou pode obter-se e melhorar-se durante o decorrer do procedimento de ramificação.

Este método provou ter bom desempenho na resolução de problemas de pequena dimensão, tornando-se proibitivo na aplicação a problemas de grande dimensão devido à necessidade enorme de recursos computacionais [Rembold *et al.* 93].

2.8.3.3 Teoria do Controlo

A Teoria do Controlo considera o sequenciamento como uma actividade dinâmica, onde os problemas de sequenciamento são na realidade um problema de resequenciamento [Rodammer *et al.* 88]. Esta teoria tenta limitar o efeito das avarias das máquinas, ausências do operador humano, carências de material, sobrecargas de pedidos ou outras perturbações que possam ocorrer durante a actividade de fabrico.

Apesar de só nos últimos anos a Teoria do Controlo ter sido aplicada aos problemas de sequenciamento da produção discreta, este tipo de problemas pode naturalmente considerar-se como um problema de controlo. Considere-se o modelo de controlo clássico, representado na figura 2.8 como o modelo do sistema de controlo para o problema do sequenciamento.

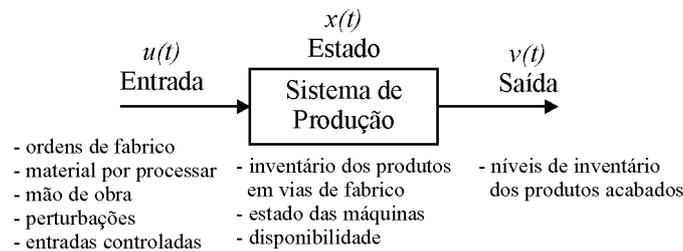


Figura 2.8 Sequenciamento da produção segundo a Teoria do Controlo

O sistema sob controlo opera em face da sequência das entradas $u(t)$ resultando uma sequência de saídas $v(t)$. As saídas em qualquer instante são função do estado do sistema $x(t)$. O objectivo do controlo é determinar uma forma de regular o estado do sistema, e consequentemente condicionar as saídas, de acordo com uma orientação que satisfaça as restrições impostas pelo modelo do sistema e, simultaneamente, satisfaça algum conjunto de critérios de desempenho.

Para uma oficina de fabrico, as entradas do sistema incluem as ordens de fabrico, o material por processar, a mão-de-obra, perturbações nas entradas e entradas controladas. As ordens de fabrico especificam as quantidades das várias peças a fabricar e os instantes de finalização pretendidos. Os materiais por processar e mão-de-obra são usados na produção e na sua falta a produção é reduzida. As perturbações nas entradas incluem as avarias nas máquinas ou falta de mão-de-obra, que alteram a capacidade produtiva durante algum período de tempo, mas durante o qual o sequenciador tem pouca influência. As entradas controladas incluem o sequenciamento, manutenção e atrasos em decisões, que alteram a capacidade produtiva, mas que o sequenciador pode condicionar dentro de certos limites [Rodammer *et al.* 88].

O estado da oficina de fabrico define o nível de inventário de todas as peças acabadas e semi-processadas, o estado de todas as máquinas (disponível, em processamento, em preparação, ou em reparação), a disponibilidade da mão-de-obra e o nível de inventário de todos os materiais. As saídas do sistema de produção podem ser quaisquer combinações

adequadas do estado, como, por exemplo, os níveis de inventário de todas as peças acabadas em determinada data de entrega.

O objectivo do sequenciamento reside na determinação do controlo, ou seja, o sequenciamento das operações necessárias para o fabrico de cada peça, o sequenciamento do trabalho extraordinário e manutenção e os instantes de tempo das encomendas de material, que conduzem a uma trajectória desejada do estado. O controlo também tem que satisfazer as restrições impostas pelos recursos limitados de fabrico e deve, simultaneamente, satisfazer as medidas de desempenho. Estas medidas de desempenho podem incluir o atraso mínimo das datas de finalização, nível máximo ou mínimo de inventário das peças em vias de fabrico, produção mínima e custos de manutenção.

Entre as diversas vantagens na aplicação da Teoria do Controlo ao planeamento e sequenciamento da produção destacam-se:

1. Este modelo reconhece a necessidade de integração da actividade de sequenciamento com a actividade do planeamento.
2. O modelo considera o ambiente dinâmico do problema do sequenciamento e tenta encontrar resultados que sejam robustos, flexíveis e adaptáveis a este tipo de ambiente.

No entanto, para sistemas de complexidade elevada, como são os sistemas de fabrico, é necessário ainda estudar e desenvolver técnicas de controlo mais adequadas para lidar com algumas características desses sistemas: não linearidade, não invariância no tempo e incerteza. O formalismo analítico da Teoria do Controlo clássico aplica-se nos domínios do tempo contínuo e discreto, mas não está perfeitamente adaptado aos sistemas dinâmicos de acontecimentos discretos. Os aspectos dos problemas da produção que podem ser representados, de forma aproximada, pelos sistemas contínuos ou discretos são as áreas que mais beneficiam das aplicações tradicionais da Teoria do Controlo, pelo menos a curto prazo. No entanto, a maioria dos problemas de controlo dos sistemas de fabrico enquadram-se na classe dos sistemas dinâmicos de acontecimentos discretos²⁴ para os quais, dado tratar-se de uma área de investigação inovadora, ainda há pouco trabalho desenvolvido [Sousa 95].

2.8.3.4 Optimização estocástica

²⁴ DEDES - *Discrete-Event Dynamic Systems* na literatura Anglo-Saxónica.

A optimização estocástica aplica-se a vários problemas dos sistemas de fabrico utilizando diferentes técnicas como sejam a teoria das filas de espera, teoria da fiabilidade²⁵, teoria de inventários²⁶ e as técnicas de cálculo da dimensão dos lotes²⁷. Uma desvantagem dos modelos de optimização estocástica é a necessidade de utilização de modelos bastante simplificados para implementar as soluções analíticas. Seguidamente descrevem-se, de forma resumida, algumas dessas técnicas.

As filas de espera consideram cada estação de maquinagem como um conjunto de servidores, em que cada máquina é um servidor e cada tarefa de processamento um consumidor. A grande variedade de tarefas e a grande diversidade de encaminhamentos dos materiais são representados assumindo que os tempos de processamento e a ocorrência das tarefas numa estação são governados por uma função de distribuição de probabilidades. Os modelos de filas de espera produzem estimativas razoáveis do desempenho do sistema, necessitam de poucos dados de entrada e de poucos recursos computacionais. Têm como principais desvantagens o facto de terem que representar vários aspectos do sistema de uma forma agregada e de gerar valores médios de saída, baseados no estado nominal do sistema. Assim, as filas de espera não modelam os efeitos transitórios resultantes de acontecimentos importantes, como sejam as avarias nas máquinas [Rodammer *et al.* 88].

A teoria de inventários e as técnicas de cálculo da dimensão dos lotes determinam a dimensão dos lotes que maximizam a produtividade e asseguram que as datas de entrega são cumpridas e os custos de produção e de inventário sejam minimizados. Os modelos de cálculo da dimensão dos lotes, normalmente, obtêm um compromisso entre os custos de preparação de uma máquina e os custos de manutenção dos inventários. A teoria de inventários modela e analisa os efeitos aleatórios para obter a política óptima de inventário, assumindo que cada produto em inventário tem uma procura baseada num processo estocástico [Rodammer *et al.* 88].

2.8.4 Métodos heurísticos

Se não se consegue obter, num espaço de tempo razoável, o melhor sequenciamento para um problema, então deve-se utilizar o conhecimento e experiência existente para encontrar o sequenciamento, que não sendo o óptimo, pode, pelo menos, ser melhor que a média [French 82]. Assim, os métodos heurísticos baseiam-se no conhecimento humano do problema.

²⁵ Reliability Theory na literatura Anglo-Sáxonica.

²⁶ Inventory Theory na literatura Anglo-Sáxonica.

²⁷ Lot-sizing Techniques na literatura Anglo-Sáxonica.

Em [Stewart *et al.* 94] é apresentada uma extensa lista bibliográfica de artigos, classificada segundo as diversas categorias, que abordam a procura por métodos heurísticos.

2.8.4.1 Procura em vizinhança

A procura em vizinhança é uma técnica heurística genérica utilizada para obtenção do sequenciamento. Primeiro toma-se uma solução inicial (semente) factível para o problema, obtida por um determinado método. Para se obter a solução inicial deve utilizar-se uma heurística, tida como boa, pois a procura em vizinhança adapta-se melhor a uma procura local do que global. Após a solução inicial, tenta-se alterar ligeiramente o sequenciamento, permanecendo na vizinhança da solução actual e avaliando cada sequenciamento resultante. Se não há melhoria, o método acaba. Caso contrário, toma-se a solução que corresponde a uma melhoria mais significativa e começa-se de novo a tentar alterar ligeiramente o sequenciamento. O processo continua assim sucessivamente até que não haja melhoria.

Na sua forma original, a procura em vizinhança realiza-se de maneira bastante dirigida, tentando apenas melhorar o mais possível a solução actual, o que conduz à obtenção da solução local óptima. No entanto, este tipo de procura, utilizada de forma prudente, conduz frequentemente a resultados próximos da solução global óptima com custos computacionais aceitáveis [Morton *et al.* 93].

2.8.4.2 Procura alargada em vizinhança

Esta abordagem tenta ultrapassar a limitação da procura em vizinhança que, como se viu anteriormente, é dirigida. Assim, para além da estratégia de intensificação da procura, a procura alargada em vizinhança incorpora uma estratégia de diversificação. Seguidamente referem-se abreviadamente algumas técnicas que implementam este tipo de estratégias. Estas técnicas, apesar de serem recentes, perspectivam um contributo importante para o problema do sequenciamento da produção [Rodammer *et al.* 88].

Procura Tabu

A procura TABU é uma procura em vizinhança que utiliza procedimentos para evitar ficar “preso” numa solução óptima local. Na sua forma mais simples, a procura TABU é uma procura em vizinhança com uma lista dos movimentos efectuados recentemente. Os movimentos, enquanto pertencentes à lista, não podem ser repetidos, daí o nome TABU. A melhor solução encontrada até ao momento é sempre guardada. Portanto, quando se alcança um óptimo local, o procedimento faz com que, no próximo movimento, se encontre uma solução pior e assim impeça que se regresse imediatamente ao óptimo local. A intensificação relaciona-se com os movimentos em torno do óptimo local, enquanto que a diversificação se

relaciona com os movimentos de afastamento desse óptimo local para uma zona nova, porventura mais favorável.

Algoritmos Genéticos

O termo algoritmos genéticos pode-se aplicar a qualquer processo de procura que simula os processos de evolução natural. Existe um conjunto inicial de soluções possíveis para o problema (população). Em cada geração, as soluções melhores permitem gerar soluções novas (sucessores), através da reprodução, cruzamento e mutação, que são os operadores de geração. As soluções novas herdam assim as características dos melhores pais.

Em [Holsapple *et al.* 93] e [Biegel *et al.* 90] são apresentadas aplicações desta técnica de procura para resolução de problemas de sequenciamento dos sistemas de fabrico.

Cristalização Simulada²⁸

Esta técnica acrescenta uma estratégia de diversificação à técnica de procura em vizinhança, de forma a poder sair de uma solução que corresponde a um óptimo local. Enquanto que, na procura TABU a estratégia de diversificação consegue-se forçando novas soluções, aqui a diversificação consegue-se de forma aleatória, com a atribuição de probabilidades aos movimentos que proporcionam novas soluções. Após a avaliação de uma solução nova na vizinhança, não se escolhe sempre a solução aparentemente mais favorável, ou seja, aquela cuja função objectivo é melhor, mas sim a solução cujo movimento tem maior probabilidade de acontecer. Deste modo, a cristalização simulada combina ponderadamente as estratégias de diversificação e intensificação em todos os movimentos.

Esta técnica de procura aplica-se na resolução de vários problemas relativos aos sistemas de fabrico. A cristalização simulada utiliza-se, por exemplo, na resolução de problemas de sequenciamento [Krishna *et al.* 95] e na formação de células de fabrico e determinação de famílias de produtos (tecnologia de grupo) [Lee *et al.* 92].

2.8.4.3 Regras de sequenciamento

As regras de sequenciamento são um método simples de decisão, baseado no estado dos recursos e nas características das tarefas a executar.

De acordo com o âmbito da informação utilizada, as regras de sequenciamento podem classificar-se em locais ou globais. São locais quando se baseiam no estado do recurso e da

²⁸ *Simulated Annealing* na literatura Anglo-Sáxonica.

tarefa em que se aplicam e são globais quando utilizam, também, informação referente ao estado global do sistema.

As regras são estáticas quando se executam previamente e o resultado da sua aplicação não se altera com o decorrer do tempo. As regras são dinâmicas quando o resultado da sua aplicação depende do comportamento do sistema ao longo do tempo.

Em geral, as regras de sequenciamento são bastante simples e é necessário pouco esforço computacional para a sua implementação, o que favorece a utilização em aplicações de tempo real. No entanto, como a maioria das regras utilizadas têm âmbito local, não se garante a obtenção da melhor solução.

Em [Panwalker *et al.* 77] descrevem-se mais de uma centena de regras de sequenciamento. Em [Morton *et al.* 93] analisa-se o comportamento de várias regras de sequenciamento face a diversos critérios de desempenho.

2.8.5 Inteligência Artificial

A Inteligência Artificial (IA) aplica-se na determinação e satisfação de um número grande e variado de restrições existentes no domínio do sequenciamento. A IA utiliza técnicas de representação do conhecimento de forma a superar essas restrições, integra restrições no processo de procura, usa mecanismos de relaxação das restrições de forma a conseguir soluções factíveis, e identifica soluções desfavoráveis para o problema do sequenciamento [Rodammer *et al.* 88].

Os sistemas periciais são um exemplo da aplicação da IA na resolução dos problemas existentes nos sistemas de fabrico. A aplicação de um sistema pericial é adequada a um determinado domínio, sobretudo quando se verificam as seguintes condições [Gupta *et al.* 88]:

1. Os problemas não podem definir-se convenientemente de forma analítica;
2. O número de soluções possíveis é grande, como é o caso dos problemas de explosão combinatória;
3. O conhecimento é vasto e é necessário utilizar o conhecimento relevante de forma selectiva.

Os sistemas periciais têm como principais desvantagens as de, para problemas de dimensão razoáveis, exigirem tempos de computação elevados e a dificuldade e morosidade associadas à construção da respectiva base de conhecimento.

Em [Kusiak 90] e [Bauer *et al.* 91] descrevem-se vários sistemas peris utilizadas em diversos aspectos dos sistemas de fabrico, entre os quais, o sequenciamento. Em [Morton *et al.* 93] e [Rodammer *et al.* 88] referem-se alguns sistemas periciais desenvolvidos para resolverem problemas de sequenciamento.

2.8.6 Simulação de acontecimentos discretos

A simulação dos sistemas de fabrico flexível é essencial para verificar conceitos de projecto, avair configurações alternatas, compara a sequência de manuseamento e transporte de materiais, testar estratégias de controlo, cenários de avarias dos equipamentos e políticas de manutenção [ElMaraghy *et al.* 82].

A simulação pode também utilizar-se como um mecanismo de controlo que suporta funções como o sequenciamento e monitorização. Relativamente ao sequenciamento, a simulação pode utilizar-se na análise da sua eficiência, nomeadamente na avaliação de heurísticas e regras de despacho.

O desenvolvimento do modelo de simulação consiste em cinco etapas principais [Bauer *et al.* 91]:

1. Definição do sistema e formulama. Nesta fase procura-se assegurar que o problema e as suas fronteiras sejam bem definidas. O objectivo principal desta etapa é a identificação explícita do propósito da simulação.
2. Recolha dos dados. O modelo de simulação requer dados bastante precisos.
3. Construção do modelo no computador. Dependendo do sistema, o modelo constrói-se através de uma linguagem de simulação, de um pacote de simulação ou de uma linguagem de programação de âmbito geral.
4. Verificação e validodelo. A verificação é o processo de confirmação de que o programa se comporta como o esperado, enquanto que a tarefa de validação consiste na construção de um nível aceitável de confiança em que qualquer dedução ou conclusão, extraída a partir do modelo, é compatível com o sistema real.
5. Experimentação com o modelo. O modelo de simulação utiliza-se para avaliar o potencial efectivo das várias alternativas. Os resultados são analisados de forma a escolher-se a alternativa mais conveniente.

A principal vantagem da simulação é a de que pode obter-se informação acerca do desempenho do sistema antes da sua implementação, permitindo assim ao projectista avaliar os riscos e benefícios do sistema. Outra vantagem é o facto de se poderem modelar efeitos,

como, por exemplo, a alteração de algoritmos, que não podem considerar-se em modelos analíticos. Por sua vez, os modelos analíticos necessitam, frequentemente, de efectuar simplificações nos fenómenos a analisar, para que possam ser representáveis matematicamente, o que não acontece de forma tão severa com a simulação, devido à sua natureza experimental.

Contudo, a natureza experimental da simulação é também uma desvantagem. Os estudos da simulação são difíceis de generalizar para além da experiência realizada e, portanto, contribuem pouco para a teoria do sequenciamento da produção. A utilização da simulação no sequenciamento da produção é dispendiosa, quer em meios computacionais quer em meios humanos necessários para implementar e testar o modelo de simulação [Rodammer *et al.* 88].

No capítulo 4 descreve-se um modelo de simulação implementado no âmbito desta dissertação.

2.9 Actividades de fabrico

Com foi referido anteriormente, as actividades de fabrico incluem as operações de processamento, montagem, transporte, armazenagem e controlo de qualidade. Seguidamente descreve-se cada uma destas operações.

Processamento

A operação de processamento transforma os produtos. Basicamente, esta operação consiste na transformação da matéria prima por determinado equipamento (máquina-ferramenta) com recurso a outros meios, como sejam a mão-de-obra, sistemas de fixação, ferramentas e energia (mecânica, calorífica, eléctrica, química, etc.). Como resultado obtém-se um produto acabado, que é o objectivo da operação, e gastos e desperdícios, que aparecem como efeitos secundários [Groover 87].

Montagem

A operação de montagem consiste em reunir vários componentes para formar um produto. Para que esta operação se realize convenientemente é fundamental que os diversos componentes a utilizar possuam características de acordo com as especificações. A montagem de componentes pode ser bastante simplificada pela actividade de concepção dos produtos. No fabrico de um produto, a operação de montagem é posterior à operação de processamento. Os manipuladores robóticos programáveis são um exemplo do equipamento que pode executar esta operação.

Transporte

A actividade de transporte serve de suporte às restantes actividades de fabrico. Assim, o sistema que implementa esta actividade é constituído por equipamento com capacidade para deslocar as matérias primas e/ou os produtos em vias de fabrico dentro da unidade fabril. O equipamento utilizado depende de vários factores como, por exemplo, das distâncias envolvidas e da natureza dos materiais a transportar. Os veículos guiados automaticamente²⁹, os robôs e os sistemas de transporte de paletes são exemplos do equipamento que pode utilizar-se com este propósito.

Armazenagem

Os armazéns permitem guardar as matérias primas, os produtos em vias de fabrico, os produtos acabados e outros materiais necessários no processo de fabrico, como, por exemplo, as ferramentas. O aparecimento de sistemas automáticos de armazenagem permitiu a sua utilização sem a intervenção humana. A sua integração com um sistema de gestão de armazém permite disponibilizar informação actualizada acerca dos produtos armazenados, como seja, por exemplo, a sua localização, quantidade, natureza e tempo de permanência.

Controlo de qualidade

O controlo de qualidade ocupa-se com a verificação dos requisitos de qualidade associados aos produtos. Os procedimentos fundamentais utilizados são a inspecção e o teste. A inspecção é o procedimento que examina o produto de forma a determinar se as características deste obedecem ao especificado no projecto. O procedimento de teste avalia as características de funcionalidade do produto.

Os equipamentos automáticos utilizados para realizar o controlo de qualidade dependem bastante das características do produto a examinar. São exemplos deste tipo de equipamento, as máquinas de medição de coordenadas, sistemas de visão por computador e sistemas ópticos que utilizam a técnica laser.

2.10 Arquitecturas de controlo

Fundamentalmente, existem dois tipos de arquitectura para controlo dos sistemas de fabrico: o controlo hierárquico e o controlo heterárquico. O controlo hierárquico surge naturalmente, devido à sua semelhança com a organização clássica da gestão e controlo dos sistemas de produção. O controlo heterárquico surge como tentativa de resolução dos problemas que o controlo hierárquico apresenta. Seguidamente descrevem-se estes dois tipos de arquitectura.

2.10.1 Controlo hierárquico

²⁹ AGV - *Automatic Guided Vehicle* na literatura Anglo-Saxónica.

A arquitectura do controlo hierárquico é baseada na estrutura de controlo representada na figura 2.9. Esta arquitectura assegura que a dimensão, funcionalidade e complexidade dos módulos individuais de controlo é limitada. Apesar do fluxo da informação de controlo se poder fazer apenas na vertical entre módulos adjacentes, é necessário e desejável a partilha de dados entre um ou mais níveis. As funções desempenhadas por cada módulo dependem do horizonte temporal pelo qual são responsáveis. Cada módulo de controlo decompõe o comando de entrada, proveniente do seu supervisor, em procedimentos a executar nesse módulo, em sub-comandos a endereçar a um ou mais módulos subordinados e em estado de retroacção enviado ao seu supervisor. Este processo de decomposição repete-se até ao nível n , onde se gera uma sequência coordenada de acções básicas que actuam no equipamento. O estado que é fornecido aos módulos supervisores, pelos respectivos subordinados, é utilizado para fechar o ciclo de controlo e permite o comportamento adequado em cada nível de controlo.

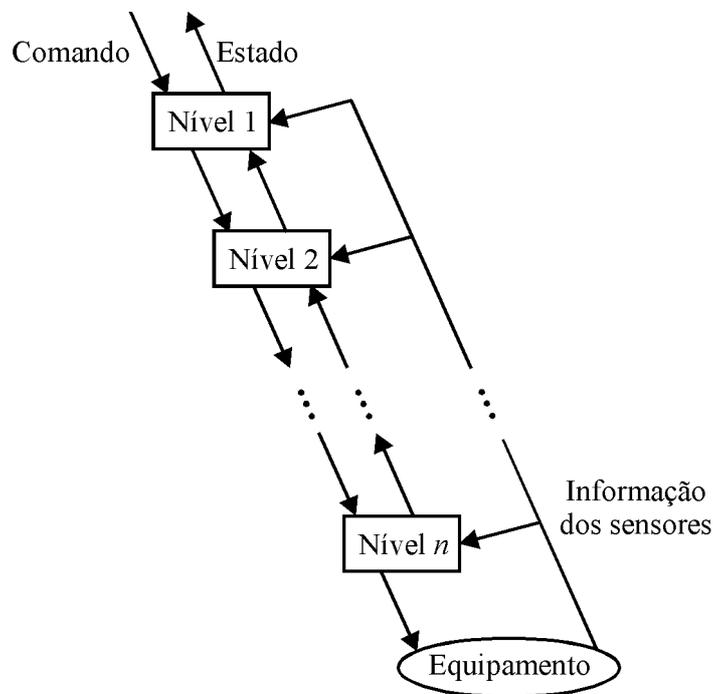


Figura 2.9 Estrutura do controlo hierárquico

Os módulos de controlo comunicam entre si através de interfaces normalizados, são concebidos de forma a responder em tempo real aos acontecimentos ocorridos nos equipamentos e são implementados num ambiente computacional distribuído [Jones *et al.* 85].

Os investigadores do NBS³⁰ propõem uma estrutura para os sistemas de fabrico composta por cinco níveis, como se representa na figura 2.10 [Jones *et al.* 85].

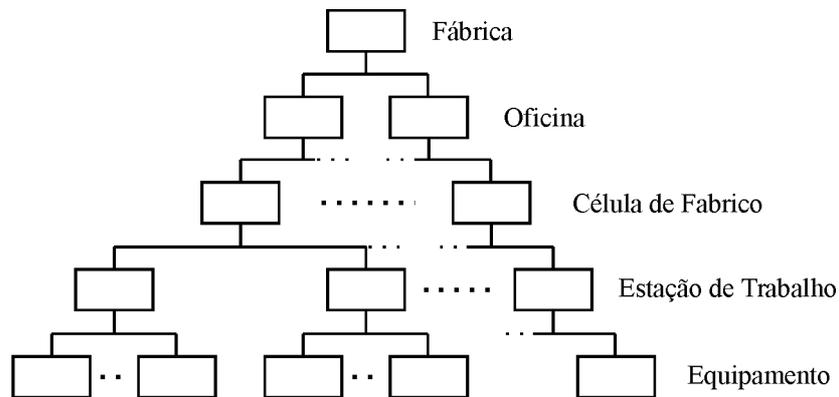


Figura 2.10 Estrutura do sistema hierárquico NBS

Em seguida descreve-se, de forma resumida, as funções de cada um dos níveis.

Fábrica

Este nível superior da hierarquia tem um horizonte temporal de planeamento que pode ir de vários meses a vários anos. O nível da fábrica pode dividir-se em três áreas funcionais:

- Projecto - área responsável pela concepção dos produtos a fabricar.
- Gestão da informação - área responsável pelas questões administrativas e financeiras.
- Gestão da produção - área responsável pelo controlo do desempenho do sistema de fabrico.

Oficina

O horizonte temporal deste nível vai de várias semanas a vários meses. O nível oficina é responsável pela coordenação da produção e pelo suporte das tarefas desencadeadas nas estações de trabalho. Deste modo aparece a gestão das tarefas e a gestão dos recursos.

A gestão das tarefas abrange o sequenciamento, a manutenção e serviços de suporte, onde se inclui a contabilização do tempo de funcionamento das máquinas e acessórios. Este módulo também é responsável pelo agrupamento das tarefas em lotes, activação e desactivação das

30 NBS - *National Bureau of Standards na literatura Anglo-Saxónica*. Organismo existente nos Estados Unidos, que promove o desenvolvimento de normas no âmbito dos sistemas de fabrico automatizados.

células virtuais³¹, atribuição e retirada de lotes em processamento nessas células e monitorização das tarefas em execução. O agrupamento das tarefas em lotes pode realizar-se segundo famílias de produtos (tecnologia de grupo).

A gestão dos recursos é responsável pela alteração dinâmica da estrutura das células virtuais, atribuindo a estas as estações de trabalho, e pelas ferramentas e materiais necessários à produção. A gestão dos recursos também é responsável pela manutenção actualizada dos níveis de existências intermédios e conhecimento da localização das ferramentas em trânsito na fábrica.

Célula

Neste nível situam-se os controladores das várias células que sequenciam as tarefas pelas diversas estações de trabalho e supervisionam o respectivo funcionamento. Para este nível, o horizonte temporal vai de várias horas a várias semanas. Uma célula compreende um determinado conjunto de estações de trabalho necessárias para execução de uma dada tarefa. Após a execução da tarefa, a célula deixa de existir, sendo portanto uma célula virtual.

Estação de Trabalho

Para este nível o horizonte temporal vai de vários minutos a várias horas. Coordena e controla as actividades de um grupo pequeno de equipamentos. O interface entre a estação de trabalho e a célula é normalizado e independente do tipo de estação, de forma a suportar a utilização das estações nas diversas células virtuais.

Equipamento

Para este nível o horizonte temporal vai de alguns milissegundos a vários minutos. Este nível tem como função traduzir os comandos do nível estação de trabalho, gerando comandos interpretáveis pelo equipamento que controla. O nível equipamento funciona como interface entre a estação de trabalho e o equipamento, assegurando assim uma comunicação normalizada com o nível da estação, independentemente do equipamento controlado, que pode ser proveniente de diferentes fabricantes.

2.10.2 Controlo heterárquico

A complexidade dos sistemas hierárquicos de fabrico por computador cresce rapidamente com a dimensão, resultando em elevados custos de desenvolvimento, implementação, operação e

31 As células virtuais são estruturas dinâmicas de produção, constituídas por conjuntos de máquinas ferramenta agrupadas segundo critérios baseados nas características dos produtos a fabricar.

manutenção. Nos sistemas hierárquicos é difícil a inclusão de tolerância a falhas, sem aumentar significativamente a sua complexidade. Quando se incorpora a tolerância a falhas, os diversos níveis da hierarquia requerem bastante conhecimento dos níveis inferiores associados [Duffie 90]. Uma outra limitação dos sistemas hierárquicos é devida à sua estrutura. Assim, uma avaria num nível superior causa uma interrupção de todos os níveis inferiores associados, o que provocará mais tarde uma interrupção de todo o sistema [Ponomaryov 90]. Por outro lado, nos sistemas hierárquicos existe uma contradição entre a flexibilidade desejada e a estrutura rígida do sistema. A estrutura do sistema e dos dados, na fase de concepção, deve obedecer estritamente às condições operacionais especificadas. Consequentemente, todas as variantes possíveis, correspondentes a alterações das condições operacionais, têm que ser consideradas na fase do projecto. Prever, num sistema que se deseja flexível, todas as condições de operação é uma tarefa impraticável.

As arquitecturas de controlo heterárquico auguram uma complexidade reduzida causada pela existência local da informação e do controlo, custos reduzidos de desenvolvimento dos programas devidos à eliminação dos níveis de supervisão, facilidade de manutenção e alteração devido à semelhança dos diversos módulos e melhor fiabilidade que advém da facilidade de inclusão de tolerância a falhas.

O sistema resultante deve ser ordenado internamente, mas permissível ao exterior [Hatvany 85]. Assim, cada entidade do sistema tem regras de funcionamento, que segue para manter a ordem do sistema, e o sistema deve permitir a integração de uma nova entidade.

O sistema deve possuir uma organização heterárquica cooperativa em que

- As entidades possuem direitos iguais de acesso aos recursos;
- As entidades possuem acesso mútuo semelhante;
- As entidades possuem modos independentes de operação;
- As entidades obedecem estritamente às regras do protocolo de todo o sistema.

Uma estrutura típica de um sistema heterárquico representa-se no exemplo mostrado na figura 2.11.

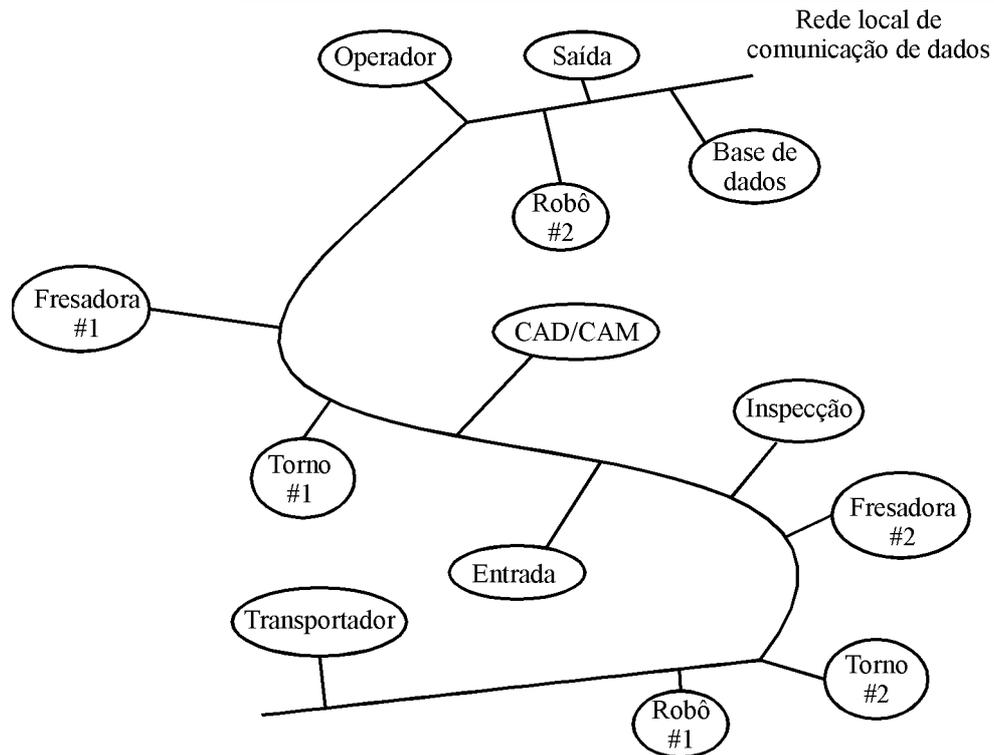


Figura 2.11 Exemplo de implementação de um sistema de fabrico heterárquico

A rede local de comunicação de dados serve de suporte à troca de informação entre as diversas entidades. Cada entidade é responsável pelo equipamento que lhe está associado e por coordenar as suas acções, através da troca de mensagens, com as outras entidades.

2.11 Células de fabrico flexível

Uma célula de fabrico flexível (CFF) pode-se definir com sendo uma configuração, integrada e controlada por computador, de máquinas-ferramenta de controlo numérico, equipamento auxiliar de produção e um sistema de manuseamento de materiais, concebida para produzir simultaneamente pequenas a médias séries de uma vasta gama de produtos, de elevada qualidade, a baixo custo [Viswanadham *et al.* 92].

Um sistema de fabrico flexível é constituído por várias células. Estes sistemas preenchem uma lacuna existente entre a produção em massa de grandes lotes e as máquinas-ferramenta isoladas, como se pode observar na figura 2.12. A produção em massa é bastante eficiente no fabrico de grandes volumes, mas possui a limitação de não se adaptar ao fabrico de novos produtos diferentes. Por outro lado, as máquinas-ferramenta, embora apresentem uma grande flexibilidade no tipo de produtos que podem fabricar, têm uma cadência de produção bastante baixa. Os sistemas de fabrico flexível constituem pois a solução para o fabrico de volumes médios de produtos [Groover 87].

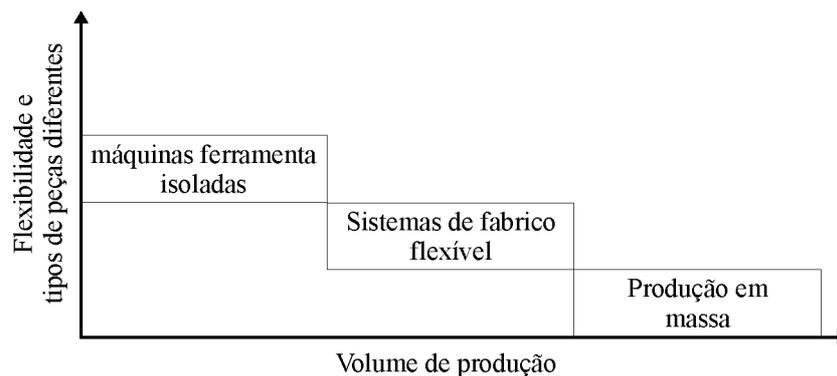


Figura 2.12 Flexibilidade dos sistemas de fabrico *versus* volume de produção

As CFF são constituídas por três componentes básicos: *estações de processamento* que podem ser compostas por diversas máquinas-ferramenta, equipamentos de inspeção e de montagem; *dispositivos de manuseamento e armazenagem* de materiais, que permitem deslocar os materiais entre as várias estações de processamento e colocá-los nos locais de armazenagem; e o *sistema de controlo por computador* que coordena as actividades realizadas nas estações de processamento e nos dispositivos de manuseamento e armazenagem.

As CFF são uma realidade na indústria mundial mais desenvolvida. No âmbito desta dissertação descreve-se um exemplo de uma CFF implementada.

3. Implementação de uma CFF

A partir da célula de fabrico flexível (CFF) existente no Instituto de Sistemas e Robótica [Mourão 93], foi desenvolvido um projecto tendo em vista o aumento das suas potencialidades de automatização e versatilidade. O trabalho consistiu no incremento das facilidades de comunicação e interacção com as máquinas-ferramenta, na criação de zonas de armazenamento temporário³² para os produtos em vias de fabrico e flexibilização dos programas de controlo e gestão de todas as actividades da CFF.

Neste capítulo descreve-se a CFF, nomeadamente as ferramentas desenvolvidas com vista ao incremento das facilidades da célula.

Na secção 3.1 apresentam-se os objectivos da CFF implementada. Na secção 3.2 descreve-se o equipamento que constitui a CFF. Na secção 3.3 apresentam-se as características das peças que se podem fabricar. Na secção 3.4 refere-se o fluxo de informação existente na CFF, onde se descrevem as mensagens existentes entre o computador pessoal e o controlador da CFF. Na secção 3.5 apresenta-se a abordagem seguida para ultrapassar o problema dos bloqueios. Na secção 3.6 descreve-se a implementação efectuada dos armazenadores temporários das máquinas-ferramenta. Na secção 3.7 refere-se a forma como se efectua o carregamento automático dos programas de maquinagem. Na secção 3.8 descreve-se o algoritmo de sequenciamento implementado. Na secção 3.9 descreve-se a forma de gestão dos recursos partilhados e na secção 3.10 descrevem-se os programas desenvolvidos para a gestão e controlo. Finalmente, na secção 4 descreve-se a operação da CFF.

3.1 Objectivos

A CFF é um projecto desenvolvido no Laboratório de Robótica e Processamento de Informação que implementa um protótipo de um sistema de produção flexível totalmente automatizado. Pretende-se criar uma plataforma que permita testar e validar algoritmos de controlo, nomeadamente na área do sequenciamento. Para que tal seja realizável, é necessário dotar a CFF existente da flexibilidade adequada. Assim, após o desenvolvimento das ferramentas básicas necessárias, (i) implementou-se o carregamento automático dos programas de maquinagem nos controladores das máquinas-ferramenta, (ii) dotaram-se as máquinas com armazenadores temporários de entrada, e (iii) implementou-se o controlo da célula de forma a permitir o fabrico de peças processadas em mais do que uma máquina.

³² *Buffers* na literatura Anglo-Saxónica.

3.2 Equipamento que constitui a CFF

A CFF é constituída essencialmente por três máquinas-ferramenta, dois robôs, quatro transportadores, um armazém e um computador pessoal. Na figura 3.1 apresenta-se a implantação do equipamento.

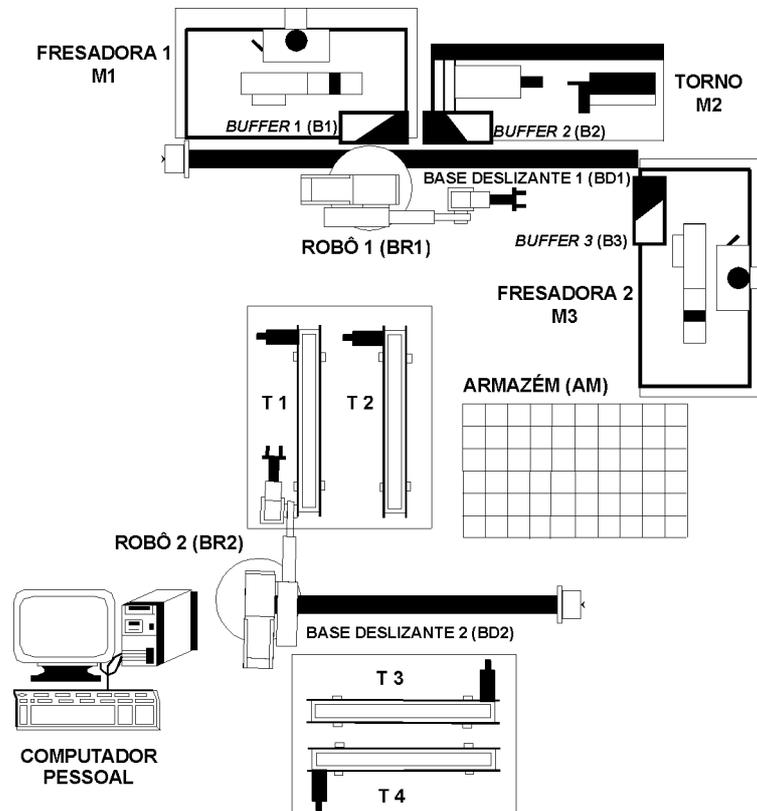


Figura 3.1 Implantação do equipamento da CFF

A CFF está dividida em dois blocos funcionais: *bloco de maquinagem* e *bloco de entrada/saída*. O bloco de maquinagem é constituído pelas fresadoras M1 e M3, pelo torno M2 e pelo robô BR1. A concentração das três máquinas numa área pequena permite que estas sejam alimentadas pelo mesmo robô BR1. Assim, o bloco de maquinagem é delimitado pelo espaço de trabalho do robô BR1. O bloco de entrada/saída compõe-se do robô BR2, do armazém e dos transportadores T3 e T4. Está circunscrito ao espaço de trabalho do robô BR2. Os dois blocos transferem a matéria prima entre si através dos transportadores T1 e T2. Esta separação funcional permite que a matéria prima proveniente do armazém, existente no bloco de entrada/saída, seja transferida para o bloco de produção e deste, após terminarem as operações de maquinagem, seja reenviada para o bloco de entrada/saída, onde pode tomar um de dois encaminhamentos possíveis: saída directamente da célula ou saída para o controlo de qualidade.

O computador pessoal contém o programa que permite efectuar a gestão da CFF.

Os robôs possuem uma estrutura antropomórfica, com cinco graus de liberdade, o que não permite independência nas três componentes de orientação do efector terminal. De forma a aumentar o espaço de trabalho e permitir, em algumas posições, obter independência nas três componentes de orientação, os robôs estão instalados em bases lineares deslizantes. Cada robô possui o respectivo controlador.

Os transportadores são comandados pelo controladores dos robôs. Os transportadores T1 e T2 são comandados pelo controlador do robô BR1. Os transportadores T3 e T4 são comandados pelo controlador do robô BR2. Cada transportador é considerado, pelo respectivo controlador, como mais uma junta, sendo o movimento conseguido através da execução do mesmo conjunto de instruções de movimentação do efector terminal.

As máquinas-ferramenta estão equipadas com um controlador numérico assistido por computador³³ que permite armazenar e transferir programas de maquinação, através de uma porta de comunicação série tipo RS232C. Os programas são escritos em código g, quer no computador quer directamente na máquina. Os programas escritos no computador podem ser transferidos para as máquinas através da interface de controlo numérico distribuído³⁴. Os sinais digitais existentes nesta interface permitem efectuar o carregamento automático de programas, iniciar a sua execução e receber informação do estado da máquina. As máquinas podem funcionar em modo manual ou automático. Na CFF utiliza-se o modo automático. Cada máquina-ferramenta possui ainda uma zona de armazenamento temporário da matéria prima para ser processada.

Os controladores dos robôs são programados na linguagem ACL³⁵, específica do fabricante, e podem funcionar em ambiente multi-tarefa. Cada controlador possui 16 entradas e 16 saídas digitais e 8 portas de comunicação série que obedecem à norma RS232C. Com a utilização das entradas e saídas digitais é possível comandar as máquinas-ferramenta através da interface DNC.

Considerando o equipamento envolvido, a CFF é constituída pelos subsistemas de processamento, transporte e armazenagem. O subsistema de processamento é constituído por três máquinas-ferramenta e pelo controlador do robô BR1. O subsistema de transporte é composto pelos robôs e respectivos controladores, as base lineares deslizantes e os transportadores. O subsistema de armazenagem é constituído pelo controlador do robô BR2 e pelo armazém.

³³ CNC - *Computer Numerical Control* na literatura Anglo-Saxónica.

³⁴ DNC - *Distributed Numerical Control* na literatura Anglo-Saxónica.

³⁵ ACL - *Advanced Control Language*, linguagem de programação dos robôs SCORBOT ER-VII.

Tal como foi referido anteriormente, a transferência de materiais entre os blocos funcionais faz-se através dos transportadores T1 e T2. O robô BR2 executa as tarefas de retirada de matéria prima do armazém e colocação nos transportadores T1 ou T2. É também função do robô BR2 o descarregamento das peças acabadas, colocando-as nos transportadores T4 ou T3, conforme a peça é submetida ao controlo de qualidade ou não, respectivamente.

O robô BR1 executa as tarefas de carregamento das máquinas com as matérias primas provenientes dos transportadores T1 ou T2, bem como o descarregamento, retirando as peças acabadas para as colocar em um dos transportadores. No caso da peça em fabrico implicar o seu processamento em mais do que uma máquina, o robô BR1 retira a peça semi-processada de uma máquina e coloca-a na outra.

3.3 Peças fabricáveis pela CFF

No quadro 3.1 apresentam-se as categorias de peças que se podem produzir na CFF. Esta classificação refere-se às diferentes formas de encaminhamento que uma peça pode ter dentro da CFF. As peças podem ser maquinadas apenas numa máquina ou em duas, sendo, neste último caso, uma delas o torno.

Peça	Código	Fresadora n.º 1	Fresadora n.º 2	Torno
tipoF1	1	1ª operação	-	-
tipoF2	2	-	1ª operação	-
tipoT	3	-	-	1ª operação
tipoF1T	4	1ª operação	-	2ª operação
tipoF2T	5	-	1ª operação	2ª operação
tipoTF1	6	2ª operação	-	1ª operação
tipoTF2	7	-	2ª operação	1ª operação

Quadro 3.1 Categorias de peças

No quadro 3.1 mostra-se a ordem de processamento em cada máquina para as várias categorias de peças. Por sua vez, para cada categoria pode produzir-se uma vasta gama de peças, dependendo do(s) programa(s) de maquinagem associado(s).

Relativamente às dimensões das peças, estas estão sobretudo limitadas pelas restrições impostas pelas máquinas-ferramenta. Assim, quanto às fresadoras a dimensão das peças está condicionada pelo curso da mesa segundo cada um dos eixos; neste caso é de 20cm segundo X e de 10cm segundo Y. A dimensão das peças a fabricar no torno está limitada pela distância máxima entre pontos e pelo curso da ferramenta; nesta máquina é de 6cm segundo X e de 10 cm segundo Z.

3.4 Fluxo de informação

Para que todos os equipamentos envolvidos possam realizar as tarefas que lhes são atribuídas, de forma coordenada, tem necessariamente de existir troca de informação entre eles. Esta necessidade de comunicação entre os diversos equipamentos é assegurada por sinais analógicos e digitais e por interfaces de comunicação série tipo RS232C.

Na figura 3.2 apresenta-se o fluxo de informação existente entre os diversos equipamentos, onde se especifica a direcção e o meio pelo qual se efectua a troca de informação: por sinais analógicos/digitais ou através de linhas de comunicação série.

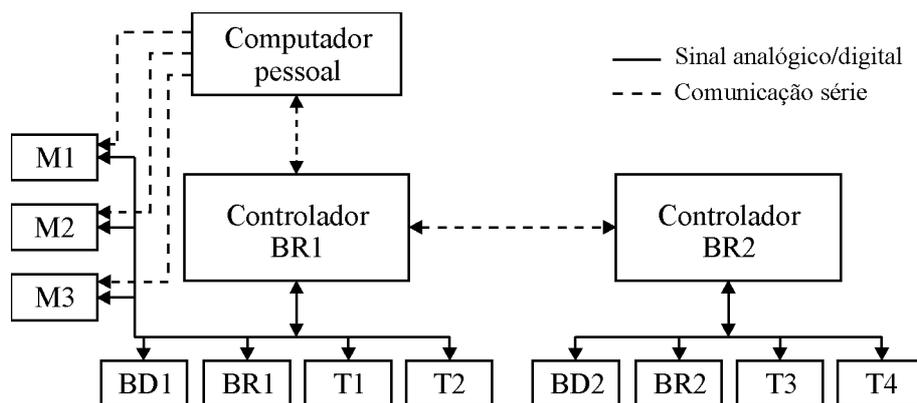


Figura 3.2 Diagrama do fluxo de informação na CFF

O computador pessoal executa as funções de planeamento e sequenciamento da produção e armazena os registos de inventário. O controlador do robô BR1 é o concentrador da informação necessária ao funcionamento em tempo real da CFF, controlando e monitorizando todas as operações que possam ocorrer. Controla as máquinas-ferramenta através da interface DNC, comunica com o controlador do robô BR2 e comanda os movimentos das juntas do robô BR1, da base deslizante BD1 e dos transportadores T1 e T2. O controlador do robô BR2 é responsável pelos movimentos de todas as suas juntas, da base deslizante BD2 e dos transportadores T3 e T4.

O fabrico de uma peça inicia-se com o envio dos respectivos dados, pelo computador ao controlador do robô BR1. Estes dados incluem a posição no armazém, onde se encontra a

matéria prima e o tipo de peça. Seguidamente, todas as tarefas elementares são desencadeadas pelo controlador. Este recebe informação dos diversos equipamentos sobre a evolução do fabrico, informa o computador acerca dos acontecimentos mais relevantes e solicita ao computador, caso seja necessário, o envio do(s) programa(s) de código g para as máquinas.

A comunicação entre o computador pessoal e o controlador do robô BR1 e entre este e o controlador do robô BR2 faz-se utilizando um protocolo descrito em [Mourão 93]. Seguidamente vão-se descrever as mensagens inerentes a esta comunicação.

3.4.1 Mensagens entre o computador pessoal e o controlador do robô BR1

A comunicação entre o computador pessoal e o controlador do robô BR1 é do tipo mestre/escravo em que o mestre é o controlador do robô. Assim, apenas este pode iniciar a transmissão de uma mensagem. No quadro 3.2 apresentam-se as mensagens enviadas pelo controlador do robô BR1 para o computador pessoal.

Designação	Descrição
INFPP	solicita informação da próxima peça
BUFFER	solicita informação da dimensão do armazenador temporário
CARMA	máquina foi carregada com matéria prima
ACTI	máquina começou a trabalhar
ACABOU	máquina acabou fabrico
PARAR	o programa do controlador do robô foi interrompido
PRINT	imprimir mensagem no monitor
CODGOK	programa de código g foi carregado com sucesso
POEBUFFER	colocada matéria prima no armazenador temporário
TIRABUFFER	retirada matéria prima do armazenador temporário
SAIUBLOCO1	peça saiu do bloco de maquina
TEMPO	tempo de início de fabrico da peça
TIRAMAQ	matéria prima ou peça retirada da máquina

Quadro 3.2 Mensagens do controlador do robô BR1 para o computador pessoal

Dado que o computador pessoal é escravo da comunicação, não tem a possibilidade de enviar uma mensagem sem que seja feito um pedido pelo controlador. Desta forma, no quadro 3.3 apresentam-se as mensagens de resposta do computador pessoal ao controlador do robô BR1. De notar que só em dois tipos de mensagem provenientes do controlador é que está subjacente

uma resposta. No caso de pedido de informação sobre nova peça a fabricar, em que a resposta pode ser NAOHAPECA, se não existir nenhuma ordem de fabrico, ou INFPP, se existir.

Designação	Descrição
NAOHAPECA	informação de que não há peça para fabricar
INFPP	informação da próxima peça a fabricar: <ul style="list-style-type: none"> – número da peça – número da matéria prima – número do alvéolo do armazém onde está a matéria prima – origem da matéria prima – destino da matéria prima – número do programa em código g a carregar na 1^a máquina – número do programa em código g a carregar na 2^a máquina – controlo de qualidade da peça – tempo de início de fabrico
BUFFER	informação da dimensão dos armazenadores temporários: <ul style="list-style-type: none"> – dimensão do armazenador temporário da máquina 1 – dimensão do armazenador temporário da máquina 2 – dimensão do armazenador temporário da máquina 3

Quadro 3.3 Mensagens do computador pessoal para o controlador do robô BR1

3.4.2 Mensagens entre os controladores dos robôs BR1 e BR2

A explicação pormenorizada deste tipo de mensagens está descrita em [Mourão 93]. No âmbito desta dissertação, não se alterou a comunicação entre os dois controladores. De forma resumida, e para que se perceba a interação existente entre os dois controladores, nos quadros 3.4 e 3.5 descrevem-se as mensagens.

Operação	Descrição
-	número da matéria prima
armazém	número do alvéolo do armazém onde se encontra a matéria prima
armazém	transportador onde deve colocar a matéria prima
receber peça	número de matéria prima
receber peça	número de peça
receber peça	transportador de onde deve retirar a matéria prima
receber peça	deve/não fazer controlo de qualidade
receber peça	pode tirar a peça do transportador

Quadro 3.4 Mensagens do controlador do robô BR1 para o do BR2

Operação	Descrição
armazém	já tem a matéria prima pronta a colocar no transportador
armazém	já colocou a matéria prima no transportador
receber peça	está pronto para retirar a peça do transportador
receber peça	já retirou a peça do transportador

Quadro 3.5 Mensagens do controlador do robô BR2 para o do BR1

3.5 Bloqueios

Os sistemas de fabrico flexível (SFF) devem actuar em função da natureza dinâmica dos processos de produção. Esta natureza dinâmica surge devido ao fluxo concorrente de peças em fabrico e à partilha de diferentes tipos de recursos. Estas características causam problemas de controlo, de que os bloqueios são um exemplo. Existem fundamentalmente duas abordagens diferentes para tratar este tipo de problemas: prevenção ou impedimento da sua ocorrência. O objectivo, quer da prevenção quer do impedimento dos bloqueios, é a inclusão no sistema de uma política de controlo que evite a sua ocorrência. As redes de Petri são uma das técnicas utilizadas para implementar estas abordagens [Viswanadham *et al.* 90].

A prevenção dos bloqueios define uma política de controlo de forma estática. Assim, após a sua implementação, assegura-se que o sistema não atinge situações indesejáveis de bloqueio. A prevenção dos bloqueios é aplicável, apenas, para sistemas de pequena dimensão e pode ter como resultado uma utilização reduzida dos recursos envolvidos.

Por outro lado, o impedimento da ocorrência de bloqueios pode-se aplicar a sistemas de fabrico de maiores dimensões em que se utiliza uma política dinâmica de alocação de recursos. Esta abordagem traduz-se numa monitorização do sistema e para cada estado deste, a política de controlo determina em tempo real, entre os possíveis estados futuros, aqueles que são os adequados para não provocarem bloqueios. Conhecendo estes estados, o comportamento do sistema é assim condicionado de forma a atingir um destes estados, impedindo assim que ocorram bloqueios.

3.5.1 Como surgem

O bloqueio no fluxo das peças em fabrico é uma situação em que a sua movimentação se torna impossível de acontecer. Na figura 3.3 apresenta-se uma situação típica em que ocorre bloqueio.

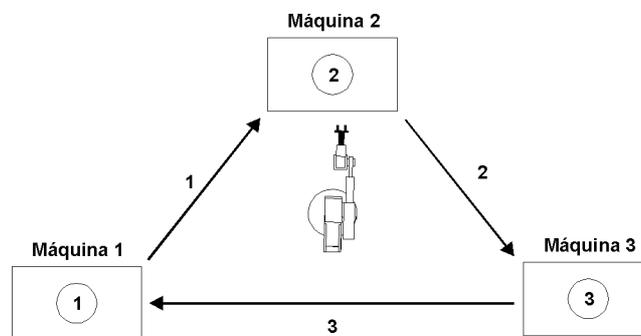


Figura 3.3 Fluxo das peças em fabrico com ocorrência de bloqueio

A peça 1 em fabrico na máquina 1 deve ir para a máquina 2. A peça 2 em fabrico na máquina 2 deve ir para a máquina 3. A peça 3 em fabrico na máquina 3 deve ir para a máquina 1. Portanto cada peça em fabrico deve aguardar pela disponibilidade da máquina que está ocupada com o fabrico de outra peça. Como as máquinas e o robô podem manusear apenas uma peça de cada vez, esta espera sucessiva causa uma situação de bloqueio no fluxo. Nesta situação, a movimentação de cada peça em fabrico não pode ocorrer sem a existência de um local temporário de armazenagem ou através da intervenção humana. Mesmo que as máquinas tenham armazenadores temporários locais, as situações de bloqueio podem ainda acontecer se os armazenadores temporários estiverem cheios.

3.5.2 Abordagem seguida

Como o problema em causa é de pequena dimensão, já que existem apenas três máquinas, implementou-se uma política de controlo com base na prevenção dos bloqueios. Desta forma, assegura-se que a CFF, durante a sua actividade, não atinge situações indesejáveis de bloqueio. Em seguida descreve-se a política implementada.

O sistema de controlo da CFF só se disponibiliza para a produção de uma nova peça se assegurar que dentro da célula existe espaço disponível para o seu fabrico. Após o envio de uma ordem de fabrico, pelo programa de gestão da CFF, e em função do tipo de peça a fabricar, o sistema de controlo reserva espaço nos armazenadores temporários das várias máquinas envolvidas. Durante as diversas fases da produção, sempre que esse espaço é ocupado pela respectiva matéria prima, a sua reserva é anulada. As rotinas *RESLU*, *TRRES* e *LIRES* implementam esta política de controlo e a descrição do respectivo funcionamento encontra-se no apêndice A deste documento.

3.6 Armazenadores temporários

Os armazenadores temporários são zonas transitórias de armazenamento de materiais utilizadas para a movimentação destes entre as estações de processamento e os sistemas de transporte. Os armazenadores temporários podem servir como filas de espera para os materiais antes e depois do seu processamento.

Num sistema de fabrico flexível podem existir três tipos de armazenadores temporários: armazenadores temporários de entrada, armazenadores temporários de saída e armazenadores temporários comuns. Os armazenadores temporários de entrada e de saída são apenas para os materiais que entram ou saem em determinada unidade funcional, respectivamente. Os armazenadores temporários comuns podem acomodar quer os materiais que entram quer os que saem.

A instalação de armazenadores temporários é dispendiosa em custo e em espaço utilizável, especialmente em SFF onde é necessário equipamento com dispositivos automáticos para a transferência dos materiais. Portanto, um aspecto importante a ter em consideração, quando se projecta um SFF, é o dimensionamento conveniente dos armazenadores temporários. Uma das ferramentas úteis para o seu dimensionamento é a simulação como se pode ver pelo estudo efectuado em [ElMaraghy *et al.* 82]. Em [Solot *et al.* 94] pode encontrar-se uma referência à principal literatura existente que aborda o problema do dimensionamento dos armazenadores temporários em SFF, através de modelos analíticos.

3.6.1 Necessidade da sua existência

Todas as operações nas máquinas demoram um certo tempo de processamento. Isto implica que a taxa dos pedidos de processamento a um sistema seja limitada; de contrário, os pedidos ocorrem a uma taxa superior àquela a que podem ser processados. As peças a fabricar devem então ser colocadas nos armazenadores temporários ou, no pior caso, nos sistemas de transporte, enquanto aguardam pela disponibilidade das máquinas.

Os armazenadores temporários de entrada contribuem para uma alimentação regular das estações de processamento respectivas. Os armazenadores temporários de saída evitam que o material processado permaneça nas máquinas e, portanto, contribuem para uma maior taxa de utilização das máquinas [ElMaraghy *et al.* 82].

3.6.2 Abordagem seguida

Implementou-se um armazenador temporário de entrada para cada máquina. Na figura 3.4 apresentam-se as máquinas com os respectivos armazenadores temporários.

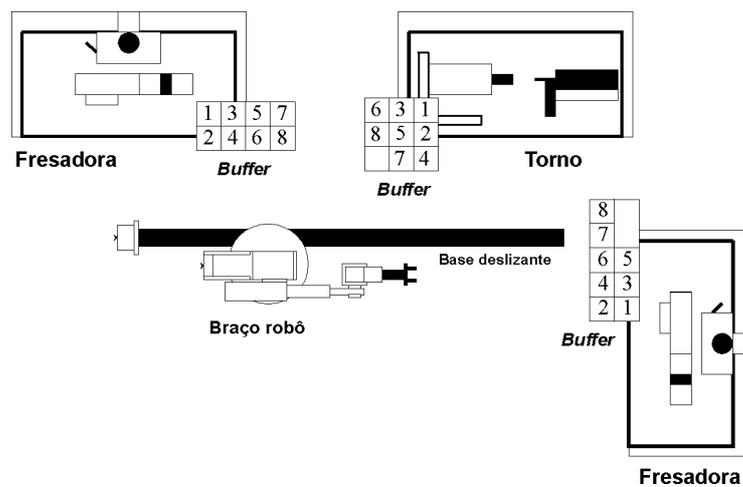


Figura 3.4 Armazenadores temporários das máquinas-ferramenta

Cada armazenador temporário possui oito posições físicas; no entanto, o número de posições utilizável pode alterar-se por configuração. O programa gestor da célula, no início de cada sessão, estabelece um diálogo com o controlador do robô BR1, que permite definir a dimensão dos armazenadores temporários. Assim, a dimensão dos armazenadores temporários pode ser configurada, de forma independente, para cada uma das máquinas e pode ter um valor compreendido entre um e oito.

A gestão dos armazenadores temporários faz-se de forma a privilegiar a ocupação dos alvéolos livres situados na zona mais próxima do local de processamento nas máquinas. Na figura 3.4, esta zona dos armazenadores temporários corresponde à numeração mais baixa dos alvéolos. Assim, sempre que é necessário colocar matéria prima nos armazenadores temporários, desde que exista um alvéolo livre nessa zona, este é ocupado. A rotina que implementa esta tarefa denomina-se *POEBU*. A respectiva descrição encontra-se no apêndice A deste documento.

A retirada da matéria prima faz-se segundo a ordem de entrada no armazenador temporário³⁶. A rotina que implementa esta tarefa denomina-se *TIRBU*. A sua descrição encontra-se no apêndice A deste documento. Assim, se se pretender alterar a regra de despacho associada à retirada da matéria prima do armazenador temporário, terá que se alterar apenas esta rotina.

A colocação e a retirada da matéria prima é efectuada pelo robô BR1.

3.7 Carregamento automático dos programas de maquinagem

O carregamento automático dos programas de maquinagem nas máquinas-ferramenta é fundamental para a flexibilidade da CFF. Permite que, durante a sessão de trabalho, se possa processar na mesma máquina a matéria prima de forma diversa.

3.7.1 Limitações do sistema

As máquinas-ferramenta utilizadas possuem um interface DNC que permite comandar e monitorar os respectivos estados a partir do exterior. Os sinais de comando e de monitorização disponíveis para cada máquina apresentam-se nos quadros 3.6 e 3.7, respectivamente:

Comando
executar programa
abrir/fechar sistema de aperto
manual/automático
carregar programa

Quadro 3.6 Sinais de comando das máquinas-ferramenta

Monitorização
sistema de aperto fechado
sistema de aperto aberto
modo automático
programa em execução
programa interrompido

Quadro 3.7 Sinais de monitorização das máquinas-ferramenta

A linguagem de programação interpretada pelo controlador de máquinas-ferramenta de controlo numérico³⁷ — código g — está normalizada pela EIA³⁸ com os códigos RS-273-A e RS-274-B que especificam o formato do bloco de variáveis de cada instrução. A explicação pormenorizada das normas ultrapassa o âmbito desta dissertação, pelo que apenas se

³⁶ FIFO - *First In First Out* na literatura Anglo-Saxónica.

³⁷ NC - Numerical Control na literatura Anglo-Saxónica.

³⁸ Electronics Industries Association, organismo existente nos Estados Unidos.

apresentam, no quadro 3.8, alguns exemplos de funções auxiliares, úteis para a resolução do problema do carregamento automático de programas de código g.

Código	Função	Descrição
m00	paragem de programa	para prosseguir a execução do programa é necessário pressionar uma tecla de comando da consola ou receber comando exterior para executar programa.
m02	fim de programa	indica o fim da operação de maquinagem da peça.

Quadro 3.8 Exemplo de funções auxiliares

Da informação mostrada nos quadros 3.6 e 3.7, constata-se que, apesar de existir comando para carregar um programa de código g na máquina, não existe informação disponível que indique o momento em que o programa acabou de ser carregado. A presença desta informação é importante pois, após se saber que o programa está carregado, têm que se executar outras tarefas. Seguidamente descreve-se a forma como esta limitação foi ultrapassada.

3.7.2 Abordagem seguida

Os processos *CODGn*, residentes no controlador do robô BR1, através da interface DNC, preparam as máquinas-ferramenta para o carregamento automático e execução dos programas de maquinagem. A descrição destes processos encontra-se no apêndice A deste documento. O programa de gestão da CFF, residente no computador pessoal, efectua o carregamento dos programas através de três portas de comunicação série. Cada porta de comunicação está ligada à respectiva máquina. A descrição do programa de gestão da CFF encontra-se na secção 3.10.1.

Como se referiu anteriormente, é necessária a confirmação, por parte do controlador do robô BR1, de que o programa foi carregado. Em face das limitações que o equipamento existente oferece e do objectivo pretendido, optou-se pela solução que seguidamente se descreve.

Ao programa em código g a enviar para a máquina, existente em ficheiro no computador pessoal, é-lhe introduzido um cabeçalho que permite implementar um protocolo simples com o controlador do robô. Este cabeçalho é constituído, apenas, pela instrução “m00”, e é acrescentado pela rotina responsável pelo seu carregamento a partir do computador pessoal.

Assim, o controlador do robô, após ter dado ordem para a máquina receber o programa em código g, através do comando “carregar programa”, informa o computador pessoal. Este começa a enviá-lo através da porta série. O controlador do robô, periodicamente, tenta colocar

o programa em execução com o comando “executar programa”. De notar que só é possível executar o programa, quando este estiver totalmente carregado. Desta forma, após a conclusão do carregamento do programa em código g este é “imediatamente” mandado executar. Ao ocorrer a primeira instrução do programa “m00”, a execução do programa é suspensa e simultaneamente aparece o sinal de monitorização “programa interrompido”. O controlador do robô fica então a saber que o programa está carregado e informa o computador pessoal. O programa só continua a sua execução após ser dada nova ordem por parte do controlador através do comando “executar programa”. Em resumo, o controlador do robô reconhece o carregamento quando lhe é indicado pelo sinal de monitorização “programa interrompido” originado pela instrução “m00”.

3.8 Sequenciamento

Esta actividade do sistema produtivo está implementada numa rotina que faz parte do módulo *sequenci.c*. Pela sua modularidade, na implementação do sequenciamento, facilmente podem ser utilizadas outras abordagens e integradas no programa de gestão da CFF. Seguidamente vai-se descrever a abordagem implementada.

Para o período de tempo T , equivalente ao período de produção, e para cada tipo de peça j consideram-se as seguintes grandezas [Akella *et al.* 84]:

- A procura $D_j(T)$ a satisfazer é o número de peças do tipo j que o mercado consome durante o período de tempo T .
- A produção acumulada $W_j(t)$ é a porção total de peças do tipo j produzidas até ao instante de tempo t .
- A taxa de procura é dada pela expressão:

$$d_j = D_j(T)/T$$

- O excesso de produção $x_j(t)$, no instante de tempo t , é a diferença entre a produção acumulada e a procura de peças do tipo j :

$$x_j(t) = W_j(t) - D_j(t)$$

em que $D_j(t) = t \cdot d_j$

Na figura 3.5 mostra-se um exemplo da evolução da produção acumulada $W_j(t)$ que tenta acompanhar a procura acumulada $D_j(t)$. O objectivo é conseguir-se a satisfação da produção num instante de tempo que seja o mais próximo possível do fim do período de produção T , mantendo $x_j(t)$ próximo de zero.

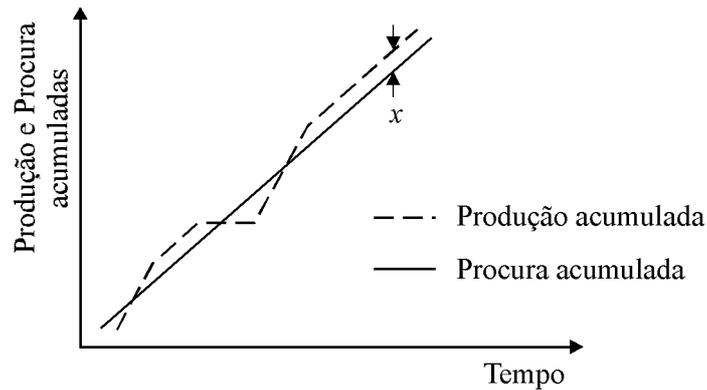


Figura 3.5 Evolução da produção e da procura

3.8.1 Algoritmo implementado

Este algoritmo baseia-se na quantidade de matéria prima que já deu entrada no sistema [Akella *et al.* 84]. Para cada tipo de peça, a produção acumulada considera-se como sendo o número total dessas peças que estão ou já terminaram a fase de processamento. É igual ao número de peças já produzidas ($PDONE_j$) mais o número de peças em fase de produção ($PINSYS_j$). Assim,

$$W_j(t) = PDONE_j(t) + PINSYS_j(t)$$

Este algoritmo produz uma ordem de fabrico para o tipo de peça que está mais atrasado na procura acumulada, ou seja, produz uma ordem de fabrico para a peça do tipo j , quando x_j é mínimo.

Devem ser definidos alguns limites no número total de peças em fabrico no sistema, de forma a evitar a sobrecarga dos armazenadores temporários e do sistema de transporte. Define-se N_j como o número máximo admissível de peças em fabrico do tipo j no sistema. O desempenho de um SFF é consideravelmente degradado na falta desta restrição, uma vez que os materiais se acumulam nos armazenadores temporários ou nos sistemas de transporte, causando congestionamentos e impedindo que outros materiais cheguem às máquinas. Além do sistema produzir abaixo das expectativas, a capacidade efectiva também é reduzida.

Por outro lado, os armazéns de produtos acabados têm limites de capacidade e os custos adicionais de armazenamento podem ser elevados. Assim, é importante a existência de um limite E_j de excesso de produção, também designado por *stock* de segurança que é o diferencial entre a procura e o valor da produção. Portanto, pretende-se que $x_j \leq E_j$.

Em seguida, descreve-se o pseudocódigo do algoritmo implementado.

Para cada ciclo do programa fazer:

1. Não gerar ordem de fabrico para a peça j se $PINSYS_j > N_j$;
2. Não gerar ordem de fabrico para a peça j se $x_j(t) > E_j$;
3. Não gerar ordem de fabrico para a peça j se $W_j(t) > D_j(T)$, ou seja, se a produção acumulada no instante de tempo t excede a procura acumulada para o período de produção T ;
4. Para os restantes tipos de peças, considera-se o tipo j que minimiza $x_j(t)$, ou seja, gera-se uma ordem de fabrico para a peça cuja produção acumulada se encontra menos adiantada ou mais atrasada relativamente à produção pretendida.

Segundo a lei de Little [Akella *et al.* 84], o número médio de peças do tipo j em processamento, N_j , depende do tempo médio de fluxo, w_j , e da taxa de entrada dessas peças, d_j , de acordo com a expressão:

$$N_j = d_j \cdot w_j$$

Esta lei é útil para a estimativa do número de peças em fabrico no sistema. De salientar que para N_j traduzir um valor realista, w_j deve incluir todos os tempos envolvidos, como o tempo de processamento, o tempo de transporte, e o tempo de espera.

Na secção 4 apresenta-se um exemplo ilustrativo do funcionamento da CFF em que se pode observar o resultado do sequenciamento gerado por este algoritmo.

3.9 Gestão dos recursos

Na CFF existem vários recursos que são partilhados. Estes recursos são geridos, sobretudo, pelo controlador do robô BR1. Alguns exemplos mais elucidativos são o próprio robô BR1, os transportadores e a porta de comunicação série com o computador pessoal. A sua utilização tem, portanto, de realizar-se de forma ordenada. Em função das facilidades oferecidas pela linguagem de programação dos controladores utilizados e pela natureza do problema, optou-se por associar a cada recurso partilhado um testemunho³⁹. Apenas uma entidade pode possuir o testemunho. Assim, qualquer entidade que necessite de utilizar um recurso só o pode fazer se estiver na posse do respectivo testemunho.

³⁹ *TOKEN* na literatura Anglo-Saxónica.

3.10 Descrição dos programas

A implementação da CFF exigiu o desenvolvimento de dois tipos de programas:

1. Os programas residentes nos controladores dos robôs, desenvolvidos na linguagem ACL, que controlam os sistemas de fabrico e de transporte.
2. O programa residente no computador pessoal que supervisiona e monitoriza as actividades de produção. Este programa é constituído por vários módulos e foi desenvolvido na linguagem de programação C. O módulo *cff.c* contém o corpo do programa e é responsável pelo diálogo com o controlador do robô BR1. O módulo *sequenci.c* contém a rotina que gera o sequenciamento das peças para produção. O módulo *com.c* é responsável pela gestão das portas de comunicação série, que comunicam com o controlador do robô BR1 e com as máquinas-ferramenta. O módulo *enviacnc.c* é responsável pelo carregamento dos programas de maquinaria nas máquinas-ferramenta.

3.10.1 Programa de gestão da CFF

Este programa faz o planeamento da produção das peças e comunica as ordens de produção ao controlador do robô Br1. Como se pode verificar, no fluxograma apresentado na figura 3.6, o programa *cff.c*, após a inicialização das variáveis, entra em ciclo de onde apenas sai por vontade expressa pelo utilizador ou se receber, do controlador do robô Br1, a mensagem *PARAR*. Durante o ciclo, o programa está receptivo a mensagens do controlador do robô Br1 e, caso receba alguma mensagem, executa a acção correspondente. Na fase inicial de uma sessão de trabalho, o controlador pede ao computador a configuração dos armazenadores temporários. A partir daí as mensagens ocorrem em função do desenrolar das actividades dentro da célula e dos pedidos de fabrico de peças estabelecidos pelo sequenciamento. Em cada passagem do ciclo, o programa invoca a rotina “scheduling” que toma as decisões de planeamento da produção. Esta rotina contém o algoritmo já anteriormente descrito na secção 3.8.1. O programa encontra-se em ciclo até se satisfazer a produção das peças definida pela rotina “scheduling”.

O utilizador, durante a sessão de trabalho, vai sendo informado acerca dos acontecimentos mais relevantes que ocorrem na CFF. No fim de cada sessão é registado num ficheiro o resultado da produção.

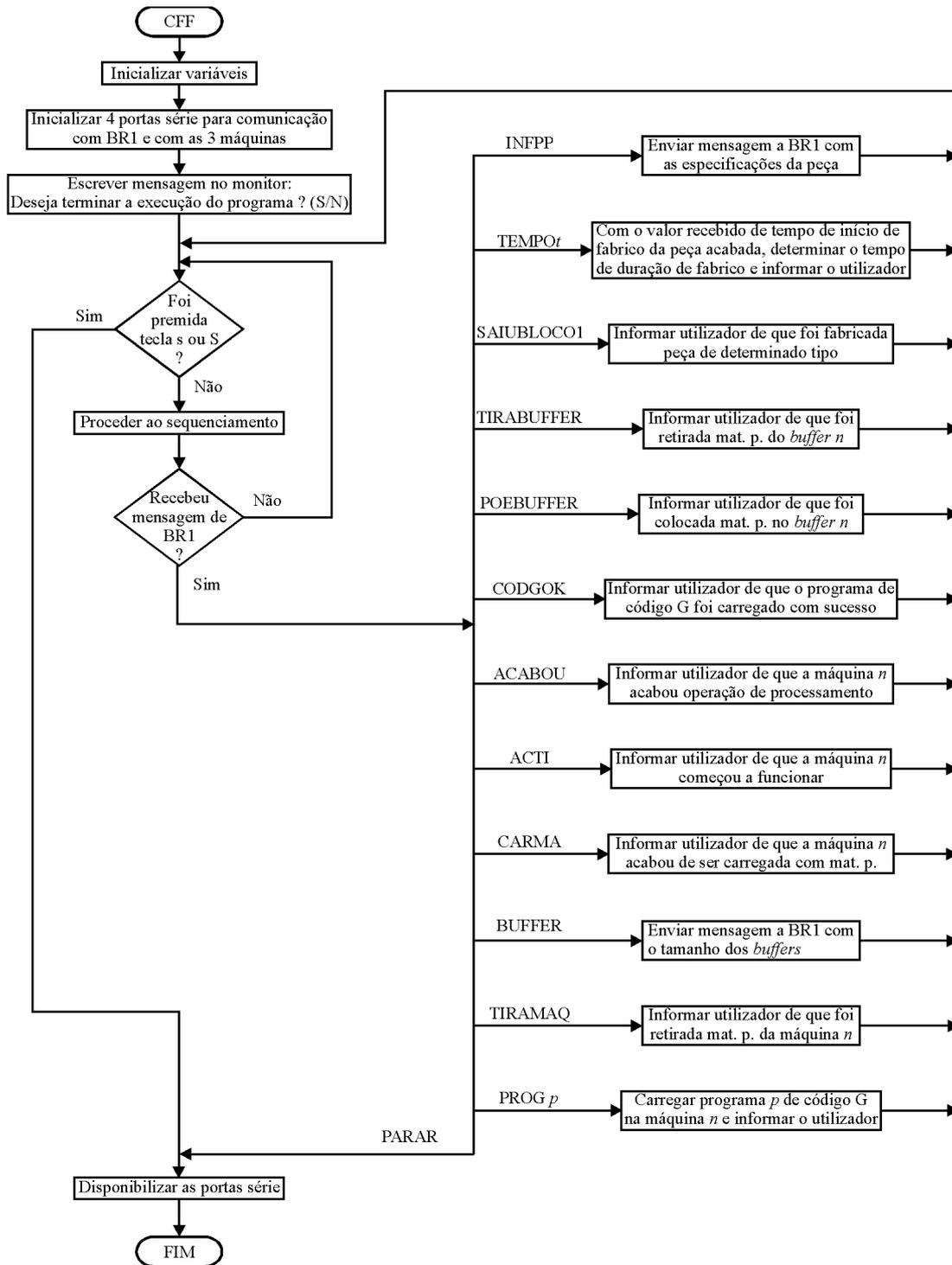


Figura 3.6 Fluxograma do programa cff.c

3.10.2 Programas do controlador BR1

De forma a aumentar a flexibilidade e versatilidade do sistema de controlo da CFF, o trabalho realizado centrou-se sobretudo ao nível dos programas residentes no controlador do robô BR1.

No quadro 3.9 apresenta-se uma listagem com uma breve descrição dos processos e rotinas residentes neste controlador.

Nome do programa	Descrição
<i>PROD</i>	Processo que inicializa as variáveis globais. Coloca em funcionamento os processos que se mantêm em execução durante toda a sessão.
<i>INFPP</i>	Processo responsável pelo estabelecimento do diálogo com o programa gestor da célula, de forma a obter os dados acerca da nova peça a produzir.
<i>POLIN</i>	Processo que estabelece o ritmo dos pedidos ao programa gestor da célula, residente no computador pessoal.
<i>PEDMP</i>	Processo que pede ao controlador do robô BR2 a matéria prima.
<i>PORM1</i>	Processo responsável pela colocação da matéria prima na máquina 1.
<i>PORM2</i>	Processo responsável pela colocação da matéria prima na máquina 2.
<i>PORM3</i>	Processo responsável pela colocação da matéria prima na máquina 3.
<i>ACTI1</i>	Processo que copia os valores das variáveis da próxima peça a processar na máquina 1 para as variáveis da peça actual da máquina 1.
<i>ACTI2</i>	Processo que copia os valores das variáveis da próxima peça a processar na máquina 2 para as variáveis da peça actual da máquina 2.
<i>ACTI3</i>	Processo que copia os valores das variáveis da próxima peça a processar na máquina 3 para as variáveis da peça actual da máquina 3.
<i>CARM1</i>	Processo responsável pelo carregamento da máquina 1 com matéria prima.
<i>CARM2</i>	Processo responsável pelo carregamento da máquina 2 com matéria prima.
<i>CARM3</i>	Processo responsável pelo carregamento da máquina 3 com matéria prima.
<i>CODG1</i>	Processo responsável pelo carregamento do programa de código G na máquina 1.
<i>CODG2</i>	Processo responsável pelo carregamento do programa de código G na máquina 2.
<i>CODG3</i>	Processo responsável pelo carregamento do programa de código G na máquina 3.
<i>DEVR2</i>	Processo que retira a peça acabada de uma máquina e coloca-a num dos transportadores para posteriormente ser retirada pelo robô BR2.
<i>TIRAT</i>	Rotina utilizada para retirar a matéria prima dos transportadores T1 ou T2.
<i>TIRAM</i>	Rotina utilizada para retirar matéria prima ou peças acabadas das máquinas.
<i>POEBU</i>	Rotina utilizada para colocação da matéria prima nos armazenadores temporários das diversas máquinas.
<i>TIRBU</i>	Rotina utilizada para retirada da matéria prima dos armazenadores temporários das diversas máquinas.
<i>POSCL</i>	Rotina utilizada para o cálculo das coordenadas físicas dos alvéolos dos armazenadores temporários das diversas máquinas.
<i>RESLU</i>	Rotina utilizada para tentar reservar espaço nos armazenadores temporários das diversas máquinas.
<i>TRRES</i>	Rotina utilizada para tratar a reservar de espaço nos armazenadores temporários das diversas máquinas.
<i>LIRES</i>	Rotina utilizada para libertar o espaço reservado nos armazenadores temporários das diversas máquinas.
<i>DESTI</i>	Rotina utilizada para determinar qual a próxima máquina em que o material vai ser processado.
<i>QCODG</i>	Rotina utilizada para determinar qual o programa de código G que deve ser carregado na máquina onde a matéria prima vai ser processada.

Quadro 3.9 Lista dos programas residentes no controlador do robô BR1

Os controladores dos robôs permitem a execução dos programas em regime de multi-tarefa. Assim, todos os processos, com a exceção do processo PROD, estão permanentemente em execução. Por sua vez, as rotinas, quando invocadas pelos processos, são executadas apenas durante o tempo necessário ao respectivo processamento. Em apêndice a este documento apresenta-se a descrição abreviada, com os respectivos fluxogramas, dos processos e rotinas residentes no controlador do robô BR1.

3.10.3 Programas do controlador BR2

Estes programas não foram alterados no âmbito desta dissertação,. A sua descrição encontra-se no documento [Mourão 93]. A sua utilização limitou-se à execução dos mesmos, pois o controlador BR2 funciona como *escravo* do controlador do robô Br1. No entanto, para uma compreensão das tarefas que o robô BR2 realiza, no quadro 3.10 apresenta-se uma listagem com uma breve descrição dos processos e rotinas residentes neste controlador.

Nome do programa	Descrição
<i>ESPIN</i>	Processo que inicializa as variáveis globais. É responsável pelo diálogo com o controlador do robô BR1 e executa as ordens ordenadas por este.
<i>ARMAZ</i>	Rotina que retira a matéria prima do armazém. e a rotina <i>VOLTA</i> é responsável por desencadear as acções necessárias à recepção das peças fabricadas colocadas nos transportadores T1 ou T2.
<i>VOLTA</i>	Rotina responsável por desencadear as acções necessárias à recepção das peças fabricadas que estão colocadas nos transportadores T1 ou T2.

Quadro 3.10 Lista dos programas residentes no controlador do robô BR2

3.11 Exploração da CFF

Para a operação da CFF é necessário, para além da colocação em funcionamento de todo o equipamento e da colocação do material no armazém, um ficheiro com os dados relativos à sessão de fabrico que se pretende realizar. Após o início da sessão não é necessária a intervenção humana. No entanto, o operador pode averiguar o desenrolar da produção através do monitor do computador pessoal. No fim da sessão, o resultado da produção é registado num ficheiro. Esta informação é útil para análise do comportamento da CFF face à utilização do algoritmo de sequenciamento. Seguidamente descrevem-se os ficheiros de dados referidos e o tipo de informação disponível para o operador da CFF, com base num exemplo ilustrativo do seu funcionamento.

3.11.1 Informação fornecida à CFF

Descreve-se, a seguir, a informação fornecida à CFF de modo a que se possam produzir as peças pretendidas durante uma sessão de fabrico.

O quadro 3.11 representa um exemplo de ficheiro que contém os dados a fornecer à CFF, relativos a uma sessão de fabrico. Na primeira linha do ficheiro indica-se o número de categorias de peças que se vão fabricar. Na segunda linha indica-se o código relativo ao algoritmo a utilizar no sequenciamento que, no exemplo apresentado, se refere ao algoritmo descrito na secção 3.8.1. A terceira linha contém o período de tempo, em segundos, durante o qual irão ser geradas ordens de fabrico, que, no caso, é de duas horas. Seguidamente aparecem tantas linhas quantas as definidas pelo número de categorias de peças a fabricar. Assim, por cada linha definem-se os dados para cada categoria. Na primeira coluna indica-se o código da categoria das peças de acordo com o quadro 3.1, referido na secção 3.3. Na segunda coluna indica-se a taxa de procura para a respectiva categoria. Nas restantes duas colunas indica-se o *stock* de segurança e o número máximo admissível de peças em fabrico da categoria, respectivamente.

4			
1			
7200			
1	0.0016	1.0	2.0
2	0.001	1.0	2.0
3	0.001	1.0	2.0
4	0.002	1.0	2.0

Quadro 3.11 Exemplo da informação fornecida à CFF

3.11.2 Informação de monitorização

O operador, durante uma sessão de fabrico, é informado dos acontecimentos mais relevantes que ocorrem na CFF. Esta informação é apresentada no monitor do computador pessoal, onde reside o programa de gestão da CFF. No quadro 3.12 apresenta-se um extracto da informação obtida durante uma sessão de trabalho.

```

16:02:45 Tamanho dos buffers: maq.1= 8 maq.2= 8 maq.3= 8
1 16:02:46 Pedido de informacao da proxima peca para a maquina
           tipoF1 MAT.P= 1 CELUL= 1 ORIG= 4 DEST= 4 CNC1=110 CNC2= 0 CQ= 3
1 16:03:41 Esta a carregar programa de codigo G n.110 na maquina
1 16:04:03 Codigo G acabou de ser carregado na maquina
1 16:04:14 Maquina acabou de ser carregada com materia prima
1 16:04:22 Maquina comecou a funcionar
1 16:04:23 Pedido de informacao da proxima peca para a maquina
           tipoF1T MAT.P= 1 CELUL= 1 ORIG= 4 DEST= 4 CNC1=110 CNC2=120 CQ= 3
1 16:05:32 Materia prima colocada no buffer da maquina
3 16:05:53 Pedido de informacao da proxima peca para a maquina

```

```

tipoF2 MAT.P= 1 CELUL= 1 ORIG= 4 DEST= 4 CNC1=130 CNC2= 0 CQ= 3
3 16:06:47 Esta a carregar programa de codigo G n.130 na maquina
3 16:07:09 Codigo G acabou de ser carregado na maquina
3 16:07:16 Maquina acabou de ser carregada com materia prima
3 16:07:21 Maquina comecou a funcionar
2 16:07:32 Pedido de informacao da proxima peca para a maquina
tipoT MAT.P= 1 CELUL= 2 ORIG= 4 DEST= 4 CNC1=120 CNC2= 0 CQ= 4
2 16:08:21 Esta a carregar programa de codigo G n.120 na maquina
1 16:08:35 Maquina acabou
2 16:08:43 Codigo G acabou de ser carregado na maquina
2 16:08:48 Maquina acabou de ser carregada com materia prima
2 16:08:52 Maquina comecou a funcionar
1 16:09:03 Pedido de informacao da proxima peca para a maquina
tipoF1T MAT.P= 1 CELUL= 1 ORIG= 4 DEST= 4 CNC1=110 CNC2=120 CQ= 3
1 16:09:25 Materia prima ou peca retirada da maquina
;16:09:50; Peca; tipoF1; fabricada e demorou ;422; seg.
1 16:10:26 Materia prima colocada no buffer da maquina
1 16:10:56 Pedido de informacao da proxima peca para a maquina
tipoF1 MAT.P= 1 CELUL= 1 ORIG= 4 DEST= 4 CNC1=110 CNC2= 0 CQ= 3
1 16:10:59 Materia prima retirada do buffer da maquina
1 16:11:26 Maquina acabou de ser carregada com materia prima
1 16:11:34 Maquina comecou a funcionar
2 16:11:56 Maquina acabou
...

```

Quadro 3.12 Exemplo da informação apresentada ao operador

Para cada acontecimento apresentado, indica-se o instante de tempo da sua ocorrência e a máquina que lhe deu origem.

3.11.3 Informação fornecida pela CFF

Após o encerramento de uma sessão de trabalho é gerado um ficheiro com o resultado da produção. O ficheiro contém informação das condições em que se realizou a sessão e o tipo de peças fabricadas com os respectivos tempos de fluxo. Um exemplo desse ficheiro é apresentado no quadro 3.13. A parte inicial do ficheiro contém um registo das condições em que se realizou a sessão. Em seguida referem-se as peças produzidas com os respectivos instantes de finalização e tempos de fluxo. Na primeira e última linha do ficheiro indica-se o instante de início e fim da sessão de fabrico.

```

Inicio sessao: 16:02:36 6-6-1996
Tamanho dos buffers das maquinas: maq1 = 8 maq2 = 8 maq3 =
8
Numero de tipo de pecas diferentes: 4
Politica de sequenciamento: 1
Periodo de fabrico: 7200
Tipo peca      Taxa procura  Excesso          Numero
pecas no sistema
tipoF1         0.0016         1.0000           2.0000
tipoF2         0.0010         1.0000           2.0000

```

tipoT	0.0010	1.0000	2.0000
tipoF1T	0.0020	1.0000	2.0000
Pecas produzidas:			
16:09:50	tipoF1	422	
16:13:09	tipoT	335	
16:14:31	tipoF2	516	
16:20:16	tipoT	462	
16:23:02	tipoF2	638	
16:26:32	tipoF1T	1328	
16:30:49	tipoF2	689	
16:32:06	tipoT	755	
16:33:51	tipoF1	1373	
16:36:47	tipoF1T	1662	
16:42:32	tipoT	369	
16:44:30	tipoF2	498	
16:46:26	tipoF1	1783	
16:48:13	tipoF1T	2064	
16:52:28	tipoF1	1727	
16:59:26	tipoT	375	
17:01:56	tipoF2	536	
17:05:01	tipoF1T	2281	
17:06:17	tipoF1	1918	
17:15:41	tipoT	358	
17:17:52	tipoF2	500	
17:19:05	tipoF1	1934	
17:20:45	tipoF1T	2634	
17:28:58	tipoF1T	2407	
17:31:46	tipoF1	2221	
17:33:25	tipoT	436	
17:34:57	tipoF2	538	
17:41:38	tipoF1T	2181	
17:44:20	tipoF1	2248	
17:50:24	tipoT	410	
17:51:36	tipoF1	1925	
17:53:26	tipoF2	610	
18:01:28	tipoF1T	2409	
18:07:59	tipoF1T	2318	
18:10:47	tipoF1	2336	
18:20:36	tipoF1T	2326	
18:23:24	tipoF1	2262	
18:29:33	tipoF1	2251	
18:39:23	tipoF1T	2263	
18:46:21	tipoF1T	2290	
18:53:21	tipoF1T	1959	
18:59:37	tipoF1T	1210	
19:05:54	tipoF1T	1158	
Fim sessao: 19:33:46 6-6-1996			

Quadro 3.13 Ficheiro com o resultado da produção

4. Modelo de simulação da CFF

Cada vez mais se utiliza a simulação como uma ferramenta de análise de um determinado modelo da realidade, devido à complexidade e ao número elevado de variáveis envolvidas nos processos a estudar. Os processos nem sempre se podem analisar através de abordagens matemáticas e métodos de optimização e, mesmo nos casos em que se podem utilizar estas abordagens, pode tornar-se numa tarefa bastante difícil. Assim, a modelação combinada com a simulação e a animação gráfica são um conjunto de ferramentas para análise e optimização dos processos dinâmicos no tempo.

O problema da optimização surge como resultado do conflito na utilização dos recursos, que são escassos. A simulação pode gerar soluções boas para problemas complexos, mas raramente coincidem com a solução óptima.

Neste capítulo referem-se abreviadamente as potencialidades do Simple++, que foi a ferramenta de simulação utilizada. Descreve-se também o modelo de simulação da CFF apresentada no capítulo 3.

4.1 SIMPLE++

O Simple++ é um ambiente de modelação e simulação vocacionado para representação de sistemas de grande escala, desenvolvido conjuntamente por Fraunhofer—*Institut for Produktionstechnics und Automation* e AESOP GmbH [Simple++ 94].

Através de uma apresentação gráfica de interacção homem-máquina, o Simple++ oferece ao utilizador um ambiente orientado por objectos, tendo, por isso, determinadas características próprias, como sejam a herança, a instanciação e o encapsulamento. Assim, a partir de classes, formadas por objectos básicos, podem criar-se instâncias que herdam as propriedades da classe. As alterações que possam acontecer nas classes são transmitidas automaticamente às respectivas instâncias. O encapsulamento permite que o utilizador de um objecto tenha que conhecer, apenas, o seu interface, desconhecendo o seu funcionamento e estrutura internas.

Os objectos têm associada informação que contém as propriedades, capacidades e funções de acesso. Para além das propriedades originais de cada objecto, é possível definir outras em função da utilização. Os objectos têm, por defeito, um determinado comportamento, que pode alterar-se definindo novas funções. Estas funções são implementadas através da linguagem de programação SIMTALK.

Um modelo é constituído por um agregado de objectos básicos e por outros modelos que podem trocar informação entre si durante a simulação. O fluxo do programa de simulação é comandado pelos acontecimentos a que os objectos estão sujeitos. O tempo que decorre entre dois acontecimentos sucessivos é calculado automaticamente e o programa “salta” de evento em evento. Assim, os intervalos de tempo são considerados, mas a duração da simulação não é afectada por eles. Apenas os acontecimentos são relevantes (simulação de acontecimentos discretos).

O Simple++ proporciona, ainda, capacidade de análise e conseqüente resolução de erros de programação, edição gráfica e de texto, animação das simulações que permite observar o comportamento dinâmico do modelo, apresentação de estatísticas durante e após as simulações e possui interfaces para bases de dados, sistemas de CAD e outras linguagens de programação.

4.1.1 Classes de objectos básicos

Os objectos básicos, existentes por defeito, permitem a construção de novos modelos e são classificados de acordo com as suas propriedades e capacidades. Assim, existem os objectos básicos de fluxo de materiais e os de fluxo de informação. Por sua vez, dividem-se em objectos móveis e fixos e, ainda, em objectos activos e passivos. No quadro 4.1 representam-se as diversas classes de objectos básicos do Simple++.

Objectos básicos							
Objectos de fluxo de materiais				Objectos de fluxo de informação			
Móveis		Imóveis		Móveis		Imóveis	
Activos	Passivos	Activos	Passivos	Activos	Passivos	Activos	Passivos
- Container	- Transporter - Entity	- SingleProc - ParallelProc - SerialProc - Line	- Track - Warehouse		- Data	- Controls - Generator	- StackFile - QueueFile - CardFile

Quadro 4.1 Classes de objectos básicos do Simple++

Objectos de fluxo de materiais

Os objectos básicos de fluxo de materiais correspondem às entidades físicas do sistema a modelar, como, por exemplo, máquinas-ferramenta, transportadores, AGVs e outras entidades com massa. As operações associadas a estes objectos implicam um dispêndio de tempo.

Os objectos de fluxo de materiais móveis podem mudar a sua localização. São activos quando possuem meios de propulsão próprios como é o caso dos AGVs, empilhadores ou operários.

Os passivos não possuem meios de propulsão próprios e, por isso, devem ser associados a objectos activos para se poderem deslocar, como é o caso de paletes, dos materiais e das ferramentas.

Os objectos de fluxo de materiais imóveis estão impossibilitados de mudar a sua localização. São activos se possuírem meios de propulsão próprios, como os transportadores, manipuladores robóticos e máquinas-ferramenta, caso contrário são passivos como os armazenadores temporários e as guias de encaminhamento.

Objectos de fluxo de informação

Estes objectos são utilizados no armazenamento e tratamento de dados. As operações que lhes estão associadas não implicam dispêndio de tempo.

Os objectos de fluxo de informação móveis passivos são dados que representam atributos. Os objectos imóveis activos representam funções e controlos definidos pelo programador. Os objectos imóveis passivos servem para armazenamento ou para transferência de dados.

4.1.2 Objectos básicos

Seguidamente descrevem-se os objectos mais importantes do Simple++. Para cada objecto representa-se o respectivo símbolo gráfico e referem-se exemplos de aplicação.

Entity (Entidade)



A entidade é um objecto móvel passivo que não pode conter outros objectos. A sua localização pode alterar-se durante a simulação, podendo encontrar-se em contentores, transportadores ou em objectos imóveis de fluxo de materiais. Utiliza-se na representação de peças ou materiais em transporte ou em processamento.

Container (Contentor)



O contentor é um objecto móvel passivo que pode conter outros objectos móveis. A sua capacidade é definida por configuração. Aplica-se na representação de paletes e embalagens.

Transporter (Transportador)



O transportador é um objecto móvel activo que pode conter outros objectos móveis, como contentores e entidades. A sua capacidade e velocidade são configuráveis. Aplica-se na representação de veículos de transporte de materiais, como, por exemplo, AGVs.

SingleProc (Processador simples)



O processador simples é um objecto imóvel activo, que ao receber um objecto móvel retém-no durante o respectivo tempo de processamento. Pode representar estações de trabalho com uma posição de processamento.

SerialProc (Processador série)



O processador série é um objecto imóvel activo que consiste em vários processadores simples agrupados em série. Os objectos em processamento mantêm a sua ordem de chegada (FIFO). Pode representar armazenadores temporários e filas de espera.

ParallelProc (Processador paralelo)



O processador paralelo é um objecto imóvel activo que consiste em vários processadores simples agrupados em paralelo. Pode processar simultaneamente vários objectos móveis com tempos de processamento diferentes. Pode representar estações de trabalho com várias posições de processamento.

Line (Linha)



A linha é um objecto imóvel activo que representa caminhos de transporte caracterizados pela velocidade e comprimento, configuráveis pelo programador, e pode representar, por exemplo, tapetes rolantes.

Track (Pista)



A pista é um objecto imóvel passivo que serve como caminho para os objectos móveis activos. É caracterizada pelo seu comprimento e pode representar, por exemplo, pistas para AGVs.

Warehouse (armazém)



O armazém é um objecto imóvel passivo utilizado para guardar objectos móveis. A sua capacidade é definida pelo programador. Pode representar locais de armazenagem.

Method (Método)



O método é um objecto de fluxo de informação activo que contém funções de controlo dos modelos definidas pelo programador. A sua acção pode ser desencadeada a partir de outros objectos primitivos ou de outros métodos.

Table-File (Tabela)



A tabela é um objecto de fluxo de informação passivo utilizada para guardar informação, cuja escrita ou leitura pode realizar-se de forma aleatória.

Event-Controller (Controlador de acontecimentos)

O Simple++ é um simulador de acontecimentos discretos. O controlador de acontecimentos sincroniza e processa os acontecimentos que ocorrem durante a simulação. Permite definir o tempo de duração da simulação que se pretende e iniciar, terminar e suspender temporariamente a simulação.

Empty-Model (Modelo vazio)

O modelo vazio serve de base para todos os modelos definidos pelo programador. A partir de uma cópia deste modelo constrói-se um novo modelo com os objectos básicos e/ou outros modelos.

Generator (Gerador)

O gerador é um objecto que permite desencadear a execução de métodos em intervalos de tempo configuráveis pelo programador. A duração dos intervalos de tempo pode ser regular ou aleatória.

4.2 Modelo

Construiu-se um modelo de simulação da CFF, descrita no capítulo anterior, com o objectivo de se conseguir uma plataforma, tanto física como simulada, para desenvolvimento, teste e validação de algoritmos de sequenciamento e controlo.

Para os vários equipamentos que constituem a CFF construíram-se os respectivos modelos. A partir destes modelos construiu-se o modelo global da CFF. Seguidamente apresentam-se esses modelos referindo-se os seus aspectos mais relevantes. Para cada modelo apresenta-se, também, o respectivo símbolo gráfico.

4.2.1 Matéria prima e peça



Cada peça ou matéria prima é uma instância do modelo básico entidade com os seguintes atributos definidos: *tipo_peca*, *tipo_materia_prima*, *celula_armazem*, *origem*, *destino*, *programa_codigo_g*, *controlo_qualidade*, *estado_proc*, *proxima_estacao*, *CQ_OK*, *tempo_proc_fresa*, *tempo_proc_torno*, *tempo_prep_fresa*, *tempo_prep_torno*, *tempo_proc_CQ*, *tempo_prep_CQ*.

Estes atributos são utilizados pelas diversas estações de processamento, de forma a executarem as operações com a duração desejada, e pelo sistema de transporte, de forma a assegurar o encaminhamento correcto.

A matéria prima, ao ser processada nas máquinas, transforma-se numa peça semi-processada ou acabada e, conseqüentemente, o seu estado de processamento dentro da CFF altera-se. Esta alteração é acompanhada pela respectiva mudança do seu aspecto gráfico.

4.2.2 Máquina-ferramenta



Na figura 4.1 apresenta-se o modelo da máquina-ferramenta.

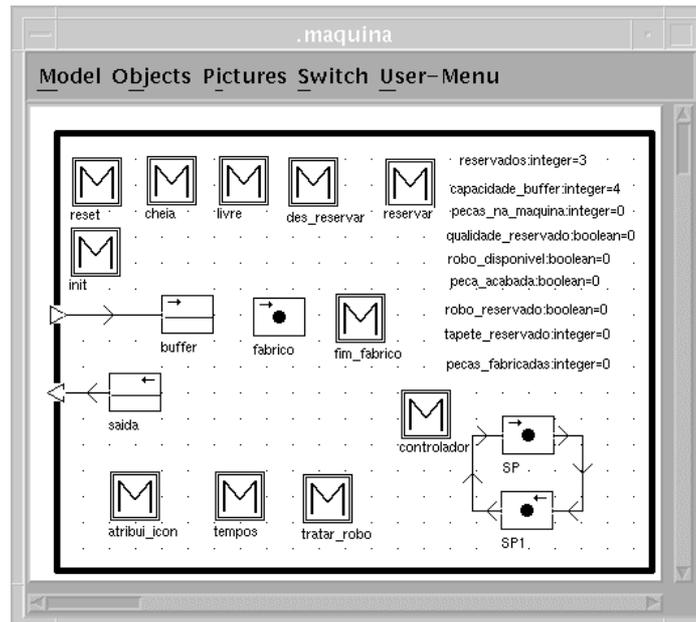


Figura 4.1 Modelo da máquina-ferramenta

Este modelo é, basicamente constituído por vários métodos, por duas linhas e por um processador simples.

Os métodos *reset* e *init* utilizam-se no início da simulação e servem, respectivamente, para remover todas as materiais ou peças em fabrico que existem no modelo e para definir o estado das várias variáveis do modelo máquina. Na descrição posterior dos vários modelos dos equipamentos, estes métodos desempenham a função referida. Algumas das variáveis do modelo encontram-se representadas na figura 4.1 e os seus nomes sugerem as respectivas funções.

Os métodos *reservar* e *des_reservar* efectuam a gestão da reserva de espaço nos armazenadores temporários de acordo com a descrição efectuada na secção 3.5.2. O método *fabrico* retém a peça em fabrico durante o tempo correspondente à soma dos tempos de preparação e processamento das peças. Estes tempos, associados a cada peça em vias de fabrico, são atribuídos pelo método *tempos* que é executado pelo método *tratar_rob*. O método *tratar_rob* executa os procedimentos de colocação das peças em vias de fabrico no

armazenador temporário ou na unidade de processamento *fabrico* ou, quando o processamento acaba, coloca a peça processada no robô.

O método *controlador* está em execução cíclica e, em função do estado da máquina e do estado do robô, toma os procedimentos adequados, como sejam, por exemplo, o pedido de reserva do robô, do transportador e da estação de controlo de qualidade.

Este modelo, conforme a sua utilização na função de fresadora ou torno, toma a respectiva apresentação gráfica, utilizando, para esse efeito, o método *atribui_icon*.

4.2.3 Robô



O robô é um modelo derivado do objecto básico transportador com os seguintes atributos definidos: *livre*, *proxima_estacao* e *tapete*. A variável *livre* determina o seu estado de disponibilidade, a variável *proxima_estacao* determina o seu local de destino e a variável *tapete* refere-se ao transportador a que diz respeito a operação de manuseamento.

O robô desloca-se numa base deslizante. Na CFF existem dois robôs e conseqüentemente duas bases deslizantes. Um dos robôs tem por missão manusear os materiais referentes às máquinas. O outro robô é responsável pela alimentação da CFF, a partir da matéria prima existente no armazém, e pelo envio das peças acabadas para a estação de controlo de qualidade ou directamente para a saída da célula. As diversas actividades dos robôs têm uma duração da ordem das dezenas de segundos. Como se pretendem considerar estes tempos na simulação, e pelo facto destes estarem directamente relacionados com o deslocamento do robô na respectiva base deslizante, criaram-se dois modelos diferentes para as bases deslizantes.

base deslizante 1



Esta base suporta o robô que serve as máquinas-ferramenta. Na figura 4.2 apresenta-se o seu modelo.

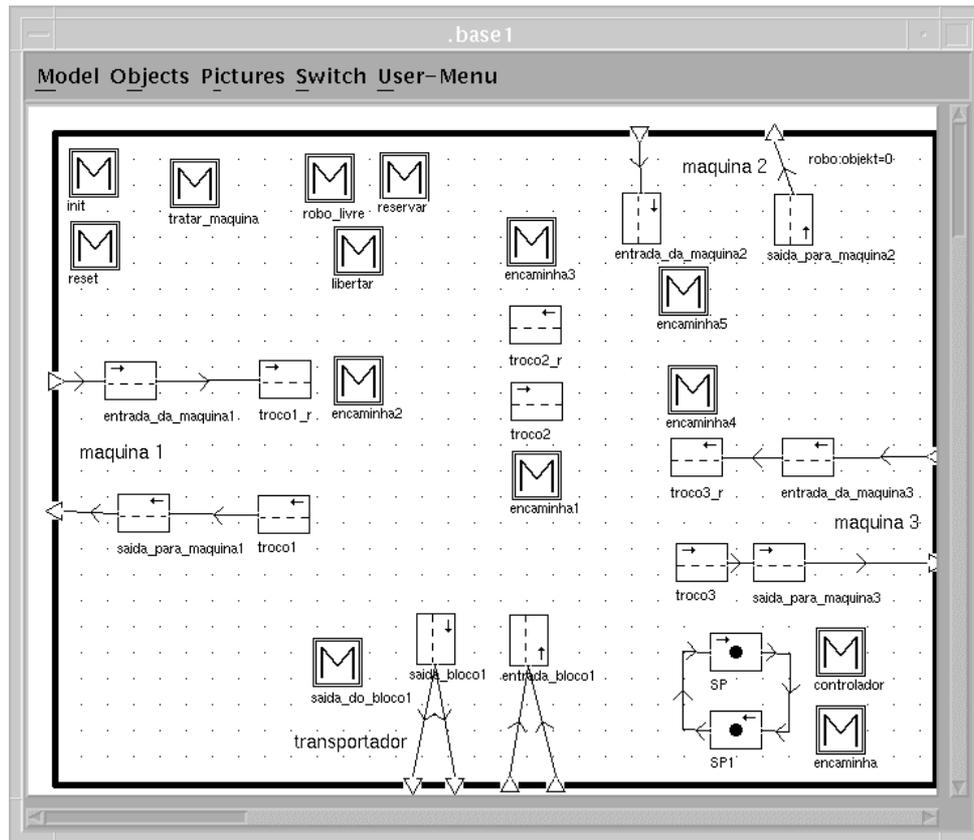


Figura 4.2 Modelo da base deslizante 1

Os diferentes percursos que o robô pode tomar estão representados pelas várias pistas do modelo. Estas pistas, que correspondem a diversos troços, possuem um comprimento que é configurável pelo programador e têm associados métodos de encaminhamento que determinam o percurso que o robô toma em função do estado dos seus atributos e do estado dos atributos do material/peça que o robô transporta. Como o robô se desloca na base deslizante nos dois sentidos, no modelo existem as pistas respectivas, como se pode observar na figura. Por outro lado, como o fluxo de materiais se pode fazer no sentido base-exterior e vice-versa, existem duas pistas com sentidos opostos nos pontos de interface com o exterior (máquinas-ferramenta e transportadores).

Existem três métodos *robo_livre*, *reservar* e *libertar* que determinam o estado de ocupação do robô. O método *tratar_maquina* assinala a máquina que reservou o robô com a indicação que aquele se encontra disponível. O método *controlador*, que se encontra em execução cíclica, atende os diversos pedidos de transporte originados pelas máquinas-ferramenta e pelos transportadores. O método *saida_do_bloco1* coloca a peça no transportador reservado.

base deslizante 2

Esta base serve de suporte ao robô responsável pela alimentação da CFF, a partir da matéria prima existente no armazém, e pelo envio das peças acabadas para a estação de controlo de qualidade ou directamente para a saída da célula. O modelo desta base possui uma estrutura semelhante ao da base 1, como se pode observar na figura 4.3. Assim, existem também vários troços que têm associados métodos de encaminhamento. No entanto, por se considerarem pontos de interface em que o fluxo de materiais se faz apenas num sentido, como as situações de retirada da matéria prima do armazém e a colocação das peças acabadas na saída da CFF, nestes casos existem apenas pistas num sentido. O método *controlador*, que se encontra em execução cíclica, atende os diversos pedidos de transporte originados pelo armazém, pelos transportadores e pela estação de controlo de qualidade.

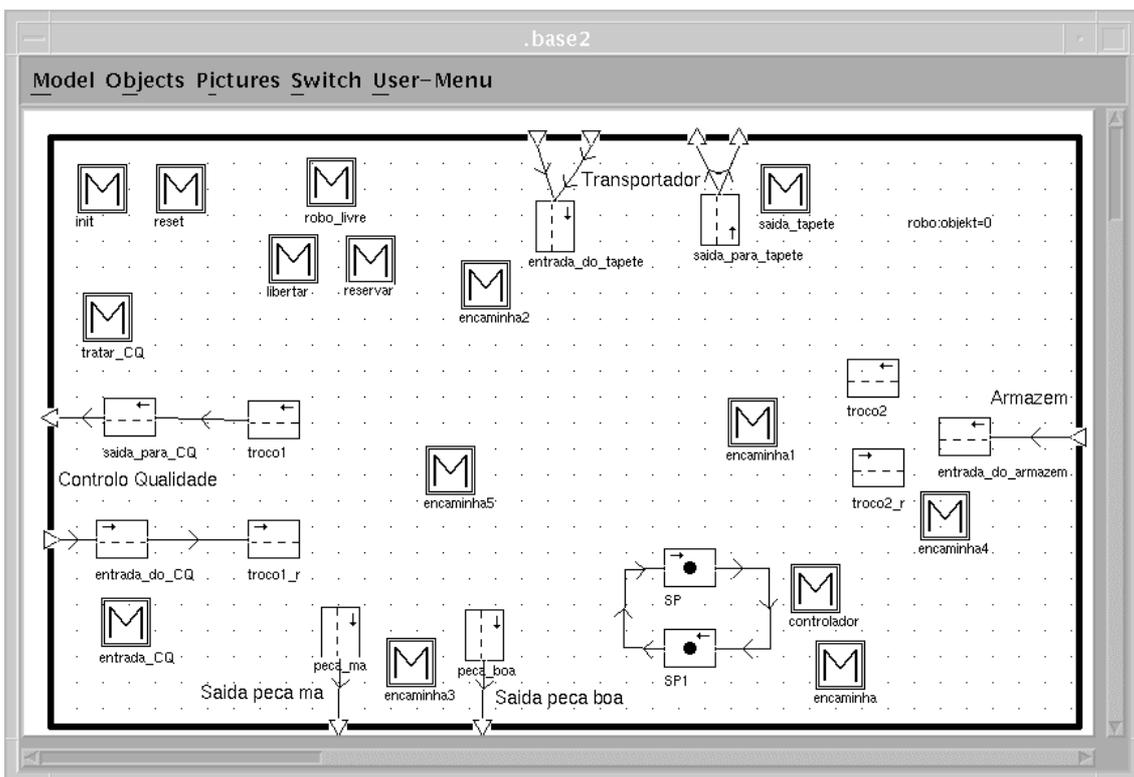


Figura 4.3 Modelo da base deslizante 2

4.2.4 Transportador

O modelo do transportador é apresentado na figura 4.4. A sua estrutura é bastante simples. É constituído por linhas e por métodos. As duas linhas, colocadas em sentidos opostos, permitem o deslocamento dos materiais e das peças nas duas direcções. Os métodos *reservar*,

libertar, *livre* e *peca_disponivel* permitem efectuar a gestão da ocupação do transportador, assegurando que, quando ocupado, exista apenas uma entidade móvel (material ou peça) no transportador.

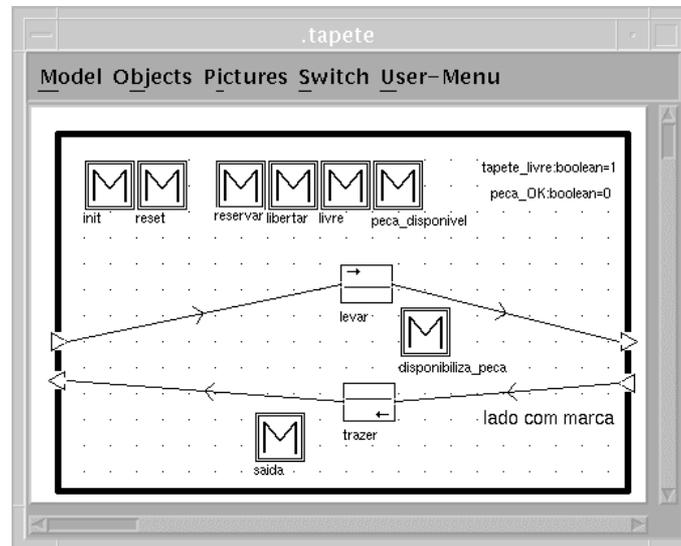


Figura 4.4 Modelo do transportador

Os métodos *saida* e *disponibiliza_peca* estão associados às linhas *trazer* e *levar*, respectivamente, e informam os modelos utilizadores, ou seja, os modelos que retiram os objectos do transportador, da existência de objecto móvel disponível.

4.2.5 Armazém



O modelo do armazém apresenta-se na figura 4.5.

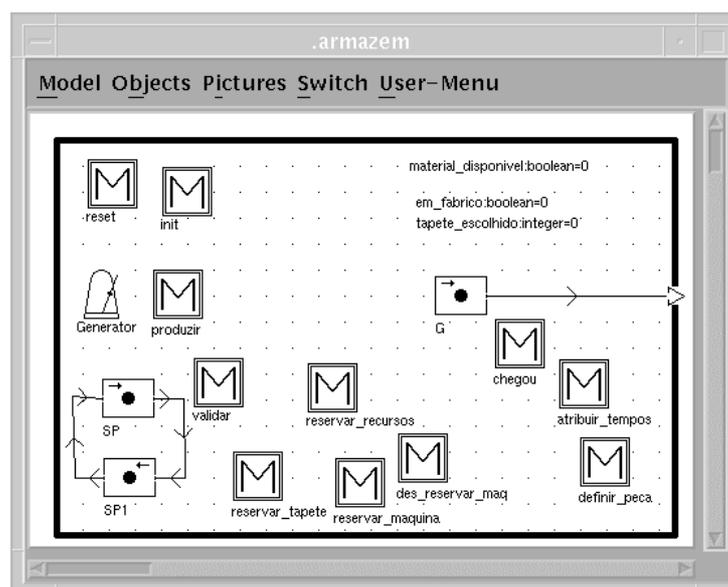


Figura 4.5 Modelo do armazém

Basicamente é constituído por vários métodos, por um gerador e pela variável *material_disponivel*. O gerador origina pedidos de fabrico com intervalos de tempo determinados de forma aleatória, através de funções de distribuição de probabilidade existentes no Simple++ e que o programador pode configurar. Os pedidos provocam a execução do método *produzir* que cria um objecto peça no processador simples *G*, sob a forma de matéria prima. Por sua vez, o método *validar*, em execução cíclica, no caso de existir peça no processador *G*, reserva os recursos necessários para a produção, através do método *reservar_recursos*, e assinala esta situação na variável *material_disponivel*. O método *controlador* da base deslizante 2 sabe assim se existe matéria prima para retirar do armazém. Os métodos auxiliares *definir_peca* e *atribuir_tempos* definem as características da peça a fabricar, de acordo com os dados do plano de produção.

No caso de se desejar implementar um determinado algoritmo de sequenciamento, este deverá substituir o gerador e o método *produzir* do modelo armazém.

4.2.6 Controlo de qualidade



Este modelo é apresentado na figura 4.6.

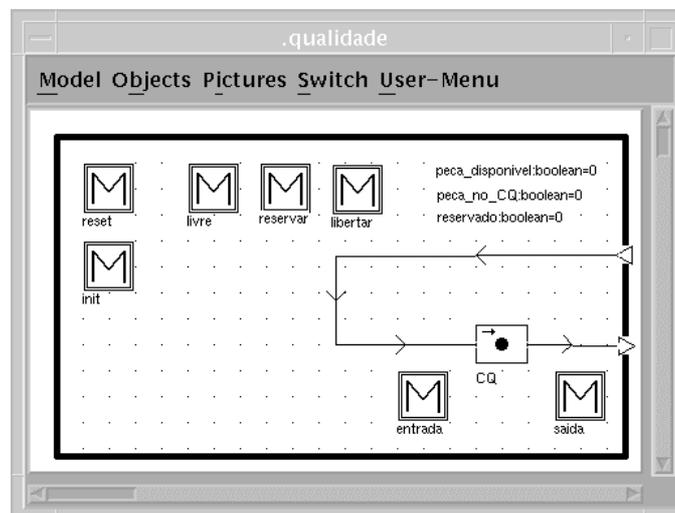


Figura 4.6 Modelo do controlo de qualidade

É constituído por métodos, variáveis e por um processador simples. Os métodos *livre*, *reservar* e *libertar* ocupam-se com a gestão da ocupação do controlo de qualidade. As variáveis determinam o seu estado de ocupação. O método *entrada* é executado ao chegar uma peça a esta estação. Este método atribui os tempos de processamento e preparação ao processador *CQ*. Após o processamento em *CQ*, o método *saida* é executado e define o resultado do controlo de qualidade, de acordo com uma função de distribuição de probabilidade parametrizável pelo programador.

4.2.7 Fim de fabrico



Este modelo apresenta-se na figura 4.7.

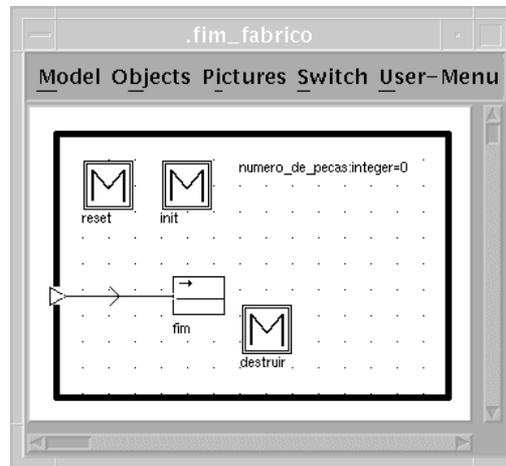


Figura 4.7 Modelo de fim de fabrico

Este modelo é bastante simples. Basicamente é constituído por uma linha por onde chegam as peças, e estas, ao atingirem o fim da linha, originam a execução do método *destruir* que as destrói e incrementa a variável *numero_de_peças*. Consequentemente, a variável *numero_de_peças* reflecte o número de peças fabricadas.

4.2.8 Configuração

Existem dois tipos de configuração. Um define as características do equipamento a simular e o outro determina as características da produção.

Equipamento



Na figura 4.8 apresenta-se o modelo do equipamento. Este é constituído por quatro tabelas que reflectem as características físicas das bases deslizantes, dos robôs e dos transportadores.

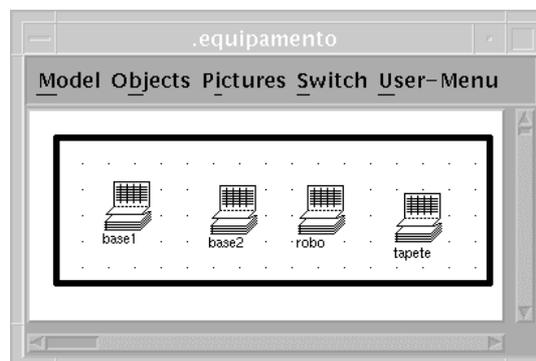


Figura 4.8 Modelo do equipamento

O comportamento das bases deslizantes é condicionado pelo comprimento dos vários troços. Assim, nas tabelas *base1* e *base2* definem-se os diversos comprimentos, como se pode ver no extracto da tabela de configuração *base1* apresentado na figura 4.9.



	String 0	Real 1	String 2
Stri 0	NOME DO TROCO	COMPRIMENTO	COMENTARIOS
1	entrada_da_maquina1	0.21	simula movimento de descarregamento da maquina.
2	saida_para_maquina1	1.23	simula movimento de carregamento da maquina.
3	entrada_da_maquina2	0.36	simula movimento de descarregamento da maquina.

Figura 4.9 Exemplo de configuração da base 1

O comportamento do robô é condicionado pela sua velocidade. Deste modo, na tabela *robo* definem-se os diversos valores de velocidade a utilizar em função das operações que o robô efectuar, como se pode observar no extracto da tabela *robo* apresentado na figura 4.10. Existe apenas uma tabela, pois os robôs utilizados na CFF são semelhantes.



	String 0	Real 1	Stri 2
Stri 0	DESIGNACAO DA VELOCIDADE	VALOR (m/s)	
1	lenta	0.01	
2	rapida	0.50	
3	normal	0.20	

Figura 4.10 Exemplo de configuração do robô

O comportamento do transportador é função da sua velocidade e do seu comprimento. Na tabela *tapete* definem-se os valores de comprimento e velocidade a utilizar na simulação e que reflectem as características reais dos transportadores utilizados. Existe apenas uma tabela, pois os transportadores utilizados na CFF são semelhantes.

Plano de produção



O modelo do plano de produção apresenta-se na figura 4.11.

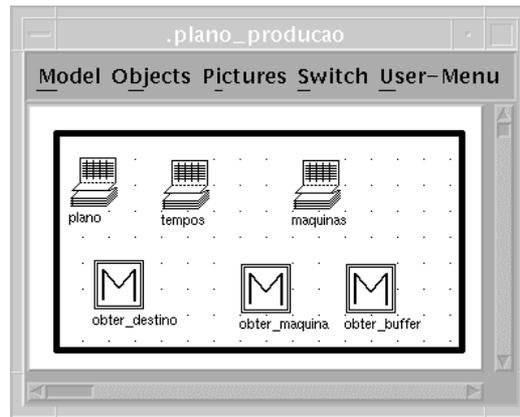


Figura 4.11 Modelo do plano de produção

É constituído por tabelas e métodos. As tabelas contêm a informação relativa ao tipo de peças a fabricar e as condições em que as máquinas-ferramenta vão trabalhar. Os métodos permitem ler essa informação das tabelas.

A tabela *plano* contém o tipo de peças a fabricar com indicação das respectivas estações de processamento a utilizar. Na figura 4.12 apresenta-se um extracto desta tabela.

	String 0	String 1	String 2	String 3
Stri 0	TIPO DE PEÇA	1.a MAQUINA	2.a MAQUINA	
1	tipoF1	fresa1	fim	
2	tipoT	torno	fim	
3	tipoF1T	fresa1	torno	fim
4	tipoTF1	torno	fresa1	fim
	tipoF2T	fresa2	torno	fim

Figura 4.12 Exemplo de tabela do plano de produção

A tabela *tempos* contém os tempos de processamento e os tempos de preparação das diversas operações que as peças vão sofrer na CFF.

Finalmente, a tabela *maquinas* contém o tipo de máquinas-ferramenta (fresadora ou torno) a utilizar na produção e a respectiva dimensão dos armazenadores temporários.

4.2.9 CFF



O modelo global da CFF é composto essencialmente por instâncias dos modelos implementados para os diversos equipamentos e que foram apresentados anteriormente. Na

figura 4.13 apresenta-se o modelo resultante, constituído por três máquinas-ferramenta, dois robôs com as respectivas bases deslizantes, quatro transportadores, um armazém, uma estação de controlo de qualidade, os locais de saída das peças da CFF e o controlador de acontecimentos. Associadas às máquinas e aos locais de saída das peças existem variáveis que permitem examinar directamente algumas características relevantes do fabrico. O controlador de acontecimentos assegura a execução da simulação.

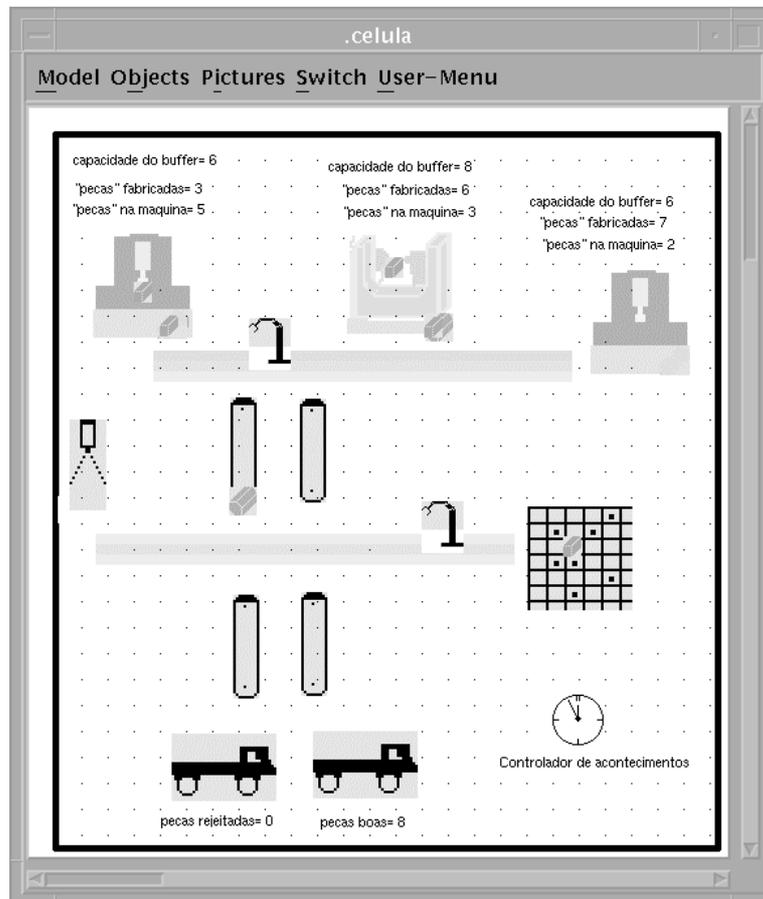


Figura 4.13 Modelo da CFF

Na figura 4.14 apresenta-se em pormenor o controlador de acontecimentos. Este objecto permite sincronizar e processar os acontecimentos que ocorrem durante a simulação, define o respectivo tempo de duração e controla a execução da simulação.

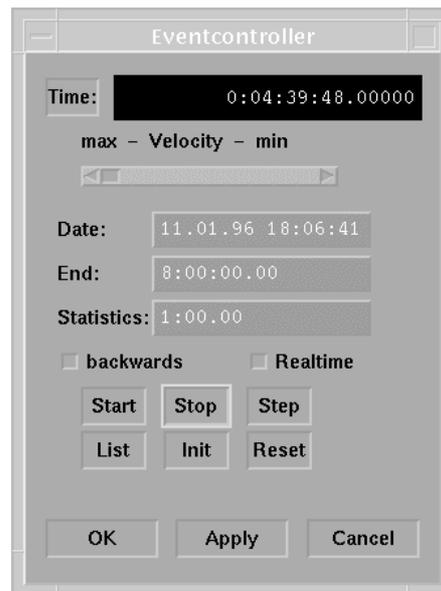


Figura 4.14 Controlador de acontecimentos

No controlador de acontecimentos é possível definir o instante de tempo a partir do qual se calculam os dados estatísticos para todos os objectos de fluxo de material que constituem o modelo da CFF.

Como exemplo, na figura 4.15 apresenta-se um extracto da informação estatística obtida para uma das máquinas que constitui a CFF.

String	Integer	Integer	Integer	Integer	Integer	Integer	Real	Real
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Name	Entries	Exits	Contents	PreCont	Max. Cont.	Min. Cont.	tot. U.	Utiliz.
fresa1								
-fabrico	13	13	0	0	1	0	61.6	61.6
-buffer	16	12	4	0	6	0	22.7	22.7
-SP	275	275	0	0	1	0	1.6	1.6
-SP1	275	275	1	1	1	0	98.4	98.4

Figura 4.15 Exemplo de tabela com informação estatística

O Simple++ disponibiliza a seguinte informação estatística para todos os objectos de fluxo de material que compõem um modelo:

- Número de entidades móveis que entram no objecto;
- Número de entidades móveis que saem do objecto;

- Número máximo de entidades móveis que estiveram simultaneamente no objecto durante a simulação;
- Utilização do objecto;
- Número de falhas de funcionamento do objecto;
- Percentagem do tempo de falhas relativo ao tempo de simulação;
- Número de períodos de inactividade do objecto;
- Percentagem de tempo de inactividade relativo ao tempo de simulação.

4.2.10 Resultados

Com a informação que o Simple++ disponibiliza é possível efectuar-se uma análise do desempenho do modelo global e de todos os seus componentes, de forma a tomarem-se opções adequadas em diversos aspectos como sejam: configurações alternativas, escolha dos equipamentos, estratégias de controlo, cenários de avarias dos equipamentos e políticas de manutenção. Seguidamente referem-se alguns aspectos relativos ao desempenho da CFF.

Através dos resultados da simulação constata-se que o robô BR1, existente no bloco de maquinagem da CFF e responsável pela alimentação das máquinas-ferramenta, possui uma taxa de utilização bastante maior que o robô BR2 do bloco de entrada/saída. Assim, no caso da estação de controlo de qualidade a integrar na CFF, durante o seu funcionamento, necessitar da manipulação das peças, poder-se-á utilizar o robô BR2 sem grandes custos para o desempenho do sistema.

A simulação permite ainda concluir que a colocação dos armazenadores temporários nas máquinas, para além da sua utilidade na resolução dos problemas dos bloqueios, veio aumentar a taxa de utilização das diversas máquinas-ferramenta. No entanto, a abordagem de prevenção dos bloqueios não aproveita convenientemente a utilização dos armazenadores temporários devido à natureza estática da política de controlo. Com uma abordagem de impedimento da ocorrência de bloqueios, embora possua uma política de controlo mais complexa, poderá obter-se uma maior taxa de utilização dos recursos. O modelo da CFF permitirá desenvolver e testar este tipo de política dinâmica de alocação de recursos.

O tempo associado ao transporte da matéria prima ou das peças acabadas dentro da CFF é da ordem das dezenas de segundos. Quando os tempos de processamento das peças nas diversas máquinas são dessa grandeza, a velocidade do sistema de transporte é determinante no desempenho da CFF. Se os tempos de processamento das peças forem elevados comparativamente com os tempos de transporte, a velocidade do sistema de transporte não é tão relevante no desempenho do sistema.

5. Conclusões e trabalho futuro

A partir da célula de fabrico flexível existente no ISR, desenvolveu-se um projecto tendo em vista o aumento das suas potencialidades de automatização e versatilidade. Assim, a implementação do carregamento automático dos programas de maquinagem nos controladores das máquinas-ferramenta, a colocação de armazenadores temporários de entrada nas máquinas e a flexibilização do controlo da célula de forma a permitir o fabrico de peças processadas em mais do que uma máquina aumentaram substancialmente as potencialidades da CFF. O algoritmo implementado para o sequenciamento permitiu confirmar o funcionamento do sistema de controlo da CFF.

Por outro lado, construiu-se um modelo de simulação da CFF que disponibiliza informação relevante acerca do seu desempenho. A análise desta informação permite estudar opções tais como: configurações alternativas, estratégias de controlo, cenários de avarias dos equipamentos e, eventualmente, políticas de manutenção. O modelo permitiu, nomeadamente, ensaiar a abordagem implementada para evitar a ocorrência de bloqueios.

O desenvolvimento do sistema real e do modelo de simulação, permitiu alertar para certos aspectos, que nem sempre são contemplados nos modelos. Assim, por exemplo, o tempo necessário para o carregamento dos programas de maquinagem nas máquinas-ferramenta, deverá considerar-se no modelo, já que a comunicação com as máquinas se efectua a uma velocidade de transmissão baixa.

Criou-se portanto uma plataforma, quer física quer simulada, que permite desenvolver, testar e validar algoritmos de controlo, nomeadamente na área do sequenciamento. Relativamente ao trabalho futuro, o modelo de simulação poderá utilizar-se para o estudo das potencialidades oferecidas pelos diversos equipamentos que constituem a CFF. Esse estudo poderá ser concretizado na CFF que servirá de validador da simulação, entretanto efectuada. Seguidamente referem-se alguns aspectos que poderão contribuir para um aperfeiçoamento da CFF existente.

Um dos pontos a considerar em desenvolvimentos futuros relaciona-se com os armazenadores temporários. Dever-se-á privilegiar o carregamento das máquinas quando estas têm peças nos respectivos armazenadores temporários. Uma das formas possíveis de resolver este problema é através da implementação de um sistema de semáforos com prioridades de forma a que os processos responsáveis pelo carregamento das máquinas tenham maior prioridade. Poder-se-ão também estudar outras regras de despacho. Uma regra de despacho interessante será o carregamento das máquinas com a matéria prima existente no armazenador temporário, correspondente a uma peça em fabrico em que o programa de maquinagem é o mesmo que o

da operação anteriormente efectuada nessa máquina, já que, desta forma o tempo de preparação correspondente ao carregamento da máquina com um novo programa de maquinagem deixa de existir. Um estudo sobre a utilização de armazenadores temporários de saída nas máquinas poderá também revelar-se como útil.

Outro aspecto a considerar futuramente é o tratamento dos bloqueios através da abordagem do impedimento da sua ocorrência. Com esta abordagem dinâmica consegue-se uma maior taxa de utilização dos recursos. Em [Viswanadham *et al.* 90], [Hsieh *et al.* 94] e [Banaszak *et al.* 90] são propostos modelos baseados em redes de Petri como soluções de impedimento da sua ocorrência.

A implementação de um sistema tolerante a falhas, através da detecção de avarias nos equipamentos e com o suporte do controlo adequado, permitirá que a CFF se adapte a situações inesperadas, aproveitando os recursos que se mantêm operacionais e evitando a paragem global. Por exemplo, se a avaria ocorrer numa fresadora, as peças que necessitam desta podem ser temporariamente transferidas para a outra fresadora.

Futuramente poderá alterar-se facilmente o controlo da CFF, de forma a contemplar o processamento da mesma peça em mais que duas máquinas.

A optimização do percurso do robô, o aumento da flexibilidade da célula, através da introdução de mais uma máquina ferramenta, e a sua integração com outras células poderão ser também objecto de estudo posterior.

Bibliografia

- [Akella *et al.* 84] R. Akella, Y. Choong, and S. B. Gershwin “Performance of Hierarchical Production Scheduling Policy”, IEEE Transactions on Componentes, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. CHMT-7, nº 3, September, 1984.
- [Ammons *et al.* 88] J. C. Ammons, T. Govindaraj, and C. M. Mitchell, “Decision Models for Aiding FMS Scheduling and Control”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 18, nº 5, September/October, 1988.
- [Banaszak *et al.* 90] Z. Banaszak and B. Krogh, “Deadlock Avoidance in Flexible Manufacturing Systems with Concurrently Competing Process Flows”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 6, nº 6, December, 1990.
- [Bauer *et al.* 91] A. Bauer, R. Bowden, J. Browne, J. Duggan and G. Lyons, Shop Floor Control Systems, Chapman & Hall, 1991.
- [Biegel *et al.* 90] J. E. Biegel and J. J. Davern, “Genetic Algoritms and Job Shop Scheduling”, Computers Industrial Engineering, vol. 19, 1990.
- [Chang *et al.* 91] T. Chang, R. Wysk and H. Wang, “Computer-Aided Manufacturing”, Prentice-Hall, Inc., 1991.
- [Courtois *et al.* 94] A. Courtois, M. Pillet and C. Martin, “Gestão da Produção”, LIDEL Edições Técnicas Limitada, 1994.
- [Custódio 92] L. Custódio, “Sistema Hierárquico para Planeamento e Sequenciamento da Produção: uma abordagem suportada em lógica difusa”, Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1992.
- [Duffie 90] N. Duffie, “Synthesis of Heterarchical Manufacturing Systems”, Computers in Industry, Vol.14, 1990.
- [ElMaraghy *et al.* 82] H. A. ElMaraghy and N. C. Ho, “A Computer Simulation Study of Automated Batch Manufacturing Systems”, Computer Engineering, 1982.
-

-
- [French 82] S. French, "Sequencing and Scheduling: An Introduction to the Mathematics of the Job-Shop", John Wiley & Sons, 1982.
- [Gershwin *et al.* 86] S. B. Gershwin, R. R. Hildebrant, R. Suri, and S. K. Mitter, "A Control Perspective on Recent Trends in Manufacturing Systems", IEEE Control Systems Magazine, April, 1986.
- [Graves 81] S. C. Graves, "A review of production scheduling.", Oper. Res., vol. 29, n° 4, pp. 646-675, Aug. 1981.
- [Groover 87] M. P. Groover, "Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing", Prentice-Hall, Inc., 1987.
- [Gupta *et al.* 88] T. Gupta and B. K. Ghosh, "A Survey Of Experts Systems in Manufacturing and Process Planning", Computers in Industry, 11, 1988.
- [Hatvany 85] J. Hatvany, "Intelligence and cooperation in heterarchic manufacturing systems", Ann. CIRP, Vol.14, N°. 1, 1985.
- [Holsapple *et al.* 93] C. W. Holsapple, V. S. Jacob, R. Pakath and J. S. Zaveri, "A Genetics-Based Hybrid Scheduler for Generating Static Schedules in Flexible Manufacturing Contexts", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 23, n° 4, July/August, 1993.
- [Hsieh *et al.* 94] F. Hsieh and S. Chang, "Dispatching-Driven Deadlock Avoidance Controller Synthesis for Flexible Manufacturing Systems", IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 10, n° 2, April, 1994.
- [Jones *et al.* 85] A. T. Jones and C. R. McLean, "A Proposed Hierarchical Control Model for Automated Manufacturing Systems", Journal of Manufacturing Systems, Vol. 5, n° 1, 1985.
- [Krishna *et al.* 95] K. Krishna, K. Ganeshan and D. J. Ram, "Distributed Simulated Annealing Algorithms for Job Shop Scheduling", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 25, n° 7, July, 1995.
-

-
- [Kusiak 88] A. Kusiak, "Artificial Intelligence - Implications for CIM", IFS (Publications) Ltd, UK, 1988.
- [Kusiak 90] A. Kusiak, "Intelligent Manufacturing Systems", Prentice-Hall, Inc., 1990.
- [Lee *et al.* 92] S. Lee and H. P. Wang, "Manufacturing Cell Formation: A Dual-Objective Simulated Annealing Approach", The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, 7, 1992.
- [Morton *et al.* 93] T. E. Morton and D. W. Pentico, "Heuristic Scheduling Systems", John Wiley Sons, Inc., 1993
- [Mourão 93] H. R. V. M. C Mourão, "Estudo e Realização de Células de Fabrico Flexível: Desenvolvimento de uma aplicação", Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1993.
- [New *et al.* 87] C. C. New and G. R. Clark, "Production Planning and Control with MRP and OPT", 1987.
- [Panwalker *et al.* 77] S. S. Panwalkar and W. Iskander, "A Survey of scheduling rules", Operations Research, Vol. 25, nº 1, January-February, 1977.
- [Ponomaryov 90] V. Ponomaryov, "Manufacturing Control and Monitoring", Computers in Industry, Vol.14, 1990.
- [Rembold *et al.* 93] U. Rembold, B. O. Nnaji and A. Storr, "Computer Integrated Manufacturing and Engineering", Addison-Wesley Publishers Ltd., 1993.
- [Rodammer *et al.* 88] F. Rodammer e Preston White, "A Recent Survey of Production Scheduling", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 18, nº 6, November/December, 1988.
- [Simple++ 94] AESOP, "Simple++ Reference Manual", 1994.
-

- [Solot *et al.* 94] P. Solot and M. V. Vliet, “Analytical Models for FMS Design Optimisation: A Survey”, *The International Journal Of Flexible Manufacturing Systems*, 6, 1994.
- [Sousa 95] J. G. C. C. Sousa, “Controlo Hierárquico de Sistemas de Manufatura com Operações de Montagem”, Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1995.
- [Stewart *et al.* 94] B. S. Stewart, C. Liaw, C. C. White, “A Bibliography of Heuristic Search Research Through 1992”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 24, nº 2, February, 1994.
- [Taborda 93] A. F. S. Taborda, “Planeamento e Sequenciamento da Produção em Células de Fabrico Flexível: Estudo de um caso”, Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1993.
- [Viswanadham *et al.* 90] N. Viswanadham, Y Narahari and Timothy L. Johnson, “Deadlock Prevention and Deadlock Avoidance in Flexible Manufacturing Systems Using Petri Net Models”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 6, nº 6, December, 1990.
- [Viswanadham *et al.* 92] N. Viswanadham and Y Narahari, “Performance Modeling of Automated Manufacturing Systems”, Prentice-Hall, Inc., 1992.

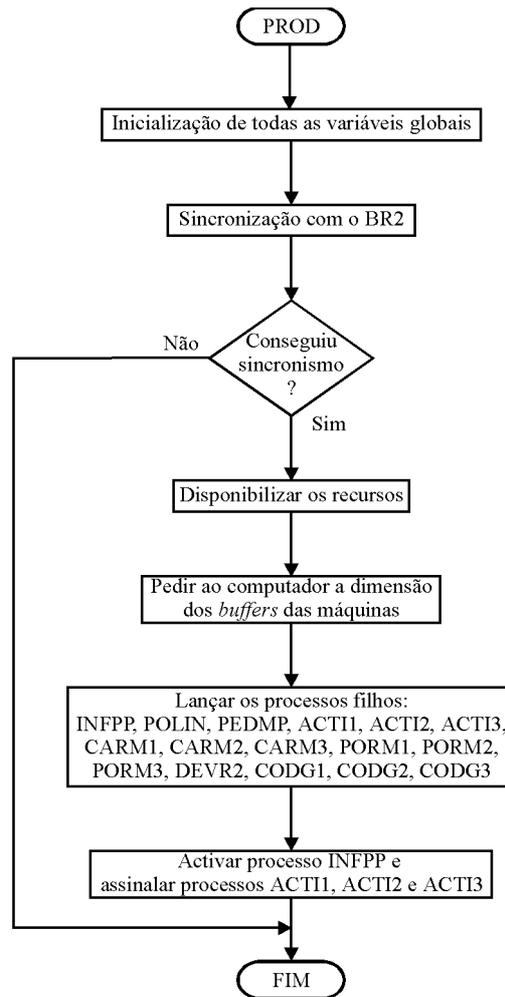
Apêndice A

Fluxogramas dos processos e rotinas residentes no controlador do robô BR1

Seguidamente apresenta-se a descrição dos vários processos residentes no controlador do robô BR1. A ordem pela qual se apresentam os processos decorre, de forma aproximada, segundo a sua intervenção nas tarefas de produção, desde a ordem de fabrico de uma peça até ao instante de finalização. Nos fluxogramas apresentados refere-se a expressão “assinalar processo” e “activar processo”. Entenda-se por “assinalar processo” como uma contribuição para que o processo continue a sua execução, já que a sua execução também está dependente de outros processos. Entenda-se por “activar processo” como uma ordem para que o processo continue a sua execução, já que a sua execução só está dependente desta ordem.

1. Processo *PROD*

Este processo é o primeiro a ser executado no controlador do robô BR1. O seu fluxograma é apresentado na figura Apêndice A.1. A sua função principal é a colocação em funcionamento de todos os outros processos necessários ao funcionamento da CFF, residentes no mesmo controlador. Estes processos ficarão em execução durante o funcionamento da CFF. Neste processo faz-se, também, a inicialização de todas as variáveis globais necessárias à partilha de informação pelos vários processos, a sincronização com o robô BR2, o pedido da dimensão dos armazenadores temporários ao programa gestor da célula e, finalmente, a activação dos processos que vão desencadear o funcionamento da CFF.

Figura Apêndice A.1 Fluxograma do processo *PROD*

2. Processo *INFPP*

Na figura Apêndice A.2 é apresentado o respectivo fluxograma.

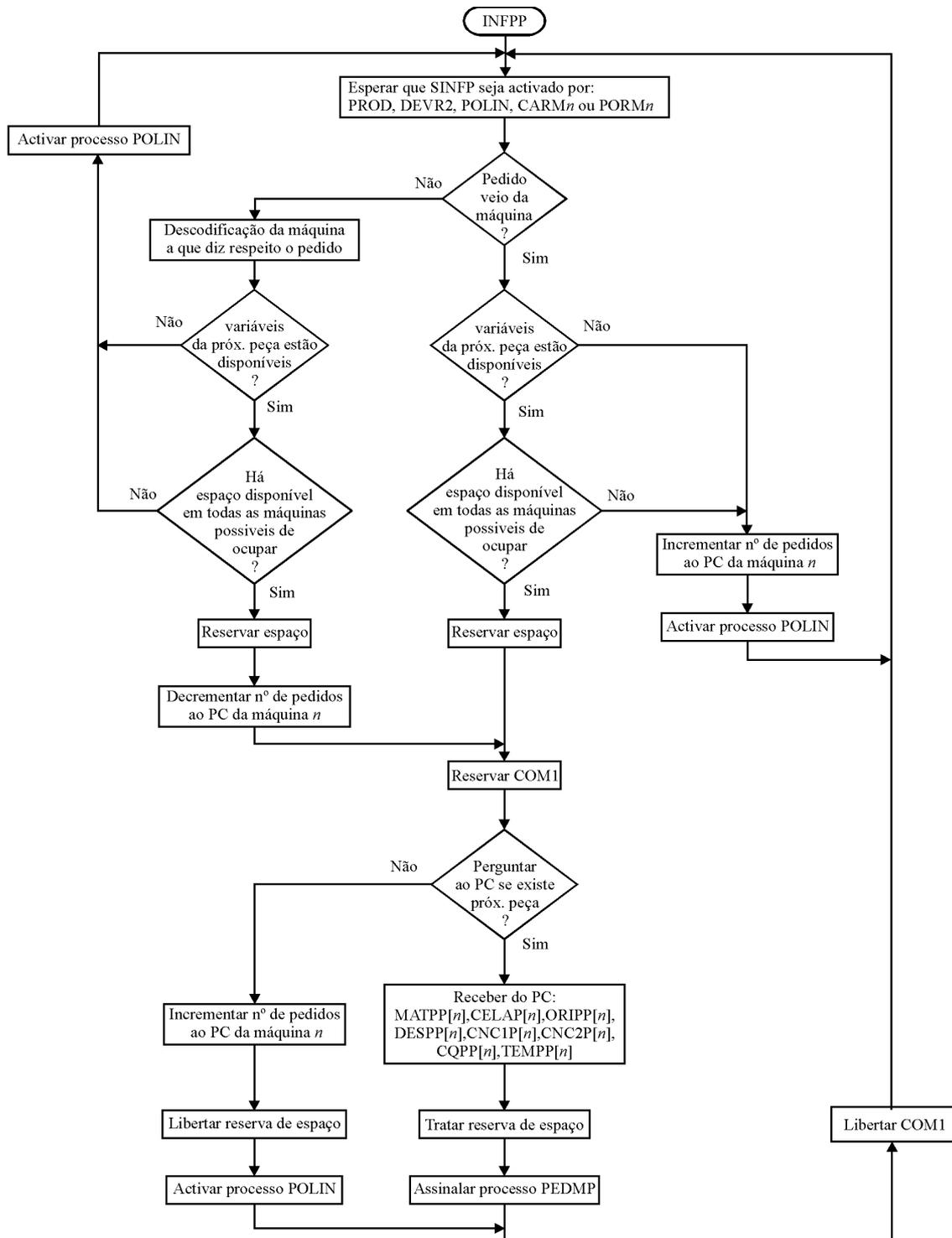


Figura Apêndice A.2 Fluxograma do processo *INFPP*

Este processo é o responsável pelo estabelecimento do diálogo com o programa gestor da célula, de forma a obter os dados acerca da nova peça a produzir. Normalmente *INFPP* é

activado pelos processos que gerem as máquinas, sempre que estas tenham disponibilidade para receber mais matéria prima para processar. No entanto, caso tenha havido essa disponibilidade e o programa gestor da célula, residente no computador pessoal, não tenha dado qualquer ordem de fabrico, então o processo *POLIN* é informado. Por sua vez, *POLIN* passará então a activar periodicamente o processo *INFPP*.

O processo *INFPP* também é responsável pela reserva, tratamento e libertação de espaço na célula para a matéria prima relativa a uma nova peça a produzir. Para tal, recorre, respectivamente, às rotinas *RESLU*, *TRRES* e *LIRES*.

De notar, que *INFPP* só pede os dados relativos a nova peça, caso exista espaço disponível na célula e, conseqüentemente, se possa atender a ordem de fabrico do programa gestor da CFF.

3. Processo *POLIN*

Este processo é activado quando existe disponibilidade por parte das máquinas para processar matéria prima, mas não existe disponibilidade da célula, no seu todo. Outra situação possível de originar a activação deste processo é a existência de disponibilidade por parte da célula, mas o programa gestor da célula não tem qualquer ordem para fabrico. O fluxograma deste processo é apresentado na figura Apêndice A.3. Para evitar que o controlador do robô esteja permanentemente a perguntar ao computador por uma nova ordem de fabrico, o processo *POLIN* estabelece uma cadência nos pedidos. Os pedidos passam a fazer-se de cinco em cinco segundos.

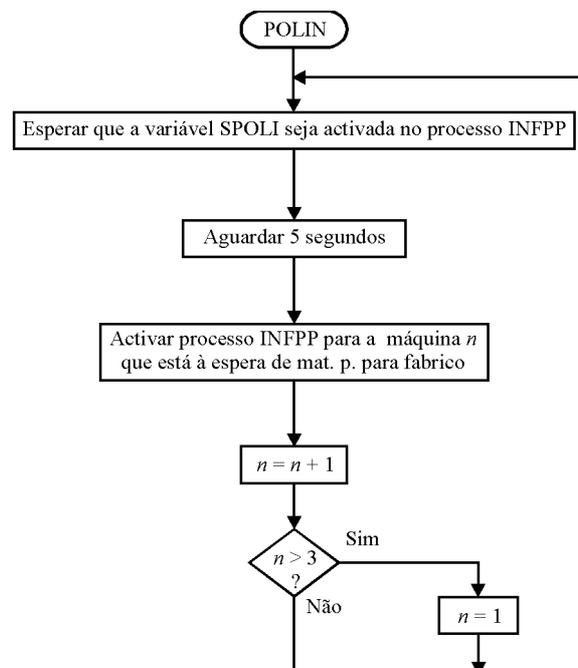


Figura Apêndice A.3 Fluxograma do processo *POLIN*

4. Processo *PEDMP*

O processo *PEDMP* é activado sempre que chega uma ordem de fabrico ao controlador do robô BR1. O fluxograma deste processo é apresentado na figura Apêndice A.4. Este processo, em função da disponibilidade, escolhe um dos dois transportadores e informa o controlador BR2 do alvéolo do armazém, existente no bloco 2, onde se encontra a matéria prima. Assim, *PEDMP* desencadeia as acções de diálogo e sincronismo com o controlador BR2, de forma a que este retire a matéria prima do alvéolo do armazém e a disponibilize no transportador. Após a existência de matéria prima no transportador, *PEDMP* activa o processo *PORM_n* relativo à máquina na qual irá decorrer a primeira ou única operação de fabrico da peça.

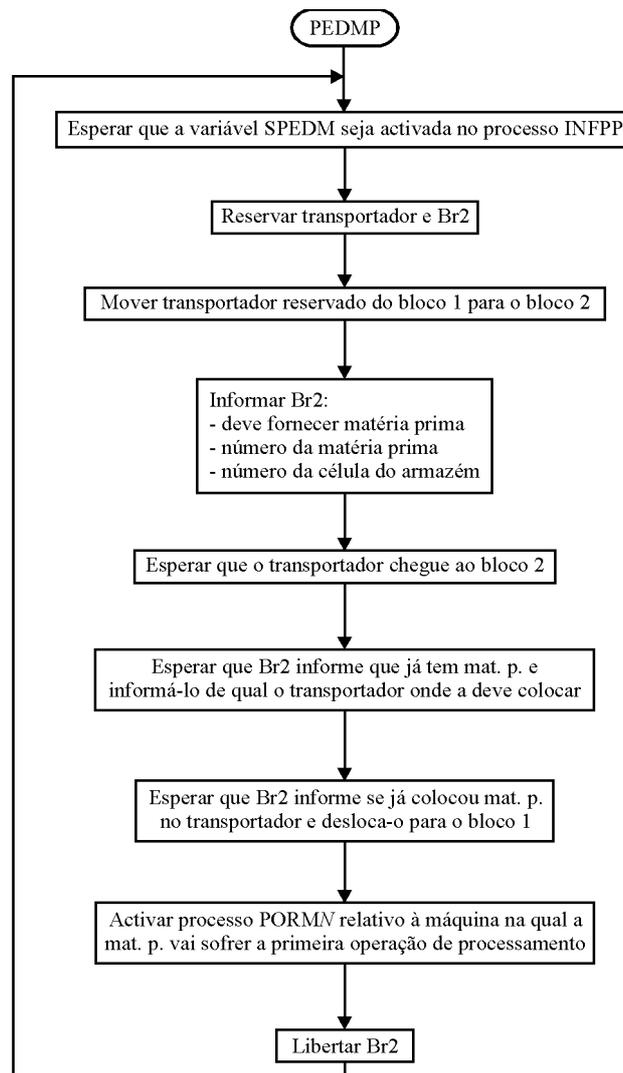


Figura Apêndice A.4 Fluxograma do processo *PEDMP*

5. Processos *PORM1*, *PORM2* e *PORM3*

Existe um processo *PORMn* para cada uma das máquinas. Estes processos são responsáveis pela colocação da matéria prima nas respectivas máquinas. Ou seja, é aqui que se toma a decisão se a matéria prima carrega directamente a máquina ou se é colocada temporariamente no respectivo armazenador temporário.

Devido à semelhança funcional existente entre estes processos, na figura Apêndice A.5 é apresentado, apenas, o fluxograma do processo *PORM1*.

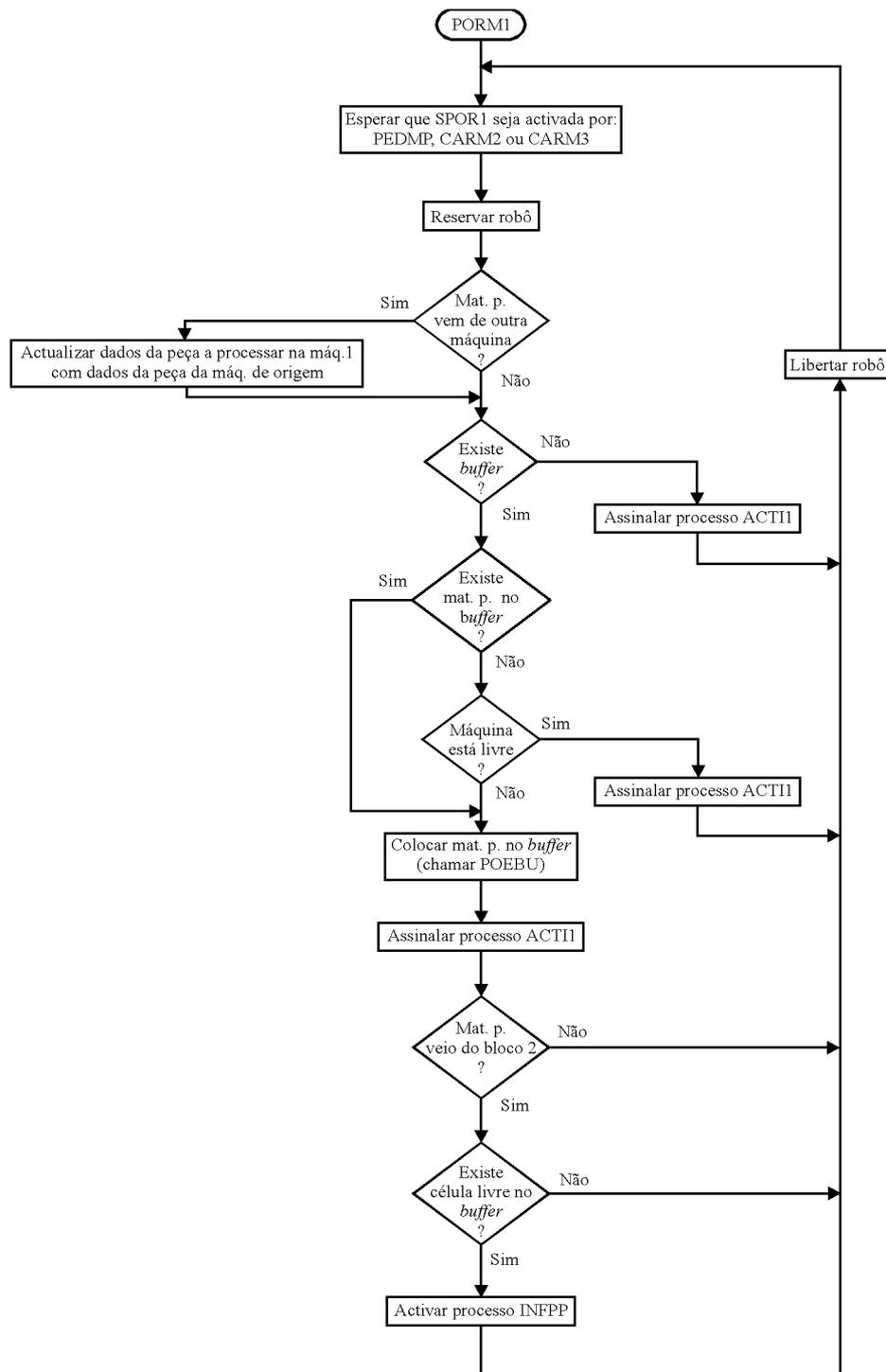


Figura Apêndice A.5 Fluxograma do processo *PORMI*

6. Processos *ACTI1*, *ACTI2* e *ACTI3*

Estes processos copiam os valores das variáveis da próxima peça para as variáveis da peça actual, caso a matéria prima venha de outra máquina ou do armazém. Seguidamente activam o respectivo processo *CARMn*, que carrega a máquina *n* com matéria prima para processamento. Existe um processo *ACTIn* para cada uma das máquinas. Cada processo *ACTIn* só é activado quando a respectiva máquina está livre, isto é, não tem peça em processamento, e existe uma peça para ser fabricada nessa máquina.

Devido à semelhança funcional existente entre estes processos, na figura Apêndice A.6 é apresentado, apenas, o fluxograma do processo *ACTI1*.

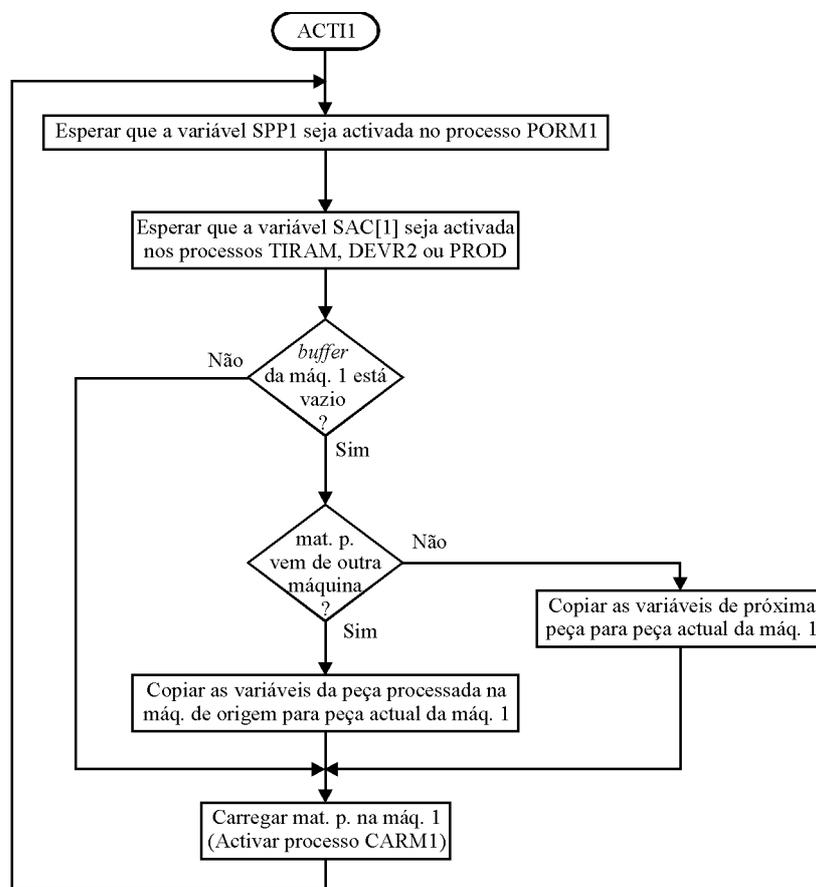


Figura Apêndice A.6 Fluxograma do processo *ACTI1*

7. Processos *CARM1*, *CARM2* e *CARM3*

O fluxograma de funcionamento do processo *CARM1* é apresentado na figura Apêndice A.7.

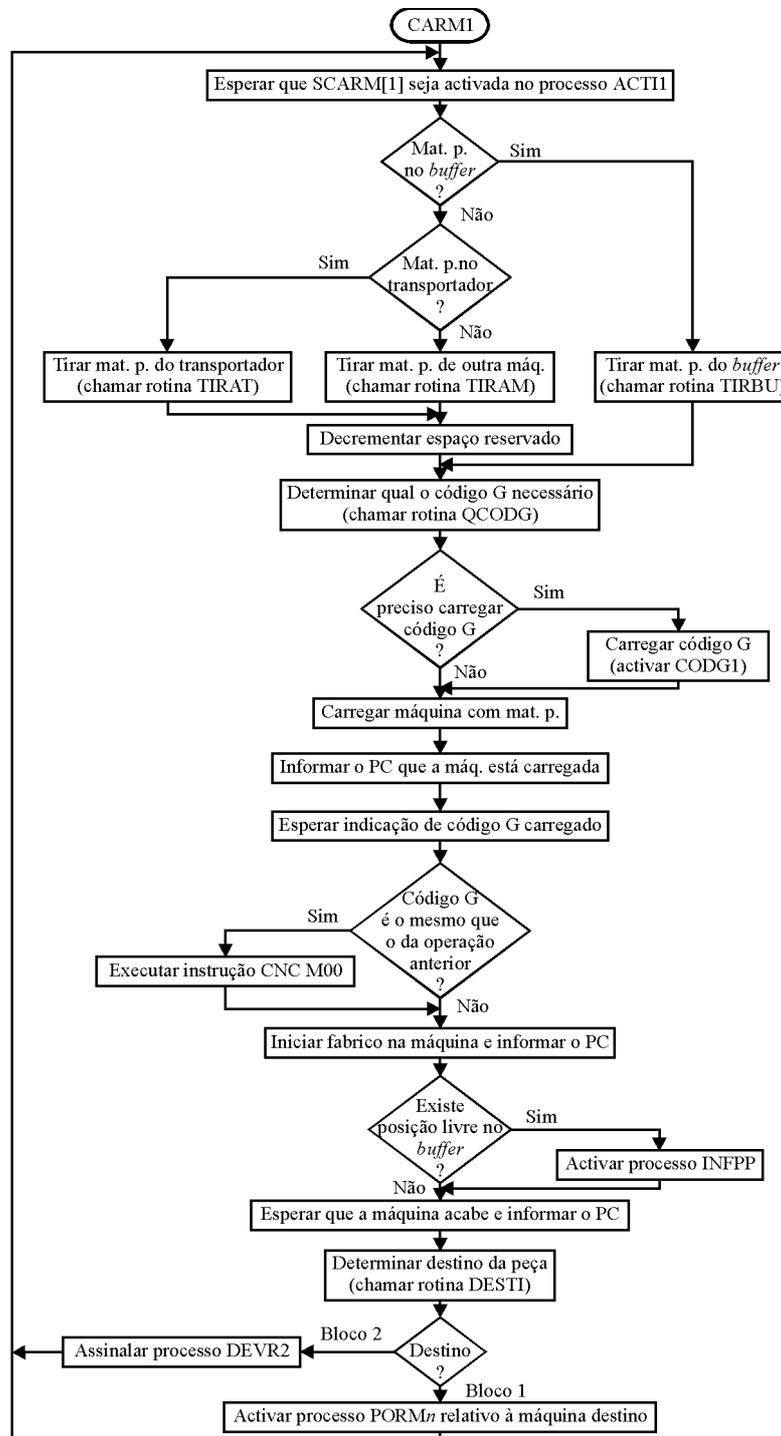


Figura Apêndice A.7 Fluxograma do processo *CARM1*

Existe um processo *CARMn* para cada uma das máquinas. Os processos *CARM2* e *CARM3* são idênticos ao representado na figura Apêndice A.7. Os processos *CARMn* são responsáveis

pelo carregamento das respectivas máquinas com matéria prima, pela decisão de carregamento do programa de código g associado à operação de fabrico que se vai realizar, caso seja necessário, e pelo início e fim da operação de maquinagem. Após a maquinagem, os processos *CARMn* determinam o destino do peça em fabrico e assinalam o processo de encaminhamento adequado. Durante a sua execução, os processos *CARMn* informam o computador acerca dos acontecimentos mais relevantes.

7. Processos *CODG1*, *CODG2* e *CODG3*

Os processos *CODGn* são responsáveis pelo carregamento do programa de código g nas máquinas respectivas. Existe um processo *CODGn* para cada uma das máquinas, de forma a poder ocorrer um eventual carregamento simultâneo de programas de código g distintos, em máquinas diferentes. Estes processos são activados pelos *CARMn* correspondentes, nos casos em que ainda não existe programa de código g no controlador da máquina-ferramenta ou, caso exista, este não é o adequado para a operação de fabrico que se vai realizar. Cada processo *CODGn* prepara a máquina respectiva para receber o programa de código g e informa o computador pessoal acerca do momento em que deve enviá-lo.

Devido à sua semelhança, na figura Apêndice A.8 apresenta-se apenas o fluxograma de funcionamento do processo *CODG1*.

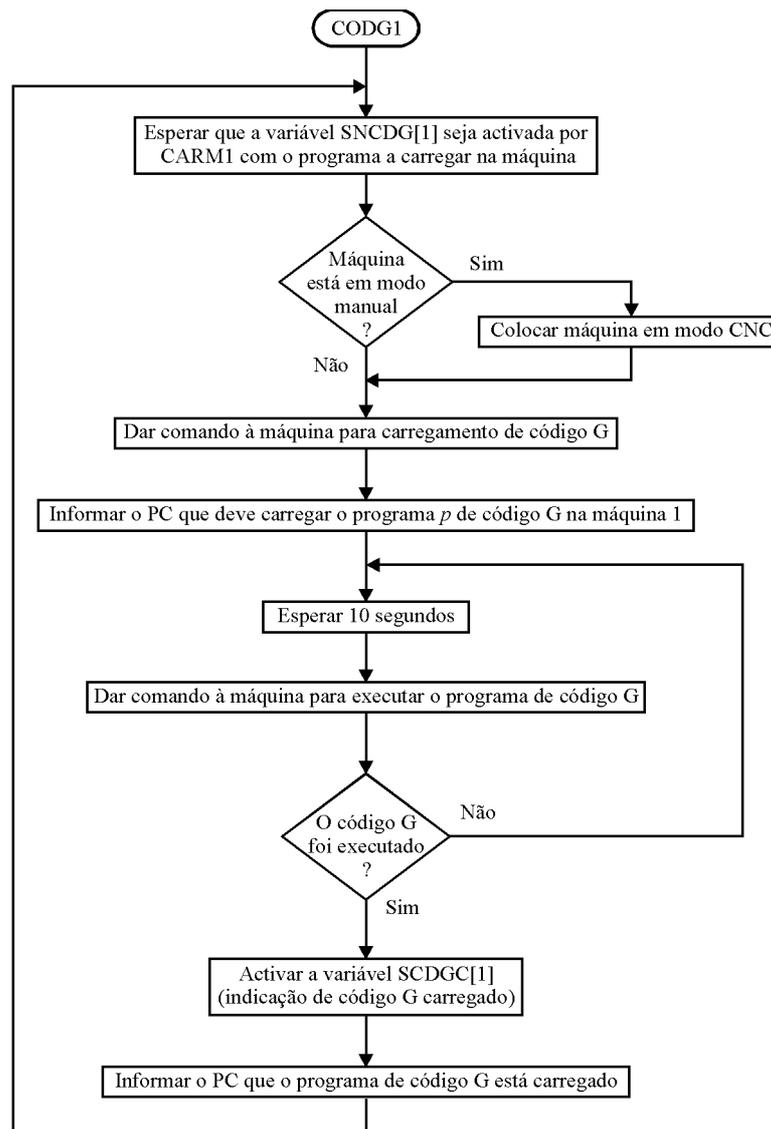
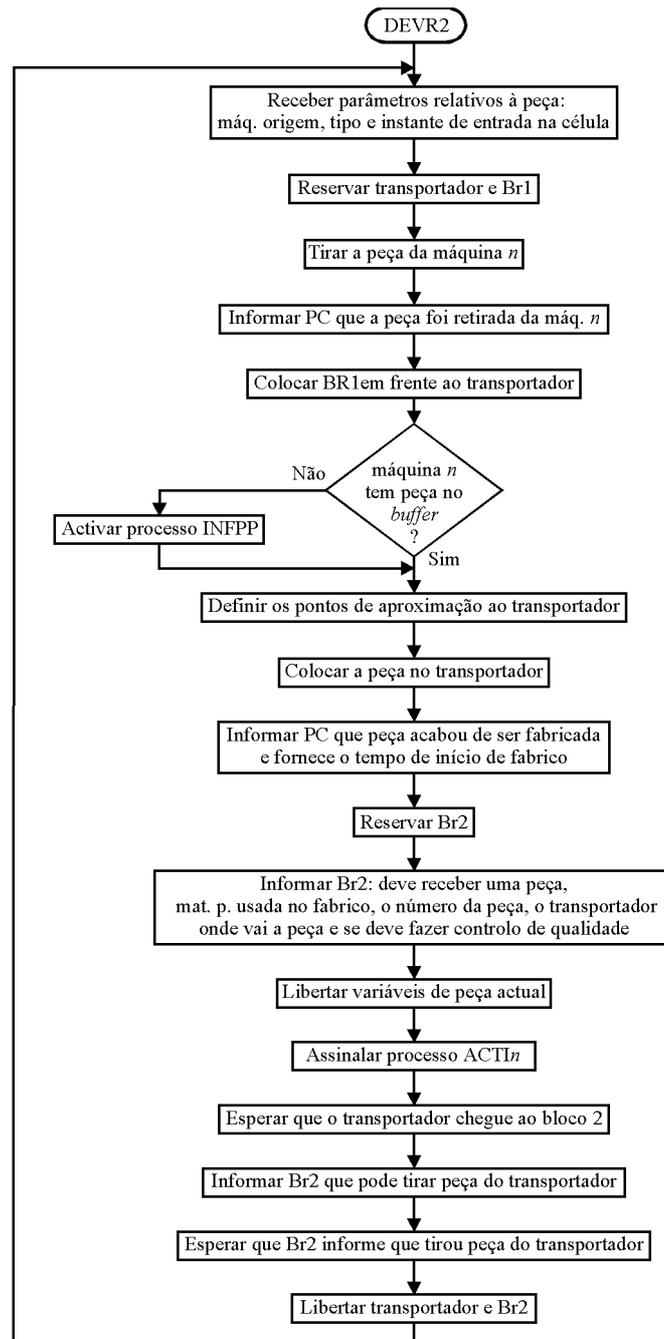


Figura Apêndice A.8 Fluxograma do processo *CODG1*

9. Processo *DEVR2*

O processo *DEVR2* dá ordem para ser retirada a peça acabada de uma máquina e envia-a para o robô BR2. Assim, a peça sai do bloco de maquinagem e o computador é informado do tipo de peça acabada de fabricar e do instante de tempo em que ocorreu a respectiva ordem de fabrico. Desta forma, o computador pode calcular o tempo de fluxo resultante do fabrico dessa peça.

O processo *DEVR2* dialoga com o controlador do robô BR2, de modo a que este retire a peça do transportador indicado e possa determinar se a peça deve ser sujeita a controlo de qualidade. O fluxograma do processo *DEVR2* é apresentado na figura Apêndice A.9.

Figura Apêndice A.9 Fluxograma do processo *DEVR2*

10. Rotinas *TIRAT* e *TIRAM*

A rotina *TIRAT* é utilizada pelos processos *CARM_n* e pela rotina *POEBU* para retirar matéria prima dos transportadores T1 ou T2. A rotina *TIRAM* é utilizada pelos processos *CARM_n* para retirar matéria prima ou peças acabadas das máquinas e pela rotina *POEBU* para retirar matéria prima das máquinas.

A rotina *TIRAT* possui dois parâmetros indicadores do transportador de onde deve retirar a matéria prima e da máquina a que se refere a operação.

A rotina *TIRAM* possui um parâmetro indicador da máquina a que se refere a operação. Após a sua execução, liberta as variáveis da máquina para se poder processar nova peça.

Nas figuras Apêndice A.10 e Apêndice A.11 apresentam-se os fluxogramas de funcionamento destas rotinas.

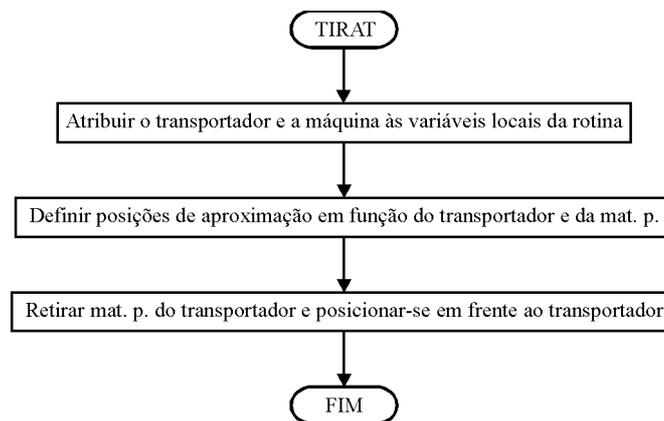


Figura Apêndice A.10 Fluxograma da rotina *TIRAT*

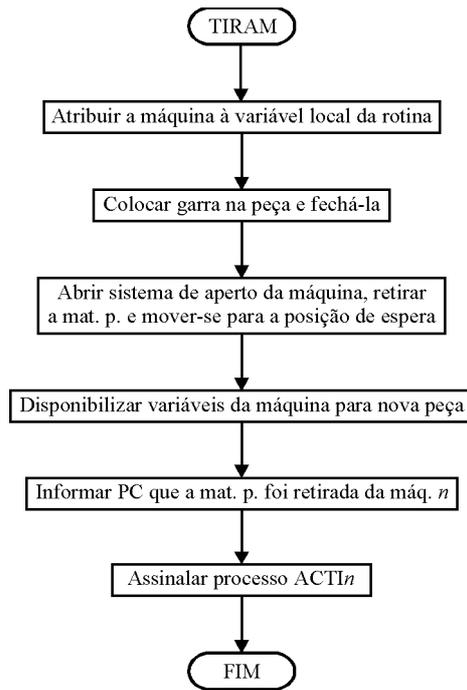


Figura Apêndice A.11 Fluxograma da rotina *TIRAM*

11. Rotinas *POEBU* e *TIRBU* e *POSCL*

Estas rotinas implementam a gestão dos armazenadores temporários de entrada de cada uma das máquinas. A forma como se realiza essa gestão descreve-se na secção 3.6.2.

A rotina *POEBU* é responsável pela colocação da matéria prima nos armazenadores temporários. O material pode vir do transportador ou de outra máquina. O fluxograma ilustrativo do seu funcionamento é apresentado na figura Apêndice A.12. Esta rotina é invocada a partir dos processos *PORMn* e, em função do parâmetro que lhe é passado, assim considera o armazenador temporário da máquina correspondente. A rotina *POEBU*, por sua vez, invoca a rotina *LIRES*, de modo a libertar o espaço reservado para a peça relativo à máquina designada.

A rotina *TIRBU* é responsável pela retirada da matéria prima dos armazenadores temporários. O fluxograma ilustrativo do seu funcionamento é apresentado na figura Apêndice A.13. Esta rotina é invocada a partir dos processos *CARMn* e, à semelhança de *POEBU*, em função do parâmetro que lhe é passado, assim considera o armazenador temporário da máquina correspondente. A ordem pela qual é retirada a matéria prima dos armazenadores temporários realiza-se segundo a regra *FIFO*.

Após a manipulação da matéria prima, as rotinas *POEBU* e *TIRBU* informam o computador da respectiva operação.

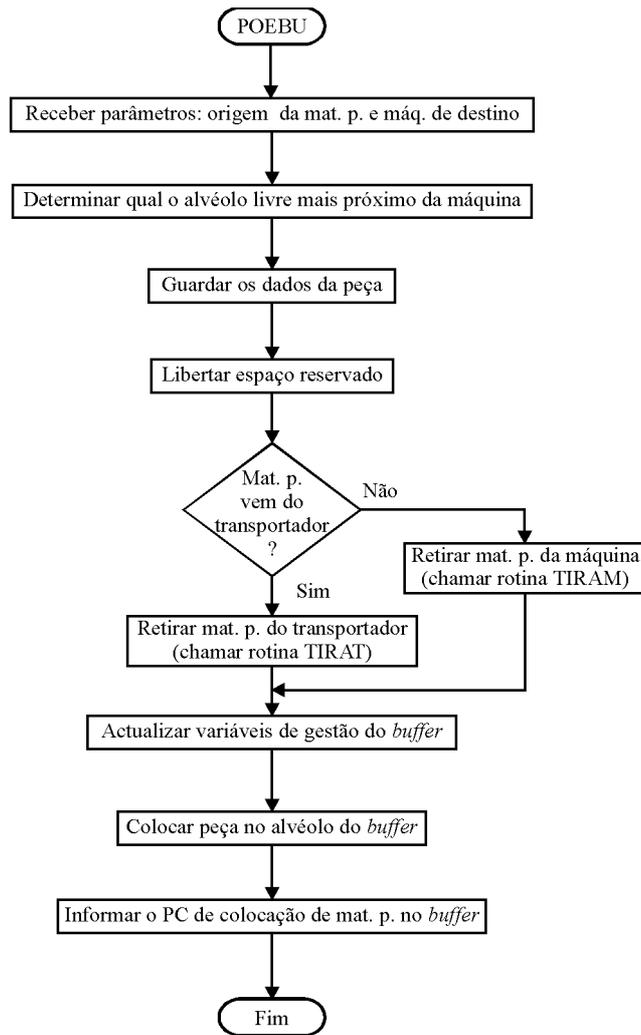


Figura Apêndice A.12 Fluxograma da rotina POEBU

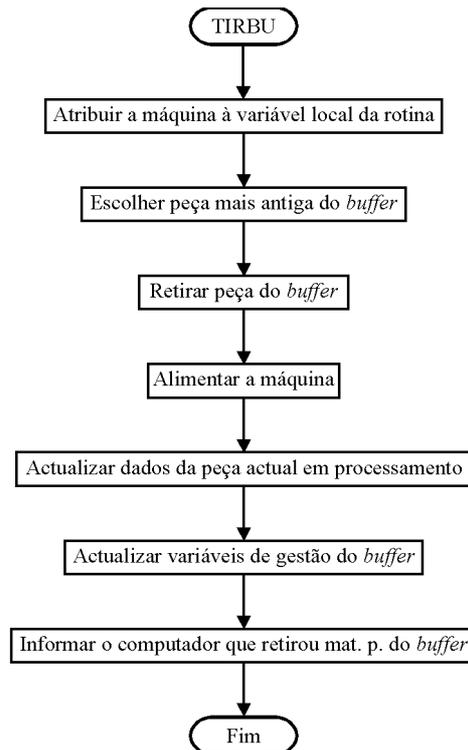


Figura Apêndice A.13 Fluxograma da rotina TIRBU

Para o cálculo das coordenadas físicas dos alvéolos dos três armazenadores temporários utiliza-se a rotina *POSCL* que é invocada pelas rotinas *POEBU* e *TIRBU*. O fluxograma ilustrativo do funcionamento da rotina *POSCL* é apresentado na figura Apêndice A.14. Esta rotina recebe como parâmetros a máquina e o número do alvéolo e devolve as coordenadas correspondentes do braço robô e da base deslizante. O robô BR1 pode assim colocar ou retirar a matéria-prima dos armazenadores temporários.

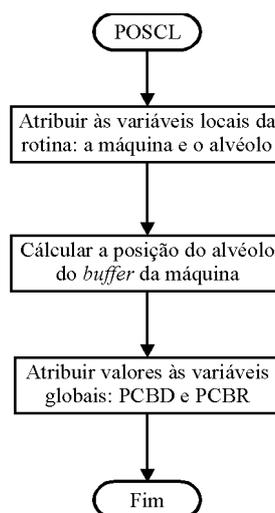


Figura Apêndice A.14 Fluxograma da rotina POSCL

12. Rotinas *RESLU*, *TRRES* e *LIRES*

Estas rotinas implementam a gestão da reserva de espaço na CFF, de forma a assegurar que uma ordem de fabrico seja realizável. A forma como se realiza essa gestão descreve-se na secção 3.5.2.

A rotina *RESLU* efectua a reserva de espaço nos armazenadores temporários das máquinas. É invocada pelo processo *INFPP*. À rotina *RESLU* é passado como argumento a máquina. Esta rotina, em função da máquina a que respeita o pedido, verifica se as outras máquinas, possíveis de serem ocupadas, têm espaço disponível. O resultado da tentativa de reserva é colocado na variável global *RSRES*. O fluxograma da rotina *RESLU* é apresentado na figura Apêndice A.15.

A rotina *TRRES* ajusta a reserva de espaço nos armazenadores temporários das máquinas. É invocada pelo processo *INFPP*. Recebe como parâmetros a máquina a que diz respeito o pedido e o tipo de peça a fabricar. Em função da máquina, determina qual o espaço reservado por *RESLU*, e dependendo do tipo de peça sabe qual o espaço que verdadeiramente vai ser ocupado. Assim, liberta o espaço reservado que não é necessário. A rotina *TRRES* recorre à rotina *DESTI*, para verificar onde vai realizar-se a segunda operação de maquinagem, caso exista. O fluxograma da rotina *TRRES* é apresentado na figura Apêndice A.16.

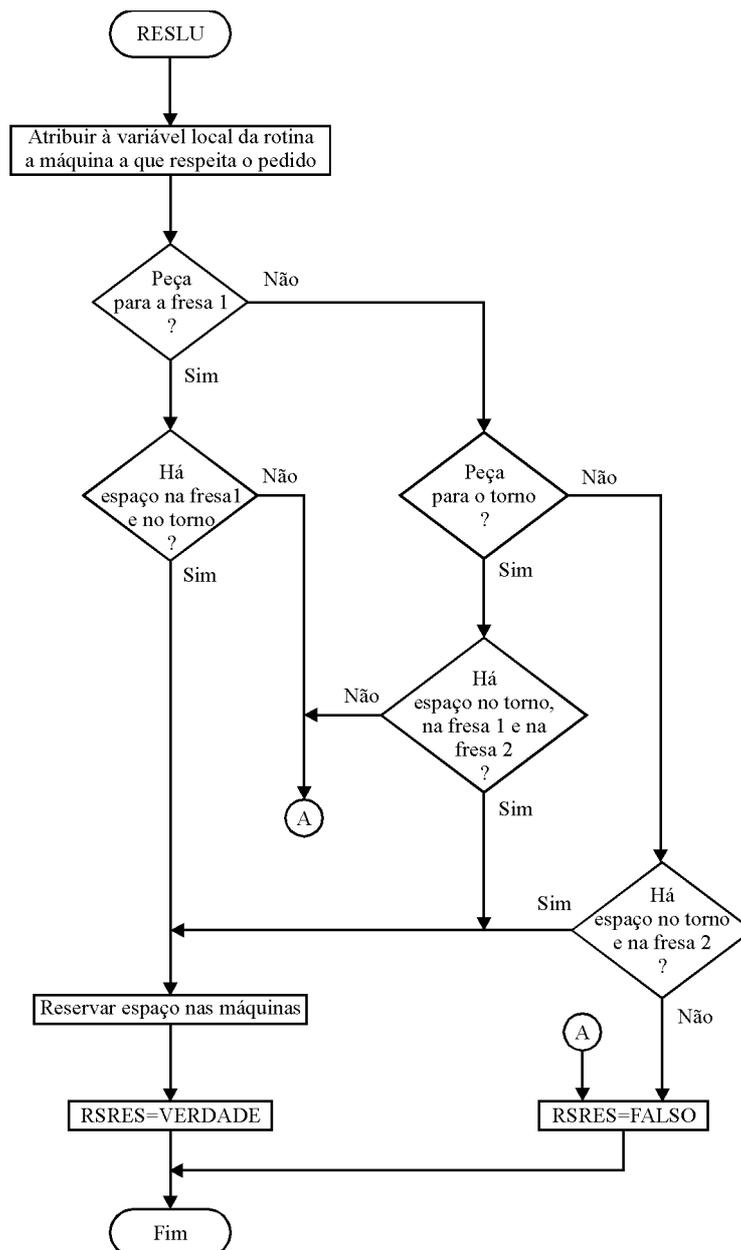


Figura Apêndice A.15 Fluxograma da rotina *RESLU*

A rotina *LIRES* liberta o espaço reservado nos armazenadores temporários das máquinas efectuado por *RESLU*. Esta rotina é invocada a partir do processo *INFPP*, no caso de, na disponibilidade da CFF para poder fabricar uma peça, não corresponder uma ordem de fabrico gerada pelo programa gestor da célula. O fluxograma da rotina *LIRES* é apresentado na figura Apêndice A.17.

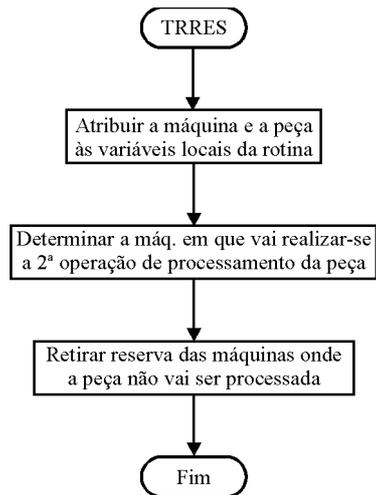


Figura Apêndice A.16 Fluxograma da rotina TRRES

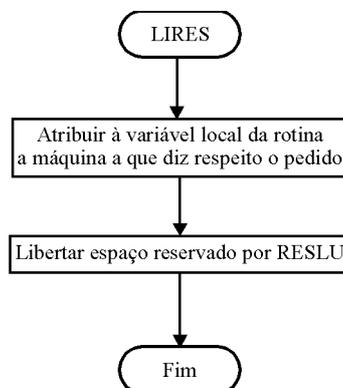


Figura Apêndice A.17 Fluxograma da rotina LIRES

13. Rotina DESTI

Esta rotina determina qual a próxima máquina em que a peça em vias de fabrico vai ser processada. Recebe como parâmetros a máquina que acabou de processar a matéria prima e qual o tipo de peça a fabricar. No caso de a peça já se encontrar fabricada e, portanto, não necessitar de ser processada em qualquer outra máquina, a rotina DESTI assinala esta situação. O fluxograma ilustrativo do seu funcionamento é apresentado na figura Apêndice A.18.

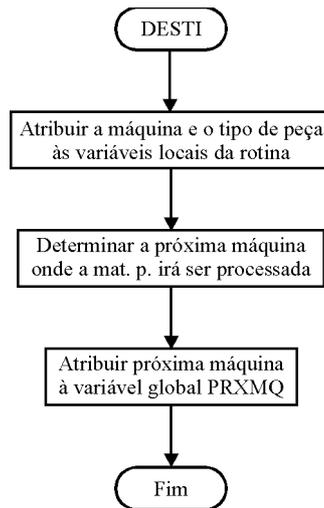


Figura Apêndice A.18 Fluxograma da rotina *DESTI*

14. Rotina *QCODG*

Esta rotina, em função da máquina e do tipo de peça que são passados como parâmetros, determina qual o programa de código g que deve ser carregado na máquina onde a matéria prima vai ser processada. O respectivo fluxograma é apresentado na figura Apêndice A.19.

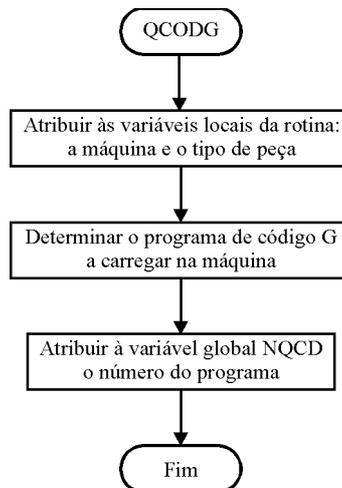


Figura Apêndice A.19 Fluxograma da rotina *QCODG*