

Pedro M. Moreira da Rocha Vilarinho

Cocepção Desenvolvimento  
de um Sistema Apoio

DEMEGI  
FEUP  
1997

---

Pedro Manuel Moreira da Rocha Vilarinho

**Concepção e Desenvolvimento de um Sistema  
de Apoio ao Projecto de Implantações Fabris**

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

1997

---

---

---

Pedro Manuel Moreira da Rocha Vilarinho

DETEGT  
FEUP

## Concepção e Desenvolvimento de um Sistema de Apoio ao Projecto de Implantações Fabris

Dissertação de doutoramento apresentada à

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

621(042)VILP/CON  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
PROFESSOR ASSOCIADO  
N.º 13352  
15 09 97

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

1997

---

---

---

---

## AGRADECIMENTOS

Diferentes pessoas e entidades contribuíram, de forma diversa, para a realização desta dissertação e a todas elas exprimo o meu reconhecimento. Não quero, contudo, deixar de particularizar alguns agradecimentos.

Em primeiro lugar, ao meu orientador, Prof. Doutor Rui Campos Guimarães, pelo interesse que pôs na supervisão deste trabalho e muito em especial pelo incentivo dado ao longo da sua realização.

Ao Jorge Freire de Sousa e ao José Vasconcelos Ferreira agradeço não só o empenho que colocaram na revisão final do texto desta dissertação mas também o apoio e a amizade que me dispensaram ao longo destes anos.

A todas as pessoas que no GEIN tão bem me acolheram e me proporcionaram um excelente ambiente de trabalho.

Ao GEIN e ao INEGI agradeço pela disponibilização de todas as condições técnicas e materiais que permitiram a realização deste trabalho.

À Secção Autónoma de Gestão e Engenharia Industrial, em particular ao seu director, Prof. Doutor Henrique Diz, agradeço todas as facilidades concedidas para que este trabalho fosse possível.

Finalmente, devo referir que os trabalhos de investigação apresentados nesta tese de doutoramento foram apoiados pelo programa PRODEP, medida 4.2, acção de formação 12.10.1.

---

---

---

---

## RESUMO

O projecto de implantações fabris envolve um processo de decisão de grande complexidade cuja resolução passa, no caso mais geral, pela sua decomposição num conjunto de problemas: selecção dos processos de fabrico, planeamento dos recursos necessários, afectação de operações de fabrico a máquinas, agrupamento de máquinas em secções (células de produção ou departamentos), selecção dos meios de movimentação, dimensionamento de parques intermédios de armazenagem e localização das secções ou das máquinas na área fabril.

Na definição destes problemas, embora se procure estabelecer as suas fronteiras por forma a minimizar as interacções entre eles, normalmente não é possível anulá-las por completo. Assim, o processo global de decisão não se restringe, em geral, à mera resolução sequencial dos referidos problemas, existindo frequentemente a necessidade de estabelecer retroacções entre eles.

Nesta dissertação caracteriza-se este processo de decisão e descreve-se a concepção e o desenvolvimento de um Sistema de Apoio ao Projecto de Implantações Fabris (SAD), que compreende as seguintes fases: planeamento dos recursos necessários e selecção dos processos de fabrico, afectação de operações de fabrico a máquinas, agrupamento de máquinas em secções fabris e implantação das máquinas nas secções fabris e destas na área fabril.

O problema do planeamento de recursos é modelizado por forma a envolver a selecção dos processos de fabrico e dos recursos (máquinas e mão-de-obra), com vista a minimizar os custos globais associados ao sistema de produção em análise. Da resolução do problema de planeamento de recursos deriva, por um lado, a definição do tipo de máquina em que cada operação é realizada e, por outro, a especificação do número necessário de máquinas de cada tipo para, no seu conjunto, permitirem a realização de todas as operações.

O objectivo do problema de afectação de operações de fabrico a máquinas é o de definir em detalhe a máquina específica para cada operação de fabrico. No procedimento que se propõe para a resolução deste problema, procura-se que a afectação de operações a máquinas seja definida por forma a que, para cada máquina,

---

---

---

---

os destinos dos fluxos nela gerados e as origens dos fluxos nela recebidos sejam tanto quanto possível idênticos entre si. Assim, pretende-se facilitar o agrupamento das máquinas em função das necessidades de circulação de materiais.

Uma vez especificado o conjunto de operações efectuadas em cada uma das máquinas dos diferentes tipos, procede-se ao agrupamento das máquinas em secções. No caso em que as máquinas são agrupadas em departamentos de acordo com a sua funcionalidade, a agregação de máquinas em secções é trivial. No caso da organização fabril ser por tecnologia de grupo, as máquinas são agrupadas em função dos componentes que processam. No SAD que se propõe, incluem-se duas heurísticas para apoiar o decisor na agregação de máquinas nesta situação.

Uma vez especificada a composição de cada secção de fabrico, o problema das implantações fabris é resolvido, definindo-se o posicionamento relativo das máquinas nas secções de fabrico e destas na área fabril, por forma a minimizar o custo global de transporte de materiais. Um modelo de programação não-linear, que encara a área fabril como um plano contínuo, foi desenvolvido para a resolução do problema da implantação de postos de máquinas em secções e destas na área fabril.

A interface desenvolvida permite ao utilizador o ajustamento das soluções obtidas, fornecendo-lhe para tal diversas informações, em particular, informação visual relativa à intensidade do fluxo entre as máquinas e entre as secções.

A obtenção de representações das implantações com um nível de detalhe razoável é assegurada pela inclusão de um módulo de desenho assistido por computador que permite a representação à escala dos objectos gráficos incluídos nas implantações.

---

---

# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução Geral</b> .....	<b>1</b>
1.1	Objectivo da dissertação .....	2
1.2	Relevância do problema .....	2
1.3	Estrutura da dissertação .....	3
<b>2</b>	<b>Enquadramento do problema de concepção de implantações fabris</b> .....	<b>5</b>
2.1	Introdução .....	6
2.2	Componentes do projecto de instalações industriais .....	6
2.3	Caracterização geral do problema de concepção de implantações fabris .....	9
2.4	O processo de criação ou de modificação de instalações industriais .....	11
2.5	Aplicabilidade do SAD a diferentes tipos de sistemas de produção .....	13
<b>3</b>	<b>Configuração do sistema de apoio ao projecto de implantações fabris</b> .....	<b>19</b>
3.1	Características gerais do sistema .....	20
3.2	Estrutura e interacções .....	22
3.3	Especificação da base de dados .....	27
3.3.1	Introdução .....	27
3.3.2	Conceitos básicos de OMT .....	28
3.3.3	Base de dados para o planeamento de recursos .....	32
3.3.4	Base de dados principal .....	35
<b>4</b>	<b>Planeamento das necessidades de equipamento e de mão-de-obra</b> .....	<b>39</b>
4.1	Introdução .....	40
4.1.1	Definição do problema do planeamento das necessidades de equipamento e de mão-de-obra .....	40
4.1.2	Abordagens utilizadas no planeamento das necessidades de equipamento e de mão-de-obra .....	41
4.2	Apresentação do modelo .....	44
4.2.1	Modelo básico .....	45
4.2.2	Representação de turnos de produção .....	48
4.2.3	Representação de turnos e de horas extraordinárias .....	50

4.2.4	Experiência computacional.....	52
4.2.5	Caracterização da solução para um exemplo concreto .....	56
4.3	Interacção com o utilizador .....	58
4.3.1	Descrição geral da interface.....	58
4.3.2	Introdução de dados .....	60
4.3.3	Utilização do modelo .....	67
4.3.4	Visualização dos resultados .....	68
4.4	Perspectivas de desenvolvimento do módulo.....	69
<b>5</b>	<b>Afectação das operações de fabrico a máquinas .....</b>	<b>74</b>
5.1	Introdução.....	75
5.2	Procedimento para afectação de operações de fabrico a máquinas .....	77
5.2.1	Agrupamento das operações por tipo de máquina .....	77
5.2.2	Descrição do procedimento .....	78
5.2.3	Modelo para a afectação residual de operações de fabrico a máquinas .....	80
5.2.4	Método de obtenção da solução. Experiência computacional .....	85
5.3	Algoritmo de recristalização simulada para o problema da afectação residual de operações de fabrico a máquinas .....	86
5.3.1	Algoritmo geral de recristalização simulada .....	86
5.3.2	Aplicação do algoritmo de recristalização simulada ao problema da afectação residual de operações de fabrico a máquinas .....	90
5.3.2.1	Parâmetros de controle.....	90
5.3.2.2	Geração da solução inicial e das soluções vizinhas .....	92
5.3.3	Experiência computacional.....	94
5.4	Ilustração do procedimento para um exemplo concreto.....	95
5.5	Interacção com o utilizador .....	103
5.5.1	Descrição geral da interface.....	103
5.5.2	Introdução de dados .....	105
5.5.3	Utilização do modelo .....	114
5.5.4	Visualização dos resultados .....	115
5.6	Perspectivas de desenvolvimento do módulo.....	118



<b>6. Agregação de máquinas em secções de fabrico .....</b>	<b>119</b>
6.1 Introdução.....	120
6.2 Tecnologia de grupo: definição e impacto na organização das empresas .....	121
6.3 Problema da formação de células de produção: métodos utilizados na sua abordagem .....	123
6.3.1 Métodos baseados na matriz de incidência.....	124
6.3.1.1 Métodos matriciais .....	125
6.3.1.2 Métodos hierárquicos de 'clustering' .....	126
6.3.1.3 Métodos não-hierárquicos de 'clustering' .....	128
6.3.1.4 Modelos de programação matemática.....	129
6.3.1.5 Métodos de pesquisa .....	130
6.3.1.6 Outros métodos .....	131
6.3.2. Métodos baseados na matriz de fluxos entre máquinas .....	132
6.4 Problema da formação de células de produção: medidas de qualidade das soluções .....	134
6.5 Heurísticas incorporadas no SAD .....	137
6.5.1 Heurística baseada num método não-hiérarquico de 'clustering' .....	138
6.5.1.1 Notação e conceitos utilizados no algoritmo .....	139
6.5.1.2 Procedimento para a obtenção de uma solução inicial .....	143
6.5.1.3 Procedimento para o melhoramento da solução inicial .....	149
6.5.1.4 Experiência computacional .....	153
6.5.2 Heurística de redução do fluxo intercelular.....	153
6.5.2.1 Parâmetros de entrada do algoritmo.....	154
6.5.2.2 Procedimento para a obtenção de uma solução inicial para o problema da formação de famílias de máquinas .....	156
6.5.2.3 Procedimento para o melhoramento da solução inicial .....	161
6.5.2.4 Procedimento para a formação das famílias de componentes.....	162
6.5.2.5 Experiência computacional .....	165
6.6 Interação com o utilizador .....	166
6.6.1 Descrição geral da interface.....	166

6.6.2	Introdução de dados .....	166
6.6.3	Utilização das heurísticas .....	173
6.6.3.1	Utilização da heurística GS .....	173
6.6.3.2	Utilização da heurística OCCS .....	176
6.6.4	Definição manual das secções e ajustamento das soluções obtidas .....	177
6.6.5	Visualização e eliminação de soluções .....	179
6.4.6	Visualização e redefinição dos equipamentos de transporte .....	179
6.7	Perspectivas de desenvolvimento do módulo .....	181
<b>7</b>	<b>Desenho de objectos gráficos e de postos de trabalho .....</b>	<b>183</b>
7.1	Introdução .....	184
7.2	Desenho de objectos gráficos .....	184
7.2.1	Estrutura da base de dados .....	185
7.2.2	Interação com o utilizador .....	187
7.2.2.1	Descrição geral da interface .....	187
7.2.2.2	Operações sobre objectos gráficos .....	190
7.2.2.3	Operações de edição .....	191
7.2.2.4	Operações sobre linhas .....	193
7.2.2.5	Operações sobre objectos .....	194
7.2.2.6	Operações sobre a área de desenho .....	194
7.2.2.7	Figuras geométricas e paleta de cores .....	196
7.2.2.8	Informação e introdução de dimensões .....	197
7.3	Desenho de postos de trabalho .....	197
7.3.1	Descrição geral da interface .....	200
7.3.2	Seleção de máquinas .....	202
7.3.3	Operações sobre a área de desenho .....	203
7.3.4	Operações para a configuração de postos de trabalho .....	204
7.3.5	Operações sobre o desenho de postos de trabalho .....	206
7.4	Perspectivas de desenvolvimento do módulo .....	207
<b>8</b>	<b>Problema das implantações fabris .....</b>	<b>208</b>
8.1	Introdução .....	209

8.2	Modelos para o problema das implantações fabris .....	211
8.2.1	Secções com áreas iguais .....	211
8.2.2	Secções com áreas diferentes.....	212
8.2.3	Implantação de máquinas (ou de secções com configuração geométrica fixa) .....	214
8.3	Critérios alternativos para o problema das implantações fabris .....	216
8.3.1	Minimização do custo de transporte de materiais.....	216
8.3.2	Maximização da medida global de desejabilidade de adjacência entre as secções .....	219
8.3.3	Critérios compostos .....	221
8.4	Heurísticas para o problema da implantação de secções com áreas desiguais .....	223
8.4.1	Métodos de construção .....	224
8.4.2	Métodos de melhoramento .....	228
8.4.3	Outros métodos .....	232
8.5	Heurísticas para a resolução do problema da implantação de máquinas (ou de secções com configuração geométrica fixa) .....	234
8.6	Heurística utilizada no sistema .....	239
8.6.1	Aspectos gerais .....	239
8.6.2	Descrição da heurística incorporada no sistema para o problema de implantações fabris .....	241
8.6.3	Experiência computacional.....	246
8.7	Interacção com o utilizador .....	248
8.7.1	Descrição geral da interface.....	248
8.7.2	Introdução de dados .....	249
8.7.3	Implantação de postos de trabalho em secções de fabrico .....	251
8.7.3.1	Seleção da secção .....	253
8.7.3.2	Operações sobre a área de desenho .....	254
8.7.3.3	Visualização dos parâmetros das soluções.....	255
8.7.3.4	Operações de configuração de secções .....	256
8.7.3.5	Operações sobre a configuração de secções .....	258
8.7.4	Implantação global de postos de trabalho ou de secções.....	258
8.8	Perspectivas de desenvolvimento do módulo.....	262

<b>9. Em conclusão</b> .....	<b>265</b>
9.1 Conclusões gerais .....	266
9.2 Perspectivas de desenvolvimento do sistema .....	271
<b>Referências bibliográficas</b> .....	<b>273</b>
<b>Apêndice A</b> Definição das bases de dados .....	<b>286</b>
<b>Apêndice B</b> Exemplo do cálculo do número de viagens .....	<b>299</b>
<b>Apêndice C</b> Gerador de problemas .....	<b>301</b>
<b>Apêndice D</b> Problema exemplo .....	<b>304</b>
<b>Apêndice E</b> Descrição detalhada do algoritmo de recristalização simulada para o problema da afectação residual de operações de fabrico a máquinas .....	<b>310</b>
<b>Apêndice F</b> Descrição detalhada do algoritmo baseado num método não-hierárquico de 'clustering' .....	<b>316</b>
<b>Apêndice G</b> Descrição detalhada do algoritmo de redução do fluxo intercelular .....	<b>324</b>

# Índice de figuras

Figura 2.1	- Componentes do projecto de instalações industriais.....	7
Figura 2.2	- O processo de criação ou de modificação de instalações industriais .....	11
Figura 2.3	- Tipos de implantações fabris.....	15
Figura 3.1	- Arquitectura do SAD .....	21
Figura 3.2	- Janela principal do sistema .....	23
Figura 3.3	- Principais interacções do Sistema de Apoio ao Desenho de Implantações Fabris.....	25
Figura 3.4	- Representação de uma classe .....	29
Figura 3.5	- Multiplicidade de associações.....	29
Figura 3.6	- Relação de associação .....	30
Figura 3.7	- Associação ternária com atributo .....	30
Figura 3.8	- Modelização de uma associação como uma classe .....	31
Figura 3.9	- Relação de generalização .....	31
Figura 3.10	- Relação de agregação .....	32
Figura 3.11	- Estrutura da base de dados para os dados de entrada do módulo de planeamento de recursos .....	33
Figura 3.12	- Estrutura da base de dados para as soluções do módulo de planeamento de recursos .....	34
Figura 3.13	- Estrutura da base de dados para o módulo do problema de afectação de operações de fabrico a máquinas .....	36
Figura 3.14	- Estrutura da base de dados dos módulos de agregação de equipamentos em secções e de implantação de secções .....	37
Figura 3.15	- Estrutura da base de dados do módulo de implantações fabris.....	38
Figura 4.1	- Modelo básico para o problema do planeamento das necessidades de equipamento e de mão-de-obra.....	47
Figura 4.2	- Modelo para o problema do planeamento das necessidades de equipamento e de mão-de-obra incluindo turnos.....	50
Figura 4.3	- Modelo para o problema do planeamento das necessidades de equipamento e de mão-de-obra incluindo turnos e horas extraordinárias .....	52

Figura 4.4	- Área da janela principal relativa ao módulo de planeamento de recursos .....	58
Figura 4.5	- Percursos de acesso aos comandos do módulo de planeamento dos recursos .....	59
Figura 4.6	- Caixa de diálogo de criação/modificação de um problema de planeamento de recursos .....	60
Figura 4.7	- Lista de selecção de identificadores de projecto .....	61
Figura 4.8	- Caixa de diálogo de erro .....	62
Figura 4.9	- Caixa de diálogo de criação de classes de mão-de-obra .....	62
Figura 4.10	- Caixa de diálogo de introdução de dados de turnos e horas extraordinárias .....	63
Figura 4.11	- Caixa de diálogo de introdução/modificação de tipos de máquinas .....	64
Figura 4.12	- Caixas de diálogo para criação e alteração de componentes.....	65
Figura 4.13	- Caixa de diálogo para definição das operações .....	66
Figura 4.14	- Caixa de diálogo para introdução do número de rotas .....	66
Figura 4.15	- Caixa de diálogo para introdução do número de operações e tamanho do lote .....	66
Figura 4.16	- Caixa de diálogo para introdução dos parâmetros para a resolução do problema .....	67
Figura 4.17	- Janelas para visualização dos resultados .....	68
Figura 4.18	- Modelo para o problema do planeamento das necessidades de equipamento e de mão-de-obra incluindo diferentes períodos de planeamento .....	72
Figura 5.1	- Procedimento para afectação de operações de fabrico a máquinas .....	79
Figura 5.2	- Exemplo do cálculo da penalidade a introduzir na função objectivo .....	82
Figura 5.3	- Modelo para o problema da afectação residual de operações de fabrico a máquinas .....	84
Figura 5.4	- Curva de temperatura de um processo de recristalização .....	87
Figura 5.5	- Algoritmo geral de recristalização simulada.....	88
Figura 5.6	- Gráfico da menor probabilidade de aceitação de soluções inferiores em função da temperatura .....	91
Figura 5.7	- Sequências de operações para os produtos do exemplo analisado.....	97

Figura 5.8	- Operações realizadas no tipo de máquina M3 .....	98
Figura 5.9	- Operações executadas no tipo de máquina M1 .....	100
Figura 5.10	- Área da janela principal relativa ao módulo de afectação de operações de fabrico a máquinas.....	103
Figura 5.11	- Percursos de acesso aos comandos do módulo de afectação de operações .....	104
Figura 5.12	- Caixa de diálogo de identificação do problema de afectação de operações de fabrico a máquinas.....	105
Figura 5.13	- Caixa de diálogo para importação de dados a partir de uma solução do problema de planeamento de recursos .....	106
Figura 5.14	- Caixa de diálogo para introdução de tipos de máquinas .....	107
Figura 5.15	- Caixas de diálogo para criação e alteração de componentes.....	108
Figura 5.16	- Janela com a paleta de cores .....	108
Figura 5.17	- Janela para visualização da lista de materiais de um componente .....	109
Figura 5.18	- Caixa de diálogo para definição das operações .....	110
Figura 5.19	- Caixa de diálogo para definição do tamanho do lote .....	110
Figura 5.20	- Caixas de diálogo para definição dos parâmetros das operações.....	111
Figura 5.21	- Caixa de diálogo para definição de armazéns .....	113
Figura 5.22	- Caixa de diálogo para definição de tipos de equipamento de movimentação de materiais .....	113
Figura 5.23	- Caixa de diálogo para definição dos parâmetros do problema.....	114
Figura 5.24	- Janela para visualização dos fluxos entre equipamentos .....	115
Figura 5.25	- Janela para visualização das operações executadas em cada máquina.....	116
Figura 5.26	- Janela para visualização dos equipamentos que processam cada uma das operações .....	116
Figura 5.27	- Histograma do número de operações por máquinas .....	117
Figura 5.28	- Histograma do número de equipamentos por operação .....	117
Figura 6.1	- Exemplo de um diagrama em árvore gerado por um algoritmo hierárquico de 'clustering' .....	128
Figura 6.2	- Área da janela principal relativa ao módulo de agregação de máquinas em secções .....	166

Figura 6.3	- Percursos de acesso aos comandos do módulo de agregação de máquinas em secções .....	167
Figura 6.4	- Caixa de diálogo de identificação do problema .....	168
Figura 6.5	- Caixa de diálogo para importação de uma solução do problema de afectação de operações .....	169
Figura 6.6	- Caixa de diálogo para a definição de operações .....	170
Figura 6.7	- Caixa de diálogo para introdução/modificação dos dados da rota .....	170
Figura 6.8	- Caixas de diálogo para definição dos parâmetros das operações.....	172
Figura 6.9	- Submenu das heurísticas para o problema de agregação de máquinas em células.....	173
Figura 6.10	- Janela com uma escala para introdução do factor de correcção da medida de eficácia .....	174
Figura 6.11	- Janela com a solução de um problema (Forma diagonal por blocos).....	174
Figura 6.12	- Janela com a solução de um problema (Matriz de fluxos) .....	175
Figura 6.13	- Caixa de diálogo para a introdução do identificador da solução .....	175
Figura 6.14	- Janela para introdução dos identificadores das células .....	176
Figura 6.15	- Janela para introdução dos parâmetros da heurística OCCS .....	177
Figura 6.16	- Caixa de diálogo para a formação manual de secções .....	178
Figura 6.17	- Janela para visualização dos fluxos inter-secções e intra-secções e redefinição dos parâmetros relativos aos equipamentos de transporte.....	180
Figura 6.18	- Janela com os parâmetros de transporte de materiais entre máquinas .....	181
Figura 7.1	- Estrutura da base de dados para o módulo de desenho de objectos gráficos .....	185
Figura 7.2	- Área da janela principal relativa aos módulos de desenho de objectos gráficos e de postos de trabalho .....	187
Figura 7.3	- Janela principal do módulo de desenho de objectos gráficos.....	188
Figura 7.4	- Percursos de acesso aos comandos do módulo de desenho de objectos gráficos.....	189



Figura 7.5	- Mensagem de aviso .....	190
Figura 7.6	- Opções para a definição da espessura do traço .....	193
Figura 7.7	- Opções para a definição do tipo de linha .....	193
Figura 7.8	- Opções disponíveis para a escala dos desenhos .....	195
Figura 7.9	- Opções disponíveis para as dimensões da área de desenho .....	195
Figura 7.10	- Exemplo ilustrativo da importância da definição de pontos de entrada e saída .....	198
Figura 7.11	- Exemplo ilustrativo da importância da orientação dos equipamentos .....	199
Figura 7.12	- Janela principal do módulo de desenho de postos de trabalho.....	200
Figura 7.13	- Percursos de acesso aos comandos do módulo de desenho de postos de trabalho.....	201
Figura 7.14	- Caixa de diálogo para identificação do problema de implantação .....	203
Figura 7.15	- Caixa de diálogo para a definição do contorno dos postos de trabalho.....	205
Figura 7.16	- Escala para a definição do ângulo de rotação de símbolos .....	206
Figura 8.1	- Exemplo de uma tabela REL .....	220
Figura 8.2	- Padrão de varrimento da área de implantação - ALDEP .....	225
Figura 8.3	- Exemplo de aplicação do procedimento ALDEP .....	225
Figura 8.4	- Exemplo de uma implantação obtida pelo procedimento CORELAP .....	227
Figura 8.5	- Exemplo da utilização de curvas de preenchimento de espaço na definição de uma implantação .....	231
Figura 8.6	- Permuta das secções 2 e 5, no exemplo considerado .....	231
Figura 8.7	- Conjunto de posições consideradas para a máquina a colocar (MAC) relativamente ao rectângulo envolvente das máquinas já colocadas (REMJC).....	237
Figura 8.8	- Exemplo de aplicação dos procedimentos sequenciais.....	238
Figura 8.9	- Exemplo que ilustra um recurso e o respectivo bloco envolvente (ampliação de 5 vezes) .....	240
Figura 8.10	- Teste das posições do bloco que não violam as restrições de não sobreposição .....	243

Figura 8.11	- Exemplo de aplicação da heurística incorporada no SAD.....	245
Figura 8.12	- Área da janela principal relativa ao módulo de implantações fabris .....	249
Figura 8.13	- Percursos de acesso ao primeiro nível de comandos do módulo de implantações fabris .....	249
Figura 8.14	- Percursos de acesso aos comandos para introdução de dados no módulo de implantações fabris .....	250
Figura 8.15	- Janela principal do módulo de implantação de postos de trabalho em secções .....	251
Figura 8.16	- Percursos de acesso aos comandos para definição da implantação de secções .....	252
Figura 8.17	- Caixa de diálogo para a definição dos parâmetros para o problema da implantação de secções .....	253
Figura 8.18	- Janela para visualização das soluções para o problema corrente.....	255
Figura 8.19	- Caixa de diálogo para definição do contorno de um posto de trabalho .....	256
Figura 8.20	- Escala para a definição do ângulo de rotação de postos de trabalho .....	257
Figura 8.21	- Janela principal do módulo de implantação de secções, postos de trabalho e armazéns na área fabril (Exemplo de implantação de postos de trabalho) .....	259
Figura 8.22	- Percursos de acesso aos comandos para definição da implantação global .....	260
Figura 8.23	- Caixa de diálogo para selecção das secções a implantar .....	261
Figura 8.24	- Caixa de diálogo para definição da posição relativa dos armazéns.....	261
Figura 8.25	- Janela principal do módulo de implantação de secções, postos de trabalho e armazéns na área fabril (Exemplo de implantação de secções) .....	263

# Índice de Tabelas

Tabela 4.1	- Parâmetros do gerador utilizados nos 12 conjuntos de problemas teste.....	53
Tabela 4.2	- Resultados globais para a estratégia A.....	54
Tabela 4.3	- Resultados globais para a estratégia B.....	55
Tabela 4.4	- Resultados globais para a estratégia C.....	55
Tabela 4.5	- Custos durante o horizonte de planeamento.....	57
Tabela 4.6	- Número de máquinas a adquirir.....	57
Tabela 4.7	- Número de trabalhadores afectos a cada turno e necessidades de trabalho extraordinário.....	58
Tabela 4.8	- Número de lotes de cada componente a ser produzido de acordo com cada rota.....	58
Tabela 5.1	- Resultados globais.....	95
Tabela 5.2	- Valores de $u_{iM0}$ .....	95
Tabela 5.3	- Valores de $u_{iM1}$ .....	96
Tabela 5.4	- Valores de $u_{iM2}$ .....	96
Tabela 5.5	- Valores de $u_{iM3}$ .....	96
Tabela 5.6	- Valores de $u_{iM4}$ .....	96
Tabela 5.7	- Matriz de penalidades para o problema de programação binária associado ao tipo de máquina M3.....	99
Tabela 5.8	- Afectação das operações às máquinas do tipo M3.....	99
Tabela 5.9	- Matriz de penalidades para o problema de programação binária associado ao tipo de máquina M1.....	100
Tabela 5.10	- Afectação das operações às máquinas do tipo M1.....	101
Tabela 5.11	- Afectação das operações às máquinas do tipo M0.....	101
Tabela 5.12	- Afectação das operações às máquinas do tipo M4.....	102
Tabela 5.13	- Matriz de fluxos.....	102
Tabela 6.1	- Exemplo de um matriz de incidência na forma diagonal por blocos (MDB).....	125
Tabela 6.2	- Medidas de semelhança entre máquinas mais frequentemente utilizadas.....	127
Tabela 6.3	- Outros métodos para o problema da formação de células.....	131
Tabela 6.4	- Exemplo de uma matriz de incidência máquinas-componentes.....	132

Tabela 6.5	- Exemplo de uma matriz de incidência .....	136
Tabela 6.6	- Matriz de incidência máquinas-componentes relativa ao exemplo analisado .....	139
Tabela 6.7	- Coeficientes de dissemelhança mais frequentemente utilizados .....	140
Tabela 6.8	- Matriz de dissemelhanças para o problema analisado .....	141
Tabela 6.9	- Composição das células .....	147
Tabela 6.10	- Dissemelhanças das máquinas não afectadas às células .....	148
Tabela 6.11	- Composição das células .....	148
Tabela 6.12	- Número de operações de cada componente processado em cada célula .....	149
Tabela 6.13	- Afectação final de máquinas e componentes a famílias .....	149
Tabela 6.14	- Número de componentes de cada família, processados em cada máquina .....	151
Tabela 6.15	- Afectação de máquinas e componentes a células .....	151
Tabela 6.16	- Dissemelhança média da máquina 5M4 a cada uma das células .....	152
Tabela 6.17	- Número de operações de cada componente executadas em cada célula .....	152
Tabela 6.18	- Afectação de máquinas e componentes a células .....	152
Tabela 6.19	- Matriz de fluxo para o exemplo considerado .....	155
Tabela 6.20	- Valor relativo do fluxo .....	157
Tabela 6.21	- Primeiro conjunto de valores de $MVFR_j$ .....	158
Tabela 6.22	- Segundo conjunto de valores de $MVFR_j$ .....	158
Tabela 6.23	- Terceiro conjunto de valores de $MVFR_j$ .....	159
Tabela 6.24	- Afectação de máquinas a células .....	159
Tabela 6.25	- Matriz de fluxo relativo máquina-célula .....	160
Tabela 6.26	- Afectação de máquinas a células .....	160
Tabela 6.27	- Primeiro conjunto de valores de $ICFR_j$ .....	161
Tabela 6.28	- Valores relativos de fluxo da máquina 3M0 com cada uma das células não completas .....	162
Tabela 6.29	- Segundo conjunto de valores de $ICFR_j$ .....	162
Tabela 6.30	- Valores relativos de fluxo da máquina 1M4 com cada uma das células não completas .....	162
Tabela 6.31	- Afectação final das máquinas a células .....	162
Tabela 6.32	- Número total de operações e número de operações por célula para cada componente .....	163

Tabela 6.33	-	Afectação de máquinas e componentes a células.....	164
Tabela 6.34	-	Afectação de máquinas e componentes a células.....	165
Tabela 8.1	-	Valores numéricos associados à medida de desejabilidade de adjacência entre cada par de secções e os valores de TCR e da área requerida para cada secção .....	226
Tabela 8.2	-	Comparação de resultados para o problema teste de Imam e Mir .....	247
Tabela 8.3	-	Comparação de resultados para o problema teste de Welgama e Gibson (1993) .....	248

# 1

---

## Introdução Geral

### Conteúdo

- Objectivo da dissertação
- Relevância do problema
- Estrutura da dissertação

## 1.1 Objectivo da dissertação

O projecto de implantações fabris envolve um processo de decisão de grande complexidade cuja resolução passa, no caso mais geral, pela sua decomposição num conjunto de problemas: selecção dos processos de fabrico, planeamento dos recursos necessários, afectação de operações de fabrico a máquinas, agrupamento de máquinas em secções (células de produção ou departamentos), selecção dos meios de movimentação, dimensionamento de parques intermédios de armazenagem e localização das secções ou das máquinas na área fabril.

Na definição destes problemas, embora se procure estabelecer as suas fronteiras por forma a minimizar as interacções entre eles, normalmente não é possível anulá-las por completo. Assim, o processo global de decisão não se restringe, em geral, à mera resolução sequencial dos referidos problemas, existindo frequentemente a necessidade de estabelecer retroacções entre eles.

Nesta dissertação caracteriza-se este processo de decisão e descreve-se a concepção e o desenvolvimento de um Sistema de Apoio ao Projecto de Implantações Fabris, que compreende as fases do planeamento de instalações industriais desde a selecção dos processos de fabrico até à implantação das máquinas.

## 1.2 Relevância do problema

A sobrevivência das empresas industriais, num mercado cada vez mais global e competitivo, exige que a eficiência com que utilizam os seus recursos seja máxima e, conseqüentemente, que os custos de produção sejam mínimos.

O planeamento eficiente das instalações industriais contribui decisivamente para a redução dos custos de produção. Estimativas apresentadas por Tompkins e White (1984) situam entre 10 e 30% a redução dos custos de transporte de materiais (que representam 20 a 50% dos custos totais de operação de uma unidade industrial). Num outro trabalho (Sule (1988)), estima-se que o impacto dos custos de transporte de

materiais nos custos totais de produção varia entre 30 e 70% consoante a implantação está planeada por produto ou por processo.

Uma implantação eficiente pode ainda conduzir à diminuição dos ciclos de produção, das existências em curso de fabrico, dos tempos de paragem, do número de 'gargalos', dos tempos de movimentação de materiais e ao aumento dos volumes de produção (Francis e White (1974)), com consequências óbvias na produtividade e, consequentemente, nos custos de produção.

Um outro aspecto que torna relevante o investimento no projecto de implantações fabris advém do facto de as decisões a ele associadas serem por natureza estruturais, no sentido em que têm um impacto a longo prazo: uma vez implementadas, a sua modificação obriga normalmente a elevados investimentos que decorrem tanto da deslocação de equipamentos como da perda de tempo de produção.

A procura de factores de aumento de produtividade, como forma de compensar a perda de competitividade associada à subida dos encargos com a mão-de-obra, tem sido uma constante nos países mais desenvolvidos. Durante as décadas de 70 e 80, muitas empresas conseguiram ganhos de produtividade através da melhoria da qualidade e da eficiência dos processos produtivos. Ora o planeamento de instalações industriais - que visa a melhor utilização dos recursos do imobilizado corpóreo na satisfação dos objectivos de produção da empresa - é um aspecto central no desenvolvimento do processo produtivo, podendo potenciar elevados ganhos de produtividade.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

Perante a diversidade de tipos de sistemas de produção existentes, não seria razoável tentar desenvolver um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) aplicável em quaisquer condições. No Capítulo 2 apresentam-se os tipos de sistemas de produção mais vulgares e justificam-se as opções tomadas relativamente àqueles que podem ser tratados pelo SAD que foi desenvolvido. Ainda neste capítulo, define-se o problema das implantações, enquadrando-o, simultaneamente, no projecto de instalações industriais.



A direcção e os objectivos do trabalho de investigação, que teve como corolário o Sistema de Apoio ao Projecto de Implantações Fabris, foram determinadas por alguns aspectos considerados cruciais na obtenção de um sistema eficaz e passível de ser utilizado com sucesso.

O facto de o projecto de implantações fabris não se limitar à utilização de modelos para a localização de equipamentos nas instalações industriais conduziu à inclusão de diferentes módulos interligados que permitem a resolução dos diferentes problemas atrás referidos. No Capítulo 3 descreve-se a estrutura global do sistema e caracteriza-se a base de dados que o suporta.

Os módulos que integram o sistema e os modelos nele incluídos são apresentados nos capítulos seguintes:

- Capítulo 4 - Planeamento das necessidades de equipamento e de mão-de-obra e selecção dos processos de fabrico,
- Capítulo 5 - Afectação das operações de fabrico a equipamentos,
- Capítulo 6 - Agregação das máquinas em células de produção e departamentos,
- Capítulo 8 - Implantação fabril.

A obtenção de implantações detalhadas é um aspecto crucial para o sucesso do sistema. Assim, as soluções para o problema das implantações fabris são apresentadas num formato gráfico no qual se representam modelos dos equipamentos à escala. Para tal, desenvolveu-se um sistema específico de desenho assistido por computador, que é apresentado no Capítulo 7, conjuntamente com o módulo para desenho de postos de trabalho.

O SAD desenvolvido carece, naturalmente, de melhoramentos importantes em algumas áreas. As perspectivas de desenvolvimento futuro do sistema, apresentadas ao longo do trabalho e, em particular, no Capítulo 9, complementam a visão do que se entende ser uma configuração desejável para um Sistema de Apoio ao Projecto de Implantações Fabris.

# 2

---

## **Enquadramento do problema de concepção de implantações fabris**

### **Conteúdo:**

- **Introdução**
- **Componentes do projecto de instalações industriais**
- **Caracterização geral do problema de concepção de implantações fabris**
- **O processo de criação ou de modificação de instalações industriais**
- **Aplicabilidade do SAD a diferentes tipos de sistemas de produção**

## 2.1 Introdução

Neste capítulo justifica-se o interesse num sistema de apoio à concepção de implantações fabris e define-se o âmbito e o alcance de aplicação do SAD que se propõe.

Em primeiro lugar, enquadra-se o projecto de implantações fabris no conjunto de actividades associadas ao problema mais geral de planeamento de instalações industriais, caracterizando-se cada uma destas actividades e analisando-se as suas interacções.

Em segundo lugar, analisam-se alguns aspectos gerais relacionados com a caracterização das situações que conduzem à necessidade de resolução do problema de concepção de implantações fabris e de definição dos objectivos e das restrições que integram este problema.

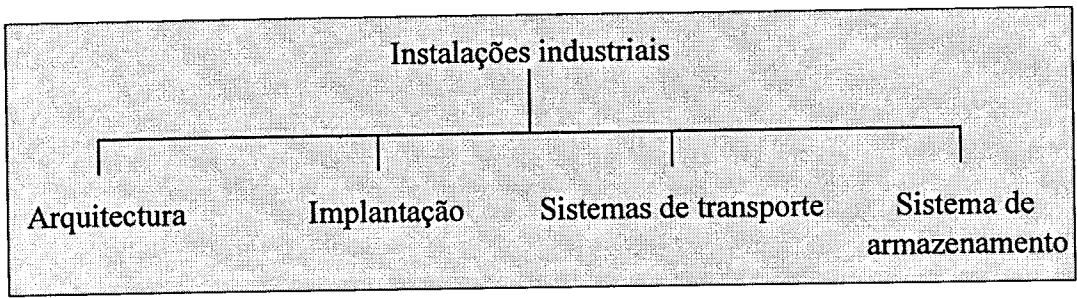
Em terceiro lugar, enquadra-se o projecto de implantações fabris no processo de criação ou de modificação de instalações industriais.

Finalmente, caracterizam-se os diferentes tipos de sistemas de produção e analisa-se a aplicabilidade do SAD a cada um deles.

## 2.2 Componentes do projecto de instalações industriais

A concepção de implantações fabris insere-se, num âmbito mais geral, no projecto de instalações industriais. Na Figura 2.1 identificam-se os quatro componentes básicos que integram o projecto de instalações industriais.

O projecto de arquitectura dos edificios inclui os estudos de engenharia dos mesmos e das respectivas infra-estruturas (electricidade, água, ar comprimido, etc.).



**Figura 2.1** - Componentes do projecto de instalações industriais

A concepção da implantação inclui o planeamento das áreas de produção, a disposição do equipamento nessas áreas e, eventualmente, o planeamento das áreas de serviços.

Os recursos que permitem o fluxo eficiente de pessoas, materiais, equipamentos e informação nas instalações são objecto do projecto de sistemas de transporte.

A concepção do sistema de armazenamento incide sobre os armazéns de matérias-primas e produtos acabados, bem como sobre as áreas de armazenamento de produtos em curso de fabrico.

A interligação existente entre os problemas associados a cada um destes componentes tornaria desejável a adopção de uma abordagem sistemática e integrada do planeamento de instalações industriais. As principais razões que apontam para tal integração são as seguintes:

- a configuração geométrica do edifício limita as soluções admissíveis para o projecto da implantação dos equipamentos,
- a implantação dos equipamentos, dos armazéns e dos espaços de armazenamento é um factor determinante na obtenção do tempo e custo mínimos totais consumidos no transporte de materiais,
- a utilização de espaço, pelas máquinas e zonas de armazenagem, é um custo crescente que qualquer empresa procura reduzir,
- a concepção inadequada da implantação pode penalizar a eficiência do sistema de produção e as modificações subsequentes da implantação têm custos não só inerentes à mudança de localização do equipamento, como também à perda de tempo de produção,

- uma implantação mal concebida conduz a fluxos ineficientes e, consequentemente, ao agravamento dos custos das operações de movimentação,
- a desarticulação entre a implantação fabril e o sistema de transporte de materiais adoptado resulta frequentemente num aumento dos tempos de produção e, consequentemente, dos custos.

A preconizada integração na abordagem dos diferentes componentes do projecto de instalações industriais confronta-se com grandes dificuldades por duas ordens de razões. Em primeiro lugar, o projecto de arquitectura (e de engenharia) coloca problemas de natureza completamente diferente de todos os outros. Em segundo lugar, a natureza combinatória dos problemas de implantação dos equipamentos, do projecto de armazéns e da selecção de equipamentos de transporte impede a sua resolução conjunta, não se conhecendo referências a uma abordagem simultânea destes diferentes componentes do projecto de instalações industriais.

Na definição destes problemas, embora se procure estabelecer as suas fronteiras por forma a minimizar as interacções entre eles, normalmente não é possível anulá-las por completo. Assim, o processo global de decisão não se restringe, em geral, à mera resolução sequencial dos referidos problemas, existindo frequentemente necessidade de estabelecer retroacções entre eles.

O SAD que é proposto neste trabalho dirige-se exclusivamente ao problema do projecto de implantações fabris. Naturalmente que a sua utilização no contexto do problema mais geral do planeamento de instalações industriais carece de um esforço de integração com os outros componentes deste processo, conforme foi já mencionado. Na utilização do SAD, em particular, há que garantir que:

- se a estrutura geométrica do edifício já se encontra definida, a implantação é projectada de forma a respeitar as condicionantes aí impostas,
- se a estrutura do edifício não está definida, a implantação é projectada sem restrições, devendo depois a estrutura do edifício adaptar-se a essa implantação (havendo neste processo capacidade de acomodação da implantação definida, quando se tenta otimizar o desenho do edifício),
- pressupondo que os equipamentos de movimentação de materiais são seleccionados em função das quantidades e dos componentes

envolvidos em cada operação de transporte, é no entanto possível redefinir estes equipamentos para as diferentes implantações geradas,

- as dimensões dos armazéns e das áreas de armazenamento dos produtos em curso de fabrico são previamente calculadas.

## 2.3 **Caracterização geral do problema do projecto de implantações fabris**

De entre as diferentes definições para o problema das implantações fabris aquela que, porventura, é mais citada na literatura caracteriza-o como 'o processo de obtenção da disposição óptima dos recursos físicos de uma unidade industrial' (El-Rayah e Hollier (1970)).

Uma visão tão geral esconde, no entanto, a diversidade de situações que podem conduzir a um projecto de implantações fabris, em particular a variedade de objectivos e restrições associadas a esse projecto.

A criação ou modificação de uma implantação fabril pode ter motivações distintas, nomeadamente:

- a construção de uma nova unidade industrial,
- a construção de uma nova linha de produção,
- a introdução, a modificação ou a eliminação de produtos,
- alterações nos processos de fabrico,
- alterações da procura,
- a introdução ou a substituição de equipamento,
- a adopção de novos padrões de segurança ou de protecção do ambiente.

Relativamente aos possíveis objectivos a incluir no estudo de uma implantação, eles podem incidir sobre:

- o custo, o tempo ou a frequência das operações de transporte de materiais,
- o volume de investimento em equipamento ou em instalações,

- os custos de processamento,
- o tempo total de produção,
- o aproveitamento do espaço,
- a variedade do equipamento de movimentação de materiais,
- a simplicidade do fluxo de materiais,
- a simplicidade da estrutura organizacional da empresa,
- as existências de componentes em curso de fabrico,
- a flexibilidade face à eventualidade de posteriores expansões,
- a simplicidade dos processos de supervisão e controle.

No que diz respeito às restrições, estas também podem ter origens distintas como, por exemplo, segurança e higiene, ambiente fabril e características gerais dos edifícios.

Tendo em conta esta diversidade de objectivos e restrições, compreende-se a impossibilidade de representar globalmente o problema do projecto de implantações num só modelo optimizante .

Assim, a tentativa de se obterem soluções óptimas globais, deve ser substituída pela de obter soluções particulares de qualidade aceitável. Tal só poderá ser conseguido recorrendo a um sistema que englobe diferentes critérios e restrições alternativos e que permita ao decisor incorporar o seu conhecimento na resolução do problema, através de uma selecção, efectuada caso a caso, dos critérios e restrições contemplados pelo modelo.

Reconhecida a dificuldade de desenvolver um sistema tão generalista que permita abarcar todos os tipos de sistemas de produção, no âmbito dos quais, aliás, a resolução do problema de implantações fabris não se reveste da mesma importância, houve que fazer opções do ponto de vista dos tipos de sistemas de produção a contemplar pelo SAD.

## 2.4 O processo de criação ou de modificação de instalações industriais

O processo de criação ou de modificação de instalações industriais é, na maior parte dos casos, despoletado pela detecção de alterações na procura, pela necessidade de alargamento ou retracção da gama de produtos fabricados, pela necessidade de introdução de modificações em produtos existentes ou ainda pelo aparecimento de novas tecnologias de produção. As diferentes fases deste processo são ilustradas na Figura 2.2.

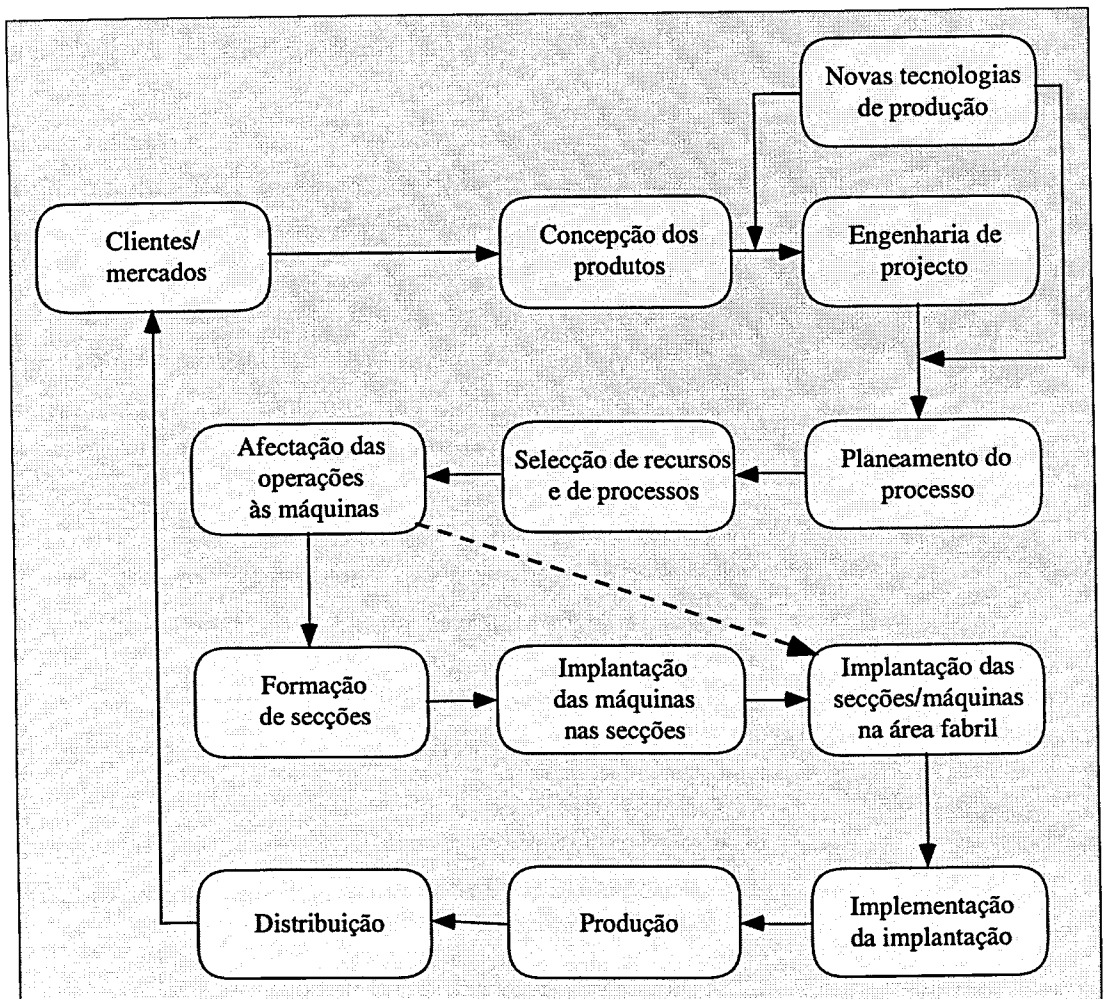


Figura 2.2 - O processo de criação ou de modificação de instalações industriais



Na fase de concepção do produto procede-se à especificação detalhada das características físicas e funcionais, do custo, da qualidade e do desempenho operacional.

A engenharia do projecto inclui a síntese, a análise e a avaliação do produto, a qual é efectuada em interacção com a fase de planeamento do processo.

No planeamento do processo especificam-se, para cada componente, as operações de fabrico necessárias para a obtenção das características definidas na fase de engenharia de projecto e, para os conjuntos de componentes, as operações de montagem requeridas para a obtenção do produto.

Em muitos casos, é possível definir processos alternativos para a produção de um mesmo componente e, normalmente, uma dada operação pode ser executada em vários tipos de máquinas e por várias classes de mão-de-obra. A selecção de um processo para o fabrico de um componente envolve a especificação de uma sequência de operações e, conseqüentemente, a definição dos recursos produtivos a utilizar, ou seja, o número de máquinas de cada tipo a utilizar e a especificação da mão-de-obra para operar esses equipamentos.

Uma vez definidas as operações a realizar e o número de máquinas de cada tipo necessárias para satisfazer a produção ao longo do período de planeamento, e sendo normal que cada máquina efectue mais do que uma operação, é necessário distribuir as diferentes operações por cada uma das máquinas.

Na formação das secções, agrupam-se as máquinas pela sua funcionalidade ou de acordo com os componentes que processam, consoante se pretenda uma implantação por processo ou por tecnologia de grupo, respectivamente.

O passo seguinte consiste na disposição das máquinas em cada uma das secções definidas na fase anterior, tendo em atenção a sua subsequente localização na área fabril e a implementação da solução encontrada, conjuntamente com os armazéns (cuja configuração geométrica se pressupõe pré-definida, conforme já foi referido), ficando assim definido o sistema de produção que se supõe satisfazer da melhor forma os objectivos da empresa e os anseios dos mercados.

Note-se ainda que, por vezes, não se torna necessária a definição de secções como, por exemplo, nas instalações em que o número de equipamentos é diminuto. Nestes casos, procede-se directamente à implantação das máquinas na área fabril.

A definição dos equipamentos de transporte a utilizar é efectuada após a afectação das operações às máquinas e posteriormente revista, depois de obtida a composição de cada uma das secções, em função do fluxo inter-secções e intra-secções.

Por forma a auxiliar o planificador de instalações industriais, o Sistema de Apoio ao Projecto de Implantações Fabris, desenvolvido no âmbito deste trabalho, inclui todas as fases desde a selecção de recursos e processos até à implantação das secções (ou máquinas) na área fabril.

As razões desta opção prendem-se com o facto das decisões associadas a este conjunto de problemas se encontrarem intimamente relacionadas e com a inexistência de sistemas que permitam projectar desta forma global as implantações fabris. As principais interacções entre estes problemas serão analisadas na secção 3.2.

## **2.5 Aplicabilidade do SAD a diferentes tipos de sistemas de produção**

As diferentes características dos sistemas de produção podem originar diferentes formas de os classificar.

No contexto do trabalho interessa, em primeiro lugar, classificar os sistemas de produção de acordo com a natureza do fluxo produtivo: quando através deste se gera um produto a granel o sistema de produção diz-se contínuo, quando se geram componentes o sistema diz-se discreto.

O SAD em causa é aplicável essencialmente aos sistemas de produção discretos, uma vez que relativamente aos sistemas de produção contínuos, os meios de transporte de materiais e a própria implantação fabril estão especificamente associados à natureza do processo e às sequências nele envolvidas, não havendo margem de manobra significativa para actuação naquelas características do processo.

Para prosseguir a definição das condições de aplicação do SAD desenvolvido, interessa classificar os sistemas de produção discreta de acordo com a abordagem utilizada para agrupar os processos de fabrico e, conseqüentemente, definir a configuração da implantação fabril.

Tendo em atenção este critério, os tipos de implantação possíveis são: por posição fixa (do produto), por produto, por processo e por tecnologia de grupo.

A implantação por posição fixa é utilizada em projectos de produtos de grandes dimensões, nos quais ou a posição do produto está pré-determinada (por exemplo, construção de edifícios) ou os custos associados à movimentação do produto entre os diferentes postos de trabalho são proibitivos (por exemplo, montagem de aviões).

Alguns destes tipos de projecto envolvem a utilização de um ou mais sistemas de produção convencional para a manufactura de componentes a integrar no projecto. A configuração destas unidades pode ser de qualquer um dos tipos atrás referidos e a sua localização depende da frequência de utilização e do tempo de transporte entre a fábrica e o projecto. Por exemplo, num estaleiro de construção naval deverá existir uma carpintaria próxima da doca onde é construído o navio, mas a fábrica onde o motor é produzido pode localizar-se a uma distância considerável.

Uma vez que, neste tipo de projectos, não se pode falar verdadeiramente de um problema de implantação de equipamentos, este tipo de configuração não é contemplada neste trabalho

Na implantação por produto, ilustrada na Figura 2.3 a), coexistem uma ou mais linhas de produção independentes, sendo os equipamentos de cada linha dedicados ao fabrico de um único componente (ou produto). No caso de um mesmo processo ser requerido por componentes diferentes, é necessária a duplicação do equipamento associado em cada uma das linhas que o utilizam.

Este tipo de organização é particularmente apropriado quando a gama de produtos a fabricar é muito reduzida e as quantidades envolvidas são muito grandes. Neste caso:

- os ciclos de produção são reduzidos, uma vez que o fluxo de produção é praticamente contínuo,
- o custo de transportes de materiais é baixo, dado que a movimentação manual de materiais é quase inexistente,
- as existências em curso de fabrico são baixas, devido ao reduzido ciclo de produção,
- o sistema de controle de produção é simples, porque o fluxo produtivo é linear e, normalmente, mecanizado,

- a flexibilidade do sistema de produção é baixa, dado o elevado custo de reconversão das linhas de produção para a manufactura de outros produtos,
- a motivação da mão-de-obra é normalmente baixa, uma vez que os trabalhadores se especializam num número reduzido de tarefas que repetem vezes sem conta.

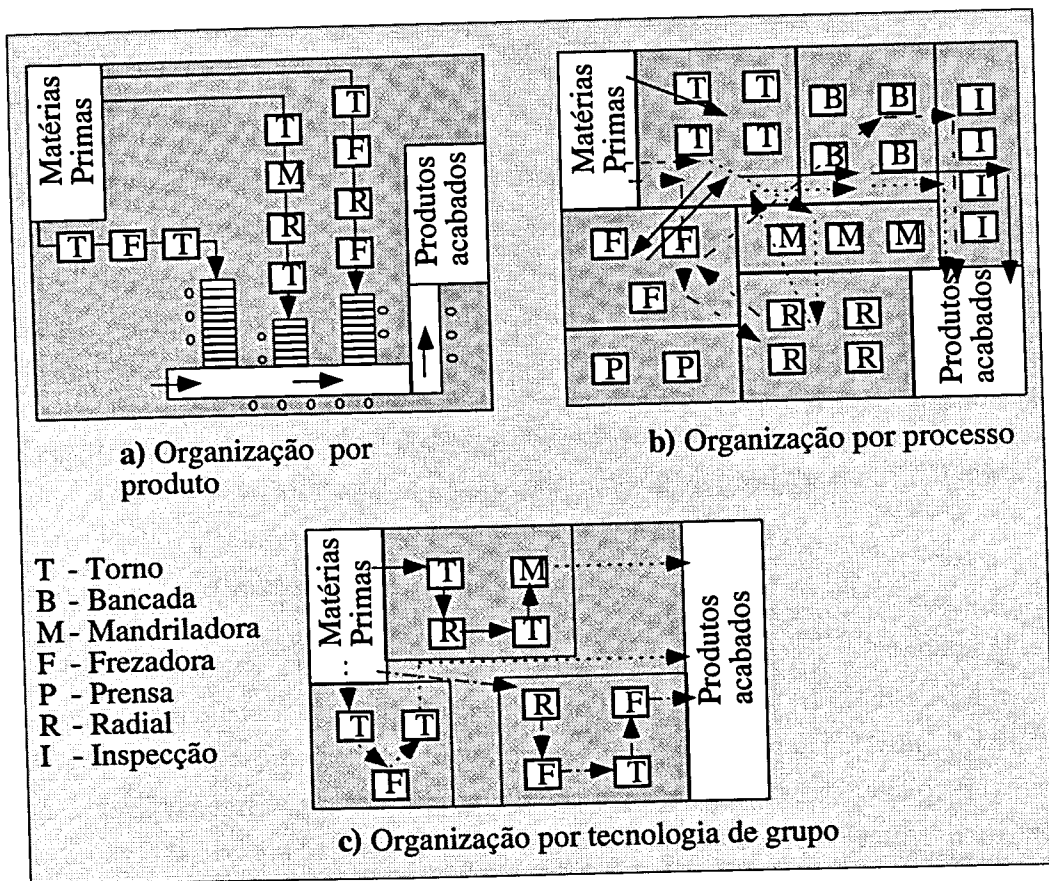


Figura 2.3 - Tipos de implantações fabris

O principal problema do projecto deste tipo de sistemas é a divisão das tarefas entre os diferentes postos de trabalho por forma a obter-se um fluxo contínuo, ou seja, tempos de processamento igualmente distribuídos (este problema é usualmente designado por equilibragem de linhas de produção). Este aspecto faz com que as implantações por produto apareçam fundamentalmente associadas a linhas de montagem, onde o trabalho é fundamentalmente manual, o que simplifica a divisão de tarefas.

Do ponto de vista da implantação de equipamentos, uma vez que estes são colocados em linha, o problema reduz-se na prática à escolha da disposição que resulte na melhor ocupação do espaço disponível.

Esta constatação levou Scriabin e Vergin (1975) a proporem uma medida ('flow dominance') que permitia verificar se um dado problema de implantação se aproximava mais de uma configuração por produto ou por processo. No caso da implantação aconselhada ser por produto, argumentavam que se obtinham melhores resultados se esta fosse realizada manualmente do que por recurso a um dos algoritmos existentes.

Estas afirmações foram posteriormente alvo de intenso debate (ver, por exemplo, Block (1977), Buffa (1976) e Herroelen e Gils (1985)), sendo inquestionável o facto de os projectos de implantação por produto se revestirem de uma dificuldade consideravelmente menor do que aquela que se associa aos projectos de implantação por processo e por tecnologia de grupo.

A maior parte da produção industrial ocorre em lotes de pequena dimensão (100 peças ou menos). Nestes ambientes as máquinas devem poder realizar uma grande variedade de diferentes operações em diferentes componentes, pelo que os tipos de organização atrás referidos não são adequados.

Nos sistemas de produção por processo (Figura 2.3 b)) os equipamentos são agrupados em departamentos de acordo com a sua funcionalidade. Assim, numa indústria metalo-mecânica, os tornos mecânicos são colocados numa determinada zona, as frezadoras noutra, etc. Os componentes percorrem então, segundo a sequência de operações respectiva, os diferentes departamentos para serem processados.

Este tipo de organização do processo produtivo caracteriza-se pelos seguintes aspectos:

- a taxa de utilização dos equipamentos e da mão-de-obra é relativamente elevada, dado que podem processar diferentes tipos de componentes,
- a flexibilidade é elevada, porque o sistema de produção é menos sensível a modificações nos tipos de componentes a processar,
- o controle da produção é difícil, pois o número de diferentes tipos de componentes em processamento, em cada instante de tempo, é, normalmente, muito elevado,

- os ciclos de produção são maiores do que nos sistemas organizados por produto, contribuindo para tal o aumento dos tempos de transporte, preparação de máquinas e espera pela disponibilidade de equipamento,
- as existências em curso de fabrico são relativamente mais elevadas do que nos sistemas organizados por produto, como consequência dos ciclos de produção mais longos,
- os custos associados à movimentação de materiais é elevado, dada a dispersão dos equipamentos pela área fabril e o número de diferentes percursos ser praticamente igual ao número de diferentes componentes a processar,
- a mão-de-obra é especializada numa determinada função, mas a variedade de diferentes tarefas que realiza é elevada, pelo que a motivação da mão-de-obra é mais fácil de obter do que no caso anterior.

Na configuração dos sistemas de produção por tecnologia de grupo (Figura 2.3 c)) os equipamentos são associados de forma a que cada grupo (célula de produção) seja maioritariamente, se não exclusivamente, dedicado ao processamento de uma família de componentes. Desta forma consegue-se obter um sistema com as vantagens de uma configuração por produto, às quais se associam a flexibilidade, a taxa de utilização do equipamento e a motivação da mão-de-obra de um sistema organizado por processo.

O SAD que se descreve neste trabalho foi desenvolvido para os sistemas de produção por processo e por tecnologia de grupo ou para sistemas híbridos destes.

Note-se que embora a utilização do SAD esteja limitada pela não inclusão de um módulo de equilibragem de linhas de produção, ele ainda pode ser útil na fase de localização dos equipamentos na área fabril.

Identificados os tipos de sistemas de produção aos quais se pode aplicar o SAD desenvolvido, interessa notar a natureza hierárquica desses sistemas, nos quais se podem identificar quatro níveis de agregação:

- instalação fabril,
- secções fabris,
- postos de trabalho,
- equipamentos.

As instalações fabris são divididas em secções, as quais podem ser departamentos ou células de produção consoante a implantação adoptada seja por processo (ou produto) ou por tecnologia de grupo, respectivamente. A utilização desta designação comum (secção) prende-se com o facto de que, ao longo deste trabalho a única distinção estabelecida entre departamentos e células de produção reside na forma como os equipamentos são agrupados.

Os postos de trabalho definem a área de trabalho de cada máquina e incluem os equipamentos auxiliares, as áreas de armazenamento dos produtos em curso de fabrico, as bancadas, etc.

O nível inferior desta hierarquia refere-se às unidades individuais de equipamentos como, por exemplo, tornos, frezadoras, etc.

# 3

---

## **Configuração do Sistema de Apoio ao Projecto de Implantações Fabris**

### **Conteúdo:**

- **Características gerais do sistema**
- **Estrutura e interacções**
- **Especificação da base de dados**



## 3.1 Características gerais do sistema

A selecção, na fase inicial do projecto, de um conjunto de características gerais desejáveis para o sistema foi determinante no seu desenvolvimento e, conseqüentemente, no seu potencial de utilização actual e futura. Entre tais características encontram-se:

### (i) Integração

A integração de diferentes etapas do processo de projecto de implantações fabris constitui um dos aspectos inovadores do sistema.

### (ii) Modularidade

Cada um dos subproblemas daquele processo é tratado por um módulo autónomo do SAD, sendo a interligação entre os diferentes módulos assegurada pela base de dados do sistema. Esta configuração permite uma grande flexibilidade de utilização, sendo possível entrar no sistema por qualquer um dos módulos, sem necessidade de resolução dos restantes problemas; tal é possível uma vez que cada um deles possui as suas próprias janelas de entrada de dados.

### (iii) Arquitectura

O sistema foi desenvolvido numa estação gráfica DG-Aviion 300 e a sua arquitectura é ilustrada na Figura 3.1.

Vários aspectos determinaram a selecção dos componentes incluídos na arquitectura do sistema:

A interface com o utilizador é uma das condicionantes do sucesso de um SAD. Optou-se pela utilização do ambiente gráfico OSF-Motif na sua definição, por ser semelhante àqueles que se encontram actualmente em plataformas PC (Windows) ou

MacIntosh (Mac-OS), obviando-se assim à necessidade de formação específica dos utilizadores para utilizarem o sistema.

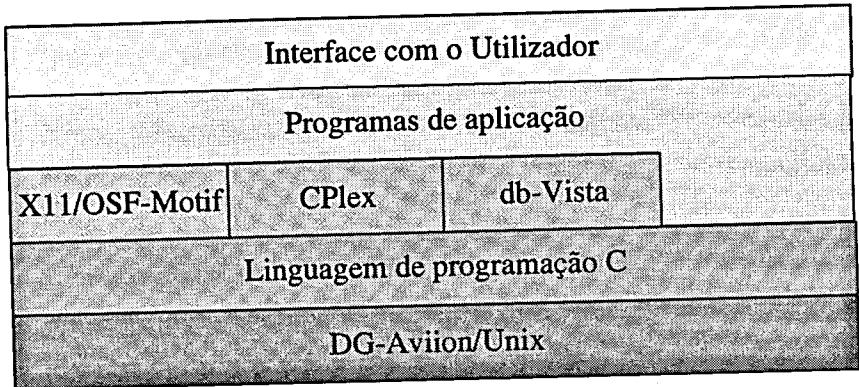


Figura 3.1 - Arquitectura do SAD

A rápida obsolescência do equipamento é, hoje em dia, um aspecto a considerar no desenvolvimento de qualquer sistema. Existiu, por isso, um cuidado particular em assegurar a portabilidade do sistema, o que justificou a opção pela linguagem C na sua implementação.

Ambas as ferramentas Cplex (programação linear e inteira) e db-Vista (Sistema de gestão de base de dados) estão escritas em linguagem C, o que facilita a sua integração no sistema, e estão disponíveis para os sistemas de operação mais comuns.

(iv) **Expansão**

A resolução do problema das implantações fabris é complexa e o SAD que se apresenta não pretende ser mais do que uma primeira versão, a partir da qual se pode evoluir para um sistema mais completo.

Tendo em atenção este aspecto, procurou-se garantir que as opções tomadas na especificação e implementação do sistema não comprometessem o seu posterior desenvolvimento.

Assim, pensa-se que a possibilidade de expansão está assegurada pelos seguintes factores: (i) arquitectura adoptada; (ii) modularidade do sistema; (iii) recurso a uma metodologia

orientada por objectos na especificação da base de dados e (iv) utilização de programação estruturada.

(v) **Interactividade**

A possibilidade de gerar e armazenar diferentes soluções para os problemas da selecção de recursos, afectação de equipamentos e formação de secções e a sua posterior utilização nos módulos de implantação, permite a fácil obtenção de um conjunto alargado de configurações para avaliação pelo decisor.

Nos módulos de implantação o utilizador é encorajado a testar os seus próprios conceitos, rearranjando as localizações dos objectos de acordo com as suas próprias ideias, por forma a incorporar o seu conhecimento e intuição no processo de decisão. Desta forma, aumenta-se a probabilidade de encontrar soluções de melhor qualidade e contribui-se para a confiança do utilizador nas soluções obtidas.

Estes aspectos são assegurados não só pelo ambiente gráfico adoptado, como por um conjunto de ferramentas que permitem a movimentação de objectos, a visualização dos fluxos de materiais e a exibição em tempo real do valor do custo global de transporte de materiais.

(vi) **Biblioteca de modelos geométricos**

Foi desenvolvido um módulo de desenho que permite a criação de uma biblioteca de modelos geométricos de equipamentos, de edifícios e de armazéns.

## 3.2 Estrutura e interacções

O Sistema de Apoio ao Projecto de Implantações Fabris compreende sete módulos, os quais serão descritos detalhadamente em capítulos seguintes:

- 1 - Desenho dos modelos geométricos dos objectos (máquinas, armazéns e edifícios),
- 2 - Desenho dos postos de trabalho,
- 3 - Planeamento de recursos (equipamento e mão-de-obra),
- 4 - Afectação de operações a máquinas,
- 5 - Agregação de máquinas em secções,
- 6 - Implantação das secções,
- 7 - Implantação global.

Estes módulos são acessíveis a partir da janela principal do sistema, apresentada na Figura 3.2.

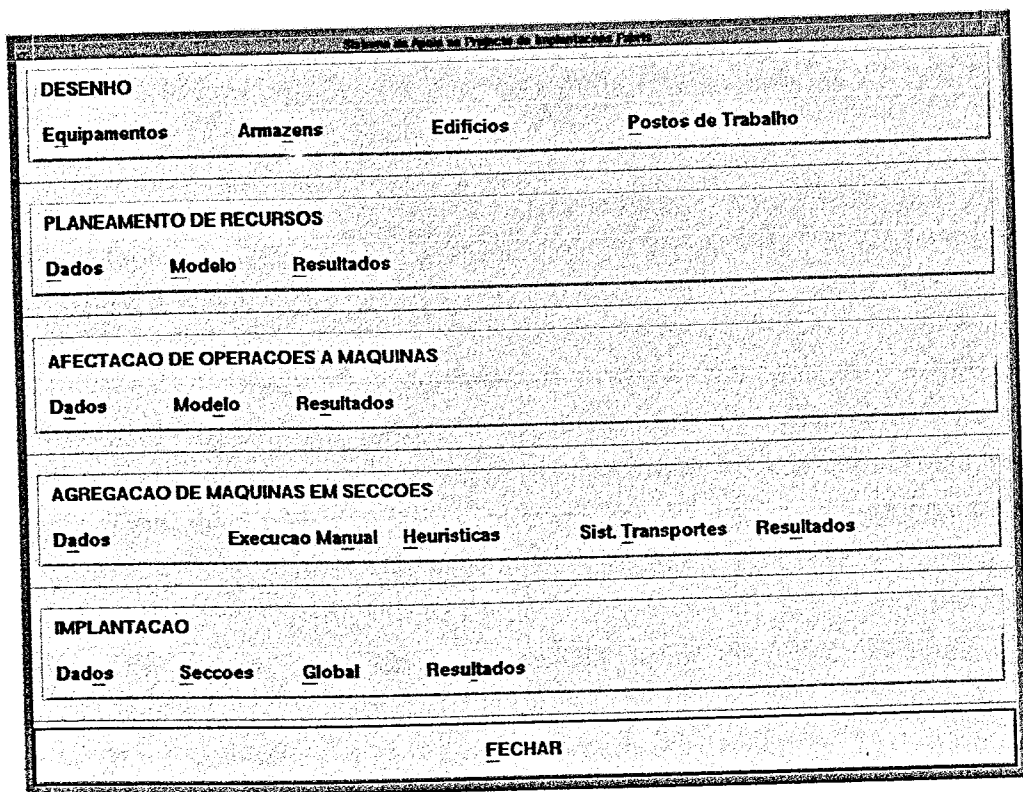


Figura 3.2 - Janela principal do sistema

Os módulos 3 a 7 correspondem às tarefas do processo de criação ou de modificação de implantações fabris, que foram descritas na secção 2.4, identificadas como aquelas directamente associadas ao problema das implantações fabris.

O módulo de desenho dos modelos geométricos dos objectos é uma ferramenta de Desenho Assistido por Computador, a qual incorpora funções básicas que permitem representar modelos à escala de equipamentos, edifícios e armazéns, além de outros símbolos necessários ao desenho da implantação (por exemplo, bancadas, transportadores, etc.).

O desenho de cada posto de trabalho consiste na representação do espaço ocupado por cada máquina que lhe corresponde, bem como os pontos de entrada e saída de materiais, o símbolo geométrico da máquina e os modelos gráficos de outros objectos incorporados no posto de trabalho.

A facilidade de geração de diferentes cenários em cada um dos módulos do sistema, pela modificação de alguns dos parâmetros de entrada a eles associados, é um aspecto crucial para a obtenção de um conjunto de implantações alternativas, que podem ser submetidas à avaliação do decisor.

As principais interações entre os módulos do sistema, apresentadas na Figura 3.3, sugerem algumas das razões que podem conduzir à criação de diferentes soluções para cada um dos problemas em análise.

A solução do problema do planeamento de recursos (equipamento e mão-de-obra) fornece as sequências de processamento de cada componente, o número de máquinas de cada tipo requeridas e, conseqüentemente, a ocupação de cada tipo de máquina por operação. Estes resultados são utilizados como 'inputs' no módulo de agregação de operações de fabrico. Aqui, é efectuada a distribuição das operações de fabrico pelas máquinas, com o duplo objectivo de diminuir a dispersão das operações e de as agrupar com base na semelhança das sequências de processamento em que se integram.

As taxas de ocupação das máquinas pelas operações, resultantes desta afectação, podem sugerir a vantagem em rever os parâmetros dos recursos ou a utilização de outros processos de fabrico de alguns dos componentes, com vista a melhorar a distribuição das operações pelas máquinas. Por exemplo, se uma operação realizada em várias máquinas ocupa residualmente uma delas, pode ensaiar-se o aumento do

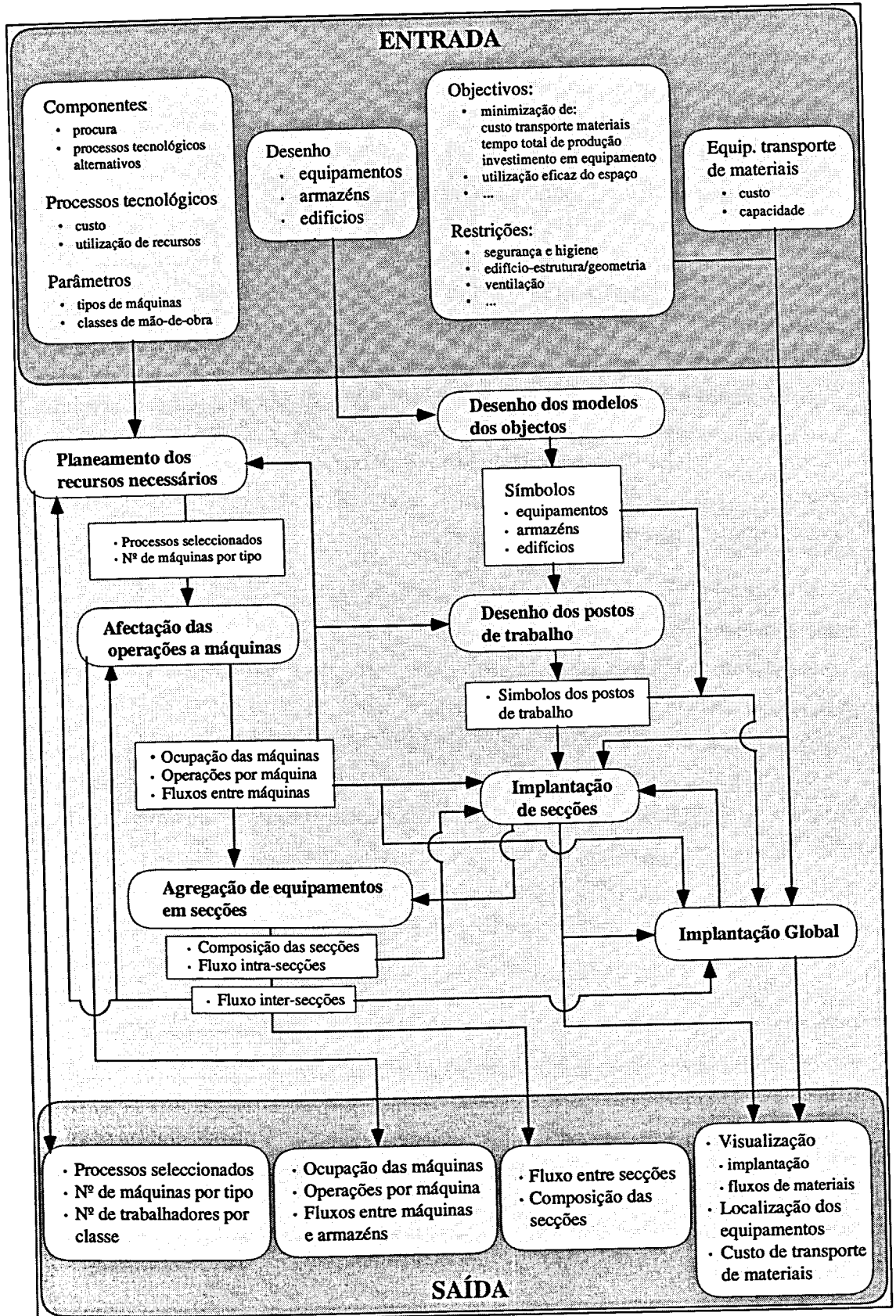


Figura 3.3 - Principais interacções do Sistema de Apoio ao Desenho de Implantações Fabris

número de horas extraordinárias da classe de mão-de-obra que a executa, na tentativa de transferir a operação em causa para uma das máquinas com maior ocupação.

O desenho dos postos de trabalho é inicialmente realizado por tipo de máquina, no pressuposto de que a configuração geométrica de tais postos é idêntica. Quando tal não se verifica os postos de trabalho podem ser alterados máquina a máquina.

A selecção dos equipamentos de transporte é efectuada depois de conhecidos os fluxos entre as máquinas, ou seja, após a afectação das operações a estas. Porém, a sua redefinição pode ser necessária após a obtenção dos fluxos intra-secções e inter-secções, ou seja, depois de resolvido o problema da agregação dos equipamentos.

As máquinas são seguidamente distribuídas pelas secções, que correspondem a departamentos que possuem máquinas com funcionalidades idênticas, ou por células de produção constituídas por máquinas agrupadas de acordo com os componentes que processam.

A formação de células de produção é assistida por um conjunto de heurísticas disponíveis no sistema, enquanto que a formação de departamentos é manual. A possibilidade de combinação destes dois tipos de configurações está prevista, uma vez que se inclui a possibilidade de ajustamento manual das soluções obtidas para a formação de células. Um exemplo típico de aplicação desta capacidade do sistema está relacionada com a utilização de equipamentos especiais num ambiente de tecnologia de grupo. Este será o caso de algumas cabinas de pintura que, por terem de ser partilhadas por diferentes famílias de componentes, em vez de figurarem em células de produção, são colocadas em departamentos de pintura, gerando uma configuração mista.

Quando se pretende uma implantação celular procura-se que cada componente seja processado numa única célula, por forma a anular o fluxo intercelular. Em grande parte dos casos tal não é possível, podendo no entanto atenuar-se este fluxo redistribuindo as operações pelas máquinas, duplicando algumas máquinas ou subcontratando algumas operações ou mesmo componentes.

A implantação de cada secção depende da sua composição, do fluxo intra-secção, da configuração dos postos de trabalho que lhe estão associados e dos equipamentos de transporte que são utilizados.

Os custos associados ao transporte de materiais entre secções e armazéns, conjuntamente com a configuração geométrica de uns e de outros são determinantes na sua implantação global.

Nos módulos de implantação (de secções e global) a heurística utilizada minimiza o custo total de transporte. No entanto, o sistema permite que o utilizador modifique a solução de forma a incorporar outros objectivos e restrições.

## **3.3 Especificação das bases de dados**

### **3.3.1 Introdução**

Os objectivos principais a atingir no processo de especificação das bases de dados do sistema são seguidamente sintetizados:

- (i) desempenho - disponibilidade e velocidade de acesso aos dados relevantes para cada um dos problemas;
- (ii) integridade - garantia da correcção dos dados armazenados;
- (iii) compreensão - coerência da estrutura da base de dados, por forma a torná-la compreensível a qualquer pessoa que necessite de a modificar ou de a estender;
- (iv) extensibilidade - facilidade de extensão da base de dados, sem prejuízo do trabalho previamente desenvolvido.

A prossecução destes objectivos foi conseguida, antes do mais, pelo recurso ao modelo de dados da metodologia OMT (Object Modeling Technique) (Rumbaugh et al (1991)), a qual torna possível a definição clara de todas as entidades envolvidas no processo e das relações entre estas. Adicionalmente, para melhor atingir os objectivos mencionados, efectuou-se a partição da base de dados em três componentes:



- (i) **Base de dados relativa a objectos gráficos** - incluída no Módulo de Desenho de Modelos Geométricos,
- (ii) **Base de dados relativa ao planeamento de recursos** - incluída no módulo com esta designação,
- (iii) **Base de dados principal** - incluída em todos os outros módulos.

Nesta secção apresenta-se a especificação destas duas últimas bases de dados, sendo a referente aos objectos gráficos descrita no Capítulo 7 conjuntamente com o módulo respectivo.

### 3.3.2 Conceitos básicos de OMT

Por forma a tornar mais clara a descrição das estruturas das bases de dados, incluem-se nesta secção as definições dos principais elementos do modelo de dados da metodologia OMT e a correspondente representação gráfica.

O elemento construtivo básico designa-se por objecto e corresponde a uma entidade do mundo real com identidade própria, cujo significado depende do contexto (ou problema) em que está inserido. Os objectos podem ser concretos, como um posto de trabalho numa implantação fabril, ou conceptuais, como o tipo de organização num sistema de produção.

Uma classe descreve um grupo de objectos com propriedades semelhantes (atributos), com o mesmo comportamento, com relações comuns com outros objectos e com a mesma semântica. Por exemplo, posto de trabalho é a classe que engloba todos os postos de trabalho numa dada implantação fabril.

Um atributo é uma propriedade dos objectos de uma dada classe. Por exemplo: Escala é um atributo da classe posto de trabalho e indica a escala utilizada na definição dos valores dos outros atributos dos objectos desta classe (Contorno, PontoEntrada e PontoSaída). Quando se refere um atributo para o qual não é clara a classe a que pertence utiliza-se a notação Classe.Atributo (por exemplo, PostoTrabalho.Escala).

O modelo objecto utiliza uma notação gráfica formal para descrever a estrutura de dados das classes e as relações entre elas.

As classes são representadas por rectângulos (Figura 3.4), contendo a designação da classe e dos seus atributos.

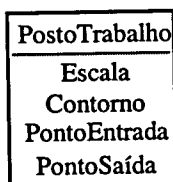


Figura 3.4 - Representação de uma classe

Uma relação é uma associação lógica entre objectos. Existem três tipos de relações: associação, generalização e agregação.

Uma associação relaciona duas classes independentes (associação binária), três classes independentes (associação ternária) ou, mais raramente, um maior número de classes independentes (associação de ordem superior).

Uma associação é representada por uma linha a unir classes independentes. As relações de associação têm uma característica fundamental que é a sua multiplicidade. Esta define-se como o número de objectos de cada uma das classes que se podem relacionar com um objecto da outra classe. Tal multiplicidade é representada por símbolos colocados no extremo da linha da relação (ver Figura 3.5).

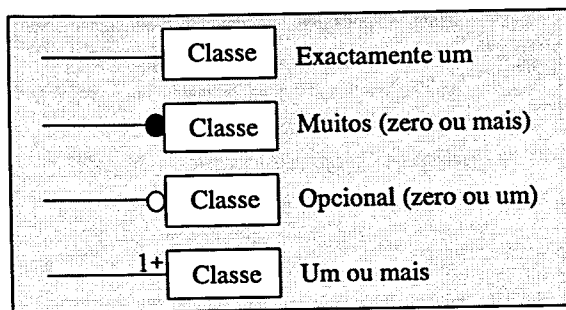


Figura 3.5 - Multiplicidade de associações

Na Figura 3.6 apresenta-se a relação de associação entre a classe Rota (sequência de operações) e a classe Operação. Esta relação é uma associação binária, na qual

cada operação pertence exclusivamente a uma só rota e cada rota contém uma ou mais operações.

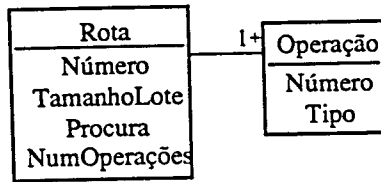


Figura 3.6 - Relação de associação

As associações podem ter atributos para representar as suas propriedades. No modelo objecto estes atributos são representados de uma forma semelhante às classes. Um dos valores obtidos em cada solução do problema de planeamento de recursos é a Utilização de cada Tipo de Máquina em cada Turno. A relação ternária representada na Figura 3.7 mostra então a Utilização como um atributo da associação ternária entre Solução, Tipo de Máquina e Turno.

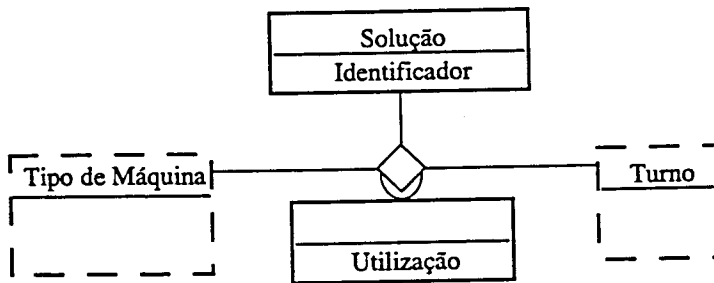


Figura 3.7 - Associação ternária com atributo

Por vezes pode ser útil modelar uma associação como uma classe. Na Figura 3.8 representa-se a associação MáquinaxMáquina a qual se designa por Fluxo. Esta associação é tratada como uma classe, neste caso com um atributo (NumViagens), por forma a possibilitar o estabelecimento de uma relação de associação (que só pode ser estabelecida entre classes) entre a classe Fluxo e a classe Transporte.

O segundo tipo de relação considerada é a generalização, através da qual se particiona uma classe em subclasses (isto é, se divide uma classe num conjunto de subclasses exaustivas e mutuamente exclusivas). As subclasses que são objecto da generalização herdam os atributos da classe.

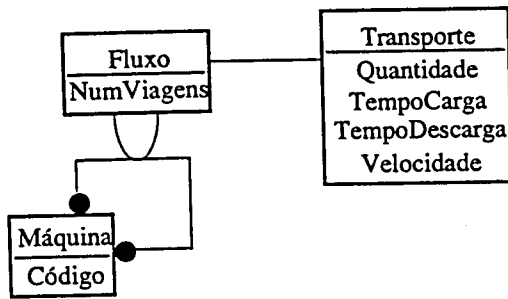


Figura 3.8 - Modelização de uma associação como uma classe

Na Figura 3.9 representa-se uma relação de generalização, no âmbito da qual um Elemento-2D se identifica como uma Elipse, uma Linha poligonal ou um Segmento de Recta. Os atributos da classe Elemento-2D (estilo de linha e grossura de traço) são herdados por cada uma das subclasses, podendo cada uma destas ter adicionalmente atributos próprios.

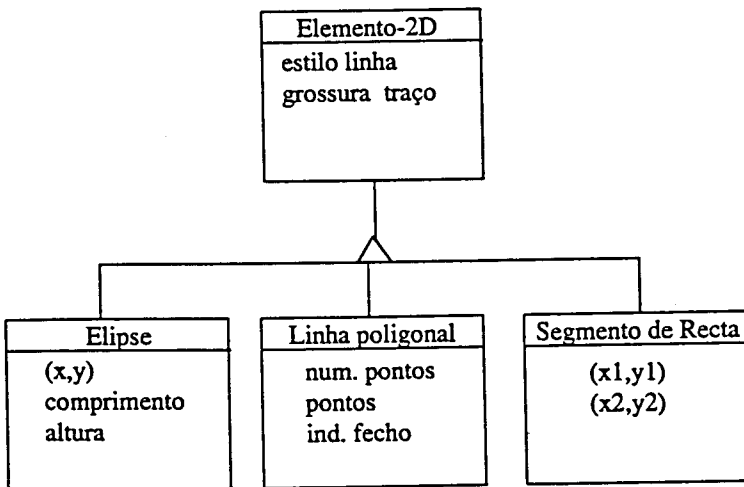


Figura 3.9 - Relação de generalização

A agregação representa uma relação do tipo produto-componente, na qual as classes representando os componentes são associadas a uma classe que representa o produto por elas constituído. Na Figura 3.10 apresentam-se duas relações de agregação: uma entre carro e tejadilho e outra entre carro e porta. Neste caso, carro é um produto e porta e tejadilho são componentes. Várias portas são componentes de um carro.

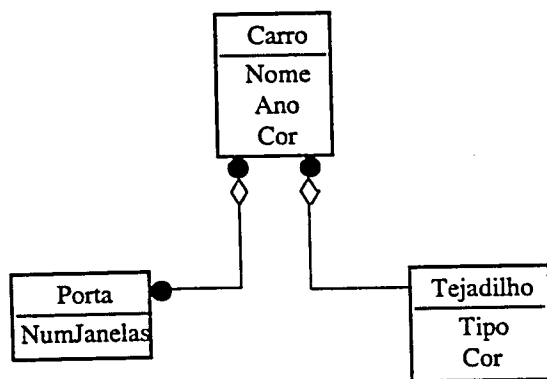


Figura 3.10 - Relação de agregação

Tal como sucede para as relações do tipo associação, também as relações do tipo agregação são caracterizadas pelo conceito de multiplicidade, que se representa por uma simbologia idêntica à que foi anteriormente introduzida. No exemplo da Figura 3.10, os mesmos tipos de porta e de tejadilho podem ser utilizado numa variedade de carros e um carro tem um tejadilho e muitas portas.

Por vezes torna-se necessário dividir o modelo objecto em diferentes páginas. Neste caso, quando se representa uma classe previamente definida noutra página utiliza-se uma rectângulo tracejado contendo somente o nome dessa classe. Na Figura 3.7 TipoMáquina e Turno são duas classes cuja definição já havia sido efectuada noutra local.

### 3.3.3 Base de dados para o planeamento de recursos

Na Figura 3.11 apresenta-se o diagrama de classes referente ao submódulo que contém os dados de entrada da base de dados do planeamento de recursos. Os dicionários de dados correspondentes às bases de dados descritas neste capítulo são apresentados no Apêndice A.

Em cada problema de planeamento de recursos referente a uma dada unidade industrial (Projecto) pressupõe-se que foram identificados os produtos a fabricar, a sua lista de componentes, os processos alternativos de fabrico de cada componente, os tipos de equipamento necessários e as categorias de mão-de-obra a utilizar.

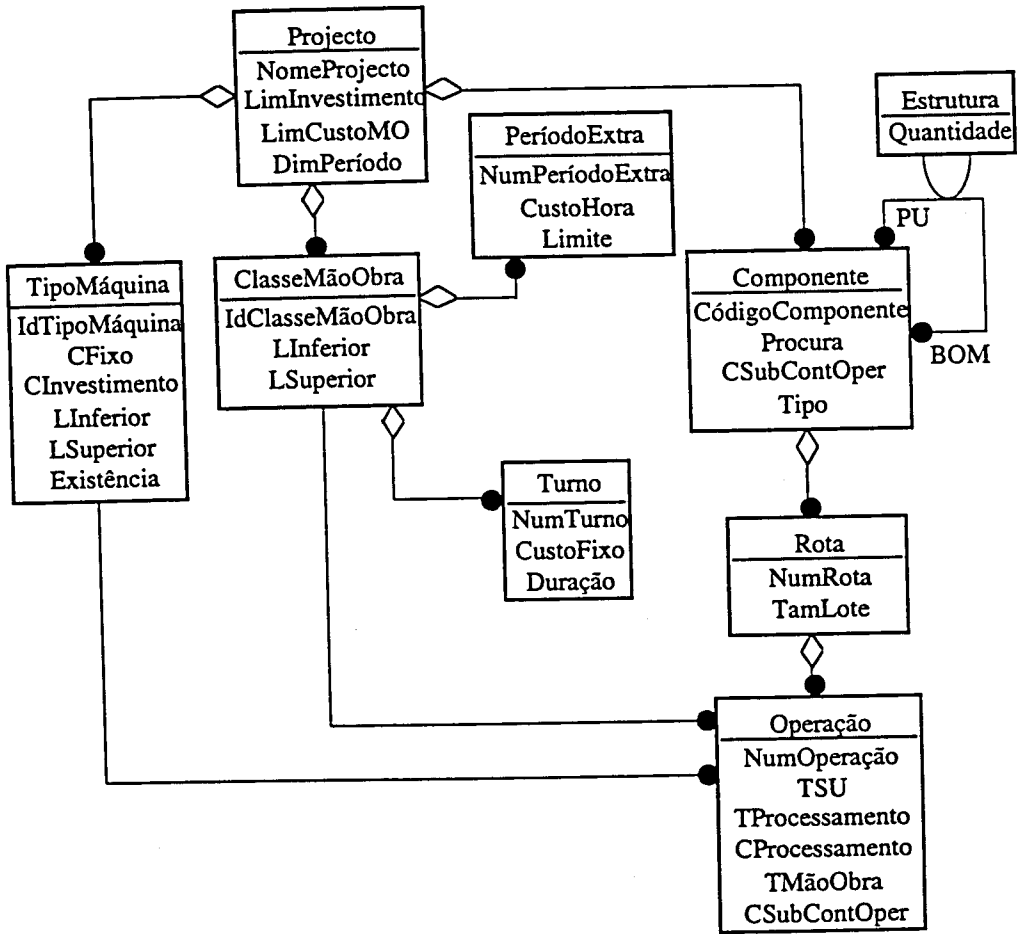


Figura 3.11 - Estrutura da base de dados para os dados de entrada do módulo de planeamento de recursos

Cada tipo de máquina (TipoMáquina), associado a um projecto, define um conjunto de equipamentos que têm características operacionais, de custo e de investimento semelhantes.

Cada classe de mão-de-obra (ClasseMãoObra) é associada ao que normalmente se designa por categoria profissional (o que corresponde a um grupo de trabalhadores que desempenham as suas funções de forma homogénea).

Tanto as máquinas como a mão-de-obra podem operar em regime normal (Turno), em turnos (Turno) ou em horas extraordinárias (PeríodoExtra)

Cada componente (Componente) - que pode ser um produto acabado, um produto intermédio ou uma matéria-prima - pode ter mais do que uma sequência de

processamento (Rota). Cada rota pode ter várias operações de processamento (Operação).

Na Figura 3.12 apresenta-se o diagrama de classes correspondente ao submódulo da base de dados para o problema do planeamento de recursos, no qual se armazenam as diferentes soluções (Solução) obtidas para cada problema de planeamento de recursos (Projecto). Cada uma destas soluções pode derivar: (i) da resolução de um problema de programação inteira mista, ou (ii) da modificação, efectuada pelo utilizador, de uma solução previamente encontrada.

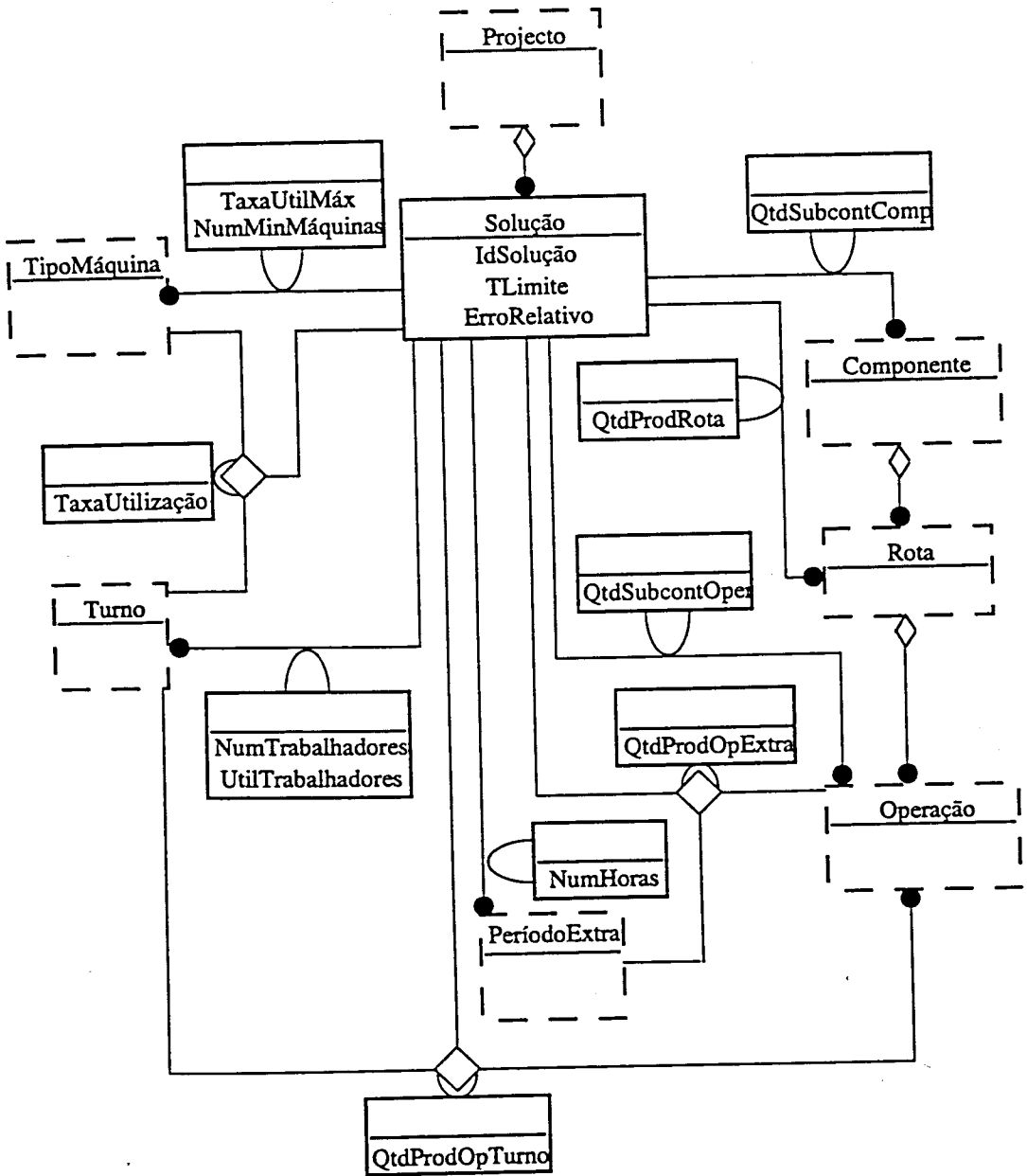


Figura 3.12 - Estrutura da base de dados para as soluções do módulo de planeamento de recursos

### 3.3.4 Base de dados principal

Com o objectivo de facilitar a apresentação da base de dados principal dividiu-se o seu diagrama de classes em três páginas. A primeira (ver Figura 3.13 ) compreende as classes e relações inerentes aos dados de entrada e da solução do problema de afectação de operações de fabrico a máquinas. A segunda refere-se aos objectos utilizados nos módulos de agregação e de implantação de secções (ver Figura 3.14) e a terceira à implantação global (ver Figura 3.15).

A classe *AfectaçãoOperações* caracteriza os problemas de afectação de operações de fabrico a máquinas e, para cada um destes problemas, o conjunto de soluções obtidas.

As classes *TipoMáquina*, *Componente*, *Estrutura*, *Rota* e *Operação* definem-se de forma semelhante às incluídas na base de dados de planeamento de recursos, descrita na secção anterior, diferindo somente em alguns dos seus atributos.

As operações podem ser de um de três tipos: (i) processamento e inspecção, (ii) armazenamento e (iii) transporte.

Cada tipo de equipamento de transporte (*TipoEquipTransporte*) reúne os meios de movimentação de cargas com características de desempenho operacional, custo e capacidade de carga semelhantes.

Cada solução do problema de afectação de operações a equipamentos (*SolAfectação*) associa a cada par (máquina, operação de processamento-inspecção) o número de lotes processados e a respectiva taxa de ocupação do equipamento.

A classe *RGF* define dois tipos de recursos geradores de fluxo:

- *Máquina* - refere-se a cada unidade individual de equipamento,
- *Armazém* - é qualquer área de retenção de produtos, subprodutos ou matérias-primas, à excepção daquelas que fazem parte integrante dos postos de trabalho.



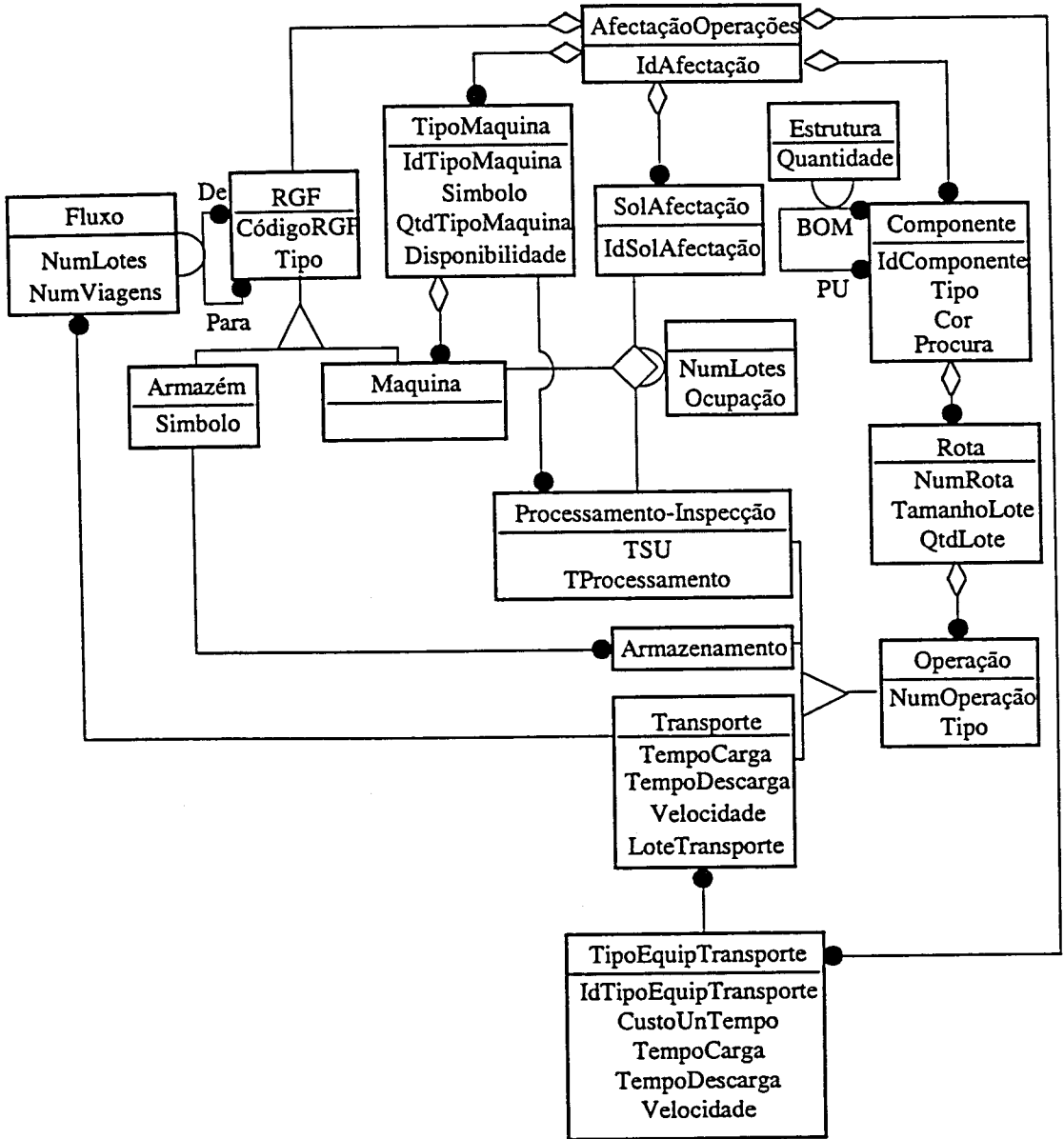


Figura 3.13 - Estrutura da base de dados para o módulo do problema de afectação de operações de fabrico a máquinas

A classe Fluxo associa as operações de transporte a cada par de recursos geradores de fluxos, em que um deles define a origem do fluxo (De) e o outro o destino (Para). Note-se que cada operação de transporte pode originar vários fluxos, o que sucede quando uma dada operação de processamento é subdividida por várias máquinas, em resultado da afectação de operações a equipamentos.

Na Figura 3.14 apresenta-se o diagrama de classe correspondente ao submódulo da base de dados principal relativo à agregação dos equipamentos em secções e à implantação dos postos de trabalho nessas secções.

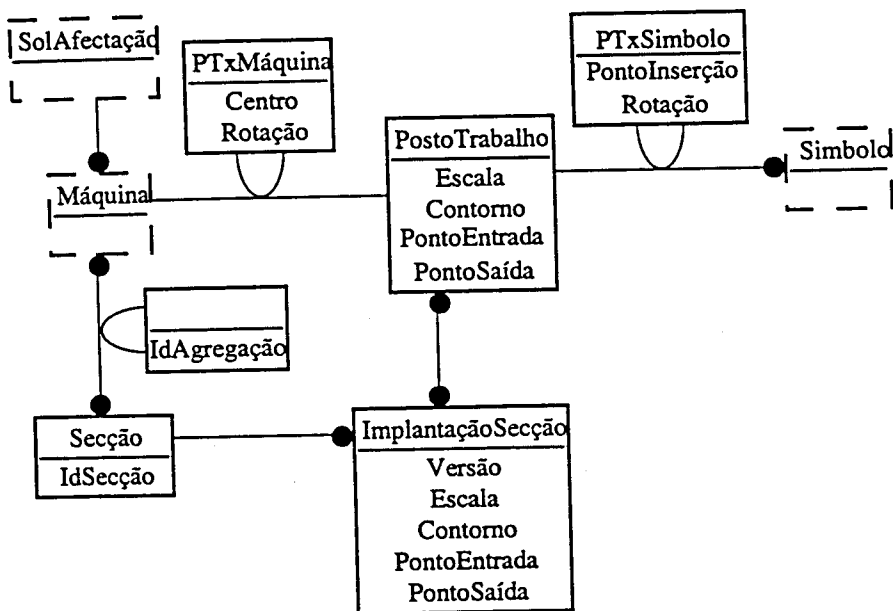


Figura 3.14 - Estrutura da base de dados dos módulos de agregação de equipamentos em secções e de implantação de secções

As máquinas são distribuídas por secções (Secção), em função da partição definida pelo sistema ou pelo utilizador.

Um posto de trabalho (PostoTrabalho) é a representação gráfica do espaço afecto a uma máquina.

A implantação de uma secção (ImplantaçãoSecção) representa geometricamente a localização dos postos de trabalho nela agrupados. Para cada secção podem ser obtidas diferentes versões da implantação dos postos de trabalho correspondentes.

Na Figura 3.15 apresenta-se o diagrama de classe correspondente ao submódulo da base de dados principal relativo à implantação global.

A implantação global (Implantação) agrupa as representações geométricas das diferentes entidades que constituem a instalação industrial (postos de trabalho, secções e armazéns).

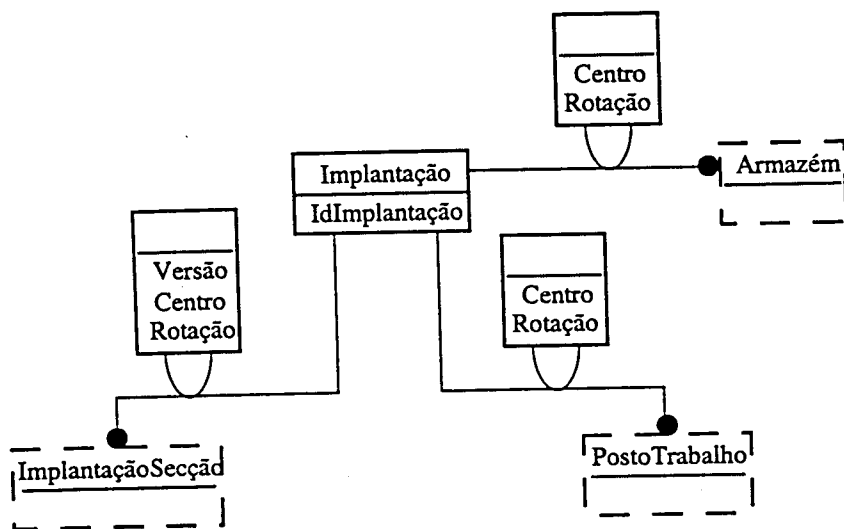


Figura 3.15 - Estrutura da base de dados do módulo de implantações fabris

O sistema de gestão de bases de dados utilizado (db-Vista) permite a utilização de modelos de dados relacionais e hierárquicos. As bases de dados relacionais estão-se a tornar cada vez mais populares, têm aumentado a sua vantagem em funcionalidade e flexibilidade e o seu desempenho tende a aproximar-se do das hierárquicas. Assim, optou-se por utilizar somente o modelo relacional na definição das estruturas da base de dados, uma vez que oferece mais garantias do ponto de vista de portabilidade e facilita a expansão futura do sistema.

# 4

---

## **Planeamento das necessidades de equipamento e de mão-de-obra**

### **Conteúdo:**

- **Introdução**
- **Apresentação do modelo**
- **Interacção com o utilizador**
- **Perspectivas de desenvolvimento**

## 4.1 Introdução

### 4.1.1 Definição do problema do planeamento das necessidades de equipamento e de mão-de-obra

Em muitos casos, é possível definir processos alternativos para a produção de um mesmo componente (ou produto) e, normalmente, uma dada operação pode ser executada em vários tipos de máquinas e por várias classes de mão-de-obra. Neste caso, a selecção de um processo para o fabrico de um componente envolve a especificação de uma sequência de operações, dos tipos de máquinas requeridos e das classes de mão-de-obra utilizadas.

O problema do planeamento dos recursos (equipamentos e mão-de-obra) envolve a selecção dos processos e dos recursos necessários, por forma a minimizar os custos globais associados ao sistema de produção em análise.

A formulação deste problema tem em conta um conjunto de restrições que limitam o volume de investimento efectuado e os custos incorridos durante o horizonte de planeamento e pressupõe a especificação, para esse horizonte de planeamento:

- (i) do valor da procura para cada um dos produtos a fabricar,
- (ii) dos custos e dos aspectos condicionantes da utilização de cada uma das classes de mão-de-obra,
- (iii) dos custos e das capacidades de cada um dos tipos de máquinas,
- (iv) dos diferentes processos alternativos para o fabrico de cada componente,

e, para cada um destes processos alternativos,

- (i) da utilização dos recursos,
- (ii) das estimativas dos custos de operação associados.

A definição simultânea de equipamentos e de mão-de-obra foi considerada por forma a tornar possível a abordagem de situações nas quais haja necessidade de

estabelecer compromissos entre diferentes processos alternativos (mais capital intensivos ou mais mão-de-obra intensivos), ou nas quais os trabalhadores podem operar simultaneamente várias máquinas.

O modelo que se apresenta na secção 4.2 pressupõe que cada um dos componentes processados numa fábrica possa ser produzido de acordo com diferentes rotas (processos de fabrico) e baseia-se em dados relativos às diferentes operações incluídas em cada uma dessas rotas.

Frequentemente a quantidade de dados a manipular para a modelização detalhada do problema é muito grande, pelo que será necessário fazer preceder a sua resolução pela definição de uma gama restrita de produtos ou componentes que representem de uma forma sintética, mas com suficiente fidelidade, a gama real de produtos a fabricar.

#### **4.1.2 Abordagens utilizadas no planeamento das necessidades de equipamento e de mão-de-obra**

A literatura sobre o planeamento das necessidades de equipamento e de mão-de-obra é relativamente escassa, não se conhecendo nenhuma abordagem que permita, como aquela que aqui se propõe, a selecção simultânea dos processos de fabrico, do equipamento e da mão-de-obra. Existem, contudo, alguns modelos para problemas afins, os quais se descrevem brevemente nesta secção.

Um dos casos mais estudados nesta área é aquele que Miller e Davis (1977) definem como o problema do planeamento das necessidades de máquinas, ou seja, 'a especificação da quantidade de cada tipo de máquinas necessárias a um processo (ou grupo de processos) produtivo(s), em cada um dos períodos considerados ao longo de um dado horizonte de planeamento' (pp. 219). Neste trabalho, os autores apresentam um esquema de classificação das diferentes abordagens ao problema do planeamento das necessidades de máquinas, em função dos factores relevantes incorporados nesses modelos. Adicionalmente apresentam uma pesquisa bibliográfica dos modelos determinísticos e estocásticos conhecidos.

Um dos modelos representativos dos primeiros trabalhos realizados nesta área foi proposto por Francis e White (1974). Ao longo de um dado horizonte de planeamento, o número ( $x_j$ ) de cada um dos  $n$  tipos de máquinas é calculado usando a expressão:

$$x_j = \sum_{i=1}^n \frac{P_{ij} \cdot T_{ij}}{H_{ij}}$$

onde

$P_{ij}$  : quantidade do componente  $i$  a produzir no tipo de máquina  $j$ ,

$T_{ij}$  : tempo unitário de produção do componente  $i$  no tipo de máquina  $j$ ,

$H_{ij}$  : número de horas disponíveis nas máquinas do tipo  $j$  para produzir o componente  $i$ .

Note-se que cada valor de  $x_j$  assim calculado não é necessariamente inteiro, pelo que deverá ser substituído por  $\lceil x_j \rceil$  (isto é, pelo menor inteiro que contém  $x_j$ ).

Significativo do pouco investimento que tem sido realizado nesta área é o facto de, mesmo nos textos mais recentes relativos ao planeamento de implantações fabris (por exemplo, Tompkins e White (1984)), se aconselhar ainda o mesmo tipo de modelo atrás referido, para o cálculo dos números de máquinas necessárias.

Da pesquisa efectuada por Miller e Davis (1977), relativa às soluções propostas para este problema, e das conclusões desse trabalho ressaltam vários aspectos :

- (i) não é tida em conta a interacção entre a decisão relativa ao número de máquinas a utilizar e outros aspectos do planeamento dos sistemas de produção (como, por exemplo, a implantação fabril, o sistema de transporte de materiais, o número e as aptidões dos trabalhadores, restrições ao volume de investimento, etc.),
- (ii) a natureza dinâmica dos sistemas de produção não é considerada (ou seja, efectuam-se análises estáticas para o problema em causa separadamente para cada intervalo do horizonte de planeamento,
- (iii) a existência de recursos escassos que condicionam a aquisição de máquinas (tais como o capital disponível para investir ao longo do projecto, o espaço, a mão-de-obra, etc.) não é explicitamente considerada nos modelos,

- (iv) o facto de as soluções não apresentarem valores inteiros implica a necessidade de se efectuarem arredondamentos; no caso do arredondamento se efectuar por excesso incorre-se num sobredimensionamento da capacidade enquanto que, no caso oposto, cria-se a necessidade de recorrer a trabalho extraordinário ou a subcontratação, sem que os respectivos custos sejam tidos em conta.

Será oportuno tecer alguns comentários relativamente às duas primeiras observações, por forma a esclarecer algumas opções tomadas no desenvolvimento do modelo que se propõe neste trabalho.

Na abordagem ao processo global do planeamento dos sistemas de produção, as interações entre os vários factores de decisão são determinantes tanto na eficiência como na própria viabilidade dos sistemas que são objecto de planeamento. No entanto, dado o elevado número de subproblemas associados ao processo global de planeamento, a complexidade de cada um deles e o seu grau de interligação, dificilmente se conseguirá desenvolver um modelo analítico capaz de abranger todos esses aspectos de forma satisfatória. A título de exemplo, pode referir-se o trabalho de Askin e Mitwasi (1992), no qual os autores propõem um modelo para a resolução integrada dos problemas das implantações fabris, selecção dos processos e planeamento da capacidade, mas que não contempla muitos dos aspectos relevantes de cada um deles. Por exemplo, não considera a possibilidade da produção e do transporte serem efectuados por lotes.

Miller e Davis (1978) propuseram um modelo dinâmico para o problema das necessidades de máquinas no qual se incluem restrições relativas à disponibilidade de espaço, ao volume de investimento e às horas extraordinárias, e uma função objectivo através da qual se procura minimizar os custos de operação, amortização, sobreutilização e subutilização de máquinas. A representação dinâmica deste problema é irrealista em vários aspectos. Por exemplo, estes autores pressupõem a existência de um mercado activo de compra e venda de máquinas usadas e admitem total flexibilidade na contratação e despedimento de mão-de-obra. Estes pressupostos são inadequados no contexto das condições em que a actividade económica se desenvolve no nosso país.

Um modelo de programação não linear para o planeamento das necessidades de máquinas foi proposto por Bard e Feo (1991), conjuntamente com uma heurística que permite a obtenção de soluções aceitáveis para o problema em causa. Neste modelo, o



objectivo é determinar o número de máquinas a adquirir e a fracção de tempo em que cada máquina está configurada para executar cada tipo de operação, de modo a minimizar o custo total. É de salientar o facto de não serem considerados, separadamente, os custos fixos (associados à disponibilidade da máquina) e os custos de operação, o que implica que o modelo só poderá ser aplicado nos casos em que o custo de operação não dependa dos componentes processados. Se bem que os autores sugeriram que é possível modificar o modelo para a selecção de processos alternativos, não é demonstrado qual o esforço computacional suplementar associado à introdução desta modificação.

Ainda relativamente ao problema do planeamento das necessidades de equipamento é de referir a existência de outros modelos para tipos de sistemas de produção específicos.

Sarin e Chen (1986) desenvolveram um modelo de programação inteira para a selecção dos equipamentos de produção num ambiente de tecnologia de grupo.

Um outro modelo para o planeamento das necessidades de equipamento produtivo (máquinas e material de transporte) para sistemas de produção flexíveis, apresentado por Kusiak (1987a), permite somente decisões de aquisição binárias e, como consequência, mesmo que o problema contenha um número pequeno de processos e máquinas, conduz a programas binários de grandes dimensões e de difícil resolução.

Para sistemas de produção 'just-in-time', Gunaserkaran et al (1993) desenvolveram um modelo para determinação do número de máquinas que minimiza os custos de funcionamento (que incluem os custos de processamento dos componentes, os custos associados ao desequilíbrio dos ritmos de produção em cada fase do processo produtivo e os custos associados à disponibilidade dos equipamentos).

## 4.2 Apresentação do modelo

Por forma a tornar mais clara a exposição, o modelo será apresentado primeiro na sua forma mais simples e depois sucessivamente estendido por forma a permitir a representação de turnos e de horas extraordinárias.

### 4.2.1 Modelo básico

A versão básica do modelo para o problema do planeamento das necessidades de equipamento e de mão-de-obra assenta no seguinte conjunto de pressupostos:

- (i) o volume de produção é estável ao longo do tempo,
- (ii) o volume global de produção pode ser adequadamente representado por um conjunto limitado de componentes ( $p=1, \dots, P$ ) produzidos em quantidades  $N_p$  num dado horizonte de planeamento,
- (iii) a produção é efectuada num conjunto de tipos de máquinas ( $m=1, \dots, M$ ), associando-se a cada um deles um custo unitário de aquisição  $c_m$ ,
- (iv) as máquinas são operadas por trabalhadores agrupados num conjunto de classes de mão-de-obra ( $h=1, \dots, H$ ),
- (v) o número de máquinas do tipo  $m$  que podem ser adquiridas encontra-se entre os limites  $(E_m)_{\min}$  e  $(E_m)_{\max}$  e o número de trabalhadores da classe  $h$  que podem ser contratados está entre os limites  $(L_h)_{\min}$  e  $(L_h)_{\max}$ ,
- (vi) para cada tipo de máquina,  $m$ , o número de máquinas inicialmente disponíveis é  $(x_0)_m$ ,
- (vii) o volume de investimento total em máquinas novas está limitado a  $I$ ,
- (viii) o custo total da mão-de-obra no horizonte de planeamento está limitado a CMO,
- (ix) tanto as máquinas como a mão-de-obra podem operar somente num turno normal de trabalho (sem possibilidade de horas extraordinárias); o tempo total deste turno ao longo do horizonte de planeamento é  $T$ ,
- (x) cada componente  $p$  pode ser produzido segundo um número limitado de rotas ( $r=1, \dots, R_p$ ) ou pode ser subcontratado com um custo  $c_{sp}$ ,

- (xi) o número de operações executadas na rota  $r$  do componente  $p$  é  $O_{pr}$  e cada operação  $o$  desta rota do componente pode ser subcontratada com um custo por lote  $co_{pro}$
- (xii) para cada par (componente, rota) =  $(p, r)$ ,
- o tamanho do lote tem um valor pré-estabelecido  $L_{pr}$
  - para cada lote, o custo da operação  $o$  (envolvendo a máquina  $m$ ) é  $cv_{pro}$ , o tempo de preparação da máquina ('set-up') mais o tempo de processamento é  $t_{pmro}$  e o tempo gasto por trabalhadores da classe de mão-de-obra  $h$  é  $t'_{phro}$
- (xiii) no horizonte de planeamento, cada máquina do tipo  $m$  tem um custo fixo  $cf_m$  e cada trabalhador da classe  $h$  tem um custo fixo  $cf_h$ .

À notação anteriormente introduzida acrescenta-se a seguinte, relativa às variáveis controláveis,

$x_m$  : número de máquinas do tipo  $m$  necessárias (o número de máquinas a serem adquiridas é  $x'_m = x_m - (x_o)_m$ ),

$y_h$  : número de trabalhadores da classe  $h$  necessários,

$z_{pro}$  : número de lotes do componente  $p$  cuja operação  $o$  é realizada segundo a rota  $r$ ,

$s_p$  : número de unidades do componente  $p$  a serem subcontratadas,

$s'_{pro}$  : número de lotes do componente  $p$  cuja operação  $o$  na rota  $r$  será subcontratada.

O problema do planeamento das necessidades de máquinas e mão-de-obra, para o qual foi definido o objectivo de minimização do custo global no horizonte de planeamento, pode ser modelizado como um problema de programação inteira mista, conforme se apresenta na Figura 4.1.

Na função objectivo, (1a), o custo total é a soma de cinco componentes: custos fixos das máquinas, custos variáveis de operação destas, custos fixos de mão-de-obra, custos de subcontratação de componentes e custos de subcontratação de operações.

As restrições podem ser interpretadas da forma seguinte:

- (1b) restrições que garantem que a procura de cada tipo de máquina não excede a capacidade correspondente,

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_m cf_m x_m + \sum_p \sum_r \sum_o cv_{pro} z_{pro} + \\ & + \sum_h cf'_h y_h + \sum_p cs_p s_p + \sum_p \sum_r \sum_o co_{pro} s'_{pro} \end{aligned} \quad (1a)$$

sujeito a

$$\sum_p \sum_r \sum_o t_{pmro} (z_{pro} - s'_{pro}) \leq x_m T \quad (m = 1, \dots, M) \quad (1b)$$

$$\sum_p \sum_r \sum_o t'_{phro} (z_{pro} - s'_{pro}) \leq y_h T \quad (h = 1, \dots, H) \quad (1c)$$

$$z_{pr1} + s'_{pr1} = \dots = z_{prO_{pr}} + s'_{prO_{pr}} \quad (p = 1, \dots, P; r = 1, \dots, R_p) \quad (1d)$$

$$\sum_r L_{pr} (z_{pro} + s'_{pro}) + s_p \geq N_p \quad (p = 1, \dots, P; o = 1) \quad (1e)$$

$$\sum_r ca_m x'_m \leq I \quad (1f)$$

$$\sum_h cf'_h y_h \leq CMO \quad (1g)$$

$$(E_m)_{\min} \leq x'_m \leq (E_m)_{\max} \quad (m = 1, \dots, M) \quad (1h)$$

$$(L_h)_{\min} \leq y_h \leq (L_h)_{\max} \quad (h = 1, \dots, H) \quad (1i)$$

$$x_m, y_h \text{ inteiros} \quad (1j)$$

$$z_{pro} \geq 0, x_m \geq 0, y_h \geq 0, \quad (1k)$$

$$s_p \geq 0, s'_{pro} \geq 0$$

Figura 4.1 - Modelo básico para o problema do planeamento das necessidades de equipamentos e de mão-de-obra

- (1c) restrições que garantem que a procura de cada classe de mão-de-obra não excede a capacidade correspondente,
- (1d) restrições impondo que, para cada par (componente, rota), o número de lotes é o mesmo para as diferentes operações executadas ou subcontratadas,
- (1e) restrições que garantem que a procura de cada componente é satisfeita,
- (1f) restrição que limita superiormente o volume de investimento em novas máquinas,
- (1g) restrição que limita superiormente o custo total da mão-de-obra,
- (1h) imposição de limites superior e inferior ao número de máquinas de cada tipo a serem adquiridas,
- (1i) Idem para o número de trabalhadores de cada classe de mão-de-obra a serem contratados,
- (1j) restrições de integralidade impostas ao número de máquinas de cada tipo e ao número de trabalhadores de cada classe de mão-de-obra,

(1k) restrições de não negatividade para as variáveis de decisão.

Note-se que, uma vez incluídas as restrições (1d) no modelo, as restrições (1e) só necessitam de ser especificadas para uma das operações incluídas em cada par (componente, rota). A operação considerada foi a primeira.

O modelo tem

- $M+H$  variáveis inteiras,
- $2 \cdot \sum_p \sum_r O_{pr}$  +  $P$  variáveis contínuas e
- $3M + 3H + P + 1 + \sum_p \sum_r O_{pr}$  restrições (incluindo  $2M+2H$  limites).

Esta dimensão pressupõe a não existência de restrições de integralidade para as variáveis  $s_p$ ,  $s'_{pro}$  e  $z_{pro}$ . Para o primeiro tipo de variável, isto é, para o número de componentes de cada tipo a serem subcontratados, a ausência de restrições de integralidade não levanta qualquer problema significativo relativamente à precisão do modelo. Contudo isto pode não ser verdade para os dois últimos tipos de variáveis, isto é, o número de lotes do componente  $p$  cuja operação  $o$  na rota  $r$  será subcontratada e o número de lotes de cada componente a serem produzidos de acordo com cada rota. Ignorar as restrições de integralidade é equivalente a assumir a divisibilidade dos lotes e dos tempos de preparação de máquina correspondentes. Este procedimento somente será apropriado se os tempos de preparação de máquina de cada lote for de uma ordem de magnitude inferior à do seu tempo de processamento. Isto acontece com muita frequência, quando os lotes são suficientemente grandes e/ou as suas operações de preparação de máquina não requerem muito tempo.

#### 4.2.2 Representação de turnos de produção

O modelo anterior pode ser estendido, por forma a ter em conta a possibilidade de se produzir em diferentes turnos. Nesta extensão consideram-se os seguintes pressupostos:

- (i) o número de turnos é dois ou três,

- (ii) um destes turnos, o 'turno de dia', é considerado o período normal de trabalho,
- (iii) cada trabalhador de cada classe de mão-de-obra pode ser afectado a qualquer um dos turnos; o custo unitário do trabalhador varia de acordo com o turno, e o custo mais baixo é naturalmente o do turno de dia.

A notação anterior será estendida no termos seguintes:

- $s$  : índice denotando um turno ( $s=1, \dots, S$ ),  
( $s=1$  representa o 'turno de dia';  $S$  pode ser igual a 2 ou 3)
- $cf_{hs}$  : custo fixo ao longo do horizonte de planeamento de um trabalhador pertencente à classe  $h$  quando trabalha no turno  $s$ ,
- $T_s$  : tempo total disponível, ao longo do horizonte de planeamento, para cada trabalhador afecto ao turno  $s$ .

Designando as novas variáveis controláveis por

- $y_{hs}$  : número de trabalhadores da classe  $h$  necessários no turno  $s$ ,
- $z_{pros}$  : número de lotes do componente tipo  $p$  a serem produzidos segundo a rota  $r$ , para a qual a operação  $o$  tem lugar no turno  $s$ ,

o problema de minimização do custo global ao longo do horizonte de planeamento pode ser modelizado de acordo com as expressões que se apresentam na Figura 4.2.

Neste modelo, tanto a função objectivo (2a) como as restrições (2b) a (2j) derivam directamente da função objectivo (1a) e das restrições correspondentes, (1b) a (1j), incluídas no modelo básico, tomando em consideração a existência de turnos sempre que apropriado.

Esta extensão ao modelo anterior tem

- $M+H.S$  variáveis inteiras,
- $P+(S+1) \cdot \sum_p \sum_r O_{pr}$  variáveis contínuas e
- $M.(S+2)+3.H.S+P+1+\sum_p \sum_r O_{pr}$  restrições (incluindo  $2.M+2.H.S$  limites).

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_m cf_m x_m + \sum_p \sum_r \sum_o cv_{pro} \sum_s z_{pros} + \\ & \sum_h \sum_s cf'_{hs} y_{hs} + \sum_p \sum_r \sum_o co_{pro} s'_{pro} \\ & + \sum_p cs_p s_p \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\text{sujeito a } \sum_p \sum_r \sum_o t_{pmro} (z_{pros} - s'_{pro}) \leq x_m T_s \quad (m = 1, \dots, M; s = 1, \dots, S) \quad (2b)$$

$$\sum_p \sum_r \sum_o t'_{phro} (z_{pros} - s'_{pro}) \leq y_{hs} T_s \quad (h = 1, \dots, H; s = 1, \dots, S) \quad (2c)$$

$$\sum_s z_{pr1s} + s'_{pr1} = \dots = \sum_s z_{prO_{pr}} + s'_{prO_{pr}} \quad (p = 1, \dots, P; r = 1, \dots, R_p) \quad (2d)$$

$$\sum_r L_{pr} (\sum_s z_{pros} + s'_{pro}) + s_p \geq N_p \quad (p = 1, \dots, P; o = 1) \quad (2e)$$

$$\sum_m ca_m x'_m \leq I \quad (2f)$$

$$\sum_h \sum_s cf'_{hs} y_{hs} \leq CMO \quad (2g)$$

$$(E_m)_{\min} \leq x'_m \leq (E_m)_{\max} \quad (m = 1, \dots, M) \quad (2h)$$

$$(L_h)_{\min} \leq y_{hs} \leq (L_h)_{\max} \quad (h = 1, \dots, H; s = 1, \dots, S) \quad (2i)$$

$$x_m, y_{hs} \text{ inteiros} \quad (2j)$$

$$z_{pros} \geq 0, x_m \geq 0, x'_m \geq 0, \quad (2k)$$

$$y_{hs} \geq 0, s_p \geq 0, s''_{pro} \geq 0$$

Figura 4.2 - Modelo para o problema do planeamento das necessidades de equipamento e de mão-de-obra incluindo turnos

### 4.2.3 Representação de turnos e de horas extraordinárias

Uma extensão ao modelo anterior foi introduzida, por forma a tomar em conta a possibilidade de realização de horas extraordinárias. O novo modelo foi construído tendo em conta os seguintes pressupostos:

- (i) somente os trabalhadores afectos ao turno de dia podem realizar horas extraordinárias,
- (ii) o trabalho extraordinário só pode ser realizado no turno que se segue ao turno de dia,
- (iii) com o objectivo de custear o trabalho extraordinário, este turno é dividido num número de períodos extraordinários e o custo unitário

do trabalho extraordinário aumenta de qualquer período para o período seguinte.

Considere-se a seguinte notação adicional:

- $E$  : número total de períodos extraordinários,
- $e$  : índice denotando todos os períodos extraordinários ( $e=1, \dots, E$ ),
- $c_{he}$  : custo unitário de um trabalhador pertencente à classe  $h$  quando realiza horas extraordinárias no período  $e$ ,
- $T_{he}$  : limite imposto ao número de horas extraordinárias que um trabalhador da classe  $h$  pode realizar durante o período  $e$ , ao longo de todo o horizonte temporal,

e definam-se as novas variáveis controláveis como:

- $t''_{he}$  : número de horas extraordinárias realizadas pelos trabalhadores da classe  $h$  no período  $e$ ,
- $w_{proe}$  : número de lotes do componente  $p$  a serem produzidos segundo a rota  $r$  para o quais a operação  $o$  é realizada no período extraordinário  $e$ .

O problema do planeamento das necessidades de equipamento e de mão-de-obra pode ser modelizado de acordo com as expressões que se apresentam na Figura 4.3.

Neste modelo, tanto a função objectivo (3a) como todas as restrições (3b) a (3j) derivam directamente da função objectivo (2a) e das restrições correspondentes, (2b) a (2j), incluídas no modelo anterior, tomando em consideração o trabalho extraordinário sempre que apropriado.

Esta extensão ao modelo anterior tem

- $M + H.S$  variáveis inteiras,
- $P + (S + E + 1) \cdot \sum_p \sum_r O_{pr}$  variáveis contínuas e
- $M.(S + 2) + 3.H.S + H.E + P + \sum_p \sum_r O_{pr}$  restrições (incluindo  $2.M+2.H.S$  limites).



$$\begin{aligned}
 \min Z = & \sum_m cf_m x_m + \sum_h \sum_s cf'_{hs} y_{hs} + \sum_h \sum_c ce_{hc} t''_{hc} \\
 & + \sum_p \sum_r \sum_o cv_{pro} ( \sum_s z_{pros} + \sum_c w_{proe} ) \\
 & + \sum_p cs_p s_p + \sum_p \sum_r \sum_o co_{pro} s'_{pro} \tag{3a}
 \end{aligned}$$

sujeito a

$$\sum_p \sum_r \sum_o t_{pmro} (z_{pros} - s'_{pro}) \leq x_m T_s \quad (m = 1, \dots, M; s = 1,3) \tag{3b.1}$$

$$\sum_p \sum_r \sum_o t_{pmro} (z_{pros} + \sum_c w_{proe} - s'_{pro}) \leq x_m T_s \quad (h = 1, \dots, H; s = 2) \tag{3b.2}$$

$$\sum_p \sum_r \sum_o t'_{phro} (z_{pros} - s'_{pro}) \leq y_{hs} T_s \quad (h = 1, \dots, H; s = 1, \dots, S) \tag{3c.1}$$

$$t''_{hc} = \sum_p \sum_r \sum_o t'_{phro} w_{proe} \leq T_{hc} \quad (h = 1, \dots, H; e = 1, \dots, E) \tag{3c.2}$$

$$\sum_s z_{prls} + \sum_c w_{prle} + s'_{prl} = \dots = \sum_s z_{prors} + \sum_c w_{prorc} + s'_{pror} \quad (p = 1, \dots, P; r = 1, \dots, R_p) \tag{3d}$$

$$\sum_r L_{pr} ( \sum_s z_{pros} + \sum_c w_{proe} + s'_{pro} ) + s_p \geq N_p \quad (p = 1, \dots, P; o = 1) \tag{3e}$$

$$\sum_m ca_m x'_m \leq I \tag{3f}$$

$$\sum_h \sum_s cf'_{hs} y_{hs} + \sum_h \sum_c ce_{hc} t''_{hc} \leq CMO \tag{3g}$$

$$(E_m)_{\min} \leq x'_m \leq (E_m)_{\max} \quad (m = 1, \dots, M) \tag{3h}$$

$$(L_h)_{\min} \leq y_{hs} \leq (L_h)_{\max} \quad (h = 1, \dots, H; s = 1, \dots, S) \tag{3i}$$

$$x_m, y_{hs} \text{ inteiros} \tag{3j}$$

$$z_{pros} \geq 0, w_{proe} \geq 0, x_m \geq 0, x'_m \geq 0, y_{hs} \geq 0, t''_{hc}, s_p \geq 0, s'_{pro} \geq 0 \tag{3k}$$

Figura 4.3 - Modelo para o problema do planejamento das necessidades de equipamento e de mão-de-obra incluindo turnos e horas extraordinárias

### 4.2.4 Experiência computacional

O modelo básico e as suas extensões foram resolvidos recorrendo ao algoritmo 'branch-and-bound' do programa Cplex (CPLEX(1991 a) e CPLEX (1991 b)) numa estação gráfica DG Aviion 300.

Os resultados apresentados nesta secção foram obtidos para o problema do planeamento das necessidades de equipamento e de mão-de-obra incluindo tanto turnos como horas extraordinárias.

Diferentes estratégias de pesquisa da solução óptima foram testadas com base em doze conjuntos de problemas teste, procurando-se representar através destes uma gama alargada de situações reais. Os parâmetros que caracterizam cada um dos conjuntos de problemas encontram-se representados na Tabela 4.1. Para cada conjunto, cinco problemas foram definidos recorrendo ao gerador descrito no Apêndice C.

Tabela 4.1 - Parâmetros do gerador utilizados nos 12 conjuntos de problemas teste

Conjunto de problemas	Nº de tipos de máquinas	Nº de classes de mão-de-obra	Nº de componentes	Procura de componentes	
				Média	Desvio padrão
1	10	10	10	50	15
2	10	10	25	50	15
3	10	10	50	50	15
4	10	10	10	100	30
5	10	10	25	100	30
6	10	10	50	100	30
7	25	10	10	200	60
8	25	10	25	200	60
9	25	10	50	200	60
10	25	15	10	200	60
11	25	15	25	200	60
12	25	15	50	200	60

Os problemas foram resolvidos utilizando três estratégias de pesquisa da árvore diferentes:

**Estratégia A:** Concede-se prioridade na pesquisa a todas as variáveis inteiras que representam tipos de máquinas. Quando se retrocede a partir de um nó já explorado recorre-se a um procedimento de pesquisa em profundidade ('depth first search') para a selecção do nó seguinte (ou seja, selecciona-se o nó gerado mais recentemente). Em cada nó selecciona-se primeiro o ramo superior (o que conduz ao maior valor inteiro da variável).

Estratégia B: Quando se retrocede a partir de um nó já explorado passa-se para o nó que apresenta o melhor valor da função objectivo para a relaxação P.L. associada. Em cada nó o algoritmo decide qual o ramo a explorar.

Estratégia C: Trata-se de uma conjugação das duas estratégias anteriores: a primeira é utilizada para determinar a primeira solução inteira para o problema e a segunda é utilizada para as restantes soluções.

Os resultados obtidos para a estratégia A sintetizam-se na Tabela 4.2. Para cada conjunto de problemas calcularam-se:

- (i) o número médio, mínimo e máximo de nós que foi necessário explorar até se atingir aquele que correspondia à melhor solução (dentro de um esforço computacional limitado a 5 minutos de CPU),
- (ii) valores médio, mínimo e máximo do excesso do custo correspondente à melhor solução obtida para a estratégia em causa, relativamente ao mais elevado dos limites inferiores para a função objectivo calculadas nas pesquisas conduzidas, segundo qualquer uma das estratégias.

Tabela 4.2 - Resultados globais para a estratégia A

Conjunto de problemas	Melhor nó		% Melhor limite	
	Média	(min, Max)	Média	(min, Max)
1	878	(249, 1522)	10.1	(5.9, 12.9)
2	248	(90, 512)	4.6	(3.3, 5.7)
3	67	(34, 126)	1.9	(1.3, 2.5)
4	861	(117, 1681)	5.5	(3.8, 6.8)
5	270	(169, 396)	2.3	(1.9, 2.9)
6	96	(47, 142)	1.0	(0.8, 1.3)
7	677	(275, 1203)	4.6	(3.6, 6.7)
8	307	(92, 472)	1.5	(1.2, 2.0)
9	93	(64, 133)	0.9	(0.4, 2.5)
10	627	(62, 1288)	6.3	(4.3, 9.8)
11	316	(77, 476)	2.1	(1.0, 3.1)
12	93	(79, 106)	0.8	(0.2, 1.2)

Nas tabelas 4.3 e 4.4 repetem-se os mesmos resultados, mas para as estratégias B e C.

Tabela 4.3 - Resultados globais para a estratégia B

Conjunto de problemas	Melhor nó		% Melhor limite	
	Média	(min, Max)	Média	(min, Max)
1	512	(223, 888)	26.2	(8.6, 41.4)
2	98	(49, 181)	16.8	(10.9, 28.9)
3	74	(54, 105)	2.4	(1.1, 4.3)
4	700	(43, 1016)	12.7	(6.6, 16.4)
5	109	(50, 209)	4.6	(3.8, 6.2)
6	79	(62, 111)	1.7	(0.6, 2.7)
7	306	(67, 3638)	18.9	(0.8, 28.7)
8	123	(50, 748)	14.8	(4.9, 32.9)
9	205	(111, 259)	5.4	(1.5, 9.6)
10	781	(172, 1176)	20.7	(12.1, 25.9)
11	135	(103, 216)	19.9	(4.7, 34.9)
12	164	(110, 237)	3.5	(0.4, 6.0)

Tabela 4.4 - Resultados globais para a estratégia C

Conjunto de problemas	Melhor nó		% Melhor limite	
	Média	(min, Max)	Média	(min, Max)
1	1106	(249, 2729)	8.6	(4.6, 12.9)
2	57	(26, 165)	5.6	(4.6, 6.6)
3	54	(34, 100)	1.7	(1.4, 2.5)
4	416	(28, 1416)	6.1	(3.9, 7.7)
5	99	(31, 340)	2.4	(1.4, 3.3)
6	87	(37, 185)	1.1	(0.5, 1.7)
7	46	(33, 59)	4.9	(3.7, 6.7)
8	205	(60, 507)	1.6	(0.9, 2.1)
9	73	(61, 101)	1.0	(0.4, 2.5)
10	52	(48, 61)	6.8	(5.3, 11.1)
11	80	(71, 91)	2.2	(1.2, 3.7)
12	89	(83, 95)	0.8	(0.2, 1.0)

Os resultados obtidos sugerem que

- (i) para as estratégias A e C a qualidade das soluções é, de uma forma geral, apreciável, tendo em consideração que o esforço computacional foi mantido dentro de limites razoáveis,
- (ii) a estratégia A é, em geral, melhor do que as outras.

Uma análise mais detalhada dos resultados correspondentes aos 60 problemas teste revelou que

- (i) a melhor solução foi obtida utilizando a estratégia A em 42 casos, a estratégia B em 4 casos e a estratégia C em 19 casos (tendo havido 4 empates),
- (ii) quando a solução obtida pela estratégia A não foi a melhor, foi invariavelmente a segunda melhor e situou-se próximo daquela,
- (iii) a estratégia C teve um desempenho próximo da estratégia A em situações nas quais, na melhor solução, o número de máquinas era zero ou um, pelo menos para alguns tipos de máquinas,
- (iv) quando as soluções obtidas pelas diferentes estratégias conduziram a custos globais semelhantes, então nunca diferiam substancialmente em termos de máquinas e mão-de-obra requeridas.

Deve-se notar que, além de definir o equipamento e mão-de-obra necessários, o modelo também especifica os fluxos de produção para as diferentes rotas de cada componente e para cada tipo de máquina. Esta informação é de importância crucial em fases mais avançadas do problema das implantações fabris.

#### **4.2.5 Caracterização da solução para um exemplo concreto**

Para ilustrar o tipo de soluções obtidas na resolução deste problema e de problemas subsequentes, definiu-se um exemplo que se especifica completamente no Apêndice D. Para este exemplo escolheu-se uma dimensão moderada, que permitisse uma interpretação relativamente simples das soluções obtidas.

Nas Tabelas 4.5 a 4.8 apresenta-se a solução obtida para este exemplo, por aplicação da estratégia A. Deve realçar-se que, neste caso, esta solução é a solução ótima para o problema.

Tabela 4.5 - Custos durante o horizonte de planeamento

Equipamentos		Mão-de-obra	
Fixo	2 851 449	Horas normais	9 421 139
Operação	679 111	Turnos	0
		Horas extraordinárias	2 606 913

Tabela 4.6 - Número de lotes de cada componente a ser produzido de acordo com cada rota

Componente	P0		A0				A1			A2				
Rota	2		1	2			1	2	3	1	2	3	4	
Operação	1		1	2	1	2	1	2	3	1	2	3	4	
Turno	1		1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1	
Período	-		-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	
Nº de lotes	20.5		0.5	0.5	33.7	33.7	44.0	44.0	44.0	85.4	85.4	85.4	22.1	63.3

Componente	A3	A4		P1		A5		A6		A7				
Rota	1	2		1	2	1	2	1	2	1	2			
Operação	1	1		1	2	1	2	1	2	1	2			
Turno	-	1		-	-	1	1	1	1	1	1			
Período	1	-		2	3	-	-	-	1	-	-			
Nº de lotes	200.0	128.6		31.4	88.0	15.7	15.7	21.0	21.0	66.4	66.4	72.9	4.1	17.1

Componente	A7		A8		A9				A10			
Rota	1		1		1	2	3	4	1	2	3	4
Operação	2	3	1	2	1	2	3	4	1	2	3	4
Turno	-	1	1	1	-	1	-	1	1	1	-	-
Período	2	-	-	-	1	-	1	-	-	-	1	1
Nº de lotes	51.7	72.9	155.6	155.6	124.8	124.8	124.8	124.8	117.7	117.7	117.7	117.7

Componente	A11				A12								
Rota	1				1				2				
Operação	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Turno	1	-	1	1	1	-	1	-	1	1	1	-	1
Período	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-
Nº de lotes	52.9	115.5	168.3	168.3	4.8	163.5	15.4	15.4	15.4	15.4	7.5	7.5	7.5

Componente	A13		A14		A15		P2	A16					
Rota	1		1		1		1	1					
Operação	1	2	1	1	2	3	1	1	2				3
Turno	-	1	1	1	1	1	-	-	1	1	-	-	1
Período	1	-	-	-	-	-	1	1	-	-	1	2	-
Nº de lotes	51.4	51.4	158.5	129.2	129.2	31.0	98.2	13.3	37.4	17.9	6.7	12.8	37.4

Componente	A17	A18		A19				A20		A21		
Rota	1	1		1				1	2	1		
Operação	1	1	2	3	1	2	3	4	1	1	1	
Turno	1	1	-	-	1	1	1	-	-	1	1	-
Período	-	-	1	1	-	-	-	1	1	-	-	1
Nº de lotes	49.6	75.6	75.6	75.6	62.4	62.4	62.4	62.4	67.2	272.1	73.1	25.1

Tabela 4.7 - Número de máquinas a adquirir

Tipo de máquina	M0	M1	M2	M3	M4
Nº de máquinas	3	2	1	2	5
Eficiência (%)	100	100	100	100	100
Utilização (%)	100	100	100	100	100

Tabela 4.8 - Número de trabalhadores afectos a cada turno e necessidades de trabalho extraordinário

Classe de mão-de-obra	H0			H1		H2	H3	H4
Turno	1			1		1	1	1
Nº de trabalhadores	1			1		3	1	1
Período	1	2	3	1	2	1	-	1
Nº de horas	419	240	237	437	245	725	-	341

## 4.3 Interacção com o utilizador

### 4.3.1 Descrição geral da interface

Nesta secção, mostram-se as interacções incorporadas no módulo do planeamento de recursos e descreve-se sumariamente a funcionalidade de cada uma daquelas interacções.

Da janela principal do SAD (que se apresentou na Figura 3.2) reproduz-se, na Figura 4.4, a área a partir da qual se tem acesso aos comandos deste módulo, segundo a árvore que se apresenta na Figura 4.5. Na Figura 4.4 exemplifica-se a forma de aceder ao comando Criar do submenu Gerais do menu Dados.

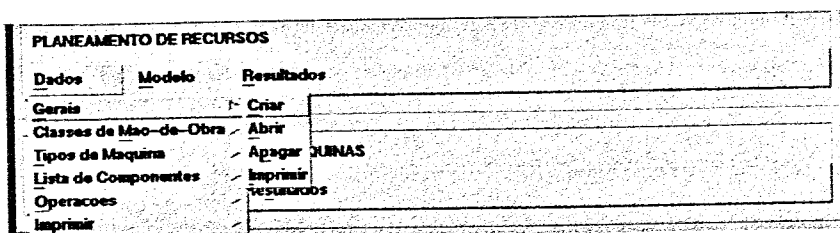


Figura 4.4 - Área da janela principal relativa ao módulo de planeamento de recursos

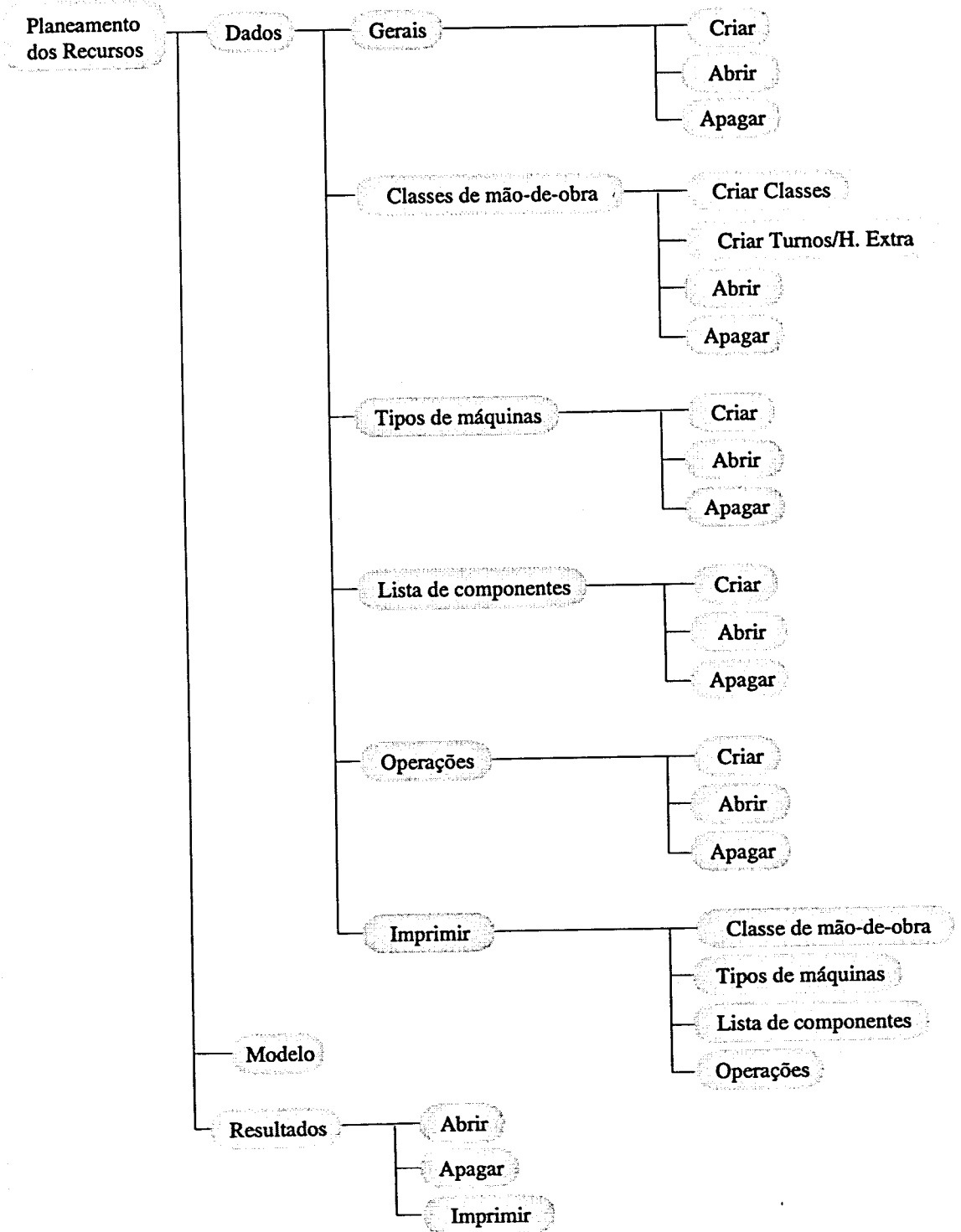


Figura 4.5 - Percursos de acesso aos comandos do módulo de planeamento dos recursos



### 4.3.2 Introdução dos dados

A criação ou modificação dos dados gerais de um problema de planeamento de recursos é efectuada através da caixa de diálogo de introdução de dados apresentada na Figura 4.6<sup>1</sup>.

Figura 4.6 - Caixa de diálogo de criação/modificação de um problema de planeamento de recursos

Figura 4.6 - Caixa de diálogo de criação/modificação de um problema de planeamento de recursos

A tecla 'F1', quando premida com o cursor na caixa de texto correspondente ao identificador do projecto, permite visualizar uma lista de selecção, como a apresentada na Figura 4.7, com os identificadores dos problemas existentes na base de dados. A selecção de um desses identificadores da lista transfere, automaticamente, o seu valor para a caixa de texto e introduz, nos outros campos da caixa de diálogo, os dados gerais associados.

Para eliminar um problema da base de dados, activa-se o botão Apagar do menu Dados-Gerais, o que faz aparecer uma lista de selecção (como a apresentada na Figura 4.7) com os identificadores de problemas já criados. O mesmo procedimento é utilizado para apagar qualquer outro item da base de dados, podendo no entanto ser

<sup>1</sup> A terminologia utilizada na maioria dos campos provém directamente da especificação da base de dados (Secção 3.3), pelo que, à excepção dos casos em que tal não se verifique, se omitirá qualquer explicação adicional na descrição da interface.

necessário utilizar mais do que uma lista para identificar o item a apagar (por exemplo, para apagar uma operação aparece primeiro uma lista com os componentes, depois outra com as rotas do componente seleccionado e finalmente uma com as operações da rota seleccionada). Note-se ainda que, quando se apaga um registo da base de dados, todas as referências a esse registo são apagadas.

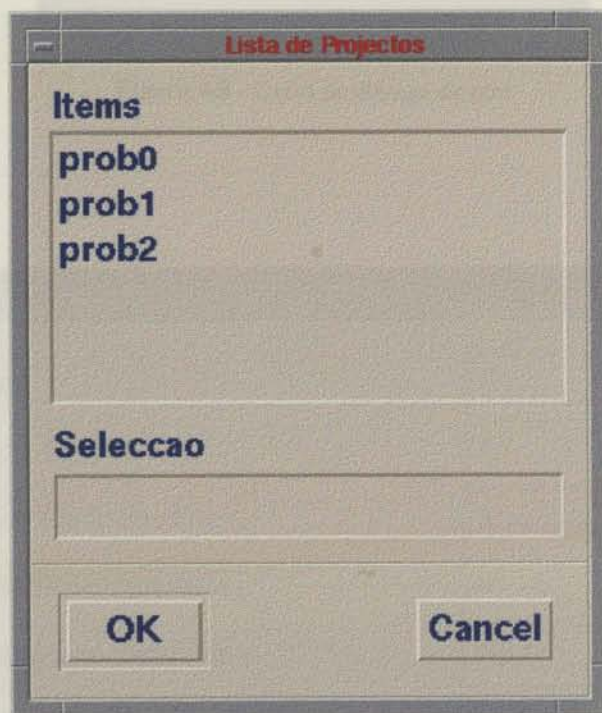


Figura 4.7 - Lista de selecção de identificadores de projecto

Uma caixa de diálogo de erro (como a apresentada na Figura 4.8), com uma mensagem apropriada ao contexto, aparecerá nos seguintes casos:

- utilização de um identificador já existente na base de dados, na criação de um novo problema,
- não inserção de um valor na caixa de texto correspondente à dimensão do período,
- inserção de um valor não inteiro em qualquer das caixas de texto, à excepção da correspondente ao identificador.

A criação de classes de mão-de-obra é efectuada numa caixa de diálogo como a da Figura 4.9.

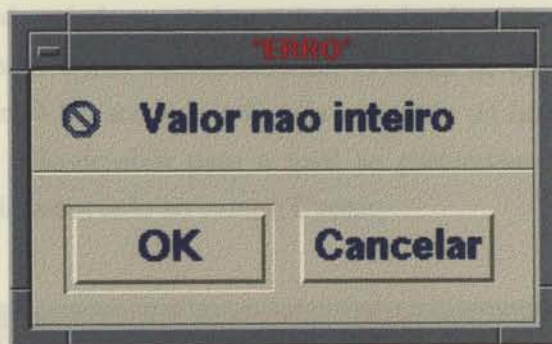


Figura 4.8 - Caixa de diálogo de erro

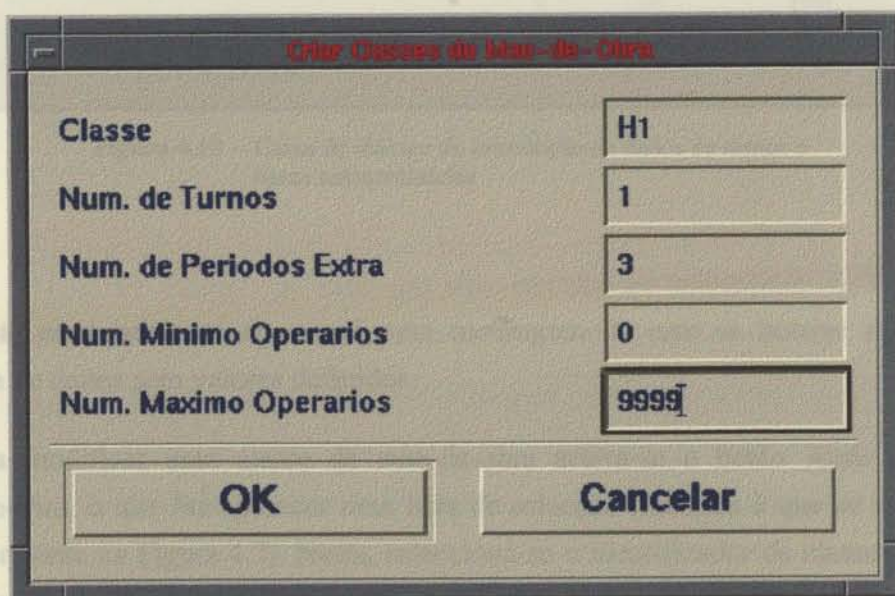


Figura 4.9 - Caixa de diálogo de criação de classes de mão-de-obra

Uma caixa de diálogo de erro (do tipo da que se apresentou na Figura 4.8), com uma mensagem apropriada ao contexto, aparecerá sempre que:

- se insira um valor não inteiro em qualquer das caixas de texto, à excepção da correspondente ao identificador da classe,
- o valor do limite inferior for superior ao do limite superior,
- o número de turnos e/ou horas extraordinárias for superior a três ou não definido.

Somente depois de criada uma classe de mão-de-obra é possível definir os seus turnos e os períodos de horas extraordinárias. A caixa de diálogo correspondente é apresentada na Figura 4.10, sendo criada pela activação do botão Criar Turnos/Horas Extra. A classe de mão-de-obra para a qual se pretendem introduzir os dados é seleccionada no botão associado ao campo Classe.

A caixa de diálogo 'Mão de Obra - Criar Turnos/Períodos' apresenta o seguinte conteúdo:

Classe: 1

Turno	Custo/Trab.	Duracao	Período	Custo Hora/Trab.	Max. Horas/Trab.
1	1500000	1760	1	1000	700
			2	1200	900
			3	100	900

Botões: Seguinte, Ok, Cancelar

**Figura 4.10** - Caixa de diálogo de introdução de dados de turnos e horas extraordinárias

Neste caso, somente aparecerá uma mensagem de erro se houver campos de entrada de dados sem valores definidos.

Para modificar uma classe de mão-de-obra activa-se o botão Abrir do menu mão-de-obra, o que faz aparecer uma lista de selecção (idêntica à que se apresentou anteriormente na Figura 4.7). Nesta, selecciona-se o identificador de classe o que faz aparecer uma caixa de diálogo como a apresentada na Figura 4.9, a qual conduz, desde que a operação não seja cancelada, a outra caixa de diálogo semelhante à apresentada na Figura 4.10.

Na criação ou modificação de tipos de máquinas utiliza-se a caixa de diálogo de introdução de dados que se reproduz na Figura 4.11.

A tecla 'F1', quando premida com o cursor na caixa de texto correspondente ao identificador do tipo de máquina, permite visualizar uma lista de selecção (semelhante à que se apresentou na Figura 4.7) dos identificadores dos tipos de máquinas existentes na base de dados. A selecção de um desses identificadores da lista transfere, automaticamente, o seu valor para a caixa de texto e introduz, nos outros campos da caixa de diálogo, os dados relativos a esse tipo de máquina.

Planeamento de Recursos - Tipos de Máquina

Tipo

Custos no Período

Existência

Custo de Investimento

Taxa Max. de Utilização

Num. Min. de Máquinas

Num. Max. de Máquinas

OK Cancelar

Figura 4.11 - Caixa de diálogo de introdução e modificação de tipos de máquinas

Uma caixa de diálogo de erro (do tipo do que se apresentou na Figura 4.8) aparecerá, com uma mensagem apropriada ao contexto, quando:

- se introduzir um valor não inteiro para os limites inferior e superior do número de máquinas,
- o valor do limite inferior for superior ao do limite superior,
- a taxa máxima de utilização for superior a 100%,
- existirem campos não definidos.

A criação ou alteração de componentes é efectuada através da sequência de caixas de diálogo apresentada na Figura 4.12. Os dados relativos a um dado componente são introduzidos na janela de diálogo a) e os identificadores dos respectivos subcomponentes, conjuntamente com as quantidades em que são utilizados no componente pai, em b). Caso o componente seja uma matéria-prima, o utilizador deixa em branco o campo Número de Subcomponentes e a caixa de diálogo b) não aparecerá. A procura só deverá ser definida para produtos acabados, ou seja, componentes que não se integrem noutros componentes.

O botão Componente permite visualizar todos os componentes e subcomponentes introduzidos na base de dados, para o problema corrente, sendo indicados por uma cor diferente aqueles cujos subcomponentes ainda não se encontram definidos.

Um caixa de diálogo com uma mensagem de erro (do tipo da que se apresentou na Figura 4.8) ocorrerá nas seguintes situações:

- identificador de componente ou subcomponente não definido,
- introdução do valor da procura não inteiro,
- introdução do valor da procura para um subcomponente.

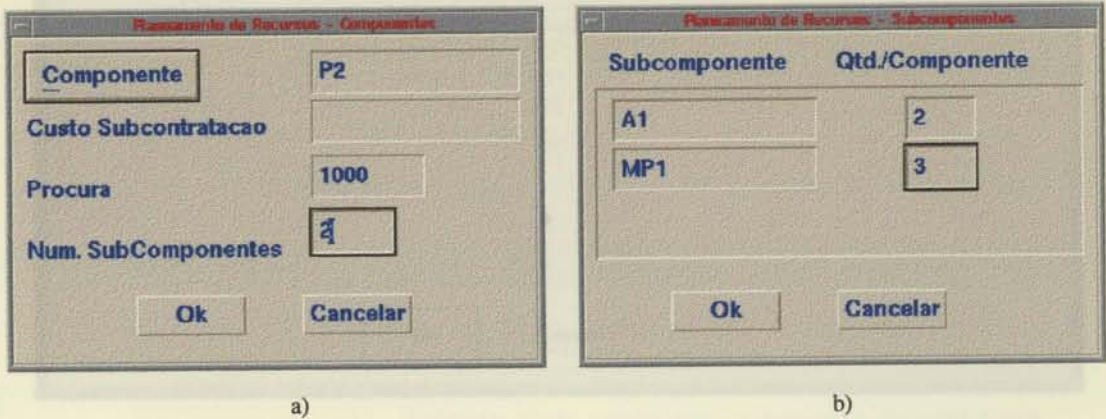


Figura 4.12 - Caixas de diálogo para criação e alteração de componentes

A definição ou modificação das operações de um componente são efectuadas em caixas de diálogo como a apresentada na Figura 4.13. Caso o número de rotas do componente ainda não se encontre definido, uma caixa de diálogo de introdução de dados (Figura 4.14) permite a sua definição. Se, para uma dada rota, o número de operações e o tamanho do lote ainda não foram especificados, aparecerá a caixa de diálogo de introdução de dados reproduzida na Figura 4.15.

Uma caixa de diálogo com uma mensagem de erro (do tipo da que se apresentou na Figura 4.8) ocorrerá nas seguintes situações:

- não definição dos dados para qualquer dos campos, à excepção dos custos de subcontratação,
- utilização de um tipo de dados inapropriado face ao campo (por exemplo, introdução de um carácter não numérico no campo TSU - tempo de 'set-up').

Planeamento de Recursos - Lista de Componentes

Componente  Rota

Operacao	Maquina				Mao de Obra		Custo Subcent.
	Tipo	Tempo/Lote	TSU	Custo/Lote	Classe	Tempo/Lote	
1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Figura 4.13 - Caixa de diálogo para definição das operações

Planeamento de Recursos - Num. Rotas

Num. de Rotas

Figura 4.14 - Caixa de diálogo para introdução do número de rotas

Planeamento de Recursos - Dados da Rota

Num. de Operacoes

Tamanho do Lote

Figura 4.15 - Caixa de diálogo para introdução do número de operações e tamanho do lote

### 4.3.3 Utilização do modelo

Activando o botão Modelo no menu principal abre-se uma janela (Figura 4.16) para introdução dos parâmetros a especificar para se resolver um problema. São eles:

- Id. Solução: identificador da solução,
- Lim. Tempo: limite máximo de tempo para a selecção de uma solução,
- Erro Relativo (%): limite de proximidade aceitável da melhor solução corrente, relativamente ao limite inferior obtido pela relaxação das condições de integralidade do problema. Quando a solução se aproxima mais deste limite inferior do que o valor definido neste parâmetro, a pesquisa de uma nova solução é interrompida.

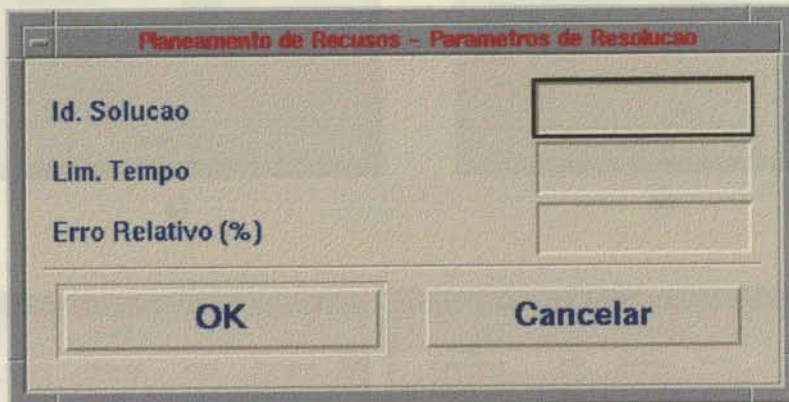
A imagem mostra uma caixa de diálogo com o título "Planeamento de Recursos - Parâmetros de Resolução". O formulário contém três campos de entrada: "Id. Solucao", "Lim. Tempo" e "Erro Relativo (%)". Abaixo dos campos, há dois botões: "OK" e "Cancelar".

Figura 4.16 - Caixa de diálogo para introdução dos parâmetros para a resolução do problema

Uma vez especificados estes parâmetros, o problema corrente é então resolvido.

Uma caixa de diálogo com uma mensagem de erro (do tipo da que se apresentou na Figura 4.8) ocorrerá nas seguintes situações:

- não preenchimento do campo relativo ao identificador da solução,
- utilização de um tipo de dados inadequado.



### 4.3.4 Visualização dos resultados

Após o cálculo de uma solução pelo sistema, ou recorrendo ao botão Abrir do menu Resultados, visualiza-se o conjunto de janelas apresentado nas Figuras 4.17 a) a d). As janelas que serão apresentadas no monitor são seleccionadas através da caixa de diálogo Soluções. Tal caixa permite ao utilizador visualizar parcial ou totalmente a solução que acabou de ser calculada ou outra que o tenha sido anteriormente. No caso particular das Figuras 4.17 a) a d) caracteriza-se uma solução no tocante aos produtos, às máquinas e aos custos incorridos no horizonte de planeamento.

**SOLUCOES**

CUSTOS  idsol

MAQUINAS  idsol

MAO DE OBRA  idsol

PRODUCAO  idsol

MATRIZ DE FLUXOS  idsol

COMPONENTES SUBCONTRAT.  idsol

OPERACOES SUBCONTRAT.  idsol

TERMINAR

a)

**CUSTOS NO PERIODO**

TOTAL 15538613.00

MAQUINAS

Investimento 0.00

Fbo 2851449.00

Operacao 678111.56

Mão de Obra

Horas Normais 9421139.00

Horas Extraordinarias 2609813.25

Horas de Turnos 0.00

Subcontratacao

Operacoes 0.00

Produtos 0.00

FECHAR

b)

**MAQUINAS**

Tipo	Numero	Eficiencia	Turno	Ocupacao
M0	3	100.00	1	100.0
M1	2	100.00	1	100.0
M2	1	100.00	1	100.0
M3	2	100.00	1	100.0
M4	5	100.00	1	100.0

FECHAR

c)

**Produtos**

Componente	Rota	Operacao	Turno	Periodo	Num. Lotes
P0	2	1	1		20.47
A0	1	1	1		0.55
		2	1		0.55
	2	1	1		33.73
		2	1		33.73
A1	1	1	1		44.60
		2	1		44.60
		3	1		44.60
A2	1	1		1	85.37
		2	1		85.37

FECHAR

d)

Figura 4.17 - Janelas para visualização dos resultados

Obtidos estes resultados, é possível modificar os valores das variáveis número de máquinas, taxa máxima de utilização de cada tipo de máquina e número de trabalhadores de cada classe, activando os botões correspondentes. O sistema poderá resolver o problema para os novos valores atribuídos a essas variáveis.

## 4.4 Perspectivas de desenvolvimento do módulo

A aplicação do modelo a um conjunto extenso de problemas, representando uma gama variada de situações realistas, revelou que a qualidade das soluções obtidas a partir deste módulo do sistema é aceitável, para níveis razoáveis de esforço computacional. No entanto, e tendo em particular atenção que um número maior de soluções geradas nesta fase poderá influenciar o número de implantações a avaliar na fase final de utilização do sistema, o desenvolvimento de algoritmos mais eficientes para a resolução do modelo deverá ser uma área a merecer atenção no futuro.

A actualização do programa CPLEX, adoptando uma nova versão que incorpora técnicas de programação inteira mais actualizadas, poderá melhorar substancialmente a velocidade de obtenção de soluções e permitir o armazenamento de soluções intermédias. Esta actualização do CPLEX só não foi introduzida, devido ao facto de versões mais recentes não correrem na plataforma em que o SAD foi desenvolvido.

Um outro aspecto a considerar em versões futuras deste módulo é a introdução de limites inferiores (absolutos ou relativos) no número de lotes de cada componente a produzir segundo uma rota em cada turno ou período. Estas restrições poderão conduzir a soluções mais atractivas do ponto de vista prático. Veja-se, por exemplo, o caso do componente A0 do qual só se produz 0.5 lote segundo a rota 1 (ver Tabela 4.6). Num caso real poderia ser mais interessante penalizar o valor da função objectivo e produzir este produto somente segundo a rota 2.

Por forma a contemplar situações em que a procura dos produtos é sazonal, uma nova versão do modelo para o planeamento de recursos foi desenvolvida, para ser incluída numa futura versão do SAD. Esta extensão é apresentada seguidamente e tem por base o modelo incluindo turnos e horas extraordinárias. Os seguintes pressupostos adicionais foram considerados:

- (i) O horizonte de planeamento compreende um número inteiro de ciclos de procura e é dividido em  $K$  períodos,
- (ii) o volume de produção é estável ao longo de cada período do horizonte de planeamento,
- (iii) o volume global de produção pode ser adequadamente representado por um conjunto limitado de componentes ( $p=1, \dots, P$ ), produzidos em quantidades  $N_{pi}$  no período  $i$ ,
- (iv) em cada período  $i$  do horizonte de planeamento a procura do componente  $p$  ( $D_{pi}$ ) é conhecida,
- (v) o armazenamento de cada componente  $p$ , produzido em excesso no período  $i$ , incorre num custo de armazenamento  $cw_{pi}$ ,
- (vi) pode existir 'stock' inicial do componente  $p$ , sendo o seu valor  $A_p$ .

Considere-se a seguinte notação adicional

$T_{si}$  : tempo total de mão-de-obra disponível no turno  $s$  durante o período  $i$ ,

$T_{hei}$  : limite ao número de horas extraordinárias que um trabalhador da classe  $h$  pode realizar durante o período extraordinário  $e$  ao longo do período  $i$  do horizonte de planeamento,

e definam-se as novas variáveis controláveis como

$z_{prosi}$  : número de lotes do tipo de componente  $p$  a serem produzidos segundo a rota  $r$ , para o qual a operação  $o$  tem lugar no turno  $s$  durante o período  $i$ ,

$w_{proei}$  : número de lotes do tipo de componente  $p$  a serem produzidos segundo a rota  $r$ , para o qual a operação  $o$  é realizada no período extraordinário  $e$  durante o período  $i$  do horizonte de planeamento,

$t''_{hei}$  : número de horas extraordinárias realizadas pelos trabalhadores da classe  $h$  no período extraordinário  $e$  durante o período  $i$  do horizonte de planeamento,

$s_{pi}$  : número de unidades do componente  $p$  a subcontratar durante o período  $i$ ,

- $s'_{proi}$  : número de lotes do componente  $p$  cuja operação  $o$  na rota  $r$  será subcontratada durante o período  $i$ ,
- $a_{pi}$  : número de unidades do componente  $p$  em armazém no final do período  $i$ .

O problema de minimização do custo global ao longo do horizonte de planeamento pode ser modelizado pelo programa inteiro misto apresentado na Figura 4.18.

Na função objectivo, (4a), o custo total é a soma de sete componentes: custos fixos das máquinas, custos variáveis de processamento, custos fixos de mão-de-obra, custos de trabalho extraordinário, custos de subcontratação de componentes, custos de subcontratação de operações e custos de armazenamento.

As restrições podem ser interpretadas como se segue:

- (4b e 4c) : restrições que garantem que a procura de cada máquina não excede a capacidade correspondente,
- (4d e 4e) : restrições que garantem que a procura de cada classe de mão-de-obra não excede a capacidade correspondente,
- (4f) : restrições impondo que, para cada par (componente, rota), o número de lotes é o mesmo para as operações executadas ou subcontratadas,
- (4g e 4h) : restrições que garantem que a procura de cada componente é satisfeita,
- (4i) : restrições que garantem que o 'stock' no final do horizonte de planeamento iguala o 'stock' inicial,
- (4j) : restrição que limita superiormente o volume de investimento em novas máquinas,
- (4k) : idem para o custo total de mão-de-obra,
- (4l) : limites superior e inferior impostos ao número de máquinas de cada tipo a serem adquiridas,
- (4m) : idem para o número de trabalhadores de cada classe de mão-de-obra a serem contratados,
- (4n) : restrições de integralidade do número de máquinas de cada tipo e do número de trabalhadores em cada classe de mão-de-obra,

(4o) : restrições de não negatividade para todas as variáveis de decisão.

$$\begin{aligned}
 \min Z = & \sum_m c f_m x_m + \sum_h \sum_s c h_{hs} y_{hs} + \sum_p c s_p \sum_i s_{pi} \\
 & + \sum_p \sum_r \sum_o c v_{pro} \left( \sum_s \sum_i z_{prosi} + \sum_e \sum_i w_{proei} \right) \\
 & + \sum_h \sum_e c e_{he} \sum_i t''_{hei} + \sum_p \sum_r \sum_o c o_{pro} \sum_i s'_{proi} \\
 & + \sum_p \sum_i c w_{pi} a_{pi} \tag{4a}
 \end{aligned}$$

sujeito a

$$\sum_p \sum_r \sum_o t_{pmro} (z_{prosi} + s'_{proi}) \leq x_m T_{si} \tag{4b}$$

$$\sum_p \sum_r \sum_o t_{pmro} (z_{prosi} + w_{proei} + s'_{proi}) \leq x_m T_{si} \tag{4c}$$

$$\sum_p \sum_r \sum_o t_{phro} (z_{prosi} + s'_{proi}) \leq y_{hs} T_{si} \tag{4d}$$

$$t''_{hei} = \sum_p \sum_r \sum_o t_{phro} (w_{proei}) \leq T_{hei} \tag{4e}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_s z_{prlsi} + \sum_e w_{prlei} + s'_{prli-...} = \\
 = \sum_s z_{prO_{r}si} + \sum_e w_{prO_{r}ei} + s'_{prO_{r}i} \tag{4f}
 \end{aligned}$$

$$N_{pi} = \sum_r L_{pr} \left( \sum_s z_{prosi} + \sum_e w_{proei} + s'_{proi} \right) + s_{pi} \tag{4g}$$

$$a_{p0} = a_{pi} = A_p \tag{4h}$$

$$a_{pi} = N_{pi} + a_{p(i-1)} - D_{pi} \tag{4i}$$

$$\sum_m c a_m x'_m \leq I \tag{4j}$$

$$\sum_h \sum_s c_{hs} y_{hs} + \sum_h \sum_e c e_{he} \sum_i t''_{hei} \leq CMO \tag{4k}$$

$$(E_m)_{\min} \leq x_m \leq (E_m)_{\max} \tag{4l}$$

$$(L_h)_{\min} \leq y_{hs} \leq (L_h)_{\max} \tag{4m}$$

$$x_m, y_{hs} \text{ inteiros} \tag{4n}$$

$$x_m \geq 0, y_{hs} \geq 0, z_{prosi} \geq 0, w_{proei} \geq 0, \\
 t''_{hei} \geq 0, s_{pi} \geq 0, s'_{proi} \geq 0, a_{pi} \geq 0 \tag{4o}$$

Figura 4.18 - Modelo para o problema do planeamento das necessidades de equipamento e de mão-de-obra incluindo diferentes períodos de planeamento

O modelo tem

- $M + H.S$  variáveis inteiras,
- $I.(S + E + 1) \cdot \sum_p \sum_r O_{pr} + I.P$  variáveis contínuas e
- $M.I.(S + 2) + H.S.(I + 2) + H.E.I + P.(2.I + 1) + I \cdot \sum_p \sum_r O_{pr}$  restrições (incluindo  $2.M + 2.H$  limites).

# 5

---

## **Afectação das operações de fabrico a máquinas**

### **Conteúdo:**

- **Introdução**
- **Procedimento para a afectação de operações de fabrico a máquinas**
- **Algoritmo de recristalização simulada para o problema da afectação residual de operações de fabrico a máquinas**
- **Ilustração do procedimento para um exemplo concreto**
- **Interação com o utilizador**
- **Perspectivas de desenvolvimento do módulo**

## 5.1 Introdução

No capítulo anterior abordou-se o problema do planeamento das necessidades de equipamento e de mão-de-obra. Da resolução desse problema deriva, por um lado, a definição do tipo de máquina em que cada operação é realizada e, por outro, a especificação do número necessário de máquinas de cada tipo para, no seu conjunto, permitirem a realização de todas as operações.

Agora o objectivo é o de definir em detalhe em que máquina específica é efectuada cada operação de fabrico.

Este problema, que é crucial para a resolução dos problemas de especificação de células de produção e de definição das implantações fabris, é normalmente associado ao planeamento operacional da produção, no contexto do qual, esta decisão se prende com a calendarização das ordens de fabrico e com a capacidade disponível nas máquinas (Dilworth (1992)).

Ainda enquadrado no planeamento operacional da produção o problema foi recentemente abordado no contexto dos sistemas de produção flexíveis (Stecke (1983), Bretthauer e Venkataramanan (1990), Liang e Dutta (1993) e Liang (1994)).

Menos frequente é a abordagem do problema da afectação de operações de fabrico a máquinas no contexto do projecto de implantações fabris. No entanto, este problema é de grande importância neste contexto por duas razões.

Em primeiro lugar, os fluxos entre máquinas são determinantes para a definição de implantações fabris e só são passíveis de serem calculados se se conhecerem as operações efectuadas nas diferentes máquinas.

A segunda razão prende-se com a especificação de células de fabrico. O processo convencional de resolução deste problema parte de uma afectação, feita a priori, de componentes a máquinas, para encontrar uma partição das máquinas em células e dos componentes em famílias (Cheng (1992)). Contudo, são as operações realizadas sobre os componentes que os ligam às máquinas correspondentes. Assim, a possibilidade de uma operação poder ser realizada em diferentes máquinas justifica a necessidade de



incluir a afectação de operações a máquinas como parte integrante do procedimento de formação de células de fabrico.

Na grande maioria dos trabalhos publicados na bibliografia relevante esta afectação é assumida como um dado inicial. Seguidamente apresentar-se-ão algumas referências que constituem excepções, por incluírem a afectação de operações a máquinas como parte integrante do problema mais geral de configuração de sistemas de produção celulares.

Co e Araar (1988) descrevem um procedimento em três fases para a resolução do problema. Na primeira procede-se à afectação de operações a máquinas, por forma a regularizar a taxa de ocupação das máquinas. Na segunda as máquinas são agrupadas de acordo com a semelhança das operações nelas efectuadas. Finalmente, determina-se o tamanho e a composição das células.

Askin e Chiu (1990) propõem um modelo que determina simultaneamente o número de máquinas de cada tipo necessárias e a afectação de operações a essas máquinas, por forma a minimizar conjuntamente, para um dado período de planeamento, o custo fixo total do equipamento e o custo associado ao fluxo inter-celular.

Ribeiro e Pradin (1993) apresentam uma metodologia conducente à obtenção de sistemas de produção celulares, na qual incluem uma fase de afectação de operações a máquinas, por forma a satisfazer restrições de capacidade e a incorporar uma medida de desejabilidade (definida pelo decisor) da realização de certas operações em certas máquinas. A esta fase segue-se uma outra na qual se determinam as famílias de componentes e a composição das células.

Um modelo de programação binária que permite resolver conjuntamente os problemas de especificação das células e de afectação de operações, por forma a minimizar a soma dos custos de operação, de preparação das máquinas e de transporte, foi proposto por Atmani, Lashkari e Caron (1995). A exclusão dos custos de transporte intra-celulares e a pré-especificação dos custos de transporte inter-celulares (numa fase em que não se conhecem as distâncias entre células) são duas limitações importantes deste modelo.

No procedimento que se descreve na secção seguinte a afectação de operações de fabrico às máquinas é definida por forma que para cada máquina sejam tanto quanto possível idênticos entre si, por um lado, os destinos dos fluxos nela gerados e, por

outro, as origens dos fluxos nela recebidos. Assim, pretende-se facilitar o agrupamento das máquinas em função das necessidades de circulação de materiais, o que é desejável tanto do ponto de vista da obtenção de configurações celulares como do projecto de implantações fabris. O objectivo assim estabelecido pode resultar numa fragmentação exagerada da operação de cada máquina, nela se incluindo um número exagerado de operações e, conseqüentemente, de 'set-ups'. O reconhecimento deste facto conduziu à introdução de uma correcção na função objectivo que permite penalizar e, portanto, refrear a fragmentação da operação de cada máquina.

## **5.2 Procedimento para afectação de operações a máquinas**

### **5.2.1 Agrupamento das operações por tipo de máquina**

No sistema global que se descreve ao longo desta tese conhece-se, em cada momento, o componente e a rota a que cada operação de fabrico diz respeito. No entanto, no caso particular deste capítulo, por razões de simplicidade de exposição, as operações serão agrupadas por tipo de máquina em que são efectuadas.

Assim, para cada tipo de máquina  $m$  ( $m=1, \dots, M$ ), as operações de fabrico que, independentemente do componente e da rota, são efectuadas numa máquina do tipo  $m$  serão denotadas por  $o_{im}$  ( $i=1, \dots, I_m$ ).

Esta simplificação é possível uma vez que, como adiante se verá, a afectação de operações de fabrico a máquinas é efectuada sequencialmente, considerando um tipo de máquina de cada vez.

## 5.2.2 Descrição do procedimento

O procedimento adoptado na afectação de operações a máquinas baseia-se no seguinte conjunto de pressupostos:

- (1) o volume de produção é estável ao longo do tempo,
- (2) o número de máquinas do tipo  $m$  é  $N_m$ ,
- (3) todas as máquinas do tipo  $m$  têm, ao longo do horizonte de planeamento, valores idênticos da disponibilidade de tempo nominal ( $D_m$ ), da taxa máxima de utilização efectiva ( $\rho_m$ ) e do tempo efectivo máximo disponível ( $T_m = \rho_m \cdot D_m$ ).

De acordo com o procedimento proposto (que se apresenta na Figura 5.1) começa-se por afectar as operações que só podem ser executadas numa determinada máquina (por não existir nenhuma outra do mesmo tipo).

Para introduzir o passo seguinte denote-se por  $t(o_{im})$  o tempo necessário para efectuar a  $i$ -ésima operação em máquinas do tipo  $m$ , por forma a produzir as quantidades requeridas dos componentes, ao longo do horizonte de planeamento,

O número de máquinas do tipo  $m$  requeridas para processar a operação  $o_{im}$  é representado pela razão

$$u(o_{im}) = \frac{t(o_{im})}{T_m}. \quad (1)$$

Se esta razão, que toma necessariamente um valor real positivo, for maior ou igual à unidade, então  $\lfloor u(o_{im}) \rfloor$  (a parte inteira de  $u(o_{im})$ ) representa o número de máquinas do tipo  $m$  que necessitam de ficar exclusivamente dedicadas ao processamento da operação  $o_{im}$  e  $u(o_{im}) - \lfloor u(o_{im}) \rfloor$  (a parte fraccionária de  $u(o_{im})$ ) representa a parte da capacidade de uma unidade adicional, do mesmo tipo, que é necessária para processar a operação  $o_{im}$  não executada nas máquinas anteriores.

No segundo passo, carregam-se as  $\lfloor u(o_{im}) \rfloor$  máquinas do tipo  $m$  que ficam exclusivamente dedicadas ao processamento de uma única operação.

**Procedimento Afectação**

Parâmetros de entrada:

$N_m$  - número de máquinas do tipo  $M$  por carregar (inicialmente  $N_m$  corresponde ao número de máquinas do tipo  $m$  disponíveis)

$I_m$  - número das operações executadas no tipo de máquina  $m$

$u_m[1...I_m]$  - vector do número de máquinas do tipo  $m$  necessárias para efectuar cada uma das operações

Parâmetro de saída:

$S_m[1...I_m][1...N_m]$  - matriz contendo a taxa de utilização de cada máquina do tipo  $m$  por cada operação

para ( $m=1$  até  $M$ )

se ( $N_m=1$ )

para ( $i=1$  até  $I_m$ )

$S_m[i][1] \leftarrow u_m[i];$

$N_m=0;$

fimpara

senão

para ( $i=1$  até  $I_m$ )

se ( $u_m[i] \geq 1$ )

para ( $j=1$  até  $\lfloor u_m[i] \rfloor$ )

$S_m[i][j] \leftarrow 1;$

$u_m[i] \leftarrow u_m[i] - 1;$

$N_m = N_m - 1;$

fimpara

fimse

fimpara

fimse

se ( $N_m=1$ )

para ( $i=1$  até  $I_m$ )

$S_m[i][1] \leftarrow u_m[i];$

$N_m=0;$

fimpara

fimse

fimpara

Ordena os tipos de máquinas por ordem crescente da folga de utilização e, em caso de empate, do número de unidades por carregar;

Afecta as operações utilizando o modelo de programação binária;

**fim.**

Figura 5.1 - Procedimento para afectação de operações de fabrico a máquinas

Se, no final desta fase, somente ficar por carregar uma máquina do tipo  $m$ , então afectam-se todas as operações (ou parte de operações) ainda não afectadas a essa única máquina desse tipo.

Nas fases seguintes do procedimento proposto somente são considerados os tipos de máquinas que ainda têm unidades por carregar e as operações (ou partes de operações) que não esgotam completamente a capacidade individual de máquinas e que, por isso, necessitam de ser agrupadas.

Para se proceder à afectação das operações às máquinas começa-se por ordenar os tipos de máquinas. Estes são ordenados por ordem crescente da folga de utilização e, em caso de empate, do número de unidades por carregar.

Com base nesta ordenação afectam-se então as operações às máquinas, utilizando sequencialmente o modelo de programação binária que se descreve na secção seguinte.

### **5.2.3 Modelo para a afectação residual de operações de fabrico a máquinas**

Como resultado do segundo passo do procedimento anterior ficaram por afectar operações (ou partes de operações) que têm de partilhar as unidades disponíveis do tipo de máquina em que são realizadas, dado que nenhuma dessas operações ocupa integralmente uma máquina do tipo em causa.

Com o modelo que seguidamente se analisará procura-se distribuir as operações (ou partes dessas operações) ainda não afectadas a máquinas pelas unidades disponíveis do tipo de máquina em que são processadas. Este modelo é aplicado consecutivamente aos diferentes tipos de máquina (sendo estes seleccionados por ordem crescente da folga de utilização e, em caso de empate, do número de unidades por carregar).

Um dos objectivos presentes, tanto na definição de implantações fabris como na constituição de células de produção, é o de criar zonas de concentração de circulação de materiais, por forma a evitar percursos de transporte desnecessários. Assim, o critério utilizado no modelo proposto para agrupar duas ou mais operações numa

mesma máquina prende-se com a semelhança entre os recursos<sup>1</sup> utilizados na execução das operações que lhes são adjacentes (antecessoras ou sucessoras). Deste modo, procura-se que, para cada máquina, sejam tanto quanto possível idênticos entre si, por um lado, os destinos dos fluxos nela gerados e, por outro, as origens dos fluxos nela recebidos.

Assim, a função objectivo é construída comparando, para cada par de operações efectuadas no mesmo tipo de máquina, o conjunto de recursos envolvidos nas operações que antecedem cada uma dessas operações e o conjunto de recursos envolvidos nas operações que lhes sucedem.

Denote-se por:

- $o'_{jm}$  - as operações de fabrico que, independentemente do componente e da rota, são efectuadas numa máquina do tipo  $m$  e que ainda não foram afectadas ( $J=1, \dots, J_m$ ),
- $\{R_{o'_{jm}}^-\}$  - o conjunto de recursos envolvidos nas operações que antecedem a operação  $o'_{jm}$ ,
- $\{R_{o'_{jm}}^+\}$  - o conjunto de recursos envolvidos nas operações que sucedem à operação  $o'_{jm}$ .

Por forma a definir a função objectivo incorporada no modelo analisaram-se alguns aspectos relativos às penalidades incorridas por se afectar as operações  $o'_{im}$  e  $o'_{jm}$  à mesma máquina, tendo em conta o critério da semelhança máxima entre os recursos utilizados na execução das operações que lhes são adjacentes.

O caso mais desfavorável (correspondente à maior penalidade) ocorre quando os recursos em que são efectuadas as operações adjacentes a  $o'_{im}$  e  $o'_{jm}$  são todos diferentes, ou seja,

- $\#\{(\{R_{o'_{im}}^-\} \cap \{R_{o'_{jm}}^-\})\} = 0,$
- $\#\{(\{R_{o'_{im}}^+\} \cap \{R_{o'_{jm}}^+\})\} = 0,$
- $\#\{(\{R_{o'_{im}}^+\} \cap \{R_{o'_{jm}}^-\})\} = 0$  e
- $\#\{(\{R_{o'_{im}}^-\} \cap \{R_{o'_{jm}}^+\})\} = 0.$

---

<sup>1</sup> Neste contexto recursos refere-se a tipos de máquinas, armazéns ou equipamentos individuais.

Neste caso existirá fluxo entre cada recurso em que é efectuada uma operação adjacente a  $o'_{im}$  e  $o'_{jm}$  e a máquina na qual estas operações são processadas.

A situação mais favorável (correspondente à menor penalidade) ocorre quando os conjuntos de recursos em que são efectuados as operações adjacentes a  $o'_{im}$  e  $o'_{jm}$  são todos idênticos, ou seja,

$$\bullet \{R_{o'_{im}}^-\} = \{R_{o'_{jm}}^-\} = \{R_{o'_{im}}^+\} = \{R_{o'_{jm}}^+\}.$$

Dois exemplos desta situação são exibidos nas Figuras 5.2 a) e b) para

- $\{R_{o'_{im}}^-\} = \{A\}$  ( $\#(\{R_{o'_{im}}^-\}) = 1$ ) e
- $\{R_{o'_{im}}^-\} = \{A, B\}$  ( $\#(\{R_{o'_{im}}^-\}) = 2$ ),

respectivamente. Nestas figuras, a máquina na qual as operações  $o'_{im}$  e  $o'_{jm}$  serão executadas é representada por C. Note-se que, para cada par de máquinas, o fluxo é representado nos dois sentidos, uma vez que se admite que os conjuntos de recursos em que são executadas tanto as operações que antecedem  $o'_{im}$  e  $o'_{jm}$  como as que lhes sucedem são idênticos.

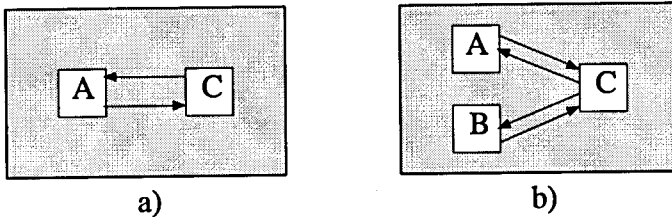


Figura 5.2 - Exemplo do cálculo da penalidade a introduzir na função objectivo

Se bem que, do ponto de vista do critério anteriormente enunciado, estas duas situações correspondam ao caso mais favorável, o exemplo da Figura 5.2 a) envolve somente a implantação de dois recursos, ao passo que o exemplo da Figura 5.2 b) envolve a implantação de três recursos, pelo que, do ponto de vista da implantação de recursos, o primeiro caso deve ser privilegiado. Assim, tendo em atenção este facto, a função objectivo foi estabelecida por forma a considerar, adicionalmente ao critério enunciado anteriormente, a dimensão dos conjuntos de recursos envolvidos nas operações adjacentes ao par de operações a afectar a uma determinada máquina.

Deste modo, a penalidade (denotada por  $c_{ij}$ ) em que se incorre por afectar as operações  $o'_{im}$  e  $o'_{jm}$  à mesma máquina é calculada iterativamente do seguinte modo:

- $c_{ij}^{(0)} = 4$
- $c_{ij}^{(1)} = c_{ij}^{(0)} - \frac{\#\{R_{o'_{im}}^-\} \cap \{R_{o'_{jm}}^-\}}{\#\{R_{o'_{im}}^-\} \cdot \#\{R_{o'_{jm}}^-\}}$
- $c_{ij}^{(2)} = c_{ij}^{(1)} - \frac{\#\{R_{o'_{im}}^+\} \cap \{R_{o'_{jm}}^+\}}{\#\{R_{o'_{im}}^+\} \cdot \#\{R_{o'_{jm}}^+\}}$
- $c_{ij}^{(3)} = c_{ij}^{(2)} - \frac{\#\{R_{o'_{im}}^-\} \cap \{R_{o'_{jm}}^+\}}{\#\{R_{o'_{im}}^-\} \cdot \#\{R_{o'_{jm}}^+\}}$
- $c_{ij} = c_{ij}^{(3)} - \frac{\#\{R_{o'_{im}}^+\} \cap \{R_{o'_{jm}}^-\}}{\#\{R_{o'_{im}}^+\} \cdot \#\{R_{o'_{jm}}^-\}}$

Esta medida para a penalidade varia entre um valor máximo de 4 para o caso mais desfavorável (quando os recursos em que são efectuadas as operações adjacentes a  $o'_{im}$  e  $o'_{jm}$  são todos diferentes) e um valor mínimo de 0 para o caso mais favorável (como o apresentado na Figura 5.2 a)). Para o exemplo da Figura 5.2 b) obtém-se um valor de  $c_{ij}=2$ .

Para uma gama relativamente extensa de casos analisados, esta medida revelou-se mais consistente do que uma outra que se estudou e que deriva desta pela substituição do produto dos termos que aparecem no divisor de cada uma das igualdades pela soma dos mesmos termos. Esta última medida não permite, por exemplo, distinguir os casos apresentados nas Figuras 5.2 a) e b).

A medida global de qualidade de uma solução é obtida adicionando para cada par de operações ( $o'_{im}, o'_{jm}$ ) afectadas a uma dada máquina a penalidade correspondente, ou seja:

$$Z = \sum_i \sum_{j>i} c_{ij} y_{ij},$$

$$\text{onde } y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se as operações } o'_{im} \text{ e } o'_{jm} \text{ se efectuarem na mesma máquina} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Para definir as restrições do modelo, considere-se a seguinte notação adicional:

- $u(o'_{im}) = \frac{t(o'_{im})}{T_m}$  - proporção de  $T_m$  (tempo efectivo máximo disponível para cada uma das máquinas do tipo  $m$ ) necessária



para efectuar a operação  $o'_{im}$  (note-se que nesta fase do procedimento  $u(o'_{im}) < 1$ ),

- $N'_m$  - número de máquinas do tipo  $m$  ainda disponíveis nesta fase do procedimento,
- $x_{ik}$  - proporção de  $T_m$  em que a máquina  $k$  ( $k=1, \dots, N'_m$ ), do tipo  $m$ , é utilizada para efectuar a operação  $o'_{im}$ ,
- $w_{ik}$  - igual a 1, se a operação  $o'_{im}$  for efectuada na máquina  $k$ .

O problema da afectação residual de operações de fabrico a máquinas pode então ser modelizado como um problema de programação binária, conforme se apresenta na Figura 5.3.

$\min \sum_i \sum_{j>i} c_{ij} \cdot y_{ij}$	(2a)
s.a. $\sum x_{ik} \leq 1$	, ( $k = 1, \dots, N'_m$ ) (2b)
$\sum_k^i x_{ik} = u_{im}$	, ( $i = 1, \dots, J_m$ ) (2c)
$x_{ik} \leq w_{ik}$	, ( $i = 1, \dots, J_m; k = 1, \dots, N'_m$ ) (2d)
$w_{ik} + w_{jk} - 1 \leq y_{ij}$	, ( $i, j = 1, \dots, J_m; j > i; k = 1, \dots, N'_m$ ) (2e)
$x_{ik}, y_{ij} \geq 0$	, ( $i, j = 1, \dots, J_m; j > i; k = 1, \dots, N'_m$ ) (2f)
$w_{ik}$ binária	, ( $i = 1, \dots, J_m, k = 1, \dots, N'_m$ ) (2g)

Figura 5.3 - Modelo para o problema da afectação residual de operações de fabrico a máquinas

A restrição (2b) garante que o tempo efectivo máximo disponível em cada máquina não é excedido. A restrição (2c) garante que todas as operações são integralmente realizadas. As restrições (2d) e (2e), conjuntamente com a função objectivo, permitem verificar quais os pares de operações processadas na mesma máquina. Note-se que a restrição (2d) garante somente que  $w_{ik}=1$  se  $x_{ik}>0$ . Se  $x_{ik}=0$  (ou seja, a operação  $i$  não é efectuada na máquina  $k$ )  $w_{ik}$  pode assumir os valores 0 ou 1. No entanto, o valor de  $y_{ij}$  na restrição (2e) só será igual a 1 se  $w_{ik}$  e  $w_{jk}$  forem simultaneamente iguais a 1. Tendo em atenção a função objectivo (2a), fica assim garantido que se  $x_{ik}>0$  (ou seja,  $w_{ik}=1$ ),  $w_{jk}$  só será igual a 1 se  $x_{jk}>0$ .

Note-se que não há necessidade de considerar as variáveis  $y_{ij}$  binárias, uma vez que, como consequência da conjugação da função objectivo (2a) e da restrição (2e), se  $w_{ik} \in \{0,1\}$  então  $y_{ij} \in \{0,1\}$ .

O modelo tem

- $N'_m + J_m + N'_m \cdot J_m + J_m \cdot (J_m - 1)$  restrições,
- $N'_m \cdot J_m + J_m \cdot (J_m - 1)$  variáveis contínuas e
- $N'_m \cdot J_m$  variáveis binárias.

A função objectivo utilizada pode conduzir a uma fragmentação exagerada da operação de cada máquina, nela se incluindo um número exagerado de operações e, consequentemente, de 'set-ups'. O reconhecimento deste facto conduziu à introdução de uma correcção na função objectivo que permite penalizar e, portanto, refrear a fragmentação da operação de cada máquina. A função objectivo incorporada no sistema é então dada por

$$\min \sum_i \sum_{j>i} (K + c_{ij}) y_{ij} \quad (2h)$$

em que  $K$  é definido pelo utilizador ( $0 \leq K \leq 100$ ).

Note-se que um valor de  $K$  muito maior do que o de  $c_{ij}$  conduz a que a influência na função objectivo (2h) do termo  $K \cdot y_{ij}$  se sobreponha à do termo  $c_{ij} \cdot y_{ij}$ . Nestas condições a função objectivo minimiza prioritariamente o número de pares de operações efectuadas no conjunto de máquinas do tipo em causa, penalizando, consequentemente, a fragmentação das operações.

#### 5.2.4 Método de obtenção da solução. Experiência computacional

O modelo para a afectação residual de operações de fabrico a máquinas foi resolvido recorrendo ao algoritmo 'branch-and-bound' do programa CPLEX (CPLEX (1991 a) e CPLEX (1991 b)) numa estação gráfica DG Aviiion 300.

A experiência computacional, obtida na base de várias dezenas de exemplos testados, permitiu concluir que somente para valores de  $N'_m$  (número de máquinas do tipo  $m$  ainda disponíveis nesta fase do procedimento) inferiores a 3 é possível obter

soluções óptimas em tempo útil (da ordem das centenas de segundos). No entanto, verificou-se que, em grande parte dos casos, as soluções geradas ao fim de um elevado tempo de execução não são muito melhores do que as que se obtêm inicialmente.

A aplicação do procedimento ao exemplo incluído no Apêndice D implica a resolução do problema da afectação residual de operações para 2 máquinas do tipo M3, 2 máquinas do tipo M1, 3 máquinas do tipo M0 e 4 máquinas do tipo M4, conforme se poderá verificar na secção 5.4.

Para as máquinas dos tipos M3 e M1 o algoritmo 'branch-and-bound' terminou ao fim de 809 e 143 segundos, respectivamente. Para as máquinas do tipo M0 o algoritmo terminou ao fim de 16770 segundos e depois de pesquisados 134700 nós. No entanto, a solução óptima foi encontrada depois de pesquisados somente 4922 nós. Para as máquinas do tipo M4 o algoritmo terminou ao fim de 93831 segundos e depois de pesquisados 595000 nós. No entanto, a solução óptima foi encontrada depois de pesquisados somente 3700 nós.

O reconhecimento das limitações associadas à obtenção de soluções para o problema da afectação residual de operações a máquinas recorrendo a este método conduziu ao desenvolvimento de um algoritmo, baseado no método da recristalização simulada ('simulated annealing'), que é apresentado na secção seguinte.

## **5.3 Algoritmo de recristalização simulada para o problema da afectação residual de operações de fabrico a máquinas**

### **5.3.1 Algoritmo geral de recristalização simulada**

O algoritmo de recristalização simulada ('simulated annealing') foi proposto por Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi (1983) para a solução aproximada de problemas de optimização combinatoria. A sua designação advém da analogia com um processo da

mecânica estatística em que se procura colocar um sistema físico no seu estado de energia mais baixo através de um arrefecimento controlado.

De uma forma sintetizada o processo de recristalização compreende os seguintes passos:

- (i) o sistema é colocado inicialmente a um nível de temperatura adequado ( $T_0$ ),
- (ii) o sistema é arrefecido de uma forma controlada, seguindo uma curva de temperatura do tipo da apresentada na Figura 5.4, a qual é escolhida por forma a evitar que o sistema cristalize num nível de energia indesejado,
- (iii) o sistema permanece um tempo pré-determinado ( $L=t_{i+1}-t_i$ ) em cada patamar de temperatura ( $T_i$ ),
- (iv) o arrefecimento do sistema termina ( $T_f$ ) quando se atinge o estado de energia pretendido (sistema 'cristalizado').

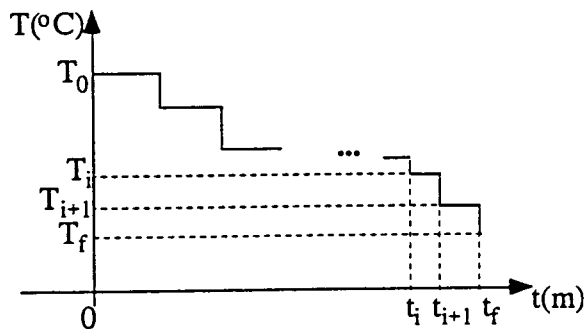


Figura 5.4 - Curva de temperatura de um processo de recristalização

O algoritmo geral de recristalização simulada é apresentado na Figura 5.5.

Esta técnica tem sido aplicada a inúmeros problemas nas áreas da gestão e organização da produção como, por exemplo, o projecto de implantações fabris (Heragu e Alfa (1992), Jajodia et al (1992) e Souilah (1995)), o planeamento da produção (Sridhar e Rajendran (1993)) e a formação de células de produção (Chen et al (1995))

**Procedimento Recristalização - Minimização**Parâmetros de entrada:  $S_0$  - solução inicial $T_0$  - temperatura inicial $L$  - duração do patamarParâmetro de saída:  $S^*$  - melhor solução encontrada/\*  $S$  representa a solução corrente \*//\*  $S_n$  representa a solução candidata a substituir a solução corrente \*//\*  $C(S)$  representa o valor da função objectivo para a solução  $S$  \*/ $T \leftarrow T_0$ ; $S \leftarrow S_0$ ; $S^* \leftarrow S_0$ ;

enquanto (não cristaliza) faz

 $n \leftarrow 1$ ;

repete

gera uma solução  $S_n \neq S_{n-1}$  na vizinhança de  $S$ ; $\Delta \leftarrow C(S_n) - C(S)$ ;se ( $\Delta \leq 0$ ) então  $S \leftarrow S_n$ ;senão  $S \leftarrow S_n$  com probabilidade  $p = e^{-\Delta/T}$ ;

fimse

se ( $C(S_n) \leq C(S^*)$ ) então  $S^* \leftarrow S_n$  fimse; $n \leftarrow n + 1$ ;até ( $n > L$ );reduz a temperatura  $T$ ;

fimfaz;

fim.

Figura 5.5 - Algoritmo geral de recristalização simulada

O algoritmo geral de recristalização simulada parte de uma solução admissível inicial,  $S_0$ , para o problema em causa e compreende um ciclo interior (controlado pelo parâmetro  $k$ ) e um ciclo exterior (controlado pelo parâmetro temperatura  $T \leq T_0$ ). Em cada iteração do ciclo interior,  $n \leq L$ , gera-se uma solução vizinha ( $S_n$ , solução candidata) da solução corrente ( $S$ ). Se a diferença entre os valores da função objectivo da solução candidata ( $C(S_n)$ ) e da solução corrente ( $C(S)$ ) é menor ou igual a zero ( $\Delta = C(S_n) - C(S) \leq 0$ ), a solução candidata é aceite e substitui a solução corrente ( $S \leftarrow S_n$ ). No caso contrário, a solução candidata pode ser aceite como solução corrente com uma probabilidade  $p = e^{-\Delta/T}$ . O valor do parâmetro  $T$  decresce em cada iteração do ciclo exterior, diminuindo assim a probabilidade de aceitação de soluções candidatas

inferiores à solução corrente entre cada iteração do ciclo exterior. Obviamente que, além da solução candidata e da solução corrente, a melhor solução encontrada é mantida ao longo da execução do algoritmo. Note-se ainda que em duas iterações consecutivas do ciclo interior as soluções candidatas têm que ser diferentes ( $S_n \neq S_{n-1}$ ), por forma a garantir a progressão do algoritmo.

O desempenho do algoritmo de recristalização simulada depende essencialmente da selecção dos seguintes parâmetros de controlo:

(i) Temperatura inicial ( $T_0$ )

A temperatura inicial,  $T_0$ , deve ser suficientemente elevada por forma a que, na primeira iteração do procedimento, a probabilidade de aceitação de soluções inferiores seja de, pelo menos, 80% (Kirkpatrick et al (1983)). A escolha de valores que conduzam a probabilidades de aceitação muito mais elevadas do que esta podem prejudicar os tempos de execução, sem que tal corresponda a melhorias substanciais no resultado.

(ii) Função de redução da temperatura

De entre as várias funções que têm sido propostas para controlar a taxa de redução da temperatura, aquela que tem sido mais utilizada é a função geométrica:  $T_i = a_i \cdot T_{i-1}$  ( $a_i < 1$  constante). Tipicamente,  $0.7 \leq a_i \leq 0.95$ . Uma vez que a probabilidade de aceitação de soluções é função da temperatura, a escolha de valores baixos de  $a_i$  pode conduzir a que o procedimento 'cristalize' em óptimos locais afastados do óptimo global. Por outro lado, a escolha de valores elevados de  $a_i$  prejudica os tempos de execução.

(iii) Comprimento do patamar ( $L$ )

O comprimento do patamar ( $L$ ) determina o número de soluções geradas para cada nível de temperatura ( $T$ ). Em grande parte das aplicações conhecidas desta técnica o comprimento do patamar é fixo; no entanto várias funções têm sido propostas na literatura (Souilah, A. (1995)).

(iv) Critério de paragem

O critério de paragem especifica o estado em que se considera o sistema 'cristalizado'. De entre os vários critérios de paragem,

podem ser destacados aqueles que se baseiam nas seguintes medidas:

- o número total de soluções candidatas geradas,
- a temperatura mínima que pode ser atingida,
- o valor mínimo da razão entre o número de soluções aceites e o número de soluções geradas.

### **5.3.2 Aplicação do algoritmo de recristalização simulada ao problema da afectação residual de operações de fabrico a máquinas**

Nesta secção definem-se os parâmetros de controle e os procedimentos para a obtenção da solução inicial e das soluções vizinhas, utilizados na versão do algoritmo de recristalização simulada para o problema da afectação residual de operações de fabrico a máquinas.

A versão detalhada do algoritmo de recristalização simulada apresenta-se no Apêndice E.

Chama-se a atenção para a forma como são geradas, a partir de cada solução corrente, as soluções vizinhas. O desenvolvimento deste procedimento, baseado no algoritmo para o problema de transportes, que à partida se imaginou ser trivial, revelou-se problemático devido à inexistência de referências relativas à implementação deste algoritmo.

#### **5.3.2.1 Parâmetros de controle**

Na implementação do algoritmo utilizaram-se os seguintes parâmetros de controle:

- Temperatura inicial ( $T_0$ )

As experiências computacionais efectuadas mostraram que a diferença dos valores da função objectivo de duas soluções vizinhas nunca excediam 10

unidades. Assim, para uma temperatura inicial de 50 garante-se que a probabilidade de aceitação de uma solução inferior é 80%.

- Função de redução da temperatura

Utilizou-se a função geométrica com um factor de redução de temperatura de 0.9 ( $T_i = 0.9T_{i-1}$ ). Como se pode verificar no gráfico da Figura 5.6, em que se representa a menor probabilidade de aceitação de soluções inferiores em função da temperatura, este factor provoca uma redução muito gradual desta probabilidade.

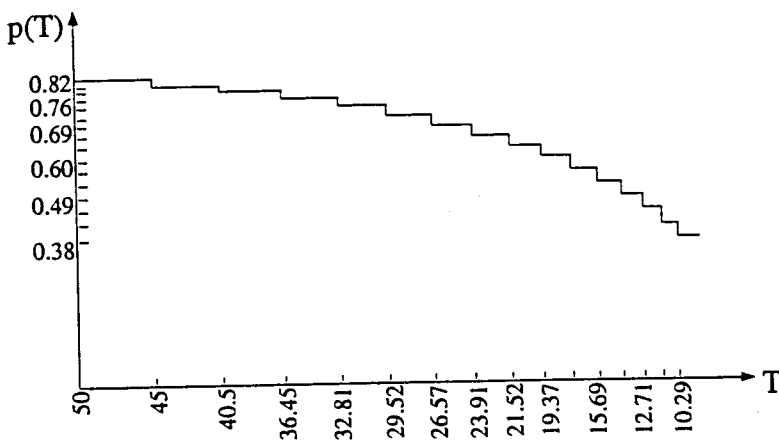


Figura 5.6 - Gráfico da menor probabilidade de aceitação de soluções inferiores em função da temperatura

- Comprimento do patamar (L)

Um factor dominante no esforço computacional associado à resolução do problema é o número de elementos da matriz dos coeficientes (número de operações x número de máquinas: O.M). Assim, por forma a restringir o esforço computacional à primeira ordem do factor dominante, limitou-se o número de soluções aceites a O.M.K, em que K é uma constante definida pelo utilizador (sendo K=1 o valor inicialmente sugerido ao utilizador).

- Critério de paragem

Utilizaram-se dois critérios de paragem. Em primeiro lugar, optou-se pela utilização de 16 patamares de temperatura (ver Figura 5.6), o que conduz a uma temperatura de cristalização superior a 10 ( $T_0 \cdot a_i^{15} = 50 \cdot (0.9^{15}) = 10.29$ ). Em



segundo lugar, admitiu-se que, se em cinco patamares de temperatura consecutivos se rejeitarem 85% das soluções geradas, então a probabilidade de substituição da melhor solução até aí encontrada é muito pequena e o algoritmo deve terminar.

### 5.3.2.2 Geração da solução inicial e das soluções vizinhas

No caso do modelo para o problema da afectação residual de operações de fabrico a máquinas introduzido na secção 5.2.3, qualquer solução básica admissível para o sistema de inequações

$$\begin{cases} \sum x_{ik} \leq 1 & , (k = 1, \dots, N'_m) & (3a) \\ \sum_k x_{ik} = u_{im} & , (i = 1, \dots, J_m) & (3b) \end{cases}$$

também é uma solução admissível para o problema original.

Note-se que este sistema é semelhante ao conjunto de restrições de um problema de transportes em que a procura excede a oferta. Tal como para o problema de transportes, é possível obter uma solução básica admissível recorrendo à regra do canto noroeste.

Uma solução vizinha obtém-se seleccionando aleatoriamente uma variável não básica, forçando-a a entrar na base. A identificação da variável que sai da base é efectuada de acordo com o procedimento habitual de resolução do problema dos transportes.

A cada par de operações processadas num mesmo equipamento está associada uma penalidade. Assim, a contribuição de cada máquina para a medida de qualidade global de uma solução corresponde à soma das penalidades associadas a cada par de operações nela efectuadas.

O exemplo seguinte ilustra numericamente a aplicação destes conceitos:

- Número de máquinas = 2,
- Número de operações = 6,

- Matriz de penalidades:

	1	2	3	4	5	6
1	-	0.07	3.90	1.96	1.01	0.27
2	-	-	2.60	1.58	1.66	0.49
3	-	-	-	0.31	3.70	1.74
4	-	-	-	-	1.84	2.32
5	-	-	-	-	-	3.77
6	-	-	-	-	-	-

- Proporção do tempo efectivo máximo disponível para cada uma das máquinas do tipo em causa necessária para efectuar a operação:

1	2	3	4	5	6
7.24	14.71	17.59	31.10	46.67	82.69

- Solução básica admissível inicial:

	1	2
1	7.24	
2	14.71	
3	17.59	
4	31.10	
5	29.36	17.31
6		82.69

- Custo da solução básica admissível inicial:

$$Z = c_{12} + c_{13} + c_{14} + c_{15} + c_{23} + c_{24} + c_{25} + c_{34} + c_{35} + c_{45} + c_{56} = 22.4,$$

- Variável a entrar na base (seleccionada aleatoriamente):  $x_{22}$ ,

- Solução básica admissível resultante:

	1	2
1	7.24	
2		14.71
3	17.59	
4	31.10	
5	44.07	2.60
6		82.69

- Custo da nova solução básica admissível:

$$Z = c_{13} + c_{14} + c_{15} + c_{34} + c_{35} + c_{45} + c_{25} + c_{26} + c_{56} = 18.64$$

### 5.3.3 Experiência computacional

O algoritmo foi implementado em linguagem C numa estação gráfica DG Aviiion 300, tendo sido testado com base em 4 conjuntos de 5 problemas teste gerados artificialmente.

Para cada conjunto de problemas, o número de máquinas que são objecto de afecção foi constante, tendo sido fixado em  $N'_m = 2, 3, 4$  e  $5$ .

O componente do vector de termos independentes correspondente a  $u_{im}$  (a proporção, expressa em percentagem, do tempo efectivo máximo disponível para cada uma das máquinas, do tipo em causa, necessária para processar a totalidade dos componentes ao longo do horizonte de planeamento) é obtido a partir de uma distribuição uniforme (1, 60).

O número de operações obteve-se adicionando os valores gerados para  $u_{im}$  ( $i=1, \dots, N'_m$ ) até que a capacidade disponível na totalidade das máquinas do tipo em causa fosse igualada ou ultrapassada. No segundo caso, o último valor gerado foi substituído por um outro que esgota a capacidade disponível nas máquinas.

Os elementos da matriz de custo foram obtidos com base numa distribuição uniforme (0, 4).

Para cada problema teste gerado, correu-se a heurística cinco vezes e, nos casos em que tal foi possível, calculou-se o valor óptimo utilizando a implementação do algoritmo 'branch and bound' da Cplex (Cplex(1991 a) e Cplex(1991 b)).

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.1, onde:

- $O_{\min}$  e  $O_{\max}$  representam, respectivamente, o número mínimo e máximo de operações geradas,
- $\Delta Z_{\min}$ ,  $\Delta Z_{\text{méd}}$  e  $\Delta Z_{\max}$  representam, respectivamente, os valores mínimo, médio e máximo da diferença percentual entre a solução encontrada e a solução óptima (nos problemas 1 e 2) e a melhor solução encontrada pela heurística (nos problemas 3 e 4),

- $T_{méd}$  e  $T^*_{méd}$  representam os tempos médios de execução do algoritmo e da implementação CPLEX (Cplex(1991 a) e Cplex(1991 b)) do algoritmo 'branch and bound', respectivamente.

Tabela 5.1 - Resultados globais

Problema	Num. de máquinas	$O_{min}$	$O_{máx}$	$\Delta Z_{min}$ (%)	$\Delta Z_{méd}$ (%)	$\Delta Z_{máx}$ (%)	$T_{méd}$ (s)	$T^*_{méd}$ (s)
1	2	6	8	0	0	0	6	11.3
2	3	9	12	0	2.2	4.1	21	8028
3	4	12	15	0	2.9	5.4	105	ND
4	5	12	19	0	4.8	9.6	282	ND

Nota: ND = não disponível

Os resultados apresentados sugerem que a qualidade das soluções obtidas pela heurística é aceitável e que os tempos de execução se mantêm dentro de limites razoáveis. Justificou-se assim a realização de um estudo aprofundado dos parâmetros do algoritmo. Tal estudo, em progresso, precederá a inclusão do algoritmo no sistema, contribuindo definitivamente para um melhoramento importante do SAD.

## 5.4 Ilustração do procedimento para um exemplo concreto

A solução obtida no capítulo anterior para o problema do planeamento das necessidades de equipamentos e de mão-de-obra do exemplo incluído no Apêndice D conduz aos valores de  $u_{im}$  (proporção do tempo efectivo máximo disponível para cada uma das máquinas do tipo  $m$  - M0, M1, M2, M3 e M4 - necessária para processar a totalidade do componentes ao longo do horizonte de planeamento, expressa em percentagem, que se apresentam nas Tabelas 5.2 a 5.6.

Tabela 5.2 - Valores de  $u_{iM0}$

Componente	A0	A2	A2	A4	A8	A9	A9	A10	A12	A15	A16	A17	A18	A19	A20
Rota	2	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2
Operação	2	1	3	1	1	1	3	2	2	3	1	1	2	4	1
$u_{iM0}$ (%)	4.70	13.38	10.47	89.51	42.92	8.92	17.85	34.87	0.38	39.59	10.44	2.87	3.09	3.40	17.60

Tabela 5.3 - Valores de  $u_{iM1}$

Componente	A1	A2	A7	A9	A10	A11	A12	A18	A19	P1
Rota	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Operação	2	2	3	4	3	1	2	1	1	1
$u_{iM1}$ (%)	8.81	10.17	16.2	76.33	5.1	6.38	3.92	61.8	10.5	0.85

Tabela 5.4 - Valores de  $u_{iM2}$

Componente	A0	A2	A3	A5	A7	A10	A12	A13	A16	A19	A20	A21	P1
Rota	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Operação	1	4	1	2	1	4	1	1	2	3	1	1	2
$u_{iM2}$ (%)	0.35	22.22	6.82	1.17	6.78	2.55	2.39	0.48	22.4	21.5	4.37	7.3	1.61

Tabela 5.5 - Valores de  $u_{iM3}$

Componente	A0	A6	A7	A9	A10	A11	A12	A12	A14	A15	A18	P2
Rota	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1
Operação	2	1	2	2	1	3	1	3	1	2	3	1
$u_{iM3}$ (%)	0.02	26.46	12.45	24.54	45.68	35.71	3.61	5.55	23.79	16.05	5.87	0.28

Tabela 5.6 - Valores de  $u_{iM4}$

Componente	A0	A1	A1	A5	A6	A8	A11	A11	A12	A13	A15	A16	A19	P0
Rota	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
Operação	1	1	3	1	2	2	2	4	3	2	1	3	2	1
$u_{iM4}$ (%)	12.16	25.75	6.74	0.23	18.52	99.56	166.6	19.33	3.96	2.81	98.22	22.70	15.02	8.41

Na Figura 5.7 apresentam-se as sequências de operações para os componentes a que se refere este exemplo. Cada operação é representada por um quadrado cuja cor indica o tipo de máquina utilizado. Na parte superior de cada quadrado indica-se o valor de  $u_{im}$  para a operação correspondente. Note-se que se o valor indicado for superior a 100% tal significa que são necessárias mais do que uma máquina para realizar a operação. Na parte inferior do quadrado indica-se o componente (através do seu código), a rota e o número da operação (a notação utilizada é  $\text{Componente}_{\text{rota, operação}}$ ).

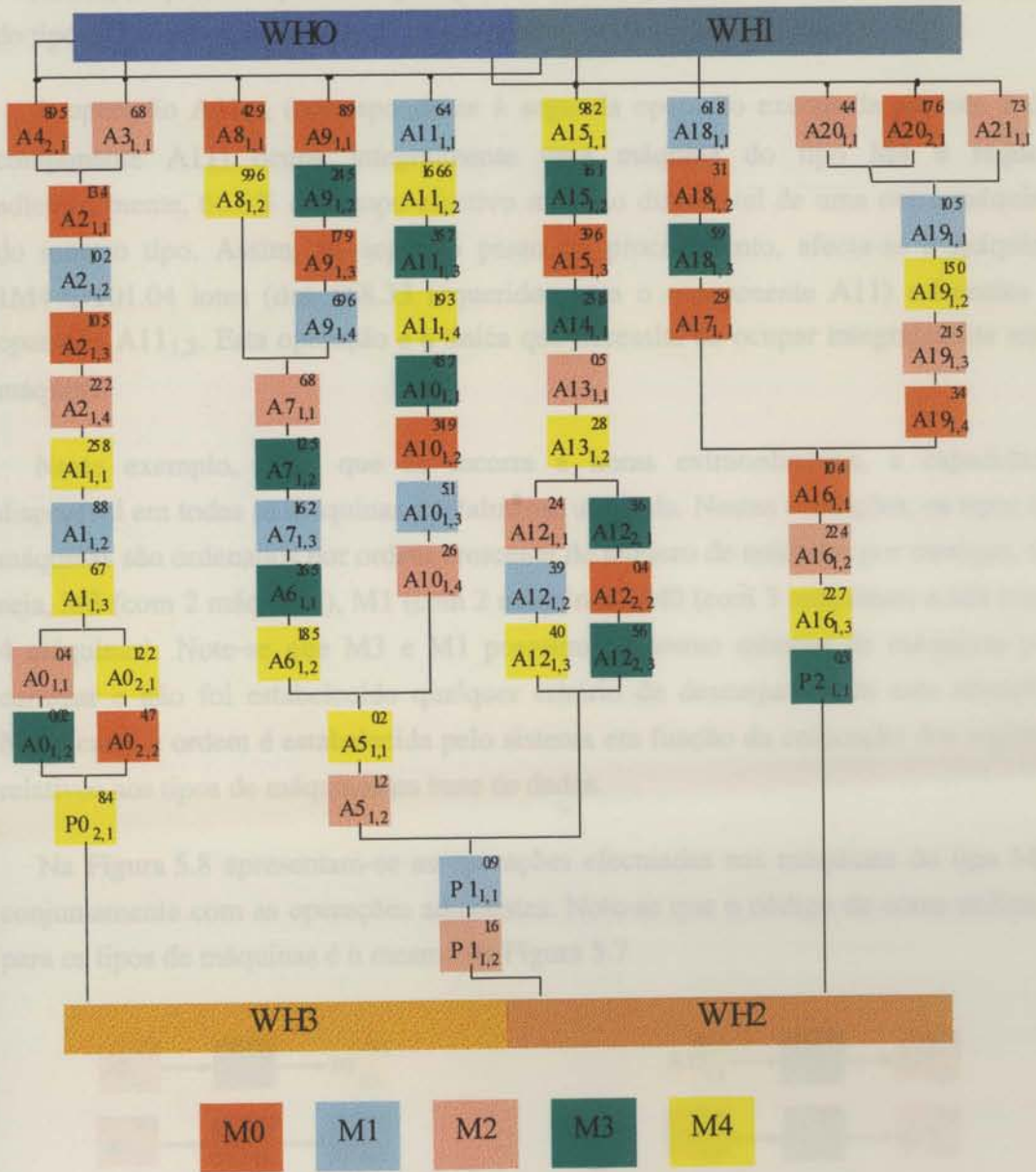


Figura 5.7 - Sequências de operações para os produtos do exemplo analisado

No exemplo considerado existem dois armazéns de matérias-primas (WH0 e WH1) e outros dois de produtos acabados (WH2 e WH3). A distribuição de matérias-primas e de produtos acabados é clara na Figura 5.7.

É oportuno relembrar que a solução do problema do planeamento das necessidades de equipamento e mão-de-obra conduziu a 3 máquinas do tipo M0, 2 do tipo M1, 1 do tipo M2, 2 do tipo M3 e 5 do tipo M4.

Assim, no primeiro passo do procedimento, carrega-se a única máquina disponível do tipo M2, com todas as operações executadas neste tipo de máquina.

A operação A11<sub>1,2</sub> (correspondente à segunda operação executada na rota 1 do componente A11) ocupa integralmente uma máquina do tipo M4 e requer, adicionalmente, 66.6% do tempo efectivo máximo disponível de uma outra máquina do mesmo tipo. Assim, no segundo passo do procedimento, afecta-se à máquina 1M4<sup>1</sup>, 101.04 lotes (dos 168.33 requeridos para o componente A11) referentes à operação A11<sub>1,2</sub>. Esta operação é a única que necessita de ocupar integralmente uma máquina.

Neste exemplo, dado que se recorre a horas extraordinárias, a capacidade disponível em todas as máquinas é totalmente utilizada. Nestas condições, os tipos de máquinas são ordenados por ordem crescente do número de unidades por carregar, ou seja, M3 (com 2 máquinas), M1 (com 2 máquinas), M0 (com 3 máquinas) e M4 (com 4 máquinas). Note-se que M3 e M1 possuem o mesmo número de máquinas por carregar e não foi estabelecido qualquer critério de desempate para esta situação. Neste caso, a ordem é estabelecida pelo sistema em função da colocação dos registos relativos aos tipos de máquinas na base de dados.

Na Figura 5.8 apresentam-se as operações efectuadas nas máquinas do tipo M3, conjuntamente com as operações adjacentes. Note-se que o código de cores utilizado para os tipos de máquinas é o mesmo da Figura 5.7

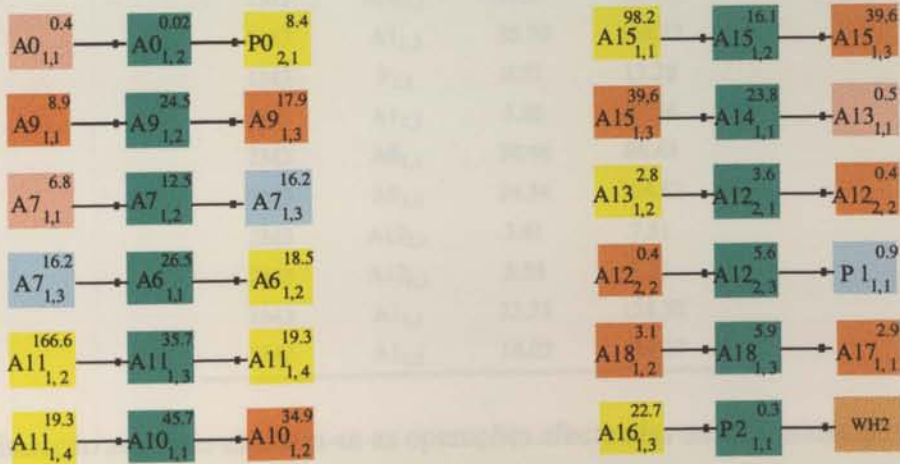


Figura 5.8 - Operações realizadas no tipo de máquina M3

<sup>1</sup> Utiliza-se a notação iMj para representar a máquina número i do tipo Mj.

A matriz de penalidades para o problema de programação binária associado é dada na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Matriz de penalidades para o problema de programação binária associado ao tipo de máquina M3

	A0 <sub>1,2</sub>	A6 <sub>1,1</sub>	A7 <sub>1,2</sub>	A9 <sub>1,2</sub>	A10 <sub>1,1</sub>	A11 <sub>1,3</sub>	A12 <sub>2,1</sub>	A12 <sub>2,3</sub>	A14 <sub>1,1</sub>	A15 <sub>1,2</sub>	A18 <sub>1,3</sub>	P2 <sub>1,1</sub>
A0 <sub>1,2</sub>		3	3	4	3	2	3	4	3	3	4	3
A6 <sub>1,1</sub>			3	4	3	2	3	3	4	3	4	3
A7 <sub>1,2</sub>				4	4	4	4	3	3	4	4	4
A9 <sub>1,2</sub>					2	4	2	2	2	2	0	4
A10 <sub>1,1</sub>						2	2	3	3	2	2	3
A11 <sub>1,3</sub>							2	4	4	2	4	2
A12 <sub>2,1</sub>								3	3	2	2	3
A12 <sub>2,3</sub>									3	3	2	4
A14 <sub>1,1</sub>										3	2	4
A15 <sub>1,2</sub>											2	3
A18 <sub>1,3</sub>												4
P2 <sub>1,1</sub>												

A resolução do problema conduz à solução que se mostra na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Afecção das operações às máquinas do tipo M3

Máquina	Operação	Ocupação	Nº de lotes
1M3	A0 <sub>1,2</sub>	0.01	0.55
1M3	A7 <sub>1,2</sub>	12.45	72.94
1M3	A10 <sub>1,1</sub>	45.67	117.72
1M3	A1 <sub>1,3</sub>	35.70	168.33
1M3	P <sub>1,1</sub>	0.27	13.28
1M3	A1 <sub>1,3</sub>	5.86	75.56
2M3	A6 <sub>1,1</sub>	26.46	66.43
2M3	A9 <sub>1,2</sub>	24.54	124.83
2M3	A12 <sub>2,1</sub>	3.61	7.51
2M3	A12 <sub>2,3</sub>	5.55	7.51
2M3	A1 <sub>1,1</sub>	23.78	158.52
2M3	A1 <sub>1,2</sub>	16.03	129.17

Na iteração seguinte afectam-se as operações efectuadas em máquinas do tipo M1.

Na Figura 5.9 representam-se estas operações, conjuntamente com as operações adjacentes. Note-se que se substituíram os componentes, as rotas e as operações afectadas na fase anterior pelos códigos das máquinas utilizadas para as executar.



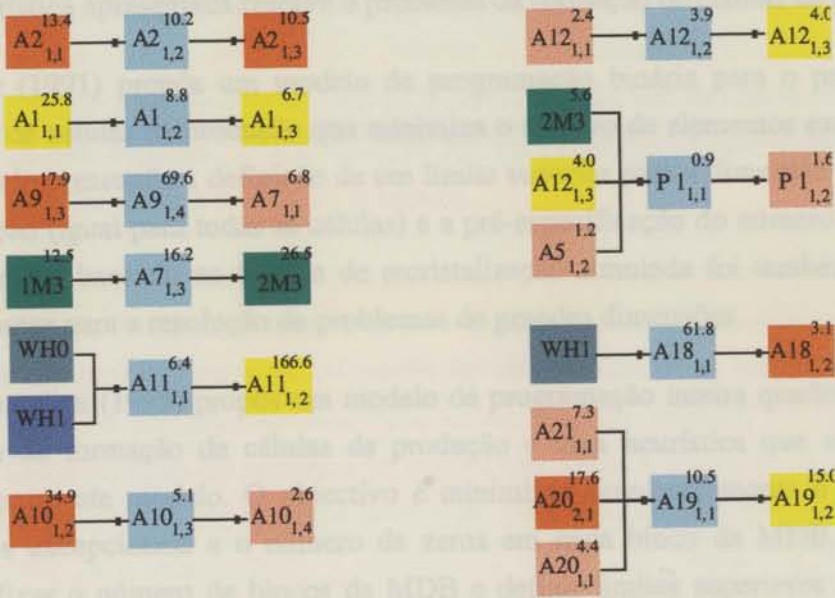


Figura 5.9- Operações executadas no tipo de máquina M1

A matriz de penalidades para o problema de programação binária associado é dada na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Matriz de penalidades para o problema de programação binária associado ao tipo de máquina M1

	A1 <sub>1,2</sub>	A2 <sub>1,2</sub>	A7 <sub>1,3</sub>	A9 <sub>1,4</sub>	A10 <sub>1,3</sub>	A11 <sub>1,1</sub>	A12 <sub>1,2</sub>	A18 <sub>1,1</sub>	A19 <sub>1,1</sub>	P1 <sub>1,1</sub>
A1 <sub>1,2</sub>		4	4	4	4	2	2	4	2	3.33
A2 <sub>1,2</sub>			4	2	2	4	4	2	3.33	4
A7 <sub>1,3</sub>				4	4	4	4	4	4	3.67
A9 <sub>1,4</sub>					2	4	3	3	3	2.67
A10 <sub>1,3</sub>						4	3	3	3	2.67
A11 <sub>1,1</sub>							3	3	3	3.67
A12 <sub>1,2</sub>								4	2.33	2.33
A18 <sub>1,1</sub>									3.67	4
A19 <sub>1,1</sub>										2.78
P1 <sub>1,1</sub>										

A resolução do problema conduz à solução que se mostra na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Afecção das operações às máquinas do tipo M1

Máquina	Operação	Ocupação	Nº de lotes
1M1	A1 <sub>1,2</sub>	8.81	44.03
1M1	P1 <sub>1,1</sub>	0.85	15.74
1M1	A9 <sub>1,4</sub>	69.58	113.76
1M1	A11 <sub>1,1</sub>	6.37	168.33
1M1	A12 <sub>1,2</sub>	3.93	15.45
1M1	A19 <sub>1,1</sub>	10.46	62.39
2M1	A2 <sub>1,2</sub>	10.16	85.37
2M1	A7 <sub>1,3</sub>	16.18	72.94
2M1	A9 <sub>1,4</sub>	6.77	11.07
2M1	A10 <sub>1,3</sub>	5.09	117.72
2M1	A18 <sub>1,1</sub>	61.75	75.56

Nas iterações seguintes afectam-se sucessivamente as operações executadas nos tipos de máquina M0 e M4. Nas tabelas 5.11 e 5.12 mostram-se os resultados obtidos.

Tabela 5.11 - Afecção das operações às máquinas do tipo M0

Máquina	Operação	Ocupação	Nº de lotes
1M0	A2 <sub>1,1</sub>	13.37	85.37
1M0	A2 <sub>1,3</sub>	10.46	85.37
1M0	A9 <sub>1,3</sub>	17.85	124.83
1M0	A15 <sub>1,3</sub>	39.58	129.17
1M0	A18 <sub>1,2</sub>	1.07	26.25
1M0	A20 <sub>2,1</sub>	17.60	272.13
2M0	A0 <sub>2,2</sub>	4.70	33.73
2M0	A4 <sub>2,1</sub>	38.56	106.85
2M0	A8 <sub>1,1</sub>	42.92	155.65
2M0	A16 <sub>1,1</sub>	10.43	37.36
2M0	A19 <sub>1,4</sub>	3.39	62.39
3M0	A4 <sub>2,1</sub>	50.95	141.18
3M0	A9 <sub>1,1</sub>	8.92	124.83
3M0	A10 <sub>1,2</sub>	34.87	117.72
3M0	A12 <sub>2,2</sub>	0.38	7.51
3M0	A17 <sub>1,1</sub>	2.87	49.64
3M0	A18 <sub>1,2</sub>	2.01	49.31

Os resultados apresentados foram obtidos utilizando o procedimento descrito nas secções 5.2.2 e 5.2.3, tendo-se limitado o tempo máximo para a resolução dos problemas de programação binária a 180 segundos e sem qualquer preocupação com a fragmentação das operações ( $K = 0$  na equação (2h)).

Tabela 5.12 - Afecção das operações às máquinas do tipo M4

Máquina	Operação	Ocupação	Nº de lotes
2M4	PO <sub>2,1</sub>	8.39	20.47
2M4	A0 <sub>2,1</sub>	12.17	33.73
2M4	A6 <sub>1,2</sub>	18.52	66.43
2M4	A11 <sub>1,4</sub>	19.33	168.33
2M4	A15 <sub>1,1</sub>	41.59	54.72
3M4	A1 <sub>1,1</sub>	22.69	38.78
3M4	A1 <sub>1,3</sub>	6.74	44.03
3M4	A11 <sub>1,2</sub>	66.60	67.29
3M4	A12 <sub>1,3</sub>	3.97	15.45
4M4	A1 <sub>1,1</sub>	3.07	5.25
4M4	A13 <sub>1,2</sub>	2.66	48.81
4M4	A15 <sub>1,1</sub>	56.59	74.45
4M4	A16 <sub>1,3</sub>	22.67	37.36
4M4	A19 <sub>1,2</sub>	15.01	62.39
5M4	A5 <sub>1,1</sub>	0.22	21.02
5M4	A8 <sub>1,2</sub>	99.58	155.65
5M4	A13 <sub>1,2</sub>	0.14	2.57

Na matriz apresentada na Tabela 5.13 indica-se somente a existência de fluxo entre pares de recursos. Note-se que cada elemento da tabela com valor igual a 1 pode corresponder a diferentes operações de transporte (por exemplo, entre a máquina 1M0 e 1M1 são transportados os componentes A9 e A2).

Tabela 5.13 - Matriz de fluxos

	1M0	2M0	3M0	1M1	2M1	1M2	1M3	2M3	1M4	2M4	3M4	4M4	5M4	WH0	WH1	WH2	WH3
1M0		1	1	1	1	1	1	1							1		
2M0	1		1			1				1			1	1	1		
3M0	1	1			1		1	1							1	1	
1M1	1					1		1	1		1	1				1	
2M1	1		1			1	1	1								1	
1M2	1	1		1	1		1	1			1	1	1	1	1	1	1
1M3	1		1		1	1			1	1	1	1					1
2M3	1		1	1	1	1				1		1					
1M4				1			1										
2M4		1					1	1			1		1	1	1		1
3M4				1		1	1			1							
4M4				1		1	1	1							1	1	
5M4		1				1				1							
WH0	1	1	1			1				1		1					
WH1		1	1	1	1	1				1		1					
WH2						1	1										
WH3										1							

Na base de dados armazena-se um registo de fluxo por cada operação de transporte, por forma a que nos módulos seguintes se possa determinar exactamente a composição do fluxo global. Caso os parâmetros de transporte para cada percurso ainda não tenham sido definidos, o número de viagens é armazenado com o valor do número de lotes (arredondado para o menor inteiro que contém esse valor), o que equivale a pressupor que o tamanho do lote de transporte é igual ao tamanho do lote de processamento.

## 5.5 Interacção com o utilizador

### 5.5.1 Descrição geral da interface

Nesta secção mostram-se as interacções incorporadas no módulo de afectação de operações de fabrico a máquinas e descreve-se sumariamente a funcionalidade de cada uma dessas interacções.

Da janela principal do SAD (que se apresentou na Figura 3.2) reproduz-se na Figura 5.10 a área a partir da qual se tem acesso aos comandos deste módulo, segundo a árvore que se apresenta na Figura 5.11.

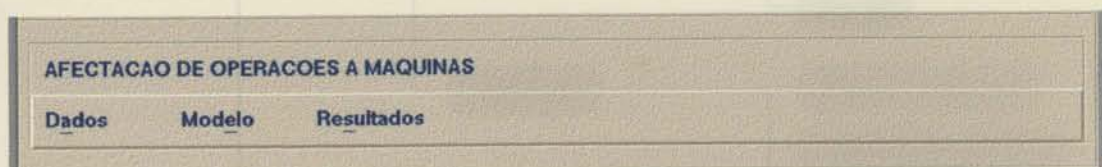


Figura 5.10 - Área da janela principal relativa ao módulo de afectação de operações de fabrico a máquinas

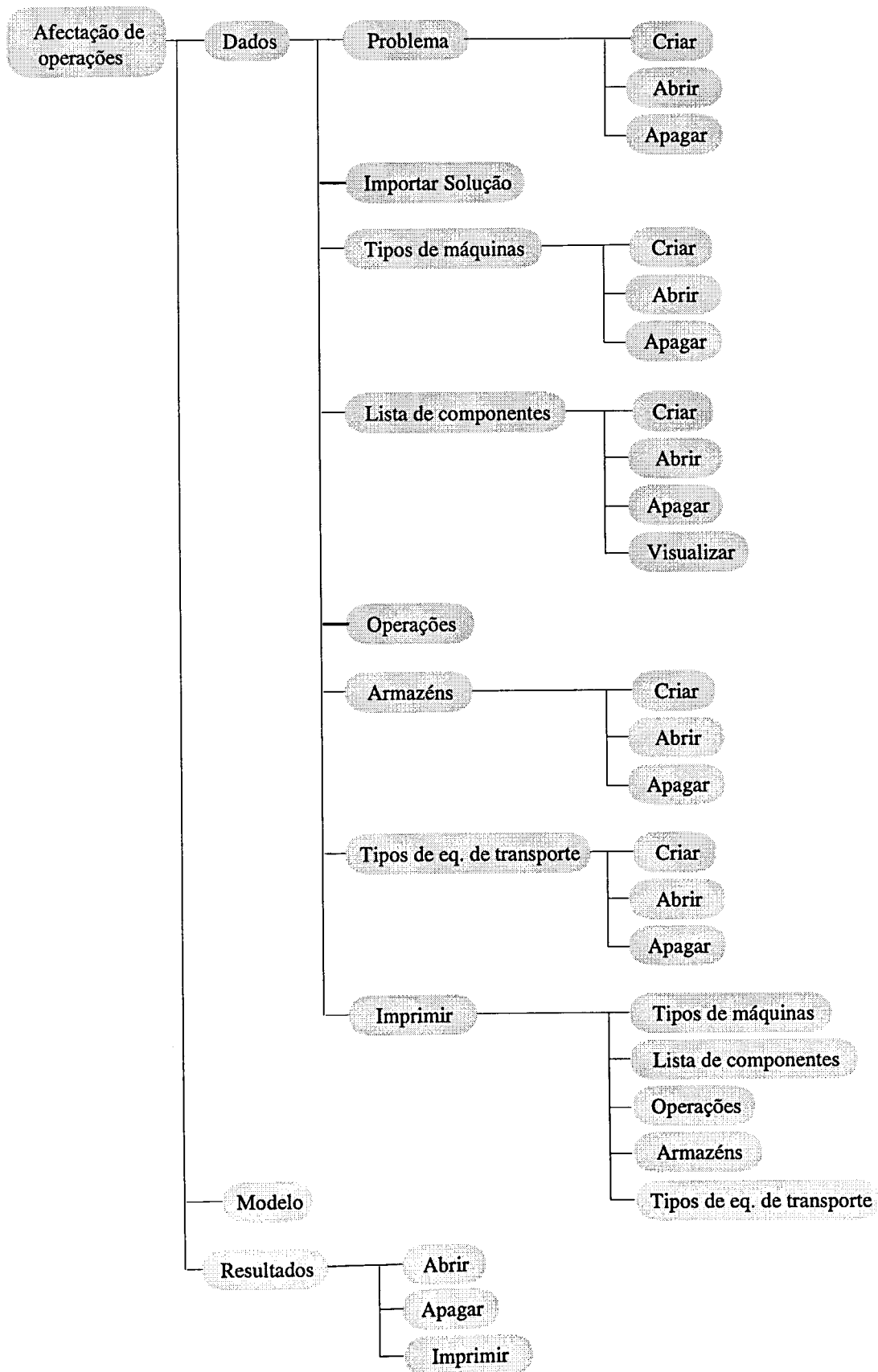


Figura 5.11 - Percursos de acesso aos comandos do módulo de afecção de operações

## 5.5.2 Introdução dos dados

A criação, a modificação e a anulação de problemas de afectação de operações a máquinas necessitam do respectivo identificador, o qual é introduzido numa caixa de diálogo semelhante à da Figura 5.12.

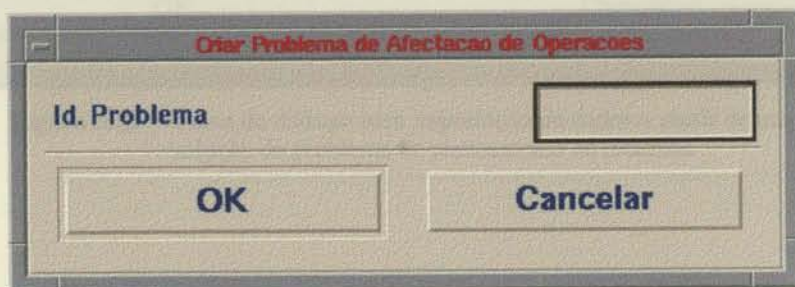


Figura 5.12 - Caixa de diálogo de identificação do problema de afectação de operações de fabrico a máquinas

A activação da tecla 'F1' quando o cursor se encontra colocado no campo de entrada de dados permite visualizar uma lista de selecção (do tipo da que se apresentou na Figura 4.7) com todos os identificadores de problemas de afectação de operações de fabrico a máquinas armazenados na base de dados. Nos casos dos procedimentos de modificação e anulação, a selecção de um dos identificadores da lista transfere, automaticamente, o seu valor para o campo de entrada de dados.

Uma caixa de diálogo de erro (semelhante à que se apresentou na Figura 4.8), com uma mensagem apropriada ao contexto, aparecerá nas seguintes situações:

- introdução de um identificador já armazenado na base de dados, no caso do procedimento de criação de problemas,
- inserção de um identificador de problema não armazenado na base de dados, no caso dos procedimentos de modificação e anulação de problemas.

Os dados de entrada para um problema de afectação de operações de fabrico a máquinas podem ser obtidos a partir de uma solução para o problema de planeamento

de recursos, a qual é seleccionada através de uma caixa de diálogo de introdução de dados como a que se pode ver na Figura 5.13.

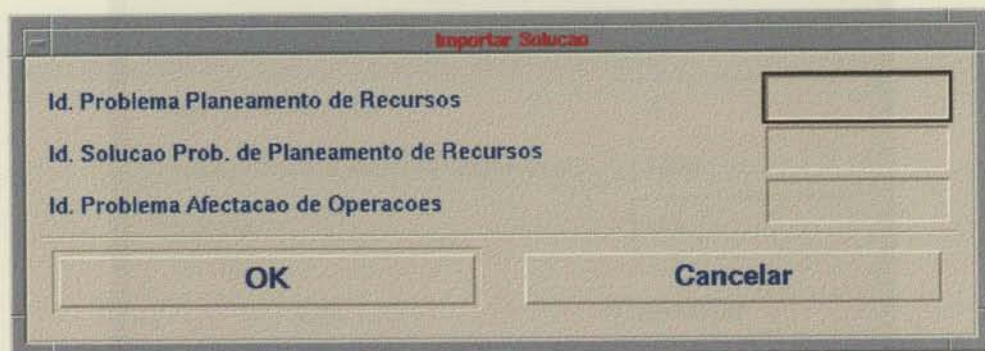


Figura 5.13 - Caixa de diálogo para importação de dados a partir de uma solução do problema de planeamento de recursos

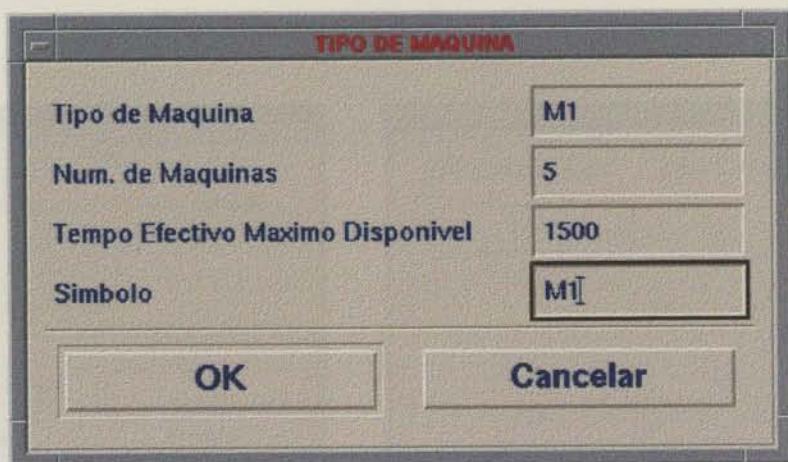
A activação da tecla 'F1' com o cursor colocado num dos campos de entrada de dados permite visualizar uma lista de selecção (semelhante à que se apresentou na Figura 4.7) com os identificadores dos problemas ou das soluções (correspondentes ao problema seleccionado) armazenados na base de dados. A selecção de um desses identificadores da lista transfere, automaticamente, o seu valor para a caixa de texto.

Uma caixa de diálogo de erro (semelhante à que se apresentou na Figura 4.8), com uma mensagem apropriada ao contexto, aparecerá nos seguintes casos:

- não preenchimento de qualquer um dos campos de entrada de dados,
- inserção de um identificador de problema não armazenado na base de dados,
- inserção de um identificador de solução não armazenado na base de dados para o problema seleccionado.

Os outros elementos da interface têm a dupla função de permitirem a modificação das soluções importadas ou a introdução de dados para problemas que não recorrem ao módulo de planeamento dos recursos.

Na criação e modificação de tipos de máquinas utiliza-se a caixa de diálogo de introdução de dados da Figura 5.14.



A caixa de diálogo intitulada "TIPO DE MAQUINA" apresenta quatro campos de entrada e dois botões de ação. Os campos são:

Etiqueta	Valor
Tipo de Maquina	M1
Num. de Maquinas	5
Tempo Efectivo Maximo Disponivel	1500
Simbolo	M1

Os botões "OK" e "Cancelar" estão localizados na base da caixa.

Figura 5.14 - Caixa de diálogo para introdução de tipos de máquinas

O campo Num. Máquinas refere-se ao número total de máquinas disponíveis, do tipo em causa. O tempo máximo efectivo disponível pode tomar valores entre 0 e 100%.

A introdução do identificador do símbolo geométrico (no campo Símbolo) a utilizar para este tipo de máquina é opcional, uma vez que ele ainda não será necessário neste módulo.

Uma caixa de diálogo de erro (semelhante à que se apresentou na Figura 4.8), com uma mensagem apropriada ao contexto, aparecerá quando:

- qualquer dos campos, à excepção de Símbolo, forem deixados em branco,
- o tempo máximo efectivo disponível ultrapassar 100%.

A criação e a modificação de componentes são efectuadas através da sequência de caixas de diálogo apresentadas na Figura 5.15. Os dados relativos a um dado componente são introduzidos na janela de diálogo a) e os identificadores dos respectivos subcomponentes, conjuntamente com a quantidade requerida pelo componente pai, em b). Caso o componente represente uma matéria-prima o utilizador deixará em branco o campo Num. subcomponentes e a caixa de diálogo b) não aparecerá. A procura só deverá ser definida para produtos acabados, ou seja, componentes que não se integrem noutros componentes. O número de rotas, segundo as quais cada componente ou subcomponente pode ser processado, é introduzido no



campo Num. rotas. Se este campo não for preenchido, assume-se a existência de uma rota única.

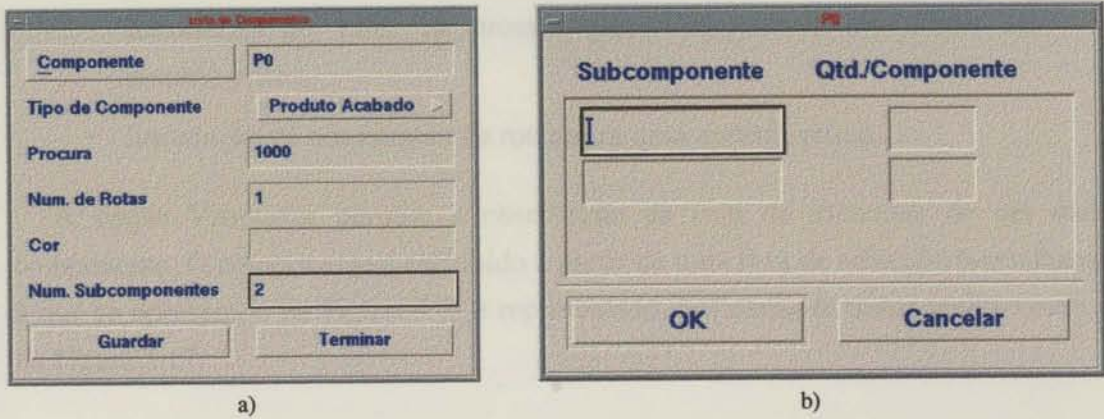


Figura 5.15 - Caixas de diálogo para criação e alteração de componentes

O botão Componente permite visualizar todos os componentes e subcomponentes introduzidos na base de dados para o problema corrente. Os componentes são identificados recorrendo a uma de duas cores distintas, conforme os seus subcomponentes se encontrem ou não definidos.

O número associado à cor com a qual o fluxo associado ao componente será visualizado na implantação fabril poderá ser introduzido no campo Cor. Para visualizar a paleta de cores disponíveis (ver Figura 5.16) o utilizador actua na tecla 'F1', com o cursor colocado no campo de entrada de dados correspondente. Se este campo for deixado em branco, a cor utilizada será a preta.



Figura 5.16 - Janela com a paleta de cores

Uma mensagem de erro (semelhante à que se apresentou na Figura 4.8) ocorre nas seguintes situações:

- identificador de componente não definido,
- introdução do valor da procura para um produto intermédio ou matéria-prima,
- introdução de um número de rotas para uma matéria-prima.

A opção Visualizar permite a observação da lista de materiais de um dado componente. O componente é escolhido a partir de uma lista de selecção (semelhante à que se apresentou na Figura 4.7) e representado graficamente numa janela como a da Figura 5.17.

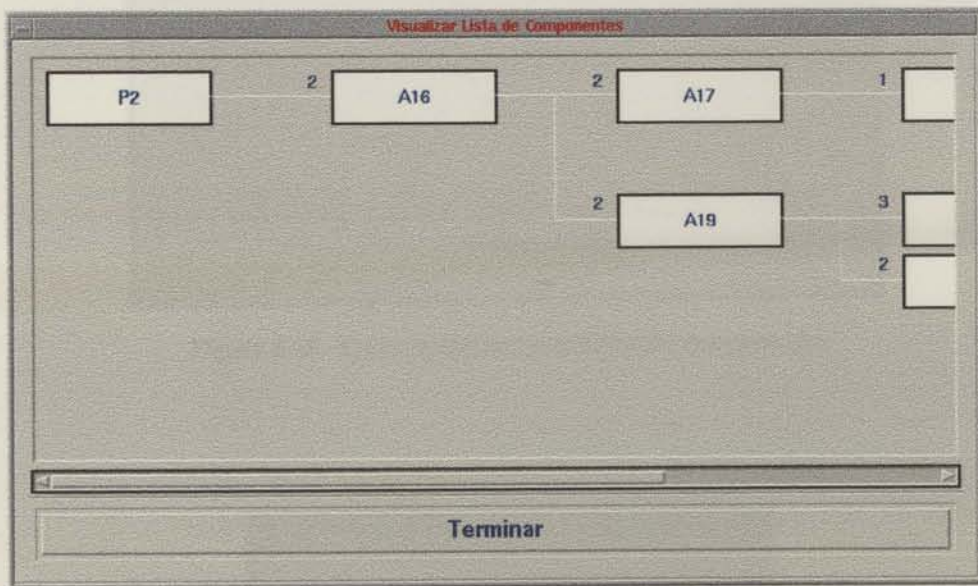


Figura 5.17 - Janela para visualização da lista de materiais de um componente

A definição e a modificação das operações de um componente são efectuadas numa caixa de diálogo como a apresentada na Figura 5.18. O componente e a rota cujas operações se pretendem definir ou modificar seleccionam-se nos menus I e II, os quais incluem, para o problema corrente, todos os componentes armazenados na base de dados, bem como as respectivas rotas. A selecção de um componente e de uma rota permite definir ou modificar o tamanho do lote na respectiva caixa de diálogo de introdução de dados (ver Figura 5.19).

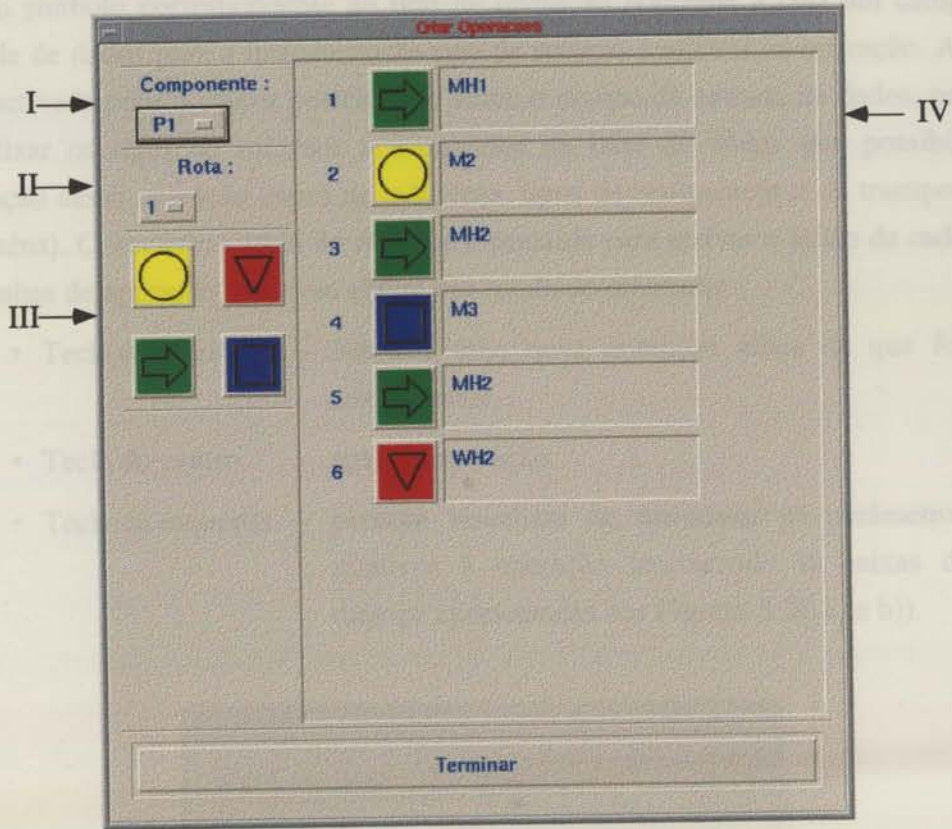


Figura 5.18 - Caixa de diálogo para definição das operações

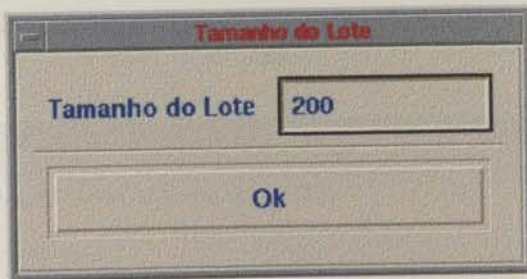


Figura 5.19 - Caixa de diálogo para definição do tamanho do lote

O accionamento de um botão da área III introduz na janela de definição da sequência de operações (IV) uma linha de operação correspondente ao tipo seleccionado: processamento (amarelo), armazenamento (vermelho), transporte (verde) ou inspecção (azul).

Cada linha de operação inclui: (i) a ordem pela qual ela é executada, (ii) um botão com o símbolo correspondente ao tipo de operação realizada e (iii) um campo de entrada de dados para a introdução do tipo de recurso a utilizar na operação. A tecla 'F1', activada com o cursor posicionado sobre o campo de entrada de dados, permite visualizar os tipos de recursos armazenados na base de dados que possibilita a execução dessa operação (tipos de máquinas, tipos de equipamentos de transporte ou armazéns). Consoante a tecla do rato que é premida para activar o botão de cada uma das linhas de operação, assim se obtém um resultado diferente:

- Tecla da direita - introduz uma nova operação antes da que foi seleccionada,
- Tecla do centro - apaga a operação,
- Tecla da esquerda - permite visualizar ou introduzir os parâmetros relativos à operação (recorrendo às caixas de diálogo apresentadas nas Figuras 5.20 a) e b)).

Caixa de diálogo intitulada "Modificar Operacao". Contém os seguintes campos de entrada:

Tipo de Máquina	M2
Tempo de Set-up	20.00
Tempo de Processamento	2.00

Botões: Ok, Cancelar

a)

Caixa de diálogo intitulada "Modificar Operacao". Contém os seguintes campos de entrada:

Codigo do Equip. de Transporte	MH1
Tempo de Carga	1.00
Tempo de Descarga	1.00
Velocidade	2
Lote de Transporte	100

Botões: Ok, Cancelar

b)

Figura 5.20 - Caixas de diálogo para definição dos parâmetros das operações

Note-se que, na definição dos parâmetros das operações de transporte, os tempos de carga e descarga, bem como a velocidade, aparecem inicialmente com os valores definidos na base de dados para o tipo de equipamento de movimentação correspondente. O utilizador só terá que introduzir novos valores no caso de o funcionamento deste tipo de equipamento, na operação particular a que se refere a introdução de dados, não ter lugar de uma forma 'standard'. O lote de transporte é inicializado com o valor do lote de processamento da operação anterior, pelo que o utilizador só terá de definir um novo valor se pretender que seja efectuada mais do que uma viagem para o transporte de cada lote.

Uma caixa de diálogo com uma mensagem de erro (semelhante à que se apresentou na Figura 4.8) pode ocorrer nas seguintes situações:

(i) Definição de operações:

- recurso não definido numa linha de operação,
- recurso introduzido numa linha de operação sem que previamente tenha sido definido na base de dados.

(ii) Definição do tamanho do lote:

- tamanho do lote nulo ou não definido.

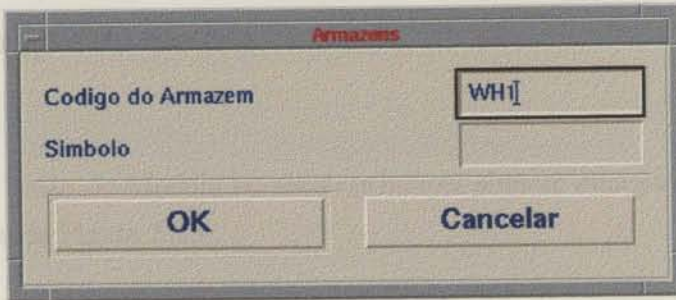
(iii) Definição dos parâmetros das operações de processamento ou inspecção:

- tempos de preparação de máquina ou de processamento não definidos.

(iv) Definição dos parâmetros das operações de transporte:

- valor do lote de transporte não definido ou superior ao tamanho do lote de processamento da operação anterior.

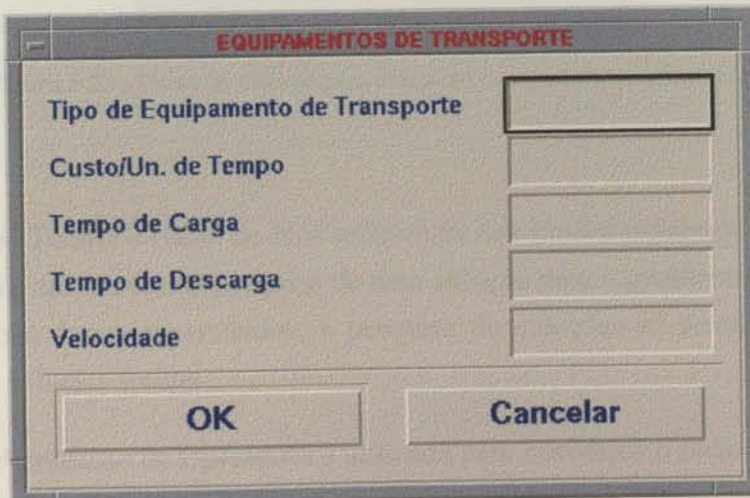
A definição e a modificação de armazéns são efectuadas utilizando a janela de diálogo que se apresenta na Figura 5.21. O campo Símbolo corresponde ao identificador do modelo geométrico que representa este armazém. A sua introdução nesta fase é opcional, uma vez que só será necessário no módulo de implantações fabris. No procedimento de modificação é possível visualizar a lista de selecção (semelhante à que se apresentou na Figura 4.7) contendo todos os armazéns definidos na base de dados para o problema corrente (activando a tecla 'F1'). Esta mesma lista é exibida no procedimento de anulação de armazéns.



A caixa de diálogo intitulada "Armazens" possui um campo de texto rotulado "Codigo do Armazem" com o valor "WH1" inserido. Abaixo dele, há um campo rotulado "Simbolo" que está atualmente vazio. Na base da caixa, há dois botões: "OK" e "Cancelar".

Figura 5.21 - Caixa de diálogo para definição de armazéns

Os dados referentes aos tipos de equipamento de movimentação são introduzidos ou modificados numa janela como a que se representa na Figura 5.22. No procedimento de modificação é possível, recorrendo à tecla 'F1', visualizar a lista de selecção (semelhante à que se apresentou na Figura 4.7) contendo todos os tipos de equipamento de transporte definidos na base de dados para o problema corrente. Esta mesma lista é exibida no procedimento de anulação. A não definição de um dos campos faz aparecer uma caixa de diálogo de erro (semelhante à que se apresentou na Figura 4.8).

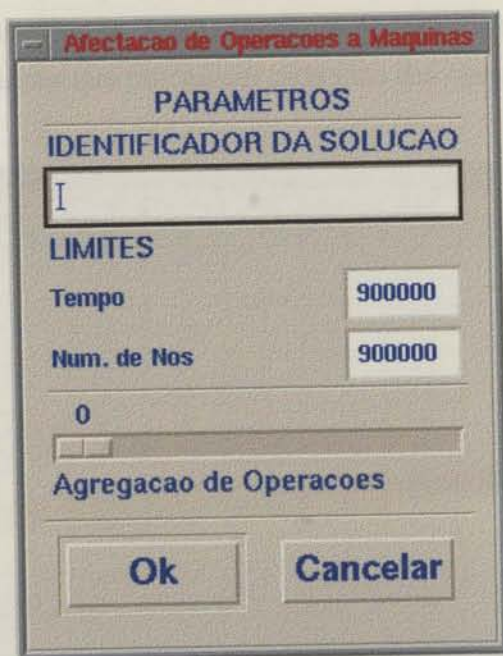


A caixa de diálogo intitulada "EQUIPAMENTOS DE TRANSPORTE" contém cinco campos de texto rotulados: "Tipo de Equipamento de Transporte", "Custo/Un. de Tempo", "Tempo de Carga", "Tempo de Descarga" e "Velocidade". Todos os campos estão atualmente vazios. Na base da caixa, há dois botões: "OK" e "Cancelar".

Figura 5.22 - Caixa de diálogo para definição de tipos de equipamento de movimentação de materiais

### 5.5.3 Utilização do modelo

Activando o botão do Modelo no menu principal abre-se uma janela de introdução de dados como a da Figura 5.23.



A caixa de diálogo, intitulada "Afectação de Operacoes a Maquinas", contém o seguinte conteúdo:

- PARAMETROS**
- IDENTIFICADOR DA SOLUCAO**: Campo de texto contendo o caractere "I".
- LIMITES**:
  - Tempo**: Campo de texto contendo "900000".
  - Num. de Nos**: Campo de texto contendo "900000".
- 0**: Campo de texto contendo "0".
- Agregacao de Operacoes**: Campo de texto contendo "0".
- Botões **Ok** e **Cancelar**.

Figura 5.23 - Caixa de diálogo para definição dos parâmetros do problema

Os campos Tempo e Num. de Nos referem-se aos limites máximos de tempo e de número de nós analisados na pesquisa de uma solução para o problema. Se os campos respectivos não forem preenchidos, a pesquisa de soluções só termina quando for encontrada a solução óptima.

A escala Agregação de Operações é utilizada para introduzir o factor de penalidade referido na definição da função objectivo (2h) (ver a secção 5.2.3).

Se o identificador da solução não for introduzido será exibida uma caixa de diálogo de erro (semelhante à que se apresentou na Figura 4.8).

Uma vez especificados estes parâmetros, o problema corrente é resolvido.

### 5.5.4 Visualização dos resultados

Depois de determinada a solução para o modelo, ou de activado o botão Abrir do menu Resultados (ver Figura 5.11), visualiza-se o conjunto de janelas apresentado nas Figuras 5.24 a 5.26. Nestas janelas apresentam-se dados relativos ao fluxo entre máquinas ou armazéns (Figura 5.24), às operações executadas em cada máquina (Figura 5.25) e às máquinas que processam cada uma das operações (Figura 5.26).

DE	PARA	PRODUTO	ROTA	OPERAÇÃO	FLUXO
1M0	2M1	A2	1	2	0.35
	1M2	A2	1	8	0.35
	1M1	A3	1	6	0.36
	2M1	A6	1	6	0.04
	2M3	A15	1	6	0.60
	1M0	A18	1	4	0.15
	1M1	A20	2	2	2.59
1M1	3M4	A1	1	4	0.28
	1M2	P1	1	2	0.08
		A8	1	8	0.36
	1M4	A11	1	2	0.46
	3M4	A11	1	2	0.36
		A12	1	4	0.19
	4M4	A19	1	2	0.29
1M2	1M3	A0	1	2	0.00
	3M4	A2	1	8	0.31
	4M4	A2	1	8	0.04
	1M0	A3	1	2	0.95
	9M2	P1	1	4	0.08
	1M1	A5	1	4	0.07
	1M3	A7	1	2	0.29

Buttons: Histograma, Fechar

Figura 5.24 - Janela para visualização dos fluxos entre equipamentos

A partir das janelas das Figuras 5.25 e 5.26 é possível visualizar histogramas que representam, respectivamente, a distribuição do número de operações por máquina (Figura 5.27) e a distribuição do número de máquinas por operação (Figura 5.28).

Assim, por exemplo, na Figura 5.27 representa-se uma situação em que aproximadamente 88% das operações se realizam numa máquina e 12% em duas máquinas. Na situação aí retratada, dos 88% das operações realizadas numa só máquina, 19% realizam-se numa máquina do tipo M0, 12% numa máquina do tipo M2, etc.



Afectação de Operações - Operações/Máquinas

MÁQUINA	PRODUTO	ROTA	OPERAÇÃO	NUM. LOTES
1M2	A21	1	2	0.25
	A20	1	2	0.17
	A19	1	8	0.29
	A16	1	4	0.21
	A13	1	2	0.29
	A12	1	2	0.19
	A10	1	8	0.75
	AV	1	2	0.29
	AS	1	4	0.07
	P1	1	4	0.08
	A3	1	2	0.85
	A2	1	8	0.25
	A0	1	2	0.00
	1M3	A18	1	6
P2		1	2	0.05
A11		1	6	0.76
A10		1	2	0.75
A7		1	4	0.29
2M3	A0	1	4	0.00
	A15	1	4	0.60
	A14	1	2	0.80
	A12	2	6	0.03
A12	2	2	0.03	

Histograma      Fechar

Figura 5.25 - Janela para visualização das operações executadas em cada máquina

Afectação de Operações - Máquinas/Operações

PRODUTO	ROTA	OPERAÇÃO	MÁQUINA	NUM. LOTES
P0	2	2	2M4	0.12
A0	1	2	1M2	0.00
		4	1M3	0.00
	2	2	2M4	0.17
		4	2M0	0.17
A1	1	2	3M4	0.24
		2	4M4	0.03
	4	1M1	0.29	
		6	3M4	0.29
A2	1	2	1M0	0.35
		4	2M1	0.35
	6	1M0	0.35	
		8	1M2	0.35
A3	1	2	1M2	0.35
		2	2M0	0.42
A4	2	2	3M0	0.56
		2	3M1	0.08
P1	1	2	1M1	0.08
		4	1M2	0.08
AS	1	2	3M4	0.07
		4	1M2	0.07
A6	1	2	2M1	0.24
		4	2M4	0.24
AV	1	2	1M2	0.29

Histograma      Fechar

Figura 5.26 - Janela para visualização dos equipamentos que processam cada uma das operações.

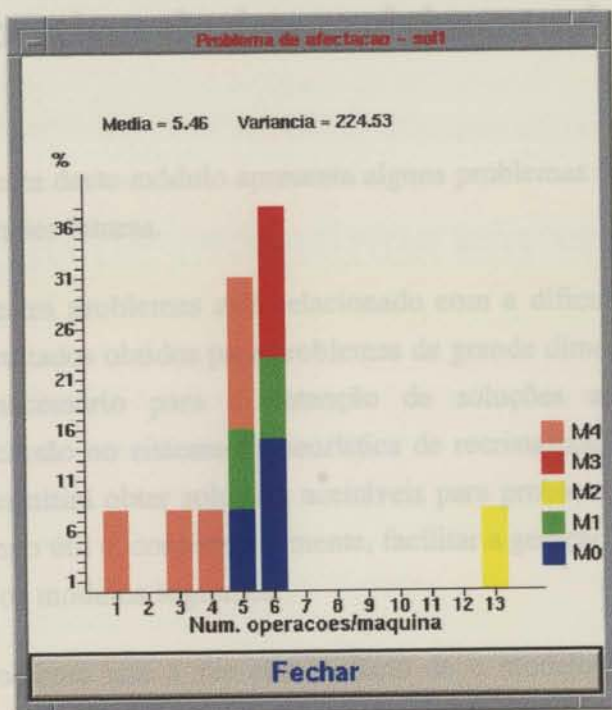


Figura 5.27 - Histograma do número de operações por máquina (as diferentes cores representam cada um dos tipos de máquina)

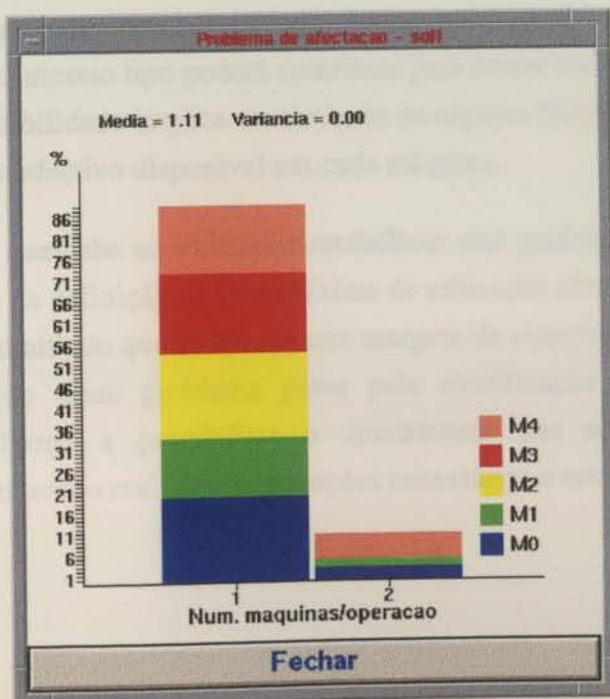


Figura 5.28 - Histograma do número de equipamentos por operação (as diferentes cores representam cada um dos tipos de máquina)

## 5.6 Perspectivas de desenvolvimento do módulo

A versão corrente deste módulo apresenta alguns problemas fundamentais a serem corrigidos em versões futuras.

O primeiro destes problemas está relacionado com a dificuldade em controlar a qualidade dos resultados obtidos para problemas de grande dimensão e com o esforço computacional necessário para a obtenção de soluções aceitáveis para esses problemas. A inclusão no sistema da heurística de recristalização simulada, descrita na secção 5.3, permitirá obter soluções aceitáveis para problemas de média e grande dimensão em tempo útil e, conseqüentemente, facilitar a geração de um maior número de cenários para os módulos seguintes.

Um outro problema tem a ver com o facto de o modelo não impor um limite mínimo à fracção de cada lote que pode ser processada numa máquina. Assim, podem ocorrer situações em que a parte fraccionária do número de lotes a processar numa dada máquina seja próxima de zero. Na prática, uma situação destas pode conduzir a um tempo de 'set-up' dessa fracção de lote muito superior ao seu tempo de processamento e, por isso, que não faça qualquer sentido a produção dum número tão pequeno de componentes num lote isolado. Assim, a transferência de fracções de lotes entre máquinas do mesmo tipo poderá contribuir para tornar mais realistas as soluções obtidas. Esta possibilidade implica a existência de alguma flexibilidade relativamente ao tempo máximo efectivo disponível em cada máquina.

Relembrando que cabe ao utilizador estabelecer este parâmetro para cada tipo de máquina (através da definição da taxa máxima de utilização efectiva para as máquinas de cada tipo) e admitindo que existe alguma margem de manobra relativamente a este valor, a resolução deste problema passa pela modificação da interface com o utilizador por forma a possibilitar o ajustamento das soluções obtidas e o fornecimento, em tempo real, das informações necessárias a este procedimento.

# 6

---

## **Agregação de máquinas em secções de fabrico**

### **Conteúdo:**

- **Introdução**
- **Tecnologia de grupo: definição e impacto na organização das empresas**
- **Problema da formação de células de produção: métodos utilizados na sua abordagem**
- **Problema da formação de células de produção: medidas de qualidade das soluções**
- **Heurísticas incorporadas no SAD**
- **Interacção com o utilizador**
- **Perspectivas de desenvolvimento do módulo**

## 6.1 Introdução

No capítulo anterior abordou-se o problema da afectação de operações a máquinas. Da resolução desse problema deriva a especificação do conjunto de operações efectuadas em cada uma das máquinas dos diferentes tipos. Agora o objectivo é o de definir o modo como as máquinas se agrupam nas secções de fabrico.

O módulo de agregação de máquinas em secções que se apresenta neste capítulo contempla os dois tipos de sistemas normalmente associados à produção discreta por lotes: por processo e por tecnologia de grupo.

Nas empresas organizadas exclusivamente por processo as máquinas são agrupadas em departamentos de acordo com a sua funcionalidade, pelo que a agregação de máquinas em secções é trivial.

Se a organização fabril for por tecnologia de grupo, as máquinas são agrupadas em função dos componentes que processam. No SAD proposto no âmbito deste trabalho incluíram-se duas heurísticas para apoiar o decisor na agregação de máquinas nesta situação. A descrição destas heurísticas será efectuada nas secções seguintes.

O SAD dispõe de uma interface que permite que o utilizador agregue as máquinas manualmente, sendo-lhe para o efeito fornecidas indicações relativas aos fluxos inter-secções e intra-secções para cada configuração considerada.

Estas indicações, conjuntamente com a representação gráfica das secções criadas, permitem ao utilizador, por um lado, modificar os resultados obtidos a partir das heurísticas de agregação segundo a tecnologia de grupo e, por outro, projectar sistemas híbridos processo/tecnologia de grupo.

Após a obtenção das secções de fabrico, o decisor pode definir (ou redefinir) o sistema de transporte de materiais que servirá de base à obtenção da implantação fabril.

## 6.2 Tecnologia de grupo: definição e impacto na organização das empresas

A tecnologia de grupo é uma forma de organização dos recursos fabris que permite, em situações de produção por lotes de pequena dimensão, a obtenção de economias normalmente associadas à produção em massa.

O paradigma subjacente à tecnologia de grupo pressupõe a divisão dos recursos produtivos em grupos de máquinas (famílias de máquinas) dedicados à produção, em exclusivo, de um conjunto de componentes (família de componentes), agrupados com base no seu processo de fabrico ou nas suas características físicas.

A aplicação dos conceitos da tecnologia de grupo a uma unidade industrial resulta na adopção de um sistema de produção celular, no âmbito do qual são definidas células de produção, cada uma das quais constituída por uma família de máquinas afectadas à produção de uma família de componentes.

Do ponto de vista da gestão da produção, a aplicação da tecnologia de grupo simplifica os fluxos de materiais, reduz os tempos de 'set-up' e de processamento, diminui as existências em curso de fabrico, permite um melhor controle do sistema de produção (Burbridge (1992)) e facilita a introdução de técnicas de 'just-in-time' (JIT) e de 'total quality management' (TQM), uma vez que associa cada trabalhador a um conjunto restrito e integrado de máquinas, componentes e tarefas pelos quais assume a responsabilidade (Alford (1994)).

Do ponto de vista tecnológico, os sistemas de produção celulares potenciam a automação dos processos de fabrico e, ao permitirem o desenvolvimento modular dos sistemas produtivos, facilitam a introdução de sistemas de fabrico integrados por computador (CIM).

Um outro aspecto que tem feito aumentar o interesse pela tecnologia de grupo é que esta ajuda a promover a interligação entre as fases de projecto e de produção. Definidas as famílias de componentes e respectivas células de produção, os projectistas procurarão desenhar os novos componentes por forma a que se encaixem numa família existente e se adaptem às máquinas existentes na célula respectiva.

Como consequência desta filosofia de projecto, tanto a qualidade como o tempo de resposta às solicitações dos mercados são melhorados (Kroll e Wang (1994)).

No que respeita aos recursos humanos, a tecnologia de grupo pode fomentar uma estrutura organizacional descentralizada ('empowerment'), na qual os operários fabris exercem autonomamente a gestão e o controle da célula em que trabalham (Alford (1994)).

O potencial da produção celular só será atingido na sua plenitude se o fluxo intercelular for eliminado, ou seja, se cada componente for processado exclusivamente na sua célula. No entanto, em grande parte das situações (particularmente quando se converte uma implantação por processo num sistema de produção celular), este objectivo pode não ser conseguido.

Segundo Irani et al (1992) o projecto de sistemas de produção celulares pode ser decomposto em quatro subproblemas:

- (i) Formação das células de produção: determinação do número e composição das famílias de máquinas e de componentes.
- (ii) Duplicação de máquinas: determinação das máquinas (partilhadas por diferentes células) a duplicar, por forma a otimizar o equilíbrio entre os custos de investimento e operação e os custos associados ao fluxo intercelular.
- (iii) Implantação intracelular: obtenção da melhor disposição das máquinas em cada uma das células, por forma a minimizar os custos dos transportes intracelulares.
- (iv) Implantação intercelular: determinação da melhor localização relativa das células na área fabril, por forma a minimizar o custo de transporte de materiais entre células.

O módulo do SAD que se apresenta neste capítulo aborda somente o primeiro destes subproblemas. Os dois últimos, designadamente os problemas de implantação (intracelular e intercelular), são abordados posteriormente, num módulo específico.

Relativamente ao subproblema (ii), cujo objectivo é a eliminação do fluxo intercelular, a via considerada é excessivamente limitada, existindo alternativas, tais como:

- (i) subcontratação da fabricação dos componentes que implicam o recurso a máquinas partilhadas, ou seja, aquelas que, por serem utilizadas no processamento de componentes de famílias distintas, originam fluxos intercelulares (o que claramente tem interações com o problema de planeamento das necessidades de máquinas e de mão-de-obra),
- (ii) realização de uma implantação híbrida, em que parte dos componentes serão processados segundo a tecnologia de grupo e os restantes por processo (neste aspecto o utilizador é ajudado pelo sistema na especificação manual das secções, sendo-lhe fornecidos elementos como a matriz de fluxos entre máquinas),
- (iii) modificação dos processos de fabrico dos componentes, por forma a que estes possam ser fabricados inteiramente numa das células existentes (o que implica uma interacção com os dados do problema de planeamento das necessidades de máquinas e de mão-de-obra),
- (iv) alteração do projecto dos componentes, para que os processos de fabrico resultantes se ajustem às células existentes.

Obviamente que qualquer uma destas alternativas pode conduzir a aumentos dos custos de investimento ou de operação, o que se pode tornar numa desvantagem da tecnologia de grupo. Recentemente, tem-se admitido a possibilidade de relaxar a restrição de não existência de qualquer fluxo intercelular, desde que os custos de movimentação adicionais sejam inferiores aos custos associados a qualquer das medidas preconizadas para a eliminação dos fluxos.

### **6.3 Problema da formação de células de produção: métodos utilizados na sua abordagem**

Os métodos utilizados na abordagem do problema da formação de células de produção fundamentam-se na análise directa da informação dos processos de fabrico.

A maioria dos métodos referidos na bibliografia baseia-se na representação do sistema de produção através de uma matriz de incidência máquinas-componentes. Os



métodos que, entre estes, são mais referidos serão analisados na secção 6.3.1. Na secção 6.3.2 são discutidos os métodos que, em alternativa à matriz de incidência, recorrem à matriz de fluxo entre máquinas.

Existem ainda métodos que recorrem a outros tipos de representação do sistema de produção. Entre tais métodos, que não serão objecto de análise detalhada nas secções seguintes, referem-se os propostos por Irani et al (1992), Tam (1990) e Wu et al (1986), o primeiro dos quais se baseia em diagramas de fluxo, enquanto que os restantes assentam na matriz de sequências de operações.

### 6.3.1 Métodos baseados na matriz de incidência

Na matriz de incidência máquinas-componentes, o sistema de produção é representado por elementos binários do tipo

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o componente } j \text{ é processado na máquina } i \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

O problema da formação de células de produção (que pressupõe a especificação conjunta de famílias de máquinas e de famílias de componentes) é equivalente a reduzir a matriz de incidência a uma forma diagonal por blocos (MDB- Matriz Diagonal por Blocos), com blocos de 1's e 0's ao longo da diagonal e 0's nas outras células. Cada um daqueles blocos representa uma célula de produção (definida por uma família de máquinas e pela correspondente família de componentes). Na Tabela 6.1 apresenta-se um exemplo de uma MDB e indicam-se os blocos correspondentes às células de produção.

Quando a MDB não é perfeita, o que acontece na maior parte dos casos, surgem 1's fora dos blocos da diagonal. Estes elementos, que se designam por excepcionais, representam interacções entre famílias de máquinas ou famílias de componentes, que derivam da existência de máquinas partilhadas (máquinas que processam componentes pertencentes a duas famílias distintas).

Dado que o paradigma da produção celular (que se traduz na inexistência de elementos excepcionais na MDB) não é, em condições normais, concretizável, as

técnicas de formação de células de produção, baseadas na matriz de incidência, procuram encontrar a MDB com o menor número de elementos excepcionais.

Tabela 6.1 - Exemplo de um matriz de incidência na forma diagonal por blocos (MDB)

		Componente								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Máquina	Célula	Família 1				Família 2			Família 3	
1	1	1	1	1	1					
2			1	1						
3	2					1	1			
4						1		1		
5	3								1	1

Este objectivo, por si só, não é suficiente, dado que bastaria considerar toda a matriz de incidência como um bloco único para eliminar a existência de elementos excepcionais. Entre os critérios complementares mais utilizados contam-se: (i) a imposição de limites máximos à dimensão das células e (ii) a minimização da densidade de 0's nos blocos.

### 6.3.1.1 Métodos matriciais

Os métodos matriciais utilizam a matriz de incidência directamente e reorganizam as suas linhas e colunas por forma a convertê-la numa MDB.

O método ROC - Rank Order Cluster - (King (1980)) é o mais referido na literatura e utiliza um algoritmo de ordenação binária para converter a matriz de incidência na forma diagonal por blocos. Extensões a este método foram posteriormente apresentadas por King e Nakornchai (1982) e Askin e Subramanian (1987).

De entre os outros métodos matriciais, destacam-se os que foram propostos por Chan e Milner (1982), Kusiak (1986) e Kusiak e Chow (1987).

As principais limitações dos métodos matriciais resultam de que, por um lado, a solução final é fortemente dependente da configuração inicial da matriz de incidência e, por outro, uma vez que a identificação das famílias de máquinas e das famílias de

componentes é feita por inspecção visual da MDB, a identificação destas pode ser problemática, em particular se a MDB não é perfeita.

### 6.3.1.2 Métodos hierárquicos de 'clustering'

Os métodos hierárquicos de 'clustering' utilizam uma matriz de semelhanças máquinas-máquinas (McAulley (1972)) que se obtém da matriz de incidência. Cada elemento daquela matriz representa uma medida de semelhança entre um par de máquinas, que é função do número de componentes (i) processados simultaneamente em ambas as máquinas ou (ii) processados somente numa delas. É também possível definir-se uma matriz de semelhanças entre componentes, a qual é formada de um modo idêntico ao descrito para a matriz de semelhanças entre máquinas.

As medidas de semelhança entre máquinas mais frequentemente utilizadas são apresentadas na Tabela 6.2 (adaptada de Sarker (1996)), onde:

- $a_{ij}$  é o elemento correspondente à linha  $i$  e coluna  $j$  da matriz de incidência máquinas-componentes ( $i = 1, \dots, M$  e  $j = 1, \dots, P$ )
- $d'_{ij}(a_{ik}, a_{jk}) = \begin{cases} 1, & \text{se } a_{ik} = a_{jk} = 1 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- $d''_{ij}(a_{ik}, a_{jk}) = \begin{cases} 1, & \text{se } a_{ik} = a_{jk} = 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- $n_i$  = número de máquinas visitadas pelo componente  $i$
- $n_{ij}$  = número de máquinas visitadas pelos componentes  $i$  e  $j$

Depois de obtida a matriz de semelhanças, a generalidade dos algoritmos hierárquicos de 'clustering' segue os seguintes passos:

- (i) Cada máquina é considerada inicialmente um 'cluster' independente.
- (ii) Selecciona-se o par de máquinas correspondente ao valor mais elevado da matriz de semelhança para formar um 'cluster' inicial. Este valor define um nível de semelhança inicial.

Tabela 6.2 - Medidas de semelhança entre máquinas mais frequentemente utilizadas

Coefficiente	Expressão	Domínio	Referência
McAuley	$\frac{\sum_k d'(a_{ik}, a_{jk})}{\sum_k d''(a_{ik}, a_{jk})}$	[0,1]	McAuley (1972)
Dutta et al	$n_i + n_j - 2 \cdot n_{ij}$	Inteiro	Dutta et al (1986)
Jaccard	$\frac{n_{ij}}{(n_i + n_j + n_{ij})}$	[0,1]	Leskowski et al (1987)
Kusiak e Chow	$n_{ij}$	Inteiro	Kusiak e Chow (1987)
Dice-Sorensen	$\frac{2 \cdot n_{ij}}{n_i + n_j}$	[0,1]	Chu e Pan (1988)

(iii) O nível de semelhança é diminuído e todos os 'clusters' com coeficientes de semelhança não inferiores a este nível são agregados para formar novos 'clusters'. Dois critérios são normalmente utilizados para definir o coeficiente de semelhança entre um par de 'clusters'. No critério SLC - 'Single Linkage Clustering' - o coeficiente de semelhança entre um par de 'clusters' corresponde ao menor coeficiente de semelhança entre quaisquer dois dos seus membros. No critério ALC - 'Average Linkage Clustering' - o coeficiente de semelhança entre um par de 'clusters' corresponde à média dos coeficientes de semelhança entre todos os membros dos dois 'clusters'.

(iv) O passo (iii) é repetido até que se forme um único 'cluster'.

Este procedimento pode ser representado por um diagrama em árvore ('dendogram') no qual os ramos representam máquinas ou famílias de máquinas ('clusters') e as linhas horizontais que ligam estes ramos representam os níveis de semelhança nos quais se formaram famílias de máquinas ('clusters'). Na Figura 6.1 apresenta-se um exemplo de um destes diagramas. Um corte horizontal deste diagrama representa uma afectação possível de máquinas a famílias de máquinas. No exemplo considerado, um corte efectuado para um valor do nível de semelhança de 0.10 conduz à formação de três famílias de máquinas, constituídas pelas máquinas {1, 2, 5, 9}, {4, 6, 8} e {3, 7}.

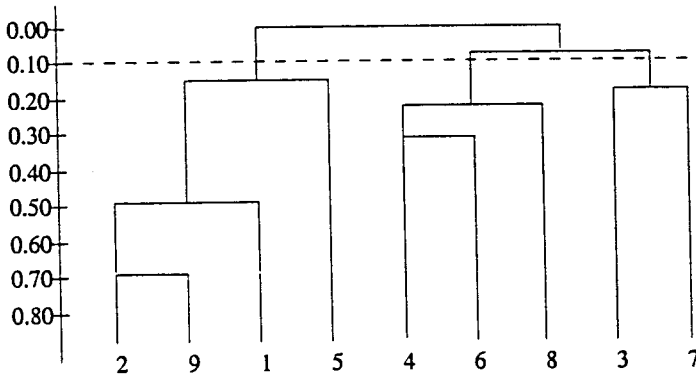


Figura 6.1 - Exemplo de um diagrama em árvore gerado por um algoritmo hierárquico de 'clustering'

Obtida uma solução para o problema da formação de famílias de máquinas, cada componente é afectado à célula que contém as máquinas que executam um maior número de operações nesse componente.

Seifoddini e Hsu (1994) apresentam um estudo comparativo dos coeficientes de semelhança e de algoritmos de 'clustering'. Shafer e Rogers (1993) e Sarker (1996) revêm um conjunto de medidas de semelhança.

### 6.3.1.3 Métodos não-hierárquicos de 'clustering'

Os algoritmos mais difundidos que utilizam os métodos não-hierárquicos de 'clustering' são os designados por ZODIAC (Chandrasekharan e Rajagopalan (1987)) e GRAFICS (Srinivasan e Narendran (1991) e Srinivasan (1994)). Estes métodos são semelhantes e a sua natureza será ilustrada recorrendo ao método GRAFICS, que é o de utilização mais comum.

Começa-se por efectuar uma partição inicial das máquinas em famílias. Cada família corresponde a uma volta ('tour') do problema de afectação de máquinas a máquinas, no qual o objectivo é o de maximização da semelhança total entre máquinas afectadas (o coeficiente de semelhança utilizado foi o definido por Kusiak e Chow(1987) - ver Tabela 6.2).

Esta partição inicial das máquinas é depois utilizada para formar as famílias de componentes que melhor se ajustam a cada uma das famílias de máquinas definidas, de acordo com um determinado critério de 'clustering'. No caso do algoritmo GRAFICS tal critério é o da regra da densidade máxima: um componente é afectado à família de máquinas que realiza o maior número de operações sobre esse componente. A partir das famílias de componentes assim obtidas passa-se à redefinição das famílias de máquinas, usando de novo o critério de 'clustering' baseado na regra da densidade máxima: agora, uma máquina é afectada à família de componentes que envolve a realização de um maior número de operações nessa máquina.

O algoritmo GRAFICS prossegue redefinindo sucessivamente famílias de componentes e de máquinas, pelo processo indicado, até se registar uma das seguintes condições de paragem: (i) no final de uma iteração, correspondente à redefinição das famílias de componentes ou de máquinas, tais famílias não são alteradas ou (ii) no final de uma daquelas iterações o número de elementos excepcionais é nulo ou não diminui relativamente ao início da iteração.

Estes métodos têm a vantagem de, na solução, serem identificadas tanto as famílias de máquinas como as famílias de componentes. A sensibilidade à partição inicial e ao critério de 'clustering' utilizado são as principais desvantagens destes métodos.

#### 6.3.1.4 Modelos de programação matemática

Diferentes modelos de programação matemática têm também sido apresentados quer para a resolução conjunta dos problemas de formação de famílias de componentes e de famílias de máquinas (problema da formação de células de produção) quer para a resolução isolada de cada um destes mesmos problemas.

Kusiak et al (1986) apresentaram um modelo de programação binária quadrática para a formação de famílias de componentes. Neste modelo, o número de famílias de componentes e a dimensão de cada uma destas são pré-definidos e o objectivo é a maximização da semelhança dos componentes de cada família.

Dada a complexidade computacional associada à resolução deste problema, várias aproximações têm sido propostas. Entre estas inclui-se o modelo da p-mediana (Mulvey e Crowder (1979) e Kusiak (1985)), o qual, por estar associado a uma das

heurísticas incorporadas no SAD, é descrito na secção 6.5.1.2. Note-se, no entanto, que a heurística apresentada resolve o problema da formação de células de produção.

Boctor (1991) propôs um modelo de programação binária para o problema da formação de células de produção que minimiza o número de elementos excepcionais. Este modelo pressupõe a definição de um limite superior para a dimensão das células de produção (igual para todas as células) e a pré-especificação do número de células. Um algoritmo baseado na técnica de recristalização simulada foi também proposto por este autor para a resolução de problemas de grandes dimensões.

Viswanathan (1995) propôs um modelo de programação inteira quadrática para o problema da formação de células de produção e uma heurística que visa obter a solução para este modelo. O objectivo é minimizar simultaneamente o número de elementos excepcionais e o número de zeros em cada bloco da MDB. O modelo permite fixar o número de blocos da MDB e definir limites superiores e inferiores para o número de máquinas numa célula de produção e para o número de componentes numa família.

Outros modelos de programação matemática para o problema da formação de células de produção foram revistos por Crama e Oosten (1996). Estes autores propuseram ainda um modelo para a diagonalização por blocos da matriz de incidência, o qual permite incorporar diferentes restrições e diferentes critérios de qualidade da solução.

### 6.3.1.5 Métodos de pesquisa

Na aplicação mais comum de algoritmos de pesquisa ao problema da formação de células de produção procura-se converter a matriz de incidência numa MDB, permutando linhas e colunas, por forma a maximizar uma medida de eficiência de 'clustering'. A eficiência de 'clustering' de uma matriz de incidência mede a qualidade da sua forma diagonal por blocos como solução para o problema da formação de células de produção.

Shargal et al (1995) avaliaram o comportamento de três algoritmos de pesquisa: (i) SA - 'Simulated Annealing', (ii) SD - 'Steepest Descent' e (iii) MSD - 'Multiple Steepest Descent', com base em seis medidas diferentes de eficiência de 'clustering'.

Um algoritmo de recristalização simulada foi proposto por Chen et al (1995) para o problema de minimização do número de elementos excepcionais na MDB, no qual o número máximo de máquinas por células é pré-definido. Uma das vantagens apontadas pelos autores é a de que o algoritmo pode ser utilizado com matrizes binárias ou não-binárias, o que permite incorporar outros factores relevantes nas decisões de formação de células de produção.

Cheng et al (1996) formularam o problema da formação de células de produção como um problema de programação binária quadrática, com o objectivo de minimizar a dissemelhança total entre as máquinas de cada célula. Esta formulação requer a pré-especificação do número de células e do número máximo de máquinas nas células. Um algoritmo de pesquisa de uma árvore binária truncada foi proposto por estes autores para a resolução deste problema. Uma vez especificada a composição de cada célula, cada componente é afectado à célula que maximiza o número de operações efectuadas nesse componente, definido-se assim as famílias de componentes.

### 6.3.1.6 Outros métodos

O problema da formação das células de fabrico tem motivado o interesse da comunidade científica nos últimos anos. Prova disso é o número de diferentes métodos que têm sido aplicados à resolução deste problema. Na Tabela 6.3 apresentam-se alguns dos restantes métodos baseados na matriz de incidência.

Tabela 6.3 - Outros métodos para o problema da formação de células

Método	Referência
Teoria dos grafos	Rajagopalan e Batra (1975)
Reconhecimento de padrões	Wu et al (1986)
'Multidimensional Scaling'	Mukhopadhyay et al (1994)
Redes neuronais	Chen e Cheng (1995)
Algoritmos genéticos	Gupta et al (1996)

Na generalidade, estes métodos baseiam-se em pré-condições muito rígidas ou requerem que a identificação das células de produção seja efectuada por inspecção visual da MDB.



### 6.3.2 Métodos baseados na matriz de fluxos entre máquinas

Uma desvantagem da utilização da matriz de incidência na modelização do problema de formação de células de produção é que esta matriz representa somente relações entre máquinas e componentes, não considerando aspectos tão importantes como as sequências de operações ou as quantidades a produzir de cada componente.

É bom lembrar que o objectivo principal do problema de formação de células de produção é a anulação do fluxo intercelular. No entanto, uma vez que na grande maioria dos casos este objectivo é de difícil concretização, admite-se a possibilidade de existir algum fluxo intercelular, procurando-se que este seja reduzido ao mínimo. Neste caso, a informação fornecida pela matriz de incidência não é suficiente e a sua substituição pela matriz de fluxos entre máquinas pode contribuir para a obtenção de soluções de melhor qualidade para o problema da formação de células de produção.

Considere-se, por exemplo, a matriz de incidência (na sua forma diagonal por blocos) apresentada na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Exemplo de uma matriz de incidência máquinas-componentes

		Componente								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Máquina	Célula	Família 1				Família 2			Família 3	
1	1	1	1	1	1	1				
2			1	1						
3	2					1	1			
4						1		1		
5	3					1			1	1

Da análise desta matriz conclui-se que o componente 5 terá de ser processado nas três células (1, 2 e 3), gerando assim fluxo intercelular. Uma vez que a matriz de incidência não fornece qualquer informação relativa à intensidade de fluxo não é possível saber se o fluxo intercelular gerado pelo componente 5 é importante ou não.

Ainda relativamente a este exemplo, considerem-se as seguintes sequências de máquinas utilizadas no processamento do componente 5: (i) {1,3,4,5} e (ii) {3,1,4,5}. A utilização isolada da MDB não permite verificar que a sequência (i) conduz a duas

operações de transporte intercelular e uma operação de transporte intracelular, ao passo que a sequência (ii) origina três operações de transporte intercelular e nenhuma operação de transporte intracelular.

A estes aspectos acresce ainda um outro de grande importância. Em grande parte dos sistemas de produção os componentes não podem ser vistos isoladamente, uma vez que se combinam em operações de montagem para dar origem a outros componentes. A matriz de incidência, apresentando isoladamente, em cada coluna, as operações efectuadas sobre cada componente, não tem em conta este facto.

Apesar do elevado número de referências encontradas na literatura para o problema da formação de células de fabrico, apenas um número muito restrito incorpora a matriz de fluxo entre máquinas como um dado do problema. O trabalho de Okogbaa et al (1992) é uma dessas referências e uma versão da heurística proposta por estes autores foi incorporada no SAD, sendo descrita com detalhe na secção 6.5.2.

Wu e Salvendy (1993) propuseram um modelo para a minimização do fluxo intercelular no qual a dimensão das células é limitada superiormente. Para a obtenção da solução para este modelo propuseram dois algoritmos de optimização de redes para a resolução do problema.

Um outro modelo proposto por Heragu e Gupta (1994), também para a minimização do fluxo intercelular, contempla aspectos como a duplicação de máquinas e o fluxo de materiais entre máquinas e incorpora um conjunto de restrições relacionadas com a capacidade das máquinas, a dimensão máxima das células, o número de células e requisitos tecnológicos e de segurança.

Recentemente, outras abordagens que incorporam dados relativos aos fluxos entre máquinas foram propostas, nelas se incluindo os trabalhos de Verma e Ding (1995) e Boctor (1996).

## 6.4 Problema da formação de células de produção: medidas de qualidade das soluções

Várias medidas têm sido utilizadas para aferir a qualidade das soluções para o problema da formação de células de produção. Nos casos em que o sistema de produção é representado por uma matriz de incidência, a solução do problema da formação de células é dada por uma matriz binária na forma diagonal por blocos, a qual se pretende que tenha o menor número possível de elementos excepcionais.

Uma medida que entra em conta com a proporção do número de elementos excepcionais relativamente ao número total de elementos unitários na MDB foi proposta por Seifoddini e Hsu (1994). Esta medida, designada por índice de capacidade de agrupamento ou GCI ('Grouping Capability Index'), é dada por:

$$\text{GCI} = 1 - \frac{\text{Número de elementos excepcionais na MDB}}{\text{Número total de elementos unitários na MDB}}$$

Note-se, contudo, que esta medida só pode ser utilizada nos casos em que se comparam soluções com o mesmo número de células ou em que o número de células é pré-fixado. Estas limitações derivam do facto de, para um mesmo problema, esta medida favorecer, em geral, as soluções com menor número de células, uma vez que estas soluções conduzem invariavelmente a um menor número de elementos excepcionais. Em particular, a definição de uma única célula conduz à inexistência de elementos excepcionais e, conseqüentemente, a um valor nulo para GCI.

Outras alternativas têm sido propostas, nas quais se procura sopesar o número de elementos excepcionais (reveladores da existência de fluxo intercelular) e o número de zeros nos blocos da MDB (associados à subutilização das máquinas nas células). Uma destas medidas, designada por eficiência do agrupamento ('Grouping Efficiency'), foi proposta por Chandrasekharan e Rajagopalan (1989), sendo definida por:

$$\eta = q.E_1 + (1-q).E_2,$$

onde

- $q$  = peso arbitrário definido pelo decisor ( $0 \leq q \leq 1$ ),

- $E_1 = \frac{\text{Número de elementos unitários nos blocos da MDB}}{\text{Número total de elementos nos blocos da MDB}}$ ,
- $E_2 = \frac{\text{Número de elementos nulos fora dos blocos da MDB}}{\text{Número total de elementos fora dos blocos da MDB}}$

Uma crítica comum a esta medida é a dificuldade associada à escolha do peso  $q$ . Se se lhe atribuir um valor muito pequeno, o termo em  $E_2$  tende a ser dominante, pelo que as soluções eficientes são aquelas que têm muitos zeros fora dos blocos da MDB, ou seja, as que têm poucos elementos excepcionais. Alternativamente, se se atribuir a  $q$  um valor muito elevado, o termo em  $E_1$  tende a ser dominante e o critério preponderante de eficiência passa a ser a densidade de elementos unitários nos blocos da MDB. Da análise das referências conhecidas que utilizam esta medida, parece ser universalmente aceite um valor de  $q=0.5$ .

Uma outra deficiência desta medida reside no facto de, para um valor não nulo de  $q$ , só se conseguir uma eficiência de agrupamento de 100% quando os blocos da MDB se encontram totalmente preenchidos com elementos unitários, ou seja, quando todos os componentes associados a cada célula são processados em todas as máquinas da célula.

Uma medida alternativa, designada por eficácia do agrupamento ('Grouping Efficacy'), foi proposta por Kumar e Chandrasekharan (1990), sendo definida por:

$$\tau = \frac{e - E}{e + B},$$

onde

- $e$  - número de elementos unitários na MDB,
- $E$  - número de elementos excepcionais na MDB,
- $B$  - número de zeros nos blocos da MDB.

Esta medida elimina a necessidade de definição do peso  $q$ , mas a obtenção de uma eficácia do agrupamento perfeita ( $\tau=100\%$ ) também exige que os blocos da MDB estejam completamente preenchidos por elementos unitários.

Nem esta medida nem a eficiência do agrupamento permitem uma avaliação criteriosa da qualidade das soluções para o problema da formação de células de produção; tal resulta de estas medidas tentarem estabelecer um equilíbrio entre um critério que é primordial na avaliação de um sistema de produção celular (traduzido na

MDB pelo número de elementos excepcionais) e um outro que, sendo importante, deveria ser colocado num plano muito inferior (a densidade de elementos unitários nos blocos). O exemplo apresentado na Tabela 6.5 permite ilustrar esta afirmação. Nesta tabela apresenta-se uma matriz de incidência na sua forma diagonal por blocos, destacando-se cada um dos blocos. É óbvio que, do ponto de vista do problema da formação de células, só se teria vantagem em afectar a máquina 5M4 à célula constituída pelas máquinas 2M0, 1M2 e 4M4. No entanto essa afectação provoca uma redução nos valores da eficácia do agrupamento e da eficiência do agrupamento (neste caso, só para valores de  $q$  superiores a 0.35).

Tabela 6.5 - Exemplo de uma matriz de incidência

	A0	A3	A4	A5	A8	A13	A16	A19	A20	A21	P1	A6	A14	A15	P0	A2	A7	A9	A10	A17	A18	P2	A1	A11	A12
2M0	1		1		1		1	1																	
1M2	1	1		1		1	1	1	1	1	1					1	1		1						1
4M4						1	1	1					1										1		
2M4	1											1	1	1										1	
2M3												1	1	1			1								1
3M0			1															1	1	1	1				1
1M0									1				1			1					1				
2M1																1	1	1	1			1			
1M3	1																	1			1	1			1
1M1								1			1							1						1	1
1M4																									1
5M4				1	1	1																			1
3M4																									1

Numa análise comparativa de todas estas medidas, Seifoddini e Djassemi (1994 e 1996) concluem que nenhuma delas é consistente na avaliação do desempenho de um sistema de produção celular e sugerem o desenvolvimento de uma medida baseada nos tempos de processamento das operações.

A minimização do fluxo intercelular é um dos principais objectivos na formação de células de produção. Nenhuma das medidas anteriores permite avaliar directamente a qualidade das soluções em termos do fluxo intercelular. Heragu e Gupta (1994) definiram uma medida de ineficiência de fluxo (a designação original - 'Flow Efficiency' - foi modificada para se caracterizar de forma mais adequada esta medida) que determina a proporção do fluxo total que é intercelular:

$$\text{Ineficiência do fluxo} = \frac{\text{fluxo intercelular}}{\text{fluxo intercelular} + \text{fluxo intracelular}}$$

Note-se que, quando se comparam duas soluções distintas, quanto menor for o valor da ineficiência do fluxo melhor será a qualidade da solução. No entanto, se se considerar somente uma célula de produção não existirá fluxo intercelular e o valor da ineficiência do fluxo será nulo. Assim, esta medida só poderá ser utilizada quando o número de células for pré-fixado.

No SAD proposto o decisor visualiza, para cada solução, os valores da eficácia de agrupamento, do índice de capacidade de agrupamento e da ineficiência de fluxo.

## 6.5 Heurísticas incorporadas no SAD

A inclusão de duas heurísticas neste módulo do SAD permite ao utilizador resolver o problema da formação de células de fabrico utilizando duas abordagens que se distinguem primordialmente pelos dados de entrada utilizados: (i) matriz de incidência e (ii) matriz de fluxos.

Na selecção destas duas heurísticas foram tomadas em conta as vantagens que derivam de:

- (i) não ser necessário pré-definir o número e a dimensão das células,
- (ii) agregar as máquinas (ou componentes) em função da família que se espera que venham a formar (ao contrário de alguns algoritmos nos quais as máquinas ou componentes são agregados aos pares, o que pode conduzir a famílias com elementos muito dissemelhantes),
- (iii) a solução final ser completa, ou seja, incluir tanto as famílias de máquinas como as de componentes (dispensando o utilizador de inspeccionar visualmente a MDB para formar as famílias).

Os testes computacionais, apresentados pelos autores de cada uma das heurísticas, revelam que estas se situam entre as que conduzem a soluções de melhor qualidade, com um esforço computacional aceitável.

### 6.5.1 Heurística baseada num método não-hierárquico de 'clustering'

A heurística que se apresenta nesta secção é baseada numa outra desenvolvida por Ganesh e Srinivasan (1994), a qual resolve o problema da formação de células de produção por forma a maximizar a eficácia do agrupamento da MDB (introduzida na secção 6.4). A heurística utiliza basicamente um método não-hierárquico de 'clustering' em que a partição inicial das máquinas em famílias de máquinas é derivada de uma solução aproximada para o problema da p-mediana.

A partição inicial das máquinas é depois utilizada para formar as famílias de componentes que melhor se ajustam a cada uma das famílias de máquinas definidas, usando o critério de 'clustering' baseado na regra da densidade máxima (ver secção 6.3.1.3). A partir das famílias de componentes assim obtidas passa-se à redefinição das famílias de máquinas, recorrendo-se ao mesmo critério de 'clustering'.

A heurística prossegue redefinindo sucessivamente as famílias de componentes e de máquinas, pelo processo indicado, até que, no final de uma iteração correspondente à redefinição de uma família de componentes ou de máquinas, a medida de eficácia de agrupamento não aumenta relativamente ao valor que tinha no início da iteração.

Nas secções seguintes introduzem-se a notação e os conceitos utilizados na heurística e descrevem-se os procedimentos para (i) a obtenção de uma solução inicial para o problema da formação de células de fabrico (a qual corresponde à obtenção da partição inicial das máquinas em famílias e à afectação de componentes a estas famílias de máquinas) e (ii) o melhoramento desta solução inicial. A descrição detalhada destes procedimentos em linguagem algorítmica foi remetida para o Apêndice F.





• **Matriz de dissemelhanças (D)**

Cada elemento,  $d_{ij}$  ( $i, j = 1, \dots, M$ ), da matriz de dissemelhanças representa uma medida de dissemelhança entre um par de máquinas, que é função do número de componentes (i) processados simultaneamente em ambas as máquinas ou (ii) processados somente numa delas.

As medidas de dissemelhança entre um par de máquinas ( $i, j$ ) mais frequentemente utilizadas são apresentadas na Tabela 6.7 (adaptada de Sarker (1996)), onde:

- $a_{ik}$  é o elemento correspondente à linha  $i$  e coluna  $k$  da matriz de incidência máquinas-componentes ( $i = 1, \dots, M$  e  $k = 1, \dots, P$ ),

$$\delta(a_{ik}, a_{jk}) = \begin{cases} 1, & \text{se } a_{ik} \neq a_{jk} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Tabela 6.7 - Coeficientes de dissemelhança mais frequentemente utilizados

Coeficiente	Expressão	Referência
Minkowski	$\left( \sum_k  a_{ik} - a_{jk} ^p \right)^{1/p}$	Arthanari e Dodge (1981)
Euclideano	$\left[ \sum_k \frac{(a_{ik} - a_{jk})^2}{P} \right]^{1/2}$	Sarker (1996)
Hamming	$\sum_k \delta(a_{ik}, a_{jk})$	Sarker (1996)

Uma revisão de um conjunto mais alargado de medidas de dissemelhança pode ser encontrada em Shafer e Rogers (1993) e Sarker (1996).

A heurística que é aqui apresentada utiliza o coeficiente de dissemelhança de Minkowski com  $p=1$ . Assim, cada elemento,  $d_{ij}$  ( $i, j = 1, \dots, M$ ), da matriz de dissemelhança é definido por:

$$d_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^P |a_{ik} - a_{jk}| & , \text{ se } i \neq j \\ \infty & , \text{ se } i = j \end{cases}$$

Cada elemento  $d_{ij}$  (com  $i \neq j$ ) da matriz de dissemelhanças utilizada na heurística corresponde então ao número total de componentes que são processados em apenas uma das máquinas  $i$  e  $j$ .

A matriz de dissemelhanças correspondente à matriz de incidência da Tabela 6.6 apresenta-se na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 - Matriz de dissemelhanças para o problema analisado

	1M0	2M0	3M0	1M1	2M1	1M2	1M3	2M3	1M4	2M4	3M4	4M4	5M4
1M0		10	7	9	4	14	9	6	6	8	8	8	8
2M0	10		9	9	10	12	9	10	6	8	8	6	6
3M0	7	9		8	5	15	8	7	7	11	7	11	9
1M1	9	9	8		9	13	10	7	5	9	3	7	9
2M1	4	10	5	9		12	5	8	6	10	8	10	8
1M2	14	12	15	13	12		13	16	14	16	14	12	12
1M3	9	9	8	10	5	13		11	5	7	7	11	9
2M3	6	10	7	7	8	16	11		6	6	6	8	8
1M4	6	6	7	5	6	14	5	6		4	2	6	4
2M4	8	8	11	9	10	16	7	6	4		6	8	8
3M4	8	8	7	3	8	14	7	6	2	6		6	6
4M4	8	6	11	7	10	12	11	8	6	8	6		6
5M4	8	6	9	9	8	12	9	8	4	8	6	6	

• Vector de dissemelhanças mínimas (DMIN)

Cada elemento,  $dmin_i$  ( $i = 1, \dots, M$ ), do vector de dissemelhanças mínimas representa a menor dissemelhança que a máquina correspondente à linha  $i$  tem com qualquer uma das outras máquinas:

$$dmin_i = \min_{\substack{j=1, \dots, M \\ j \neq i}} \{d_{ij}\}, \quad i = 1, \dots, M$$

O vector de dissemelhanças mínimas correspondente à matriz de dissemelhanças da Tabela 6.8 é então:

$$DMIN = [4, 6, 5, 3, 4, 12, 5, 6, 2, 4, 2, 6, 4]^T$$

Na Tabela 6.8 encontram-se assinalados os elementos que, para cada linha, tomam o valor mínimo das dissemelhanças.

- **Vector MCNO**

Inicialmente, quando nenhuma máquina esteja ainda afectada a qualquer célula, cada elemento  $mcno_j$  ( $j = 1, \dots, M$ ) do vector MCNO corresponde ao número de elementos assinalados na coluna  $j$  da matriz de dissemelhanças. Para o exemplo correspondente à matriz de dissemelhanças da Tabela 6.8 o vector MCNO é dado inicialmente por

$$MCNO=[2, 2, 0, 0, 4, 0, 0, 0, 7, 1, 4, 2, 3].$$

Por exemplo, o primeiro elemento deste vector é igual a dois, uma vez que na primeira coluna da matriz de dissemelhanças, correspondente à máquina 1M0, estão assinalados dois elementos. Isto significa que há duas máquinas (2M1 e 2M3) para as quais a dissemelhança com a máquina 1M0 é mínima de entre as dissemelhanças de cada uma dessas máquinas com todas as restantes.

Sempre que se afectam máquinas a células, o vector MCNO é actualizado, vindo o seu  $j$ -ésimo elemento definido nos seguintes termos:

- (i) quando a máquina  $j$  se encontra afectada a uma célula,  $mcno_j=0$ ,
- (ii) no caso contrário,  $mcno_j$  é igual à soma dos elementos assinalados na coluna  $j$  da matriz de dissemelhanças que não correspondam a máquinas já afectadas a células. Por exemplo, numa fase em que a máquina 2M1 já estivesse afectada a uma célula e a máquina 2M3 não estivesse afectada a qualquer célula, o primeiro elemento do vector MCNO seria igual a um (e não a dois como anteriormente).

- **Eficácia do agrupamento ( $\tau$ )**

A medida de eficácia do agrupamento utilizada na heurística como critério de optimização difere da apresentada na secção 6.4, uma vez que se introduziu no cálculo desta medida um parâmetro  $K$  ( $1 \leq K \leq 10000$ ) que permite ao decisor controlar o peso da subocupação de células. Assim, utilizando a notação introduzida anteriormente:

$$\tau = \frac{e - E}{e + \frac{B}{K}} \quad (1)$$

Note-se que quanto maior for o valor de  $K$  mais penalizada é a existência de elementos excepcionais relativamente à subocupação de células. Para um valor muito elevado de  $K$ , esta medida aproxima-se do índice de capacidade de agrupamento definido na secção 6.4 e, uma vez que na heurística que se apresenta não se pré-define o número de células, poder-se-á notar uma tendência para a criação de um pequeno número de células de dimensão excessiva (no limite, uma única célula). Se assim suceder, haverá que baixar o valor de  $K$ . No SAD é dada ao utilizador a possibilidade de gerar e armazenar diferentes soluções para diferentes valores de  $K$ , o que lhe permitirá escolher, de entre aquelas soluções, a que corresponder ao melhor compromisso.

### 6.5.1.2 Procedimento para a obtenção de uma solução inicial

A partição inicial das máquinas em famílias de máquinas deriva de uma solução aproximada para o problema da  $p$ -mediana (Mulvey e Crowder (1979) e Kusiak (1985)).

Para definir este problema introduza-se a seguinte notação:

- $M$  - número de máquinas,
- $d_{ij}$  - dissemelhança entre as máquinas  $i$  e  $j$  ( $i, j = 1, \dots, M$ )  
( $d_{ij} \geq 0$  e, se  $i = j$ , então  $d_{ij} = \infty$ ),
- $p$  - número de famílias de máquinas a formar,
- $x_{ij} = \begin{cases} 1 & , \text{ se a máquina } i \text{ pertence à família de máquinas } j \\ 0 & , \text{ no caso contrário.} \end{cases}$

O problema da  $p$ -mediana para a formação de famílias de máquinas define-se então nos seguintes termos:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M d_{ij} \cdot x_{ij} \quad (2a)$$

$$\text{sujeito a } \sum_{j=1}^M x_{ij} = 1 \quad , i = 1, \dots, M \quad (2b)$$

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} = p \quad (2c)$$

$$x_{ij} \leq x_{ji} \quad , i, j = 1, \dots, M \quad (2d)$$

$$x_{ij} \text{ binária} \quad , i, j = 1, \dots, M \quad (2e)$$

A função objectivo (2a) minimiza a soma das dissemelhanças. A restrição (2b) garante que cada máquina só é afectada a uma família. A restrição (2c) garante a afectação de  $p$  máquinas nucleares a  $p$  células. Note-se que cada célula recebe um número idêntico ao da respectiva máquina nuclear. A restrição (2d) garante que uma máquina só é afectada a uma célula quando esta tiver sido já definida (através da identificação da respectiva máquina nuclear). A última restrição (2e) garante a integralidade da solução.

Uma vez que o problema da  $p$ -mediana é NP-completo, quando a sua dimensão for grande torna-se necessário recorrer a técnicas heurísticas para a sua resolução.

A heurística que se apresenta nesta secção começa por identificar sequencialmente  $p$  ( $0 \leq p \leq M$ ) máquinas nucleares (tais máquinas servem de base à formação de  $p$  células), recorrendo para tal ao cálculo de minorantes para o modelo da  $p$ -mediana. Estes minorantes são calculados de acordo com o procedimento que a seguir se expõe.

De acordo com a heurística que aqui se apresenta, o processo de selecção de máquinas nucleares não incide senão nas máquinas  $j$  tais que  $mcno_j \neq 0$ . Tal procedimento é justificável uma vez que, de acordo com a definição do vector MCNO, apresentada na secção anterior,  $mcno_j = 0$  implica que

- (i) a máquina  $j$  já foi previamente afectada a uma célula e portanto não se pode converter em máquina nuclear de outra célula ou
- (ii) quando tal não suceda, se a máquina  $j$  se convertesse numa máquina nuclear de uma célula, então todas as outras máquinas ainda não afectadas a células seriam preferencialmente atraídas por outras células.

Para cada célula, considere-se a soma das dissemelhanças entre a máquina nuclear da célula e as máquinas não nucleares que a ela pertencem. Seja  $D$  o valor que se obtém adicionando, para todas as células, as somas anteriormente definidas.

Supondo que  $k$  é o índice da primeira máquina seleccionada como nuclear, pode obter-se um minorante de  $D$  calculando

$$LB_k = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k \\ mcno_i \neq 0}}^M d \min_i,$$

uma vez que qualquer máquina  $i$ , tal que  $mcno_i \neq 0$ , pode servir de base à formação de uma nova célula (à excepção, obviamente, da máquina  $k$ ).

Um minorante com esta mesma definição será utilizado quando já se tiverem formado  $N$  células e  $k$  é a máquina seguinte a ser seleccionada como nuclear, uma vez que, para qualquer máquina  $i$  (nuclear ou não) afectada a uma célula,  $mcno_i = 0$ .

Se uma máquina  $k$  não tiver dissemelhança mínima com nenhuma outra máquina ou já tiver sido afectada a uma célula - isto é, se  $mcno_k = 0$  - então a máquina  $k$  não será candidata a nuclear. Neste caso, far-se-á  $LB_k = \infty$ .

No processo de selecção da primeira máquina nuclear ou das máquinas nucleares seguintes, calcula-se um minorante de  $D$  considerando cada uma das  $M$  máquinas como candidata a nuclear, formando assim o vector  $LB$ , de dimensão  $M$ . Selecciona-se para máquina nuclear aquela que corresponde ao elemento do vector  $LB$  com valor mais baixo ou, em caso de empate, aquela que corresponde ao elemento do vector  $MCNO$  com valor mais alto (o que significa que tem dissemelhança mínima com maior número de máquinas). Se o empate persistir é seleccionada a máquina que, na matriz de dissemelhanças, ocupa uma posição correspondente ao índice mais baixo.

Considere-se, a título de exemplo, a selecção da primeira máquina nuclear correspondente ao exemplo que tem vindo a ser discutido. Inicialmente o vector  $MCNO$  é, como se viu na secção anterior, dado por

$$MCNO = [2, 2, 0, 0, 4, 0, 0, 0, 7, 1, 4, 2, 3].$$

Calculando o vector  $LB$  obtém-se

$$LB = [27, 25, \infty, \infty, 27, \infty, \infty, \infty, 29, 27, 29, 25, 27].$$

Os elementos do vector  $LB$  que tomam o valor mais baixo são  $LB_2$  e  $LB_{12}$ . Para se estabelecer mais facilmente a correspondência directa destes elementos às máquinas respectivas, substituir-se-á o índice  $k$  ( $k = 1, \dots, M$ ) pela designação das máquinas que ocupam a posição correspondente na matriz de dissemelhanças. Assim, os elementos  $LB_2$  e  $LB_{12}$  receberão a designação de  $LB_{2M0}$  e  $LB_{4M4}$ . Dado que se verifica um empate entre estes elementos do vector  $LB$ , comparam-se os valores correspondentes do vector  $MCNO$ , obtendo-se um novo empate ( $mcno_{2M0} = mcno_{4M4} = 2$ ). Aplicando o procedimento anteriormente enunciado para esta situação de duplo empate,

selecciona-se a máquina 2M0, que na matriz de dissemelhanças ocupa uma posição que corresponde a um índice inferior.

Uma vez determinada a máquina nuclear da célula (designa-se por  $m$  essa máquina) afectam-se a essa célula todas as máquinas  $m'$  ainda não afectadas a outras células, tais que  $m$  tenha dissemelhança mínima com  $m'$  (isto é,  $d_{mm'} = d_{\min_m}$ ) e, simultaneamente,  $m'$  tenha dissemelhança mínima com  $m$  (isto é,  $d_{mm'} = d_{\min_{m'}}$ ).

No exemplo que tem vindo a ser discutido, as máquinas 1M2 e 4M4 têm dissemelhança mínima com a máquina 2M0, mas esta máquina tem dissemelhança mínima com a máquina 4M4 e não com a máquina 1M2. Deste modo, a máquina 4M4 é afectada à célula 1.

Este passo termina a iteração que consiste em definir uma nova máquina nuclear e afectar-lhe máquinas não nucleares. A iteração será repetida até que todos os elementos do vector MCNO sejam nulos, ou seja, até se esgotarem as máquinas candidatas a nucleares.

Para o exemplo que se tem vindo a utilizar, ilustra-se seguidamente este procedimento para cada uma das restantes células.

(i) Formação da célula 2

$$\text{MCNO} = [2, 0, 0, 0, 4, 0, 0, 0, 5, 1, 3, 0, 1]$$

$$\text{LB} = [39, \infty, \infty, \infty, 39, \infty, \infty, \infty, 41, 39, 41, \infty, 35]$$

A máquina escolhida como nuclear para a célula é 2M4 ( $\text{LB}_{1M0} = \text{LB}_{2M1} = \text{LB}_{2M4}$ , mas  $\text{mcno}_{2M4} = 1$  é menor do que  $\text{mcno}_{1M0} = 2$  e  $\text{mcno}_{2M1} = 4$ ) e nenhuma outra máquina é afectada a esta célula.

(ii) Formação da célula 3

$$\text{MCNO} = [2, 0, 0, 0, 4, 0, 0, 0, 4, 0, 3, 0, 1]$$

$$\text{LB} = [43, \infty, \infty, \infty, 43, \infty, \infty, \infty, 45, \infty, 45, \infty, 43]$$

A máquina escolhida como nuclear para esta célula é 5M4 ( $\text{LB}_{1M0} = \text{LB}_{2M1} = \text{LB}_{5M4}$ , mas  $\text{mcno}_{5M4} = 1$  é menor do que  $\text{mcno}_{1M0} = 2$  e  $\text{mcno}_{2M1} = 4$ ) e nenhuma outra máquina é afectada a esta célula.

(iii) Formação da célula 4

$$\text{MCNO} = [2, 0, 0, 0, 4, 0, 0, 0, 3, 0, 3, 0, 0]$$

$$LB = [47, \infty, \infty, \infty, 47, \infty, \infty, \infty, 49, \infty, 49, \infty, \infty]$$

A máquina 1M0 é seleccionada como máquina nuclear desta célula ( $LB_{1M0} = LB_{2M1}$ , mas  $mcno_{1M0} < mcno_{2M1}$ ). Como a máquina 2M1 tem dissemelhança mínima com a máquina 1M0 e vice-versa, a máquina 2M1 também é afectada a esta célula.

(iv) Formação da célula 5

$$MCNO = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 3, 0, 3, 0, 0]$$

$$LB = [\infty, \infty, \infty, \infty, \infty, \infty, \infty, \infty, 57, \infty, 57, \infty, \infty]$$

A máquina 1M4 é seleccionada como máquina nuclear desta célula ( $LB_{1M4} = LB_{3M4}$  e  $mcno_{1M4} = mcno_{3M4}$ , mas a máquina 1M4 tem índice mais baixo na matriz de dissemelhanças). Como a máquina 3M4 tem dissemelhança mínima com a máquina 1M4 e vice-versa, a máquina 3M4 também é afectada a esta célula.

Uma vez que todos os elementos do vector MCNO são agora nulos, não são criadas mais células e a composição das famílias de máquinas para o exemplo que tem vindo a ser considerado é a que se mostra na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 - Composição das células

Célula	Máquinas
1	2M0    4M4
2	2M4
3	5M4
4	1M0    2M1
5	1M4    3M4

Note-se que ainda não estão afectadas todas as máquinas, pelo que é necessário prosseguir a afectação. Para cada uma das máquinas restantes, o critério de afectação a uma das células já constituídas é o da minimização da soma das dissemelhanças entre essa máquina e cada uma das máquinas já incluídas na célula. Em caso de empate a máquina será afectada à célula com menor número de máquinas.

Na Tabela 6.10 mostram-se, para o exemplo que vem sendo analisado, os valores das dissemelhanças entre cada uma das máquinas não afectadas e cada uma das células (cada um destes valores corresponde à soma das dissemelhanças da máquina com as diferentes máquinas incluídas na célula). O par (célula, máquina) a que



corresponde a menor dissemelhança é o par (2, 2M3), pelo que a máquina 2M3 é afectada à célula 2.

Tabela 6.10 - Dissemelhanças das máquinas não afectadas às células

Célula	Máquina				
	3M0	1M1	1M2	1M3	2M3
1	22	16	24	20	18
2	11	9	16	7	6
3	9	9	12	9	8
4	12	18	26	14	14
5	14	8	28	12	12

Este procedimento é repetido até que todas as máquinas sejam afectadas. Note-se que, como este processo é sequencial, há que considerar a actualização da composição das células no cálculo das dissemelhanças entre as máquinas e as células.

A composição resultante das famílias de máquinas é a que se mostra na Tabela 6.11.

Tabela 6.11- Composição das células

Célula	Máquinas		
1	2M0	4M4	1M2
2	2M4	2M3	
3	5M4	3M0	
4	1M0	2M1	1M3
5	1M4	3M4	1M1

A solução inicial completa-se com a determinação da composição das famílias de componentes que melhor se ajustam a estas células. Para tal, afecta-se cada componente à célula que contém o maior número de máquinas que o processam ou, em caso de empate, à célula com menor número de máquinas.

Na Tabela 6.12 apresenta-se, para cada componente considerado no problema que vem sendo analisado, o número de operações executadas em cada célula e destaca-se a afectação resultante.

Tabela 6.12 - Número de operações de cada componente processado em cada célula

Célula	Componente												
	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12
1	2	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1
2	1	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	1	1
3	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1
4	1	0	2	0	0	0	0	2	0	2	2	1	0
5	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	2

Célula	Componente											
	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	P0	P1	P2
1	2	0	1	3	0	0	3	1	1	0	1	0
2	0	1	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0
3	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1	0	0	3	0	1	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0

Para esta solução, obtém-se a composição das famílias de máquinas e de componentes que se apresenta na Tabela 6.13. A esta solução, corresponde um valor de eficácia de agrupamento de 47.0% (considerando  $K=1$  na equação (1)).

Tabela 6.13 - Afectação final de máquinas e componentes a famílias

Família de máquinas/componentes	Máquinas	Componentes
1	2M0 4M4 1M2	A0 A3 A13 A16 A19 A20 A21 P1
2	2M4 2M3	A6 A14 A15 P0
3	5M4 3M0	A4 A5 A8 A17
4	1M0 2M1 1M3	A2 A7 A9 A10 A18 P2
5	1M4 3M4 1M1	A1 A11 A12

### 6.5.1.3 Procedimento para o melhoramento da solução inicial

A solução inicial, obtida pelo procedimento descrito na secção anterior, é melhorada através da redefinição das famílias de máquinas e de componentes, até que o valor da eficácia de agrupamento não cresça de uma solução para a seguinte. Os detalhes do procedimento para o melhoramento da solução inicial são apresentados seguidamente:

- (i) O processo inicia-se com o cálculo da eficácia do agrupamento da solução inicial.
- (ii) Afecta-se cada máquina à família de componentes que contém o maior número de componentes por ela processados ou, em caso de empate, à família de componentes com menor dimensão. Se todas as células têm mais do que uma máquina, passa-se para o passo (iv); no caso contrário, prossegue-se no passo seguinte.
- (iii) Reaffectam-se as máquinas que se encontram isoladas numa célula a uma outra célula, seleccionada de acordo com o critério de minimização da dissemelhança média (isto é, o valor médio das dissemelhanças entre uma máquina e as máquinas da família). Actualiza-se o número de famílias de máquinas e prossegue-se para o passo (iv).
- (iv) Se a solução for admissível (ou seja, se o número de famílias de máquinas for igual ao número de famílias de componentes) calcula-se a eficácia do agrupamento; no caso contrário, passa-se ao passo (vi).
- (v) Se o valor da eficácia do agrupamento, calculado no passo anterior, não aumentar, relativamente ao da última solução admissível encontrada, o algoritmo termina; no caso contrário, prossegue-se para o passo seguinte.
- (vi) Afecta-se cada componente à família de máquinas que contém o maior número de máquinas envolvidas no seu processamento ou, em caso de empate, à família com menor número de máquinas. Se todas as famílias de máquinas processarem mais do que um componente, passa-se para o passo (viii); no caso contrário, prossegue-se para o passo seguinte.
- (vii) Reaffectam-se as máquinas incluídas em famílias de máquinas que só processam um componente a outra família, sendo esta seleccionada de acordo com o critério de minimização da dissemelhança média. Actualiza-se o número de famílias de máquinas e retorna-se ao passo (vi).
- (viii) Se a solução for admissível, calcula-se a eficácia do agrupamento; no caso contrário, retorna-se ao passo (ii).

- (ix) Se o valor da eficácia do agrupamento, calculado no passo anterior, não aumentar, relativamente ao da última solução admissível encontrada, o algoritmo termina; no caso contrário volta-se ao passo (ii).

Na Tabela 6.14 apresenta-se, para a solução inicial do problema que vem sendo analisado (ver Tabela 6.13), o número de componentes de cada família processados em cada máquina. Naquela tabela assinalou-se, para cada máquina, a família de componentes à qual será afectada como resultado da aplicação dos critérios referidos no passo (ii) do procedimento atrás descrito. A nova composição de cada uma das células é apresentada na Tabela 6.15.

Tabela 6.14 - Número de componentes de cada família, processados em cada máquina

Família de componentes	Máquinas												
	2M0	1M2	4M4	2M4	2M3	3M0	5M4	1M0	2M1	1M3	1M1	1M4	3M4
1	3	8	3	1	0	0	1	1	0	1	2	0	0
2	0	0	1	3	3	0	0	1	0	0	0	0	0
3	2	1	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0
4	0	3	0	0	1	3	0	3	5	4	1	0	0
5	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	3	1	3

Tabela 6.15 - Afectação de máquinas e componentes a células

Célula	Máquinas	Componentes
1	2M0 4M4 1M2	A0 A3 A13 A16 A19 A20 A21 P1
2	2M4 2M3	A6 A14 A15 P0
3	5M4	A4 A5 A8 A17
4	1M0 2M1 1M3 3M0	A2 A7 A9 A10 A18 P2
5	1M4 3M4 1M1	A1 A11 A12

Uma vez que a célula 3 inclui somente a máquina 5M4, esta deverá ser reafectada à célula com a qual tem menor dissemelhança média. Na Tabela 6.16, apresenta-se a dissemelhança média da máquina 5M4 com cada uma das células, bem como a composição destas. Da análise desta tabela resulta que a máquina 5M4 será incluída na célula 4.

Uma vez que o número de famílias de máquinas é agora diferente do número de famílias de componentes, o algoritmo prossegue com a afectação de componentes a famílias de máquinas.

Tabela 6.16 - Dissemelhança média da máquina 5M4 a cada uma das células

Célula	Máquinas	5M4
1	2M0 1M2 4M4	8.0
2	2M4 2M3	8.0
3	3M0 1M0 2M1 1M3	8.5
4	1M1 1M4 3M4	6.3

Na Tabela 6.17 apresenta-se, para cada componente considerado no problema que vem sendo analisado, o número de operações executadas em cada célula e destaca-se a afectação resultante.

Tabela 6.17 - Número de operações de cada componente executadas em cada célula

Célula	Componente												
	A0	A3	A13	A16	A19	A20	A21	P1	A6	A14	A15	P0	A4
1	2	1	2	3	3	1	1	1	0	0	1	0	1
2	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	1	0
3	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1
4	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0

Célula	Componente											
	A5	A8	A17	A2	A7	A9	A10	A18	P2	A1	A11	A12
1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1
2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
3	0	0	1	2	2	3	3	4	1	0	1	1
4	1	1	0	0	0	1	0	0	0	2	3	2

Para esta solução, obtém-se a composição das famílias de máquinas e de componentes que se apresenta na Tabela 6.18. O valor da eficácia de agrupamento desta solução é de 45% e, uma vez que este valor é menor do que o obtido para a solução anterior, o procedimento termina, sendo a solução final aquela que se apresentou na Tabela 6.13.

Tabela 6.18 - Afectação de máquinas e componentes a células

Célula	Máquinas	Componentes
1	2M0 1M2 4M4	A0 A3 A13 A16 A19 A20 A21 P1 A4 A5 A8
2	2M4 2M3	A6 A14 A15 P0
3	3M0 1M0 2M1 1M3	A17 A2 A7 A9 A10 A18 P2
4	1M1 1M4 3M4 5M4	A1 A11 A12

A solução final apresentada na Tabela 6.13 conduz aos seguintes valores para as medidas de qualidade da solução incluídas no SAD (ver secção 6.4):

- Eficácia do agrupamento = 0.47
- Índice de capacidade de agrupamento = 0.66
- Ineficiência do fluxo = 0.70

Registe-se que a heurística não contempla os casos em que uma máquina só processa um componente e em que esse componente só é processado nessa máquina. Estes casos conduziram a uma célula com uma máquina e um componente, pelo que se admite que o utilizador eliminará esses casos previamente à resolução do problema.

#### 6.5.1.4 Experiência computacional

A extensa experiência computacional relatada por Ganesh e Srinivasan (1994) revelou que o algoritmo que desenvolveram conduz a melhores resultados do que os obtidos utilizando os algoritmos ZODIAC (Chandrasekharan e Rajagopalan (1987)) e GRAFICS (Srinivasan e Narendran (1991)). Até ao aparecimento daquele algoritmo, os dois últimos têm sido referidos (Miltenburg e Zhang (1992)) como os que, de entre aqueles que são baseados na matriz de incidência, conduzem a soluções para o problema da formação de células de produção com valores mais elevados de eficácia de agrupamento.

Os testes computacionais efectuados com o algoritmo implementado no SAD revelaram que, mesmo nos casos em que os problemas são de grande dimensão (por exemplo, 30 máquinas), o tempo de execução se mantém dentro de limites perfeitamente aceitáveis (para a dimensão apresentada, na ordem de 30 segundos).

#### 6.5.2 Heurística de redução do fluxo intercelular

A heurística que se apresenta nesta secção é baseada numa outra, proposta por Okogbaa et al (1992), a qual resolve, numa primeira fase, o problema da formação de famílias de máquinas por forma a minimizar o fluxo intercelular. Depois de obtidas as

famílias de máquinas, as famílias de componentes são definidas afectando cada componente à célula que contém o maior número de máquinas envolvidas no seu processamento. Uma vez que a utilização isolada do critério de minimização do fluxo intercelular pode conduzir à formação de uma única célula, a heurística requer a pré-definição de uma dimensão máxima das células.

Nas secções seguintes definem-se os parâmetros de entrada do algoritmo e descrevem-se os procedimentos para (i) a obtenção de uma solução inicial para o problema da formação de famílias de máquinas, (ii) o melhoramento desta solução inicial e (iii) a afectação dos componentes às famílias de máquinas. A descrição detalhada destes procedimentos em linguagem algorítmica foi remetida para o Apêndice G.

### 6.5.2.1 Parâmetros de entrada do algoritmo

O algoritmo requer a definição dos seguintes parâmetros de entrada para cada problema:

- (i)  $M$  - número de máquinas,
- (ii)  $P$  - número de componentes,
- (iii)  $F(M \times M)$  - matriz de fluxos entre máquinas,
- (iv)  $A(M \times P)$  - matriz de incidência máquinas-componentes,
- (v)  $N_{Oper}$  - vector que contém o número de operações efectuadas em cada máquina,
- (v)  $MaxCell$  - número máximo de células,
- (vi)  $MaxMaq$  - número máximo de máquinas por célula,
- (vii)  $VRFD$  - limite inferior desejável para o valor relativo do fluxo desejável entre uma máquina e uma família de máquinas. Este valor relativo do fluxo (VRF) expressa o fluxo trocado entre a máquina e um conjunto de máquinas como uma proporção do fluxo total que passa por essa máquina. Por exemplo, se o fluxo entre a máquina  $i$  e o conjunto constituído pelas

máquinas j, k e l é de 100 unidades e se o fluxo total que passa pela máquina i é de 200 unidades, o valor relativo do fluxo entre a máquina i e o conjunto de máquinas considerado é de 50%.

Definindo-se diferentes conjuntos de valores para os parâmetros (v) a (vii) induzem-se diferentes soluções. No SAD é dada ao utilizador a possibilidade de gerar e armazenar diferentes soluções para diferentes valores dos parâmetros (v) a (vii), o que lhe permitirá escolher daquelas soluções a que corresponder ao melhor compromisso entre as diferentes medidas que implícita ou explicitamente são utilizadas para avaliar a qualidade das soluções.

A heurística aqui descrita será ilustrada utilizando o mesmo exemplo a que se recorreu na secção anterior (ver Apêndice D). A matriz de fluxos que se apresenta na Tabela 6.19 corresponde, para este exemplo, à solução obtida no capítulo anterior para o problema de afectação de operações de fabrico a máquinas. Nas duas últimas linhas da Tabela 6.19 incluíram-se ainda os dados relativos ao fluxo total que passa por cada máquina (FTotal) e ao número de operações efectuadas em cada máquina (NOper).

Tabela 6.19- Matriz de fluxo para o exemplo considerado

	1M0	2M0	3M0	1M1	2M1	1M2	1M3	2M3	1M4	2M4	3M4	4M4	5M4
1M0		107	142	387	211	286	27	385					
2M0	107		50			101				68			156
3M0	142	50			168		244	141					
1M1	387					335		8	102		184	69	
2M1	211		168			130	73	73					
1M2	286	101		335	130		74	159			77	180	302
1M3	27		244		73	74			102	339	68	38	
2M3	385		141	8	73	159				122		106	
1M4				102				102					
2M4		68					339	122			44		67
3M4				184		77	68			44			
4M4				69		180	38	106					
5M4		156				302				67			
FTotal	1545	482	745	1085	655	1644	965	994	204	640	373	393	525
NOper	6	5	6	6	5	13	6	6	1	5	4	5	3



Na versão original da heurística proposta por Okogbaa et al (1992), os elementos da matriz de fluxo indicam o número total de operações consecutivas entre pares de máquinas ou, alternativamente, o número total de componentes que fluem entre máquinas. Obviamente que o ideal seria incluir na matriz de fluxo o custo total de transporte entre pares de máquinas, mas tal não é possível uma vez que não se conhecem as suas localizações. Assim, em face dos dados disponíveis nesta fase, optou-se por utilizar o número de viagens efectuadas entre pares de máquinas para aproximar o custo total do fluxo, o que é claramente mais realista do que qualquer das soluções propostas na versão original.

No exemplo com que se ilustrará a aplicação da heurística, para além dos parâmetros de entrada apresentados na Tabela 6.6 (note-se que a matriz de incidência é a mesma que se utilizou para ilustrar a heurística descrita na secção 6.5.1) e na Tabela 6.19, fixaram-se os seguintes valores para os restantes parâmetros de entrada:

- MaxCell = 5
- MaxMaq = 5
- VFRD = 35%

### 6.5.2.2 Procedimento para a obtenção de uma solução inicial para o problema da formação de famílias de máquinas

O procedimento para a obtenção de uma solução inicial para o problema da formação de famílias de máquinas começa com a identificação do número máximo de máquinas nucleares, que servem de base à formação do número equivalente de células (MaxCell). A primeira máquina nuclear seleccionada é aquela que processa o maior número de componentes ou, em caso de empate, a máquina que na matriz de fluxos ocupa uma posição correspondente ao índice mais baixo.

Para o problema que tem vindo a ser analisado, verifica-se que a máquina 1M2 é a que processa um maior número de operações (como se pode constatar da análise da linha referenciada por NOper na Tabela 6.19). Assim, a máquina 1M2 é afectada à célula 1.

No processo de selecção das máquinas nucleares seguintes, calcula-se, para cada máquina ainda não afectada, o valor relativo de fluxo trocado entre essa máquina e o

conjunto das máquinas nucleares já afectadas. Selecciona-se para máquina nuclear aquela que, de entre as máquinas ainda não afectadas, apresenta o menor daqueles valores. Em caso de empate selecciona-se a máquina que processa maior número de componentes e, se o empate ainda subsistir, aquela que na matriz de fluxos ocupa uma posição correspondente ao índice mais baixo.

Da análise da matriz de fluxos relativa ao problema que tem vindo a ser estudado (ver Tabela 6.19), verifica-se que nenhuma das máquinas 3M0, 1M4 e 2M4 troca fluxo com a máquina 1M2 (pelo que é nulo o valor relativo de fluxo), o que as converte em candidatas a serem incluídas na segunda célula. A máquina 3M0 é então seleccionada para integrar a célula 2, uma vez que realiza mais operações do que as máquinas 1M4 e 2M4. Seguindo o mesmo raciocínio as máquinas 2M4 e 1M4 são afectadas às terceira e quarta células, respectivamente, uma vez que não trocam fluxo entre si nem com nenhuma das outras máquinas já incluídas em células.

A selecção da quinta máquina nuclear baseia-se no valor relativo do fluxo entre as máquinas não afectadas e as quatro já incluídas nas células anteriores. Para cada uma das máquinas ainda não afectadas, aquele valor apresenta-se na Tabela 6.20.

Tabela 6.20 - Valor relativo do fluxo

1M0	2M0	1M1	2M1	1M3	2M3	3M4	4M4	5M4
0.28	0.45	0.40	0.45	0.79	0.42	0.32	0.46	0.70

Com a selecção da máquina 1M0 para integrar a quinta célula, termina o procedimento de inicialização das células, dado que se atingiu o limite superior (MaxCell).

Designando por  $\{I\}$  o conjunto de máquinas já incluídas em células que ainda comportam mais máquinas e por  $\{J\}$  o conjunto de máquinas ainda não afectadas a células, no passo seguinte calcula-se, para cada máquina  $j \in \{J\}$ , o maior dos valores relativos do fluxo com as máquinas  $i \in \{I\}$ , ou seja

$$MVFR_j = \frac{\text{Max}_{i \in \{I\}} \{F_{ij}\}}{\sum_{i=1}^M F_{ij}}, \quad (j \in \{J\}),$$

onde  $F_{ij}$  representa o fluxo entre o par de máquinas  $(i, j)$ .

A máquina correspondente ao valor máximo de  $MVFR_j$  ( $j \in \{J\}$ ) é então afectada à célula que contém a máquina  $i \in \{I\}$  com a qual troca maior fluxo, desde que aquele valor máximo seja superior ou igual ao valor desejável (ou seja,  $MVFR_j \geq VFRD$ ), parâmetro que é definido pelo utilizador. Esta afectação implica que a máquina deixe de pertencer ao conjunto  $\{J\}$  e passe a pertencer ao conjunto  $\{I\}$ .

Este passo é repetido sucessivamente até que nenhuma das máquinas  $j \in \{J\}$  verifique a condição  $MVFR_j \geq VFRD$ . No caso de uma das células ficar completa, porque atingiu o número máximo de máquinas por célula (MaxMq), as máquinas dessa célula são excluídas do conjunto  $\{I\}$ .

Para o exemplo que tem vindo a ser analisado,  $\{I\} = \{1M0, 3M0, 1M2, 1M4, 2M4\}$  e  $\{J\} = \{2M0, 1M1, 2M1, 1M3, 2M3, 3M4, 4M4, 5M4\}$ . Da matriz de fluxo entre máquinas que se apresentou na Tabela 6.19, obtém-se para as máquinas  $j \in \{J\}$  os valores de  $MVFR_j$  que se apresentam na Tabela 6.21.

Tabela 6.21 - Primeiro conjunto de valores de  $MVFR_j$

	Máquina							
	2M0	1M1	2M1	1M3	2M3	3M4	4M4	5M4
$MVFR_j$	0.22	0.36	0.32	0.35	0.39	0.21	0.46	0.58

O maior valor corresponde a  $MVFR_{5M4}$  e é superior ao valor de  $VFRD$  definido pelo utilizador ( $VFRD = 35\%$ ). A máquina  $i \in \{I\}$  com a qual a máquina 5M4 troca maior fluxo é a máquina 1M2 (ver Tabela 6.19) e esta máquina foi afectada à célula 1, pelo que a máquina 5M4 também é afectada a esta célula e os conjuntos  $\{I\}$  e  $\{J\}$  são actualizados.

Os valores de  $MVFR_j$  ( $j \in \{J\}$ ) são recalculados e os novos valores apresentam-se na tabela Tabela 6.22.

Tabela 6.22 - Segundo conjunto de valores de  $MVFR_j$

	Máquina						
	2M0	1M1	2M1	1M3	2M3	3M4	4M4
$MVFR_j$	0.32	0.36	0.32	0.35	0.39	0.21	0.46

Com base nestes valores a máquina 4M4 é afectada à primeira célula, pois  $MVFR_{4M4} = 0.46 \geq 0.35 = VFRD$  e  $F_{4M4,1M2} = 180$  corresponde ao maior valor de fluxo trocado entre a máquina 4M4 e qualquer das máquinas  $i \in \{I\}$ .

Nas iterações seguintes, os valores de  $MVFR_j$  ( $j \in J$ ) apresentados na Tabela 6.22 mantêm-se, obtendo-se a seguinte sucessão de afectações:

- 2M3 é afectada à quinta célula, uma vez que  $F_{2M3,1M0} = 385$  conduz a  $MVFR_{2M3} = 0.39 \geq 0.35$
- 1M1 é afectada à quinta célula, uma vez que  $F_{1M1,1M0} = 385$  conduz a  $MVFR_{1M1} = 0.36 \geq 0.35$

Os valores de  $MVFR_j$  ( $j \in \{J\}$ ) são novamente modificados, obtendo-se os valores que se apresentam na tabela Tabela 6.23.

Tabela 6.23- Terceiro conjunto de valores de  $MVFR_j$

	Máquina			
	2M0	2M1	1M3	3M4
$MVFR_j$	0.32	0.32	0.35	0.49

A máquina 3M4 é então afectada à quinta célula, uma vez que  $F_{3M4,1M1} = 184$  conduz a  $MVFR_{3M4} = 0.49 \geq 0.35$ .

Uma vez que os valores de  $MVFR_j$  ( $j \in \{J\}$ ) não são alterados na iteração seguinte, a máquina 1M3 é colocada na célula 3, pois  $F_{1M3,2M4} = 339$  conduz a  $MVFR_{1M3} = 0.35$ .

Depois desta afectação, os valores de  $MVFR_j$  ( $j \in \{J\}$ ) permanecem inalterados e são todos inferiores a  $VFRD = 35\%$ , pelo que este passo termina.

A composição das famílias de máquinas resultantes deste passo apresentam-se na Tabela 6.24, aí se incluindo também o conjunto de máquinas ainda não afectadas.

Tabela 6.24 - Afectação de máquinas a células

Célula	Máquinas			
1	1M2	5M4	4M4	
2	3M0			
3	2M4	1M3		
4	1M4			
5	1M0	2M3	1M1	3M4
Máquinas não afectadas: 2M0 e 2M1				

O passo seguinte inicia-se com a construção de uma matriz de fluxo relativo máquina-célula ([C]), na qual cada um dos elementos  $C_{jk}$  representa o valor relativo do fluxo entre a máquina não afectada  $j$  ( $j \in \{J\}$ ) e a célula não completa  $k$ . Denotando por  $\{K\}$  o conjunto das células não completas, os elementos da matriz [C] vêm dados por

$$C_{jk} = \frac{\sum_{i \in \text{célula } k} F_{ij}}{\sum_{i=1}^M F_{ij}}, \quad (k \in \{K\}, j \in \{J\}).$$

Destes elementos selecciona-se aquele que tem valor mais elevado e faz-se a afectação máquina-célula correspondente. Este passo é repetido sucessivamente até que todas as máquinas tenham sido afectadas.

Para o exemplo que tem vindo a ilustrar a heurística, a matriz de fluxo relativo máquina-célula é apresentada na Tabela 6.25.

Tabela 6.25 - Matriz de fluxo relativo máquina-célula

Máquina	Célula				
	1	2	3	4	5
2M0	0.53	0.10	0.14	0.00	0.22
2M1	0.20	0.26	0.11	0.00	0.43

O maior valor dos elementos da matriz é  $C_{2M0,1}=0.53$ , pelo que a máquina 2M0 é afectada à célula 1.

A matriz de fluxo relativo máquina-célula é então recalculada, sendo os valores da única coluna da matriz (relativa à máquina 2M1) iguais aos apresentados na coluna correspondente a esta máquina na Tabela 6.25. Deste modo, a máquina 2M1 é afectada à célula 5.

A afectação resultante desta fase é apresentada na Tabela 6.26.

Tabela 6.26 - Afectação de máquinas a células

Célula	Máquinas				
1	1M2	5M4	4M4	2M0	
2	3M0				
3	2M4	1M3			
4	1M4				
5	1M0	2M3	1M1	3M4	2M1

### 6.5.2.3 Procedimento para o melhoramento da solução inicial

O melhoramento da solução inicial recorre ao conceito de fluxo relativo intracelular, o qual se define, para cada máquina  $j$  de uma dada célula  $k$ , como a razão entre o fluxo que essa máquina troca com as outras máquinas dessa célula e o fluxo total que passa pela máquina, o qual é dado por

$$ICFR_j = \frac{\sum_{i \in \text{célula } k} F_{ij}}{\sum_{i=1}^M F_{ij}}, \quad (j \in \text{célula } k).$$

Entre as máquinas com valores  $ICFR_j < VFRD$ , aquela que tiver um valor inferior de  $ICFR_j$  é retirada da célula respectiva e associada à célula com a qual tem maior valor relativo do fluxo (desde que esta célula não esteja completa). Em caso de empate entre máquinas, desloca-se aquela que se encontra colocada na célula com o índice mais baixo e, se o empate subsistir, aquela que na matriz de fluxo tiver um índice mais baixo. Em caso de empate entre células de destino, selecciona-se a célula com índice mais baixo.

Este passo é repetido até que todas as máquinas com  $ICFR_j < VFRD$  tenham sido consideradas.

Para o exemplo que vem sendo analisado, os valores de  $ICFR_j$ , correspondentes às diferentes máquinas, apresentam-se na Tabela 6.27.

Tabela 6.27 - Primeiro conjunto de valores de  $ICFR_j$

Célula	1				2		3		4	5			
Máquina	2M0	1M2	4M4	5M4	3M0	2M4	1M3	1M4	1M0	1M1	2M1	2M3	3M4
$ICFR_j$	0.53	0.35	0.46	0.87	0.00	0.53	0.35	0.00	0.64	0.53	0.43	0.47	0.49

A máquina 3M0 é retirada da célula 2 (dado que,  $ICFR_{\min} = ICFR_{3M0} = ICFR_{1M4} = 0 < 0.35$  e a máquina 3M0 pertence a uma célula com menor índice do que a máquina 1M4). O valor do fluxo relativo da máquina 3M0 com cada uma das células não completas apresenta-se na Tabela 6.28.

**Tabela 6.28** - Valores relativos de fluxo da máquina 3M0 com cada uma das células não completas

Máquina	Célula		
	1	3	4
3M0	0.08	0.33	0

Da análise dos valores apresentados nesta tabela resulta que a máquina 3M0 deverá ser reafectada à célula 3.

Para esta nova composição das células, recalculam-se os valores do fluxo relativo intracelular. Estes novos valores apresentam-se na Tabela 6.29.

**Tabela 6.29** - Segundo conjunto de valores de  $ICFR_j$

Célula	1				3			4	5				
Máquina	2M0	1M2	4M4	5M4	3M0	2M4	1M3	1M4	1M0	1M1	2M1	2M3	3M4
$ICFR_j$	0.53	0.35	0.46	0.87	0.33	0.53	0.60	0.00	0.64	0.53	0.43	0.47	0.49

A máquina 1M4 é retirada da célula 4 (pois,  $ICFR_{min} = ICFR_{1M4} = 0 < 0.35$ ). O valor do fluxo relativo da máquina 1M4 com cada uma das células não completas apresenta-se na Tabela 6.30.

**Tabela 6.30** - Valores relativos de fluxo da máquina 1M4 com cada uma das células não completas

Máquina	Célula	
	1	3
1M4	0.00	0.50

Da análise dos valores apresentados na Tabela 6.30 resulta que a máquina 1M4 deverá ser reafectada à célula 3. Uma vez que para nenhuma das outras máquinas  $ICFR_j < VFRD$ , o procedimento termina. A afectação final das máquinas a células apresenta-se na Tabela 6.31, na qual os índices das células foram actualizados.

**Tabela 6.31** - Afectação final das máquinas a células

Célula	Máquinas				
1	1M2	5M4	4M4	2M0	
2	2M4	1M3	3M0	1M4	
3	1M0	2M3	1M1	3M4	2M1

### 6.5.2.4 Procedimento para a formação das famílias de componentes

Os componentes são afectados às células do seguinte modo:

- (i) ordenam-se os componentes por ordem decrescente do número de operações envolvidas no seu processamento e, em caso de empate, pelo seu índice na matriz de fluxos,
- (ii) de acordo com a ordenação obtida, cada componente é afectado à célula na qual é executado o maior número das suas operações e, em caso de empate, à célula que processa menor número de componentes.

Para o exemplo que vem sendo analisado, resume-se na tabela Tabela 6.32, o procedimento de afectação que acabou de ser descrito.

Tabela 6.32 - Número total de operações e número de operações por célula para cada componente

Componente	Nº de operações	Nº de operações/célula			Componente	Nº de operações	Nº de operações/célula		
		1	2	3			1	2	3
A0	4	2	2	0	A13	3	3	0	0
A1	3	1	0	2	A14	1	0	0	1
A2	3	1	0	2	A15	4	1	1	2
A3	1	1	0	0	A16	3	3	0	0
A4	2	1	1	0	A17	1	0	1	0
A5	2	2	0	0	A18	4	0	2	2
A6	2	0	1	1	A19	4	3	0	1
A7	3	1	1	1	A20	2	1	0	1
A8	2	2	0	0	A21	1	1	0	0
A9	5	0	1	4	P0	1	0	1	0
A10	4	1	2	1	P1	2	1	0	1
A11	5	0	3	2	P2	1	0	1	0
A12	5	1	1	3					

Na Tabela 6.33, resume-se a solução finalmente encontrada para o problema que serviu de ilustração à heurística.



Tabela 6.33 - Afectação de máquinas e componentes a células

Célula	Máquinas	Componentes
1	2M0 1M2 4M4 5M4	A0 A3 A4 A5 A7 A8 A13 A16 A19 A20 A21 P1
2	3M0 1M3 1M4 2M4	A6 A10 A11 A17 A18 P0 P2
3	1M0 1M1 2M1 2M3 3M4	A1 A2 A9 A12 A14 A15

Para essa solução, apresentam-se seguidamente os valores das medidas de qualidade da solução (introduzidas na secção 6.4):

- Eficácia do agrupamento = 0.36
- Índice de capacidade de agrupamento = 0.68
- Ineficiência do fluxo = 0.48.

Registe-se que, de acordo com as duas medidas que avaliam exclusivamente o fluxo intercelular (índice de capacidade de agrupamento e ineficiência do fluxo), a qualidade desta solução é superior àquela que, para o mesmo problema, havia sido obtida com a heurística anterior. Este resultado, que tomado isoladamente não revela nada de particularmente importante, é representativo daquilo que se passou na generalidade dos exemplos que foram utilizados para comparar as duas heurísticas. Com base nas experiências computacionais efectuadas, pode confirmar-se a superioridade da segunda heurística na redução do fluxo intercelular. Estes testes permitiram ainda concluir que a escolha de um valor elevado de VFRD não garante necessariamente a obtenção de melhores soluções, uma vez que, se não se afectarem máquinas às células criadas inicialmente (devido ao facto do maior valor relativo de fluxo entre as máquinas não afectadas e as máquinas colocadas inicialmente ser inferior a VFRD), as soluções tendem a degradar-se consideravelmente.

Adicionalmente, deve observar-se que, para a heurística que acabou de ser descrita, a solução obtida pode ser melhorada por actuação nos parâmetros de entrada (designadamente, MaxCell, MaxMaq e VFRD). Por exemplo, adoptando para aqueles parâmetros os valores

- MaxCell = 6
- MaxMaq = 6
- VFRD = 30%

a nova solução obtida (ver Tabela 6.34) é superior à anterior, de acordo com as medidas de qualidade adoptadas:

- Eficácia do agrupamento = 0.37
- Índice de capacidade de agrupamento = 0.7
- Ineficiência do fluxo = 0.44

Tabela 6.34 - Afecção de máquinas e componentes a células

Célula	Máquinas	Componentes
1	2M0 1M2 4M4 5M4	A0 A3 A4 P1 A5 A7 A8 A13 A16 A19 A20 A21
2	1M3 1M4 2M4	P0 A6 A11 P2 A14 A17
3	1M0 3M0 1M1 2M1 2M3 3M4	A1 A2 A9 A10 A12 A14 A15 A17

### 6.5.2.5 Experiência computacional

A experiência computacional relatada por Okogbaa et al (1992) revelou que a heurística de redução do fluxo intercelular que propuseram conduz, do ponto de vista dos fluxos intercelulares, a melhores resultados do que os obtidos utilizando algoritmos baseados em métodos matriciais (ver secção 6.3.1.1).

Os testes computacionais efectuados com base na versão implementada no SAD revelaram que o esforço computacional envolvido na aplicação desta heurística era da mesma ordem de grandeza do da heurística anterior e que, portanto, mesmo nos casos em que os problemas são de grande dimensão (por exemplo, 30 máquinas), o tempo de execução se mantém dentro de limites perfeitamente aceitáveis (para a dimensão apresentada, na ordem de 35 segundos).

## 6.6 Interacção com o utilizador

### 6.6.1 Descrição geral da interface

Nesta secção mostram-se as interacções incorporadas no módulo de agregação de máquinas em secções e descreve-se sumariamente a funcionalidade de cada uma daquelas interacções.

Da janela principal do SAD (que se apresentou na Figura 3.2) reproduz-se na Figura 6.2 a área a partir da qual se tem acesso aos comandos deste módulo, segundo a árvore que se apresenta na Figura 6.3.

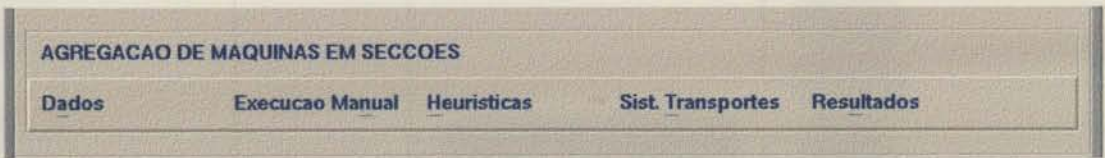


Figura 6.2 - Área da janela principal relativa ao módulo de agregação de máquinas em secções

### 6.6.2 Introdução dos dados

Os dados para o problema de agregação de máquinas em secções de fabrico podem ser introduzidos directamente neste módulo ou importados do módulo de afectação de operações. No primeiro caso, a criação, a modificação e a eliminação de problemas de agregação de máquinas em secções necessitam do respectivo identificador, o qual é introduzido numa caixa de diálogo como a representada na Figura 6.4.

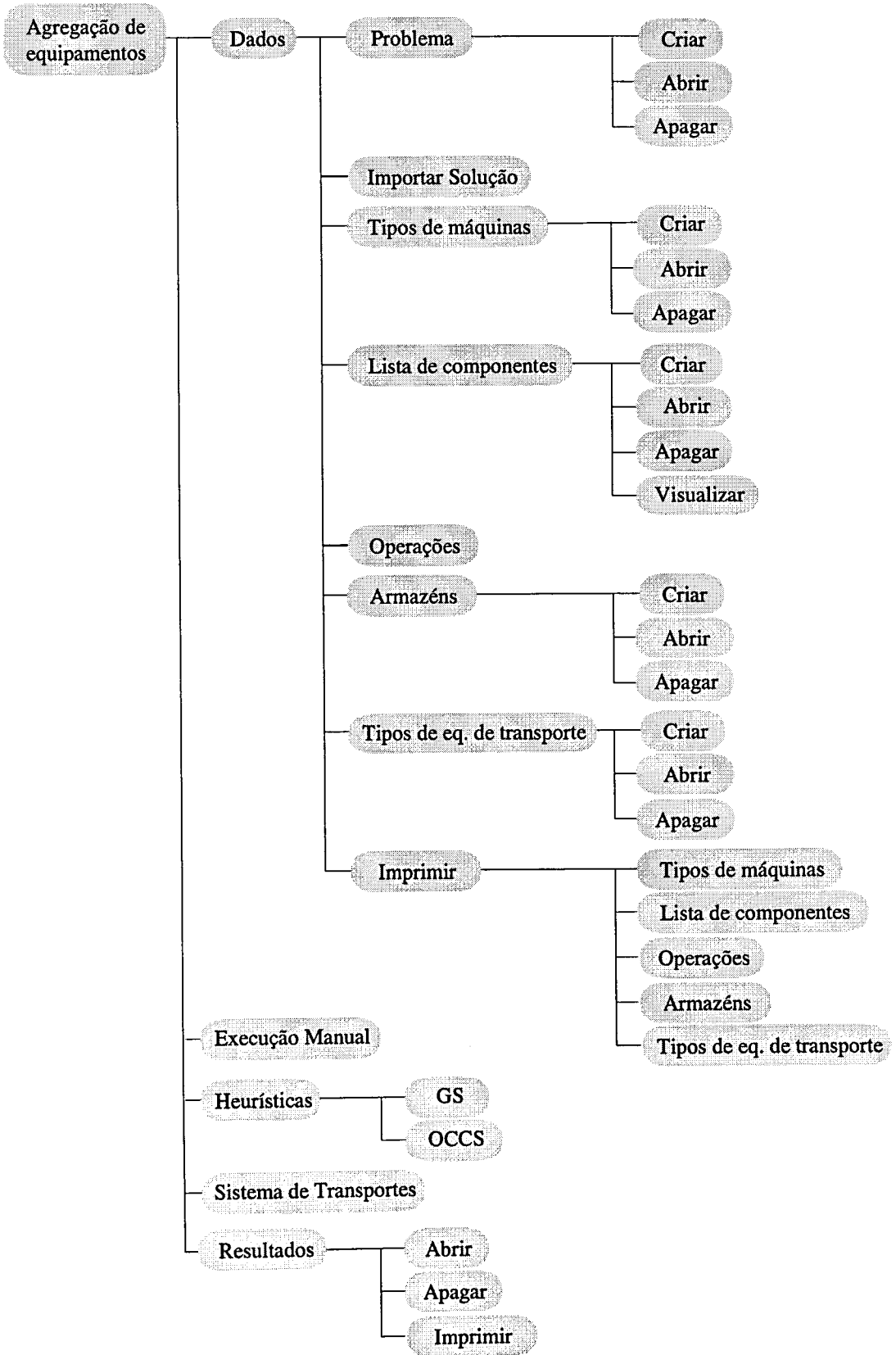


Figura 6.3 - Percursos de acesso aos comandos do módulo de agregação de máquinas em secções

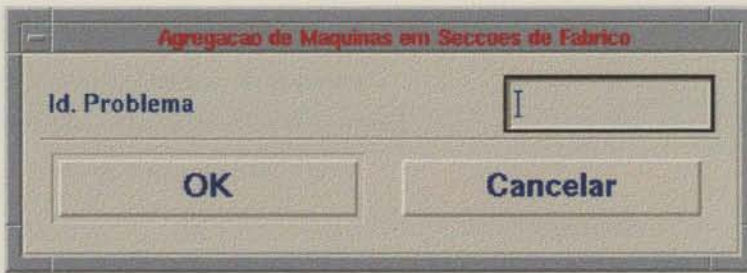


Figura 6.4 - Caixa de diálogo de identificação do problema

A activação da tecla 'F1' quando o cursor se encontra colocado no campo de entrada de dados permite visualizar uma lista (como a apresentada na Figura 4.7) com todos os identificadores de problemas de agregação de máquinas em secções armazenados na base de dados. No caso dos procedimentos de modificação e eliminação de problemas, a selecção de um desses identificadores da lista transfere, automaticamente, o seu valor para o campo de entrada de dados.

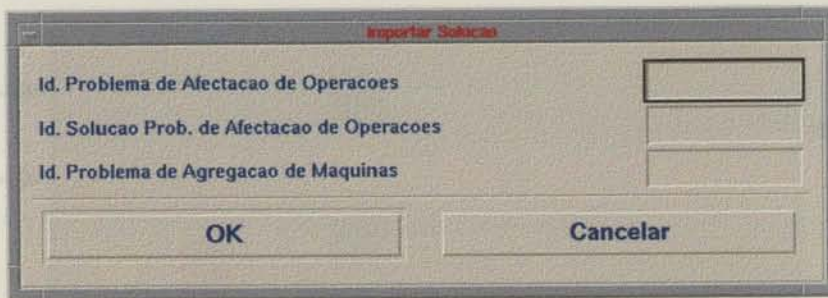
Uma caixa de diálogo de erro (como a apresentada na Figura 4.8), com uma mensagem apropriada ao contexto, aparecerá nas seguintes situações:

- introdução de um identificador já armazenado na base de dados, no caso do procedimento de criação de problemas,
- inserção de um identificador de problema não armazenado na base de dados, no caso dos procedimentos de modificação e anulação de problemas.

Os dados de entrada para o problema de agregação de máquinas em secções podem ser obtidos a partir de uma solução para o problema da afectação de operações de fabrico a máquinas, a qual é seleccionada através de uma caixa de diálogo de introdução de dados como a que se pode ver na Figura 6.5

A activação da tecla 'F1' com o cursor colocado num dos campos de entrada de dados permite visualizar uma lista de selecção (como a apresentada na Figura 4.7) com:

- os identificadores dos problemas armazenados na base de dados ou,
- para cada um destes problemas, os identificadores das soluções armazenadas na base de dados.



**Figura 6.5** - Caixa de diálogo para importação de uma solução do problema de afectação de operações

A selecção de um destes identificadores da lista transfere automaticamente o seu valor para a caixa de texto.

Uma caixa de diálogo de erro (semelhante à apresentada na Figura 4.8), com uma mensagem apropriada ao contexto, aparecerá nos seguintes casos:

- não preenchimento de qualquer uma das caixas de entrada de dados,
- inserção de um identificador de um problema não armazenado na base de dados,
- inserção de um identificador de uma solução não armazenada na base de dados.

Os outros elementos da interface têm a dupla função de permitirem a modificação das soluções importadas e a introdução de dados para problemas que não recorrem ao módulo de afectação de operações de fabrico a máquinas.

Na criação e modificação dos tipos de máquinas, dos componentes, dos armazéns e dos tipos de equipamento de movimentação de materiais utilizam-se caixas de diálogo semelhantes às apresentadas na secção 5.5.2 (Figuras 5.14 a 5.17, 5.21 e 5.22).

A definição e a modificação das operações de um componente são efectuadas numa caixa de diálogo como a apresentada na Figura 6.6. O componente e a rota cujas operações se pretendem definir ou modificar seleccionam-se nos menus I e II, os quais incluem, para o problema corrente, todos os componentes armazenados na base de dados, bem como as respectivas rotas. A selecção de um componente e de uma rota permite definir ou modificar o tamanho do lote na respectiva caixa de diálogo de introdução de dados (Figura 6.7).

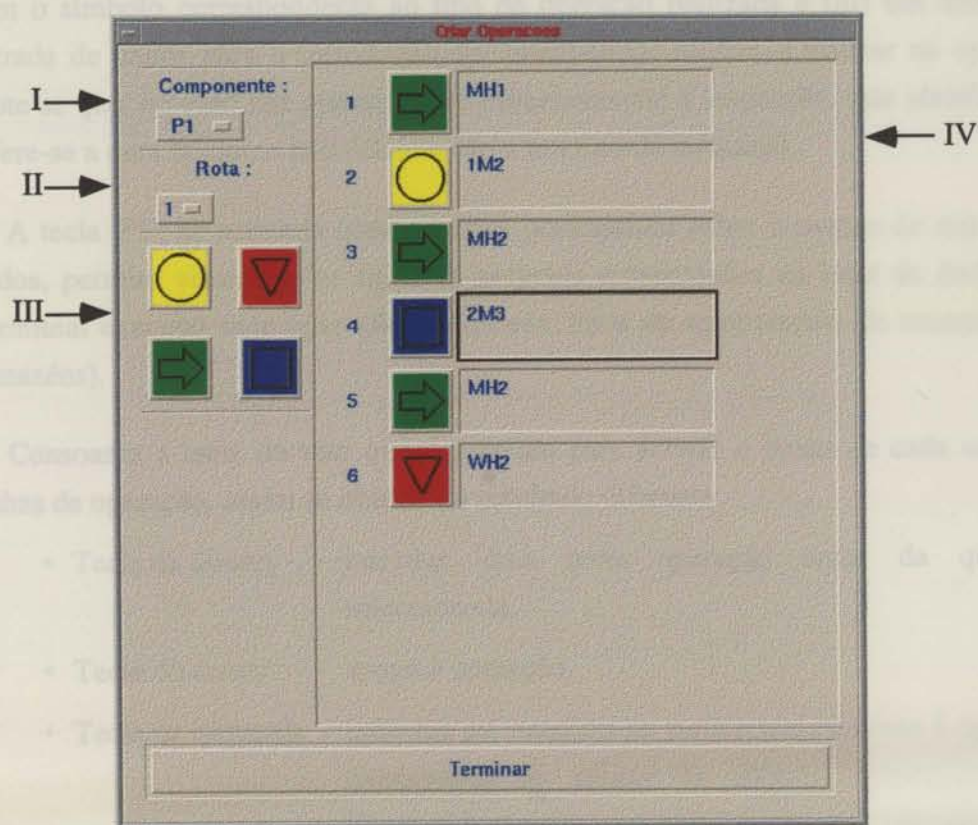


Figura 6.6 - Caixa de diálogo para a definição de operações

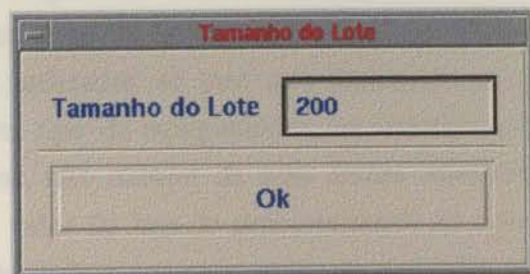


Figura 6.7 - Caixa de diálogo para introdução/modificação dos dados da rota

O accionamento de um botão da área III introduz na janela de definição da sequência de operações (IV) uma linha de operação correspondente ao tipo seleccionado: processamento (amarelo), armazenamento (vermelho), transporte (verde) ou inspecção (azul).

Cada linha de operação inclui: (i) a ordem pela qual ela é executada, (ii) um botão com o símbolo correspondente ao tipo de operação realizada e (iii) um campo de entrada de dados para a introdução do identificador recurso a utilizar na operação (note-se que, no caso das operações de processamento e inspecção, este identificador refere-se a uma máquina individual e não a um tipo de máquina).

A tecla 'F1', se activada com o cursor posicionado sobre o campo de entrada de dados, permite visualizar os tipos de recursos armazenados na base de dados que permitem executar essa operação (máquinas, tipos de equipamento de transporte ou armazéns).

Consoante a tecla do rato que é premida para activar o botão de cada uma das linhas de operação, assim se obtém um resultado diferente:

- Tecla da direita - introduz uma nova operação antes da que foi seleccionada,
- Tecla do centro - apaga a operação,
- Tecla da esquerda - introduz ou visualiza os parâmetros relativos à operação (recorrendo às caixas de diálogo apresentadas na Figura 6.8 a) e b)), para todos os tipos de operações com excepção das de armazenamento.

Note-se que, na definição dos parâmetros das operações de transporte, os tempos de carga e de descarga, bem como a velocidade, aparecem inicialmente com os valores definidos na base de dados para o tipo de equipamento de movimentação correspondente. O utilizador só terá que introduzir novos valores no caso de o funcionamento deste tipo de equipamento, na operação particular a que se refere a introdução de dados, não ocorrer de uma forma 'standard'. O lote de transporte é inicializado com o valor do lote de processamento da operação anterior, pelo que o utilizador só terá de definir um novo valor se pretender que seja efectuada mais do que uma viagem para o transporte de cada lote.

Uma mensagem de erro (como a apresentada na Figura 4.8) pode ocorrer nas seguintes situações:

(i) Definição de operações:

- recurso não definido numa linha de operação,
- recurso introduzido numa linha de operação sem que previamente tenha sido definido na base de dados.



Operacao do Processamento/Inspeccao

Tipo de Maquina	<input type="text"/>
Cod. da Maquina	<input type="text"/>
Tempo de Set-up	<input type="text"/>
Tempo de Processamento	<input type="text"/>

OK Cancelar

a)

Modificar Operacao

Codigo do Equip. de Transporte	MH1
Tempo de Carga	1.00
Tempo de Descarga	1.00
Velocidade	2
Lote de Transporte	100

Ok Cancelar

b)

**Figura 6.8** - Caixas de diálogo para definição dos parâmetros das operações

(ii) Definição da rota:

- tamanho do lote nulo ou indefinido.

(iii) Definição dos parâmetros das operações de processamento ou inspeção:

- tempos de preparação de máquina ou de processamento indefinidos.

(iv) Definição dos parâmetros das operações de transporte:

- valor do lote de transporte indefinido ou superior ao tamanho do lote de processamento.

### 6.6.3 Utilização das heurísticas

Activando o botão das Heurísticas no menu principal (ver Figura 6.2) visualiza-se o submenu que se apresenta na Figura 6.9, o qual permite ao utilizador optar por uma das duas heurísticas disponíveis no SAD para o problema da especificação de células de produção.

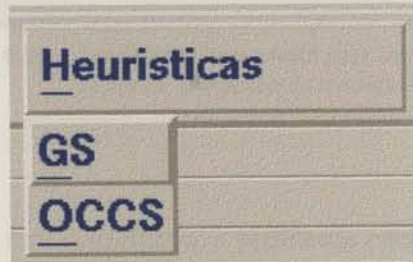


Figura 6.9 - Submenu das heurísticas para o problema de agregação de máquinas em células

A heurística GS (de Ganesh e Srinivasan (1994)) corresponde àquela que se apresentou na secção 6.5.1, baseada num método não-hierárquico de 'clustering'. A heurística OCCS (de Okogbaa, Chen, Changchit e Shell (1992)) utiliza o método de redução do fluxo intercelular apresentado na secção 6.5.2.

#### 6.6.3.1 Utilização da heurística GS

Activando o botão GS no submenu das heurísticas, abre-se uma janela com uma escala (ver a Figura 6.10), para selecção do parâmetro K (ver equação (1) na secção 6.5.1.1), que se traduz num maior ou menor peso da subocupação das células na medida de eficácia do agrupamento.

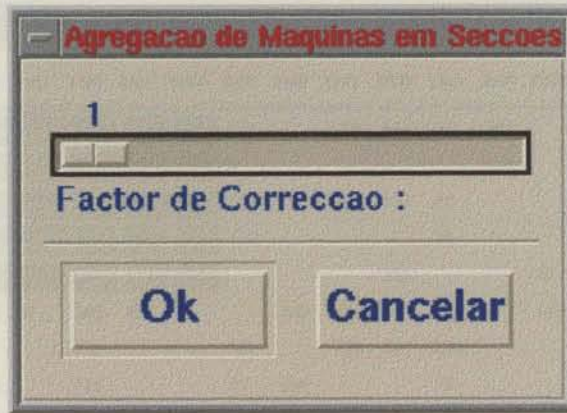


Figura 6.10 - Janela com uma escala para introdução do factor de correcção da medida de eficácia

Uma vez especificado este parâmetro, o problema corrente é resolvido. A solução do problema é apresentada em duas janelas, nas quais se podem visualizar a matriz de incidência máquinas-componentes na forma diagonal por blocos (Figura 6.11) e a matriz de fluxos organizada por células (Figura 6.12), respectivamente. Na primeira destas janelas ainda se podem observar as três medidas de desempenho utilizadas para avaliar a qualidade das soluções obtidas.



Figura 6.11 - Janela com a solução de um problema (Forma diagonal por blocos)



Figura 6.12 - Janela com a solução de um problema (Matriz de fluxos)

A activação do botão Guardar, em qualquer uma das janelas das Figuras 6.11 ou 6.12, permite ao utilizador armazenar esta solução na base de dados, tendo para tal que introduzir o respectivo identificador numa caixa de diálogo como a que se apresenta na Figura 6.13.

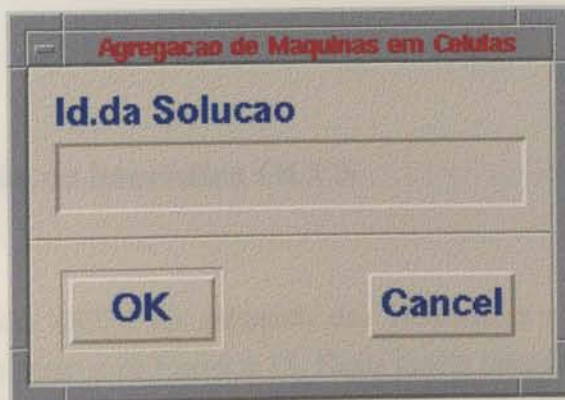


Figura 6.13 - Caixa de diálogo para a introdução do identificador da solução

Se o identificador da solução não for introduzido, ou se for igual a um outro já armazenado na base de dados para o mesmo problema, será exibida uma mensagem de erro (do tipo da apresentada na Figura 4.8).

A activação da tecla 'F1' com o cursor posicionado no campo de entrada de dados permite visualizar uma lista (como a apresentada na Figura 4.7) com todos os identificadores de soluções deste problema armazenadas na base de dados.

Depois de introduzido o identificador da solução será exibida uma janela de diálogo (Figura 6.14) para introdução dos identificadores de cada uma das células.

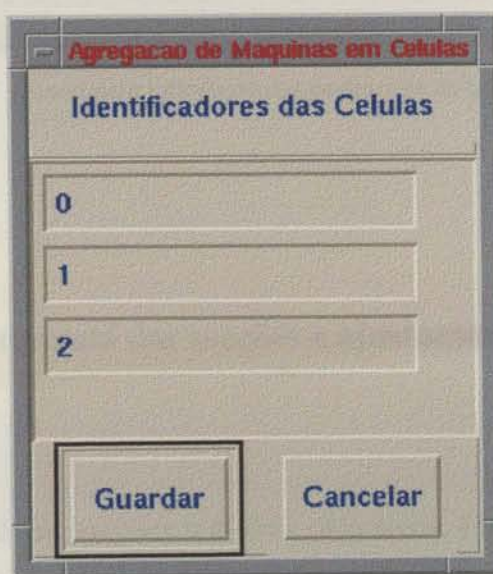


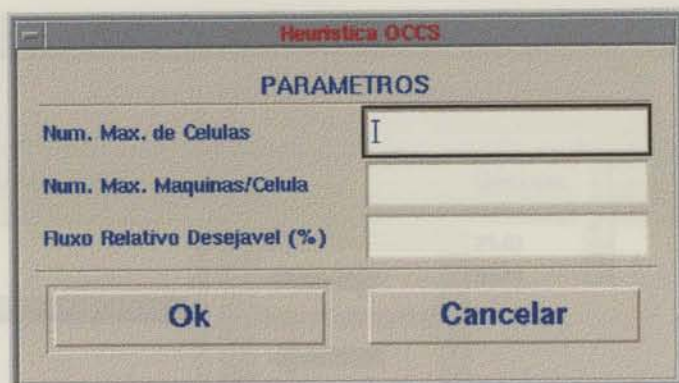
Figura 6.14 - Janela para introdução dos identificadores das células

### 6.6.3.2 Utilização da heurística OCCS

Activando o botão OCCS no submenu das Heurísticas abre-se uma janela de introdução de dados como a da Figura 6.15. Nesta janela introduzem-se os parâmetros para a resolução do problema corrente.

Uma vez especificados estes parâmetros, o problema corrente é resolvido. A solução do problema é exibida em duas janelas como as apresentadas nas Figuras 6.11

e 6.12 e, seguindo um procedimento exactamente igual ao da heurística apresentada no ponto anterior, pode ser armazenada na base de dados.



A janela de diálogo, intitulada "Heurística OCCS", contém o título "PARAMETROS" e três campos de entrada:

- Num. Max. de Celulas: campo com o valor "1" introduzido.
- Num. Max. Maquinas/Celula: campo vazio.
- Fluxo Relativo Desejavel (%): campo vazio.

Na base da janela, há dois botões: "Ok" e "Cancelar".

Figura 6.15 - Janela para introdução dos parâmetros da heurística OCCS

#### 6.6.4 Definição manual das secções e ajustamento das soluções obtidas

A definição manual das secções tem dois objectivos. Em primeiro lugar permite definir a composição dos departamentos no caso de sistemas organizados por processo. Em segundo lugar, permite o ajustamento de soluções para o problema da formação da células de produção, obtidas a partir das heurísticas disponíveis neste módulo.

Esta opção requer a introdução de um novo identificador de solução (no caso de se pretender definir manualmente uma secção) ou a selecção de um dos identificadores de solução armazenados na base de dados (no caso de se pretender modificar uma solução armazenada na base de dados).

Introduzido o identificador da solução (numa lista de selecção como a que se apresentou na Figura 4.7), visualiza-se uma janela de diálogo como a apresentada na Figura 6.16. A secção sobre a qual se querem efectuar operações é seleccionada no menu associado ao campo Secção. A lista de identificadores de máquinas que ainda não foram afectadas a qualquer secção é visualizada na lista associada ao campo

Máquinas e a lista de identificadores das máquinas afectadas à secção corrente é visualizada na lista associada ao campo Secção.



Figura 6.16 - Caixa de diálogo para a formação manual de secções

Nesta janela podem ser efectuadas as seguintes operações:

- (i) Transferência de máquinas não afectadas para uma secção: faz-se seleccionando as máquinas da lista associada ao campo Máquinas e activando a seta que aponta do campo Máquinas para o campo Secção.
- (ii) Eliminação de máquinas de secções: consegue-se seleccionando as máquinas da lista associada ao campo Secção e activando a seta que aponta do campo Secção para o campo Máquinas.
- (iii) Criação de secções: obtém-se activando o botão Criar Secção (que permite visualizar uma lista de selecção, como a que se apresentou na Figura 4.7) e introduzindo-se um novo

identificador no campo de texto da lista de selecção (a introdução de um identificador existente na base de dados faz aparecer uma mensagem de erro).

- (iv) **Eliminação de secções:** consegue-se activando o botão Apagar Secção, o que permite visualizar uma lista de selecção (como a que se apresentou na Figura 4.7) com todos os identificadores de secções existentes na base de dados e seleccionar um conjunto de identificadores desta lista. Eliminando-se uma secção da base de dados, as máquinas que lhe estavam afectadas passam para a lista associada ao campo Máquinas.

Uma solução modificada pode ser armazenada na base de dados com o mesmo identificador (o que elimina a solução original) ou com um novo identificador (preservando assim a solução original). O novo identificador é introduzido no campo de texto de uma lista de selecção (como a que se apresentou na Figura 4.7).

### **6.6.5 Visualização e eliminação de soluções**

As operações que se podem executar sobre as soluções armazenadas na base de dados são as de visualização ou de eliminação. A activação de qualquer uma destas operações conduzirá ao aparecimento de uma lista de selecção (como a que se apresentou na Figura 4.7) com os identificadores das soluções existentes para o problema em análise. A selecção de um destes identificadores permite visualizar janelas como as das Figuras 6.11 e 6.12 (opção Visualizar) ou apagar a solução da base de dados (opção Eliminar).

### **6.6.6 Visualização e redefinição dos equipamentos de transporte**

Activando o botão Sistema de Transporte no menu principal abre-se uma janela como a da Figura 6.17, a qual permite visualizar os fluxos inter-secções e intra-secções e redefinir os parâmetros relativos aos equipamentos de transporte utilizados para movimentar aqueles fluxos. Para tal, seleccionam-se as secções



(recorrendo-se aos menus associados aos campos Da Secção e Para a Secção) entre as quais se pretende analisar os fluxos e activa-se o botão Visualizar. Note-se que a escolha da mesma secção nos campos Da Secção e Para a Secção, como no exemplo exibido, permite visualizar os fluxos internos relativos à secção seleccionada.

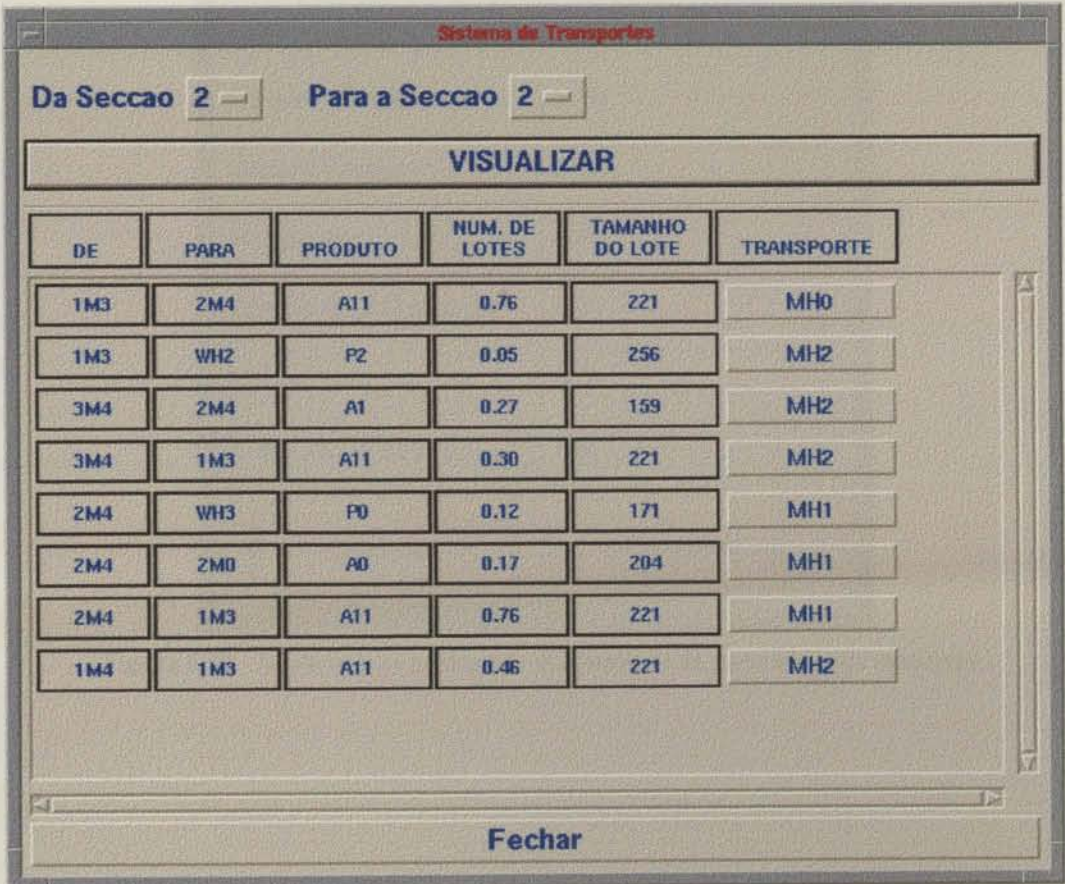


Figura 6.17 - Janela para visualização dos fluxos inter-secções e intra-secções e redefinição dos parâmetros relativos aos equipamentos de transporte

Premindo um dos botões associados ao campo Transporte (por exemplo, o correspondente a MH1) aparecerá uma caixa de diálogo como a representada na Figura 6.18. Nesta caixa podem ser alterados todos os parâmetros de transporte, incluindo o equipamento de transporte utilizado na operação em causa. Note-se que a introdução de um valor no campo Quantidade/Viagem recalcula automaticamente o campo número de viagens (durante o período de planeamento) e vice-versa.

A importância desta opção reside no facto de, somente depois de solucionado o problema de agregação das máquinas em secções de fabrico, o utilizador poder ter a noção exacta dos fluxos envolvidos entre cada par de máquinas e/ou armazéns.

Assim, admite-se que em face dos resultados obtidos neste módulo o utilizador possa redefinir, com vantagem, o sistema de transporte de materiais.

EQUIPAMENTO DE TRANSPORTE	
Tipo de Equipamento:	MH0
Quant/Viagem:	221
Tempo de Carga:	7.00
Tempo de Descarga:	8.00
Velocidade:	4.00
Num. de Viagens:	169
[Guardar] [Cancelar]	

Figura 6.18 - Janela com os parâmetros de transporte de materiais entre máquinas

## 6.7 Perspectivas de desenvolvimento do módulo

O desenvolvimento futuro deste módulo deverá passar primordialmente pela integração de novos modelos que permitam: (i) o projecto de sistemas de produção híbridos (processo/tecnologia de grupo) e (ii) a resolução conjunta dos problemas da afectação de operações a máquinas e da formação de células de produção.

Os sistemas de produção celular puros podem não ser os mais apropriados quando se fabrica uma grande variedade de produtos em lotes de pequena dimensão. Nestes casos, os componentes dentro de cada família tendem a ser muito dissemelhantes, donde decorre uma maior dificuldade em limitar o fluxo intercelular. Uma alternativa

possível é a implementação de sistemas de produção híbridos, nos quais coexistem simultaneamente células de produção e departamentos (organizados por processo).

O desenvolvimento de modelos para auxiliar o projecto de sistemas de produção híbridos não tem merecido muita atenção na literatura. No entanto, a sua importância prática é reconhecida (ver, por exemplo, Harhalhis et al (1996)), pelo que é uma área que deverá merecer a máxima atenção no desenvolvimento futuro deste projecto.

A afectação de operações de fabrico a máquinas tem claras implicações na formação de células de produção. O modelo incorporado no SAD para a resolução do problema de afectação de operações de fabrico a máquinas produz soluções míopes, uma vez que só considera os processos adjacentes a cada par de operações. É de imaginar que, por essa razão, as soluções obtidas não sejam as melhores no contexto da definição de sistemas de produção celulares. As operações executadas sobre diferentes componentes deveriam ser agrupadas tendo em conta as sequências de processamento completas desses componentes.

Um modelo que permita a resolução simultânea dos problemas da afectação de operações e da formação de células de produção seria desejável, mas parece de difícil consecução, pelo que será de investir no desenvolvimento de uma extensão do modelo para o primeiro destes problemas que proporcione a obtenção de soluções mais adaptadas ao objectivo do segundo.

# 7

---

## **Desenho de objectos gráficos e de postos de trabalho**

### **Conteúdo:**

- **Introdução**
- **Desenho de objectos gráficos**
- **Desenho de postos de trabalho**
- **Perspectivas de desenvolvimento**

## 7.1 Introdução

A obtenção de implantações detalhadas é um aspecto crucial no sucesso de um sistema de apoio ao projecto de implantações fabris, como o que se apresenta neste trabalho. Assim, as soluções para o problema das implantações fabris devem ser representadas graficamente através de modelos à escala dos equipamentos, por forma a facilitar a interpretação visual da implantação gerada e a permitir a criação de planos detalhados das instalações industriais.

Neste capítulo descrevem-se os módulos de desenho de objectos gráficos e de postos de trabalho. No primeiro destes módulos definem-se os modelos à escala dos equipamentos (máquinas, bancadas, etc.), edificios e armazéns. No segundo, desenham-se os postos de trabalho associados às máquinas, os quais incluem, para além do modelo gráfico da máquina que serve de base ao posto de trabalho, os pontos de entrada e de saída de materiais, a área de circulação e os armazéns de materiais em curso de fabrico.

## 7.2 Desenho de objectos gráficos

Neste módulo, desenham-se os modelos gráficos dos recursos que se utilizarão na representação das implantações fabris. Os componentes fundamentais deste módulo são: (i) a área de desenho onde são traçados os objectos gráficos que representam os modelos dos recursos, (ii) a interface associada a esta área de desenho, que inclui as operações para criação e modificação dos objectos gráficos e (iii) a base de dados em que se armazenam os modelos gráficos dos recursos.

Nesta secção, descrevem-se a estrutura da base de dados, a interface com o utilizador e a funcionalidade deste módulo.

## 7.2.1 Estrutura da base de dados

Na Figura 7.1 apresenta-se o diagrama de classes referente ao módulo de desenho de objectos gráficos. O dicionário de dados correspondente à base de dados descrita nesta secção é apresentado no Apêndice A.

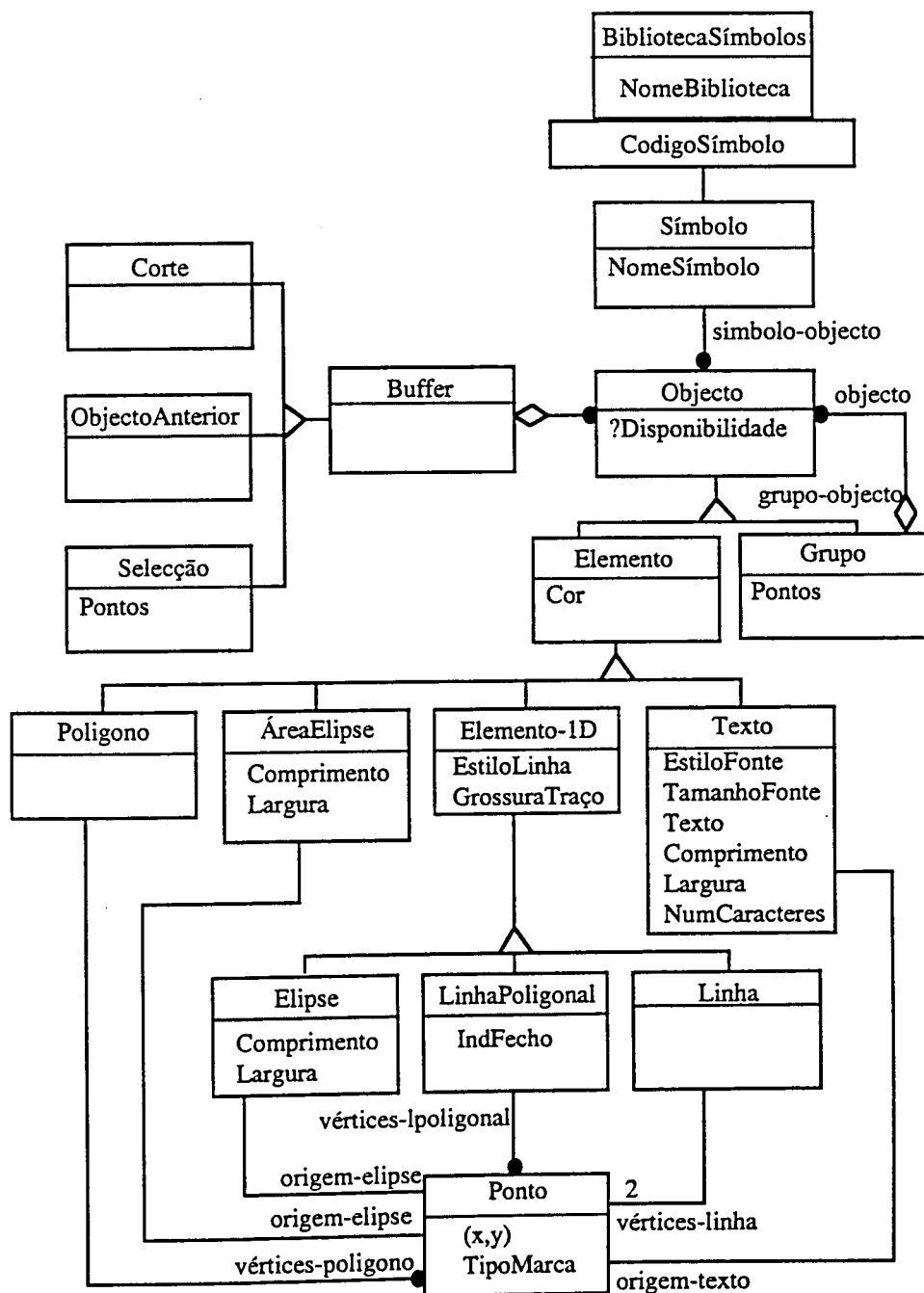


Figura 7.1 - Estrutura da base de dados para o módulo de desenho de objectos gráficos

Um Símbolo é a representação gráfica de um recurso. Os símbolos são agrupados em bibliotecas (BibliotecaSímbolos), por forma a facilitar a pesquisa. Por exemplo, podem ser criadas bibliotecas contendo conjuntos de símbolos de diferentes tipos de máquinas (tornos, frezadoras, prensas, etc.).

Os símbolos são constituídos por Objectos, os quais agrupam conjuntos de Elementos gráficos básicos. Estes elementos podem ser agrupados (Grupo), por forma a que o conjunto por eles definido seja encarado como um objecto único. Os objectos também pode ser inseridos em grupos, conjuntamente com os elementos gráficos básicos.

Os elementos gráficos básicos são: o segmento de recta (Linha), a elipse (Elipse), a linha poligonal (LinhaPoligonal), a cadeia de caracteres (Texto), o polígono (Polígono), a área de elipse (ÁreaElipse) e o ponto (Ponto).

Os pontos são armazenados na base de dados em coordenadas do mundo real, por forma a tornar a sua posição independente da escala utilizada no desenho.

Os objectos podem ser copiados para um registo temporário (Buffer-Corte) para posterior inserção noutra local da área de desenho.

Quando se inicia a execução de qualquer operação na área de desenho o sistema armazena o símbolo corrente num registo temporário (Buffer-ObjectoAnterior). Este funcionamento permite que o utilizador possa restabelecer o símbolo anterior, se após a execução da operação a quiser anular.

Um conjunto de objectos pode ser seleccionado para sobre ele se operar uma transformação (por exemplo, apagar, rodar, etc.). Esta selecção é armazenada num registo temporário (Buffer-Seleccção).

## 7.2.2 Interação com o utilizador

### 7.2.2.1 Descrição geral da interface

Nesta secção mostram-se as interações possíveis no módulo de desenho de objectos gráficos e descreve-se sumariamente a funcionalidade de cada uma destas interações.

Da janela principal do SAD (que se apresentou na Figura 3.2) reproduz-se na Figura 7.2 a área a partir da qual se tem acesso aos comandos dos módulos de desenho de objectos gráficos e de postos de trabalho. A selecção, nesta área, das opções Equipamentos, Armazéns e Edifícios conduzem o utilizador à janela da Figura 7.3, a qual, além de incluir a área de desenho, fornece o acesso aos comandos do módulo de desenho de objectos gráficos, segundo a árvore que se apresenta na Figura 7.4.

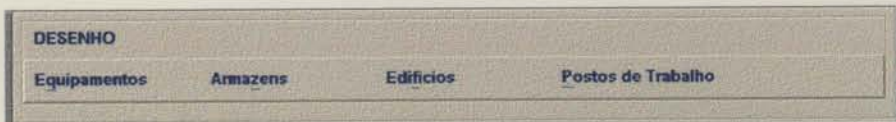


Figura 7.2 - Área da janela principal relativa aos módulos de desenho de objectos gráficos e de postos de trabalho

Na janela da Figura 7.3 podem-se distinguir os seguintes componentes:

- i) **Área de desenho:** inclui a folha na qual se representam os objectos gráficos e duas régua (uma horizontal e outra vertical) graduadas em coordenadas do mundo real (em função da escala seleccionada). A posição do zero das régua pode ser alterada (zero móvel), bastando para tal accionar o botão esquerdo do rato com o cursor posicionado sobre a régua na posição pretendida para o zero. A porção da área de desenho visualizada depende das dimensões da janela principal, as quais têm como limite máximo o tamanho do monitor. Os



cursores horizontal e vertical (colocados na parte inferior e à direita da área de desenho, respectivamente) permitem controlar a porção da área de desenho que é visualizada.

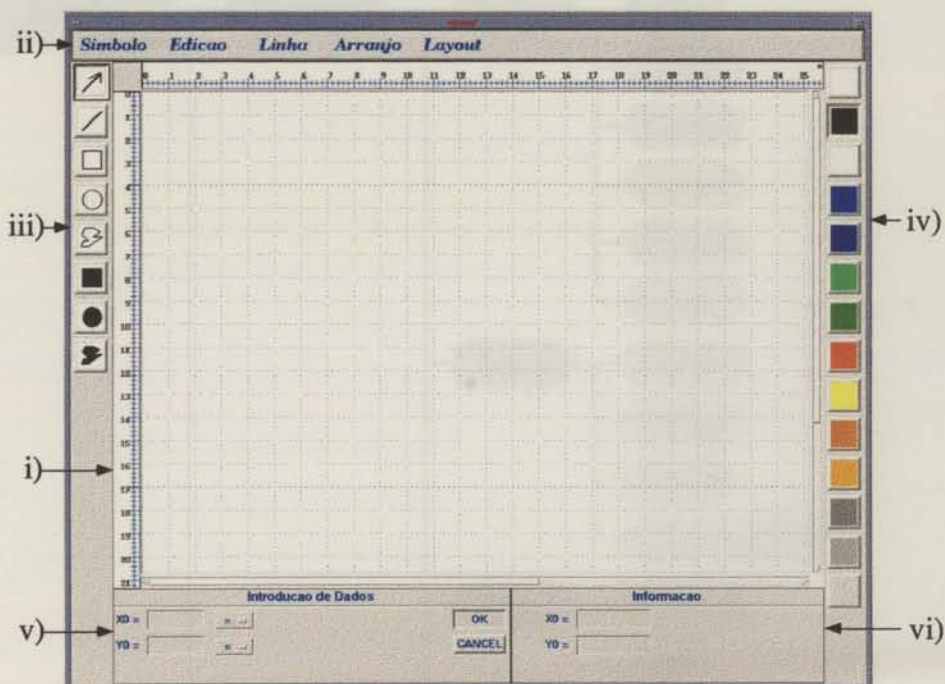


Figura 7.3 - Janela principal do módulo de desenho de objectos gráficos

- ii) **Menu de operações:** inclui os comandos que permitem efectuar operações sobre os objectos gráficos e a área de desenho.
- iii) **Menu de elementos geométricos:** inclui os botões que permitem seleccionar os elementos geométricos básicos a incorporar no desenho ou colocar o cursor no modo apontador (para selecção de áreas ou de objectos).
- iv) **Paleta de cores:** inclui os botões que permitem seleccionar a cor dos objectos gráficos.
- v) **Janela de introdução de dados:** inclui os campos de entrada de dados que permitem a definição dos objectos gráficos básicos. Os campos de entrada de dados são configurados automaticamente em função do elemento geométrico escolhido na área iii). A introdução de dados nestes campos é opcional,

uma vez que os objectos gráficos podem ser definidos utilizando o cursor associado ao rato.

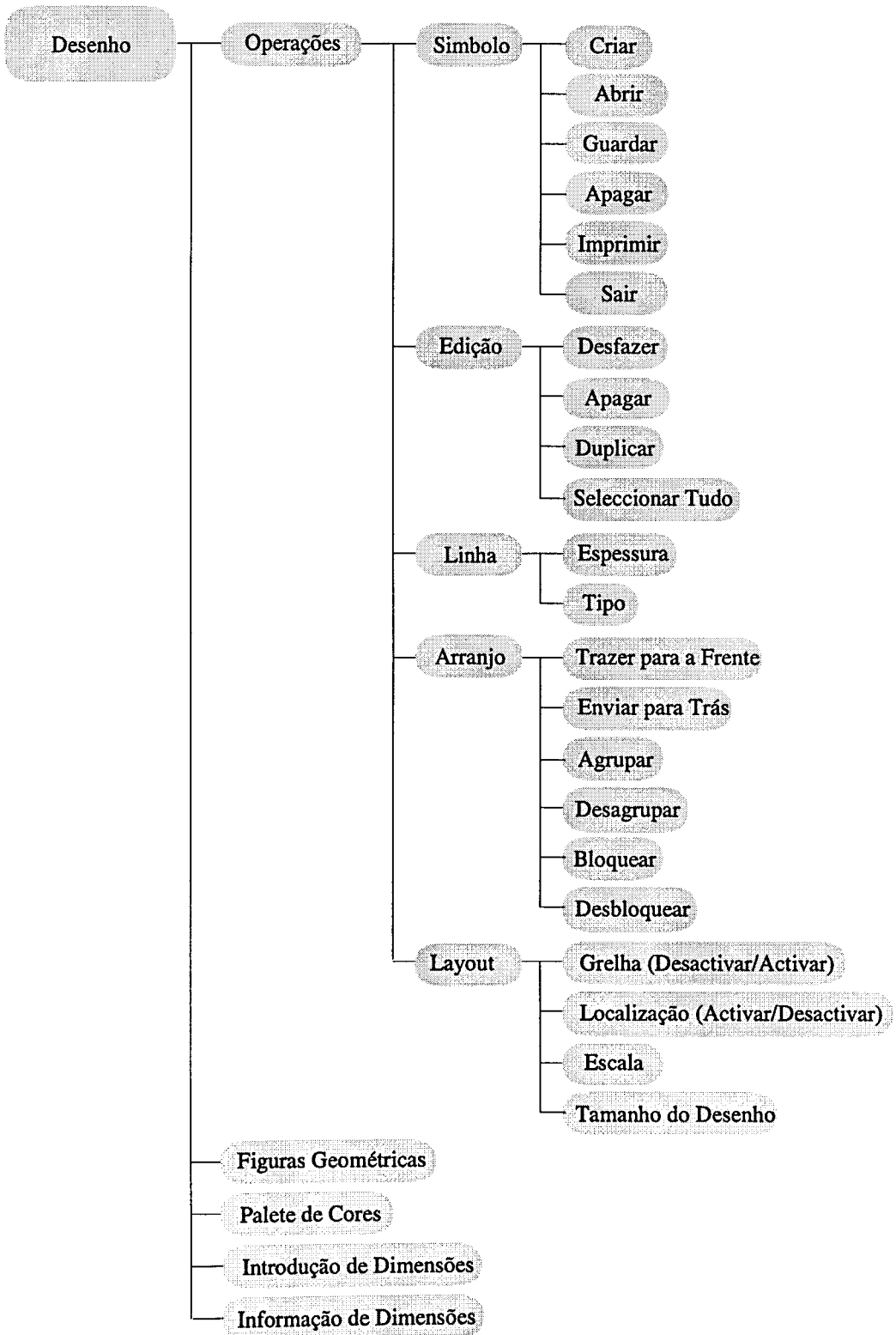


Figura 7.4 - Percursos de acesso aos comandos do módulo de desenho de objectos gráficos

- vi) **Janela de informação:** inclui os campos de texto nos quais se podem visualizar, em tempo real, os movimentos do cursor e as dimensões dos objectos gráficos. Os campos de texto são configurados automaticamente em função do elemento geométrico escolhido na área iii).

### 7.2.2.2 Operações sobre objectos gráficos

O sistema permite as seguintes operações sobre objectos gráficos:

- i) **Criar:** apaga os objectos gráficos da área de desenho. Uma mensagem de aviso (como a apresentada na Figura 7.5) é exibida, por forma a permitir armazenar os objectos gráficos na base de dados. Se a resposta a esta mensagem for afirmativa, aparecerá uma lista de selecção (como a que se apresentou na Figura 4.7) com todos os nomes das bibliotecas de símbolos existentes na base de dados. Pode-se então optar por seleccionar uma das bibliotecas existentes ou criar uma nova biblioteca introduzindo-se a sua designação na caixa de texto da lista de selecção. Uma vez seleccionada a biblioteca, aparece uma nova lista de selecção, com os nomes dos símbolos existentes nessa biblioteca, e o nome do novo símbolo é introduzido no campo de texto dessa lista de selecção. Uma mensagem de erro (como a que se apresentou na Figura 4.8) aparecerá se o nome do novo símbolo for igual a um já existente na base de dados para a biblioteca seleccionada.



Figura 7.5 - Mensagem de aviso

- ii) **Abrir:** exhibe na área de desenho um símbolo existente na base de dados. A biblioteca e o símbolo são sequencialmente seleccionados através de duas listas de selecção (como a que se apresentou na Figura 4.7) contendo, respectivamente, todos os nomes de bibliotecas e dos símbolos da biblioteca seleccionada. Do mesmo modo que na operação anterior, é dada a oportunidade de guardar o símbolo que se encontra actualmente na área de desenho.
- iii) **Guardar:** acrescenta à base de dados um símbolo contendo os objectos gráficos exibidos na área de desenho. A selecção da biblioteca e do nome do símbolo são introduzidos como na operação i).
- iv) **Apagar:** apaga um símbolo da base de dados. A biblioteca e o símbolo são seleccionados sequencialmente como na operação ii).
- v) **Imprimir:** imprime os objectos gráficos exibidos na área de desenho.
- vi) **Sair:** abandona o módulo de desenho de objectos gráficos. No caso de existirem objectos gráficos na área de desenho é dada a opção de os armazenar na base de dados, recorrendo-se a um procedimento semelhante ao descrito para a operação i).

### 7.2.2.3 Operações de edição

As operações de edição são efectuadas sobre um conjunto de objectos seleccionados para o efeito. As formas de selecção de objectos são as seguintes:

- i) **Um único objecto:** efectua-se activando o botão esquerdo do rato com o cursor posicionado sobre o objecto a seleccionar. A selecção de um objecto anula a selecção anterior.

- ii) **Um conjunto de objectos não contíguos:** efectua-se como no caso anterior, mas premindo continuamente o botão 'Shift' no teclado. Assim, os objectos são seleccionados um a um, mas a selecção de um objecto não anula as selecções anteriores.
- iii) **Um conjunto de objectos contíguos:** efectua-se traçando (com o cursor no modo apontador) um rectângulo que abranja todos os objectos a seleccionar. Este rectângulo é definido premindo-se o botão esquerdo do rato no ponto correspondente a um dos vértices do rectângulo e, com o botão sempre premido, movendo-se o rato até ao vértice oposto. Durante esta operação são visualizados (a tracejado) diferentes rectângulos em que um dos vértices é o ponto inicial (onde o rato foi premido pela primeira vez) e o vértice oposto é o ponto onde o cursor se encontra (efeito de 'rubber-band'). Se o rectângulo é traçado da esquerda para a direita, somente são seleccionados os objectos totalmente abrangidos pelo rectângulo. No caso contrário, são seleccionados adicionalmente todos os objectos que são cruzados por um dos lados do rectângulo.

Os objectos seleccionados são indicados por pequenos rectângulos colocados nos vértices do menor rectângulo que os envolve.

As operações de edição permitidas pelo sistema são as seguintes:

- i) **Desfazer:** anula a última operação efectuada sobre um conjunto de objectos.
- ii) **Apagar:** apaga o conjunto de objectos seleccionados.
- iii) **Duplicar:** duplica os objectos seleccionados.
- iv) **Seleccionar Tudo:** selecciona todos os objectos na área de desenho.

## 7.2.2.5 Operações sobre objectos

## 7.2.2.4 Operações sobre linhas

As operações sobre objectos são efectuadas sobre um conjunto de objectos

As operações sobre linhas são efectuadas sobre um conjunto de objectos seleccionados ou sobre os elementos gráficos básicos traçados a partir do momento em que uma das opções da operação é activada.

As operações sobre linhas definem a espessura e o tipo de linha dos objectos gráficos. As opções disponíveis para cada uma destas operações são apresentadas nas Figuras 7.6 e 7.7. As opções que nestas figuras estão assinaladas com um losango são aquelas que, por defeito, se encontram activas inicialmente.

<b>Linha</b>	<b>Arranjo</b>
<b>Espessura</b> ▶	0.18 mm
<b>Tipo</b> ▶	0.18 mm
	◊ 0.25 mm
	0.35 mm
	0.50 mm
	0.70 mm
	1.00 mm
	1.40 mm

Figura 7.6 - Opções para a definição da espessura do traço

<b>Linha</b>	<b>Arranjo</b>
<b>Espessura</b> ▶	
<b>Tipo</b> ▶	◊ ———
	- - - - -
	— · — · —
	· · · · ·
	- - - - -
	- - - - -

Figura 7.7 - Opções para a definição do tipo de linha

### 7.2.2.5 Operações sobre objectos

As operações sobre objectos são efectuadas sobre um conjunto de objectos seleccionados. O sistema permite as seguintes operações sobre objectos:

- i) **Trazer para a frente:** sobrepõe o conjunto de objectos seleccionados a todos os outros objectos na área de desenho.
- ii) **Enviar para trás:** sobrepõe todos os objectos não seleccionados na área de desenho ao conjunto de objectos seleccionados.
- iii) **Agrupar:** agrupa os objectos seleccionados num único objecto.
- iv) **Desagrupar:** é a operação inversa da anterior.
- v) **Bloquear:** impede qualquer operação sobre o conjunto de objectos seleccionados.
- vi) **Desbloquear:** anula a operação anterior.

### 7.2.2.6 Operações sobre a área de desenho

O sistema permite as seguintes operações sobre a área de desenho:

- i) **Activar/Desactivar Grelha:** coloca ou retira a grelha da área de desenho.
- ii) **Activar/Desactivar Localização:** activa ou desactiva a visualização de informações na janela Dimensões. Note-se que o sistema fica sensivelmente mais lento se esta opção estiver activada.
- iii) **Escala:** define a escala do desenho. As opções disponíveis são as que se apresentam na Figura 7.8; aquela que está assinalada com um losango é a que, por defeito, se encontra activa inicialmente. A graduação das régua da área de desenho é

actualizada de acordo com a escala seleccionada e os objectos na área de desenho, caso existam, são redesenhados de acordo com a nova escala.

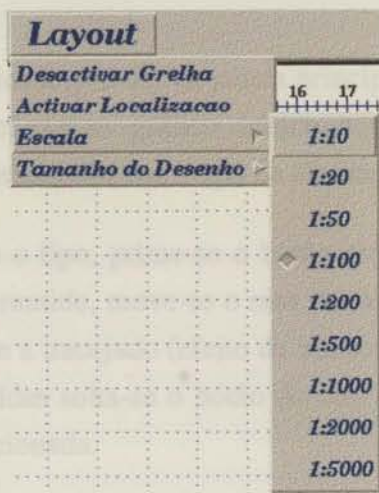


Figura 7.8 - Opções disponíveis para a escala dos desenhos

iv) **Tamanho do desenho:** define as dimensões da área de desenho. As opções disponíveis apresentam-se na Figura 7.9; aquela que está assinalada com um losango é a que, por defeito, se encontra activa inicialmente.

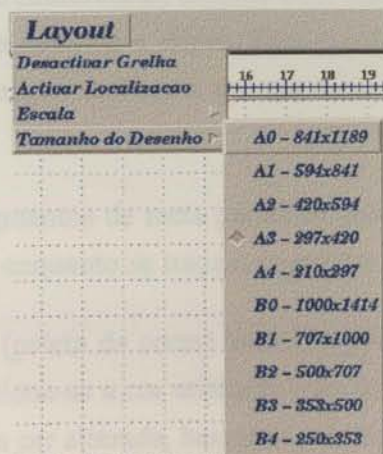


Figura 7.9 - Opções disponíveis para as dimensões da área de desenho



### 7.2.2.7 Figuras geométricas e paleta de cores

No grupo de botões indicado por iii) na janela principal deste módulo (Figura 7.3) selecciona-se o tipo do elemento gráfico básico a utilizar no desenho, o qual permanece activo até que se escolha outro tipo de elemento ou o apontador.

Depois de seleccionado o tipo, prime-se o botão esquerdo do rato para fixar um dos pontos. Com o botão premido, move-se o rato visualizando-se simultaneamente a figura geométrica resultante a tracejado (efeito de 'rubber-band'). Quando a figura fica com as dimensões pretendidas solta-se o botão do rato e aparece a figura definitiva, desenhada com a cor seleccionada.

Nas linhas poligonais ou polígonos desenha-se um segmento de recta de cada vez. Para indicar que uma linha poligonal é fechada, activa-se o botão direito do rato depois de desenhado o último segmento de recta.

Note-se que um rectângulo é armazenado na base de dados como um polígono ou uma linha poligonal, consoante seja sólido ou não; a sua introdução como elemento gráfico serve somente para facilitar a utilização do sistema.

Para se desenhar uma circunferência, escolhe-se o modo elipse e mantém-se a tecla 'Shift' premida enquanto se desenha a elipse. Este procedimento obriga a que o eixo maior e o eixo menor da elipse tenham a mesma dimensão, desenhando assim uma circunferência.

Para se desenharem segmentos de recta paralelos aos eixos  $XX'$  e  $YY'$ , prime-se a tecla 'Shift' ou 'Caps Lock' enquanto se traça o segmento.

No conjunto de botões (paleta de cores) indicado por iv) na janela principal deste módulo (Figura 7.3) selecciona-se a cor utilizada para desenhar os elementos gráficos. A cor de um elemento pode ser alterada, bastando para tal seleccioná-lo e activar a cor pretendida na paleta.

### 7.2.2.7 Informação e introdução de dimensões

Na janela Dimensões (indicada por vi) na janela principal deste módulo, apresentada na Figura 7.3) podem-se visualizar, consoante o elemento que se está a desenhar, as seguintes informações:

- i) **Modo apontador:** coordenadas da posição corrente do cursor.
- ii) **Modo linha, linha poligonal ou polígono:** coordenada do ponto fixo (ou do ponto terminal do segmento de recta anterior, no caso das linhas poligonais ou polígonos), ângulo relativamente ao eixo XX' e comprimento do segmento.
- iii) **Modo rectângulo ou área de rectângulo:** coordenadas do ponto fixo, comprimento e largura.
- iv) **Modo elipse ou área de elipse:** coordenadas do ponto fixo, comprimento e largura do menor rectângulo que contém a elipse.

A janela Introdução de Dados (indicada por v) na janela principal deste módulo, apresentada na Figura 7.3) permite a definição manual dos elementos gráficos. Os dados a introduzir são os mesmos que foram descritos relativamente à janela Dimensões.

## 7.3 Desenho de postos de trabalho

Um dos aspectos distintivos do SAD que se apresenta neste trabalho reside no facto de as máquinas não serem colocadas isoladamente na área de implantação, mas sim associadas ao posto de trabalho que as integra. Cada posto de trabalho compreende: (i) o espaço necessário para a operação de uma máquina, o que inclui, para além da própria máquina, espaços de armazenamento de materiais e ferramentas

auxiliares e a área que o operário necessita para se movimentar, (ii) um ponto de entrada dos materiais e (iii) um ponto de saída dos materiais.

Podem-se enunciar duas razões para a introdução deste conceito de posto de trabalho. Em primeiro lugar, a operação de uma máquina implica normalmente a existência de equipamentos auxiliares, de áreas de armazenamento de materiais e de espaço para o operador se movimentar, pelo que a área a alocar a uma máquina na área de implantação é, normalmente, superior à área que a máquina, por si só, ocuparia. Em segundo lugar, a orientação das máquinas e, conseqüentemente, a definição dos pontos de entrada e de saída de materiais, é um aspecto importante no desenho de implantações fabris. A relevância deste facto é ilustrada pelas duas situações que se apresentam nas Figuras 7.10 e 7.11. Em ambos os casos, pretende-se implantar três máquinas (M0, M1 e M2) por forma a minimizar a distância que o fluxo entre elas tem que percorrer. Admite-se ainda que só existe fluxo da máquina M0 para a máquina M1 e desta para a máquina M2. Os pontos de entrada e de saída de materiais são representados pelas letras E e S, respectivamente.

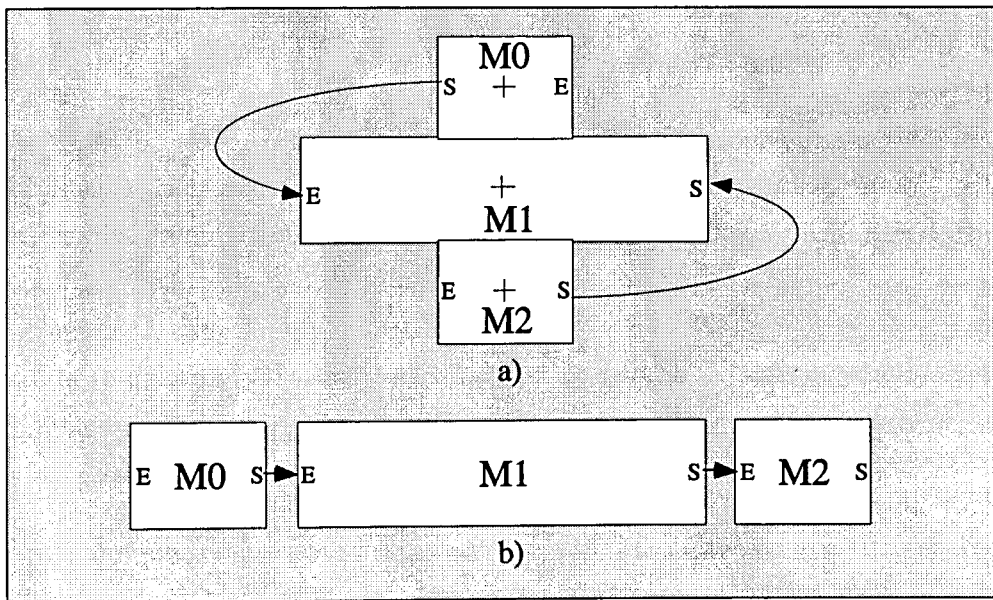


Figura 7.10 - Exemplo ilustrativo da importância da definição de pontos de entrada e saída

Na situação apresentada na Figura 7.10, o comprimento da máquina M1 é muito maior do que a sua largura. A utilização dos centros geométricos das máquinas para medir a distância percorrida pelos fluxos conduziria à implantação representada na Figura 7.10-a), uma vez que esta colocação das máquinas corresponde à menor distância entre os centros geométricos dos pares de máquinas (M0, M1) e (M1, M2).

No entanto, a distância que, de facto, os fluxos teriam que percorrer (indicada naquela figura pelas setas) é muito maior. Na Figura 7.10-b) apresenta-se a implantação que resultaria da consideração dos pontos de entrada e de saída de materiais no cálculo da distância a percorrer pelos fluxos. Como se pode constatar, os percursos de transporte são menores neste segundo caso.

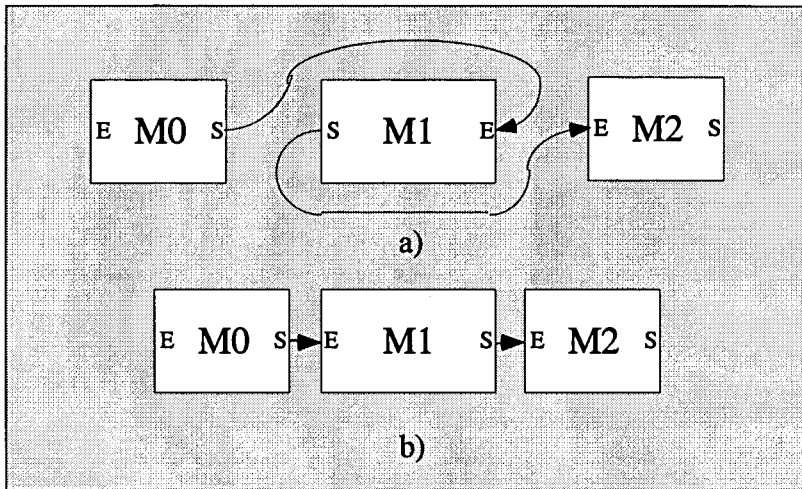


Figura 7.11 - Exemplo ilustrativo da importância da orientação dos equipamentos

Na situação apresentada na Figura 7.11, pretende-se realçar a importância da orientação das máquinas na diminuição dos percursos de transporte. A não orientação dos equipamentos, pela não definição dos pontos de entrada e de saída de materiais, pode conduzir à situação representada na Figura 7.11-a). Neste caso, os percursos de transporte (indicados pelas setas) são maiores do que os induzidos pela implantação representada na Figura 7.11-b), a qual se obteve tendo em consideração os pontos de entrada e de saída de materiais.

O módulo que se apresenta nesta secção possibilita a definição gráfica dos postos de trabalho associados a cada uma das máquinas a colocar na área fabril. A estrutura da base de dados correspondente a este módulo foi apresentada na secção 3.3.4, assim como o correspondente modelo objecto (ver Figura 3.14).

### 7.3.1 Descrição geral da interface

Nesta secção mostram-se as interações possíveis no módulo de desenho de postos de trabalho e descreve-se sumariamente a funcionalidade de cada uma destas interações.

A selecção da opção Postos de Trabalho na área da janela principal do SAD reproduzida na Figura 7.2 conduz o utilizador à janela da Figura 7.12, a qual, além de incluir a área de desenho, fornece o acesso aos comandos do módulo de postos de trabalho, segundo a árvore que se apresenta na Figura 7.13.

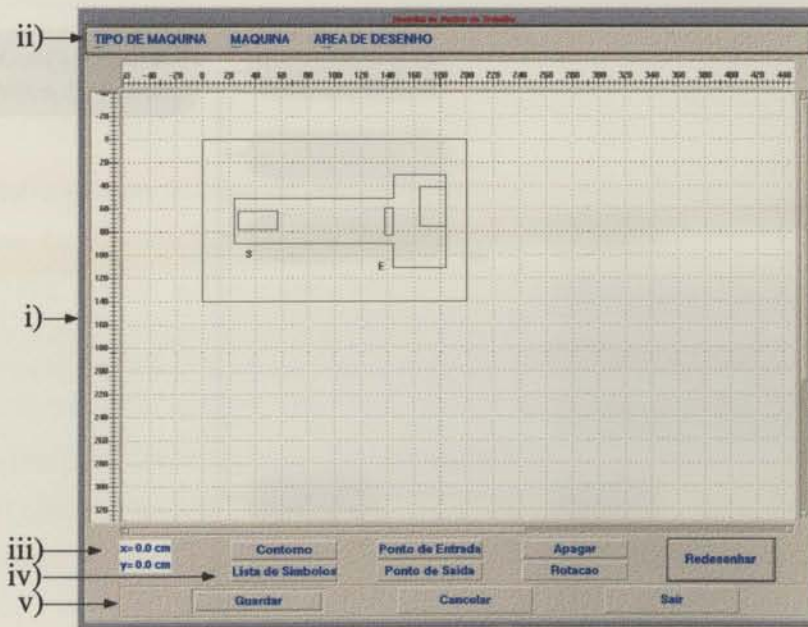


Figura 7.12 - Janela principal do módulo de desenho de postos de trabalho

Na janela da Figura 7.12 podem-se distinguir os seguintes componentes:

- i) **Área de desenho:** inclui a folha na qual se desenhavam os postos de trabalho e duas régua com zero móvel (uma horizontal e outra vertical) graduadas em coordenadas do mundo real (em função da escala seleccionada). A porção da área de desenho visualizada depende das dimensões da janela principal, as quais têm como limite máximo o tamanho do monitor. Os

cursores horizontal e vertical (colocados na parte inferior e à direita da área de desenho, respectivamente) permitem controlar a porção da área de desenho que é visualizada. Na janela da Figura 7.12 pode-se visualizar um posto de trabalho, compreendendo o símbolo da máquina associada, os pontos de entrada (E) e de saída (S) de materiais e o rectângulo que define o contorno do posto de trabalho. Qualquer símbolo, representado na área de desenho, pode ser seleccionado e movido com o cursor.

ii) **Menu de operações:** consta dos comandos que permitem seleccionar as máquinas a incluir nos postos de trabalho a desenhar e definir os parâmetros da área de desenho.

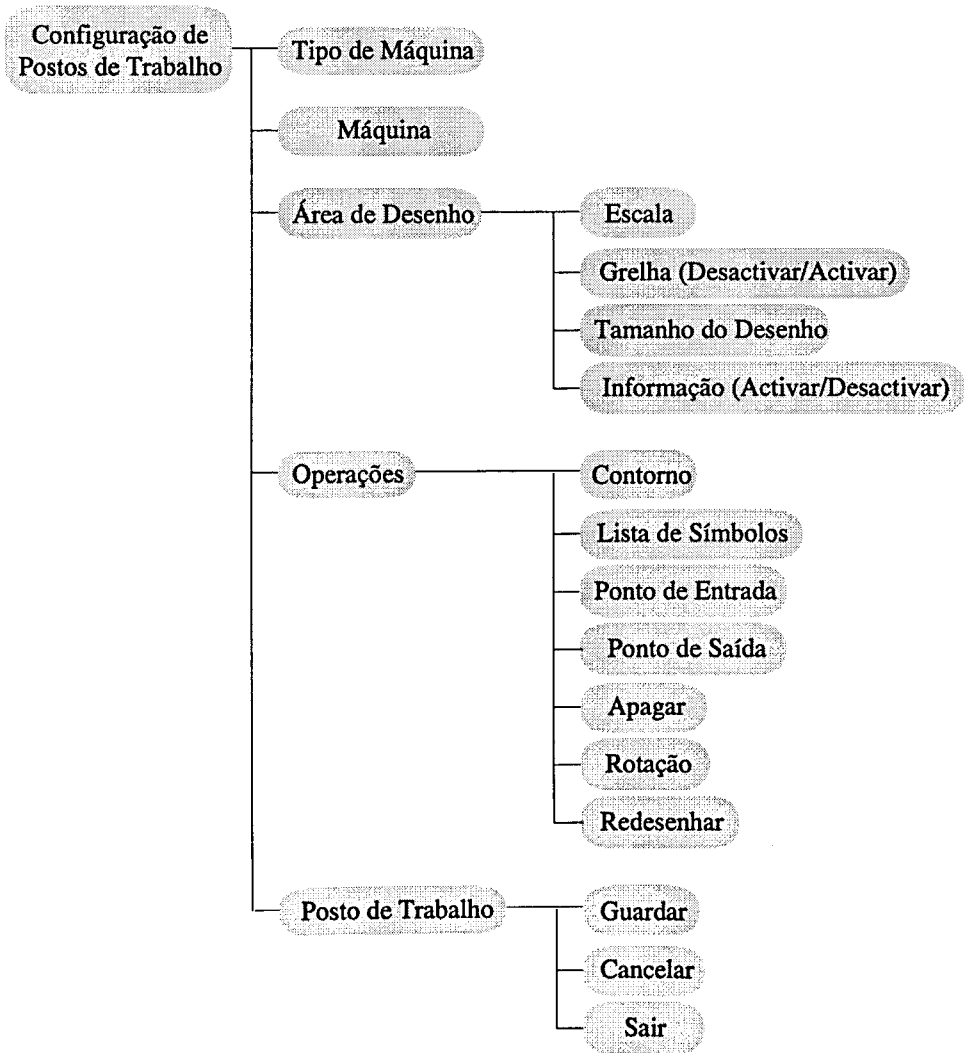


Figura 7.13 - Percursos de acesso aos comandos do módulo de desenho de postos de trabalho

- iii) **Janela de informação:** inclui os campos de texto nos quais se pode visualizar, em tempo real, os movimentos do cursor.
- iv) **Operações de configuração de postos de trabalho:** inclui os botões que permitem definir alguns dos elementos constituintes dos postos de trabalho e efectuar operações sobre os símbolos associados a estes postos de trabalho.
- v) **Operações sobre o desenho de postos de trabalho:** inclui os botões que permitem guardar e cancelar o desenho corrente e abandonar este módulo.

### 7.3.2 Selecção de máquinas

O desenho dos postos de trabalho pode ser efectuado ao nível dos tipos de máquinas ou das unidades individuais. Este modo de funcionamento permite definir uma configuração geral para todas as unidades de um determinado tipo e, posteriormente, ajustar a configuração de algumas máquinas em particular.

Note-se que este módulo só poderá ser utilizado após a definição de um problema de implantações fabris, uma vez que somente aí se saberá quais os tipos de máquinas e as máquinas individuais para os quais é relevante desenhar os postos de trabalho. O modo como se define um problema de implantações fabris é descrito no capítulo seguinte, mas, por agora, só importa saber que a cada um destes problemas está associado um identificador e um conjunto de máquinas (e os tipos respectivos) a colocar na área de implantação.

A selecção de uma das opções Tipo De Máquina ou Máquina no menu de operações da janela da Figura 7.12 faz aparecer uma caixa de diálogo como a representada na Figura 7.14, para introdução do identificador do problema de implantação.

A activação da tecla 'F1', quando o cursor se encontra colocado no campo de entrada de dados, permite visualizar uma lista de selecção (como a apresentada na Figura 4.7) com todos os identificadores de problemas de implantação armazenados

na base de dados. A selecção de um desses identificadores da lista transfere, automaticamente, o seu valor para o campo de entrada de dados.

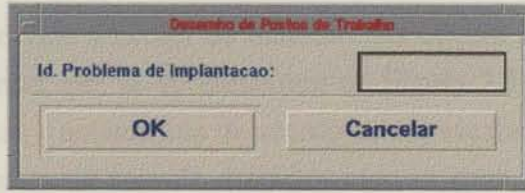


Figura 7.14 - Caixa de diálogo para identificação do problema de implantação

Uma caixa de diálogo de erro (como a apresentada na Figura 4.8), com uma mensagem apropriada ao contexto, aparecerá quando se introduz um identificador de um problema não armazenado na base de dados.

Após a aceitação do identificador introduzido na caixa de diálogo, aparecerá uma lista de selecção (como a apresentada na Figura 4.7) com os identificadores dos tipos de máquina ou das máquinas individuais (consoante a opção escolhida inicialmente) associados ao problema de implantação. Selecciona-se então o tipo de máquina, ou a unidade individual, cujo posto de trabalho se pretende desenhar e o símbolo correspondente é inserido na área de desenho. No caso de um determinado tipo de máquina não ter ainda o seu símbolo definido, aparecerão sequencialmente duas listas de selecção (como a apresentada na Figura 4.7) para se escolher os identificadores da biblioteca e do símbolo (da biblioteca seleccionada) que passará a estar associado a esse tipo de máquina.

### 7.3.3 Operações sobre a área de desenho

O sistema permite as seguintes operações sobre a área de desenho:

- i) **Activar/Desactivar Grelha:** coloca ou retira a grelha da área de desenho.
- ii) **Activar/Desactivar Localização:** activa ou desactiva a visualização de informações na janela de informação (ver



Figura 7.12-iii)). Note-se que o sistema torna-se mais lento se esta opção estiver activada.

iii) **Escala:** define a escala do desenho. As opções disponíveis são as mesmas que se apresentaram na Figura 7.8. A graduação das régua é actualizada de acordo com a escala seleccionada, e os objectos na área de desenho, caso existam, são redesenhados de acordo com a nova escala.

iv) **Tamanho do desenho:** define as dimensões da área de desenho. As opções disponíveis são as mesmas que se apresentaram na Figura 7.9.

### 7.3.4 Operações para a configuração de postos de trabalho

As operações disponíveis para a configuração de postos de trabalho são as seguintes:

i) **Contorno:** define o rectângulo que delimita o espaço associado ao posto de trabalho. A activação desta opção (ver Figura 7.12-iv)) faz aparecer uma janela de diálogo como a representada na Figura 7.15. Nesta janela definem-se as coordenadas do canto superior esquerdo (X,Y), o comprimento e a largura do rectângulo. A alteração de um contorno associado a um posto de trabalho é efectuada pela simples redefinição de um novo contorno.

Um diálogo de erro (como o apresentado na Figura 4.8) será exibido nas seguintes situações:

- não introdução do tipo de dados correcto em cada um dos campos,
- não preenchimento de um dos campos.

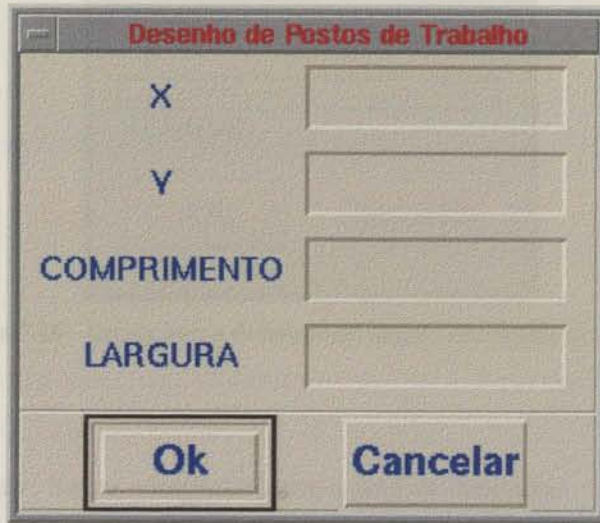


Figura 7.15 - Caixa de diálogo para a definição do contorno dos postos de trabalho

- ii) **Pontos de entrada/saída:** definem as coordenadas dos pontos de entrada e de saída de materiais. Seleccionando-se qualquer uma destas opções (ver Figura 7.12-iv)) e activando-se o cursor no ponto desejado da área de desenho, definem-se as coordenadas do ponto de entrada (ou do de saída). O cursor é modificado durante esta operação para indicar ao utilizador a opção seleccionada (o cursor fica com o formato de um E no caso da opção de definição do ponto de entrada e com o formato de um S no caso de definição do ponto de saída). A modificação de um ponto de entrada ou de saída é efectuada redefinindo-se simplesmente o ponto.
- iii) **Lista de Símbolos:** aparecem sequencialmente duas listas de selecção (como a apresentada na Figura 4.7) que permitem escolher uma biblioteca e um símbolo (dessa biblioteca) para integrar o posto de trabalho.
- iv) **Rotação:** define a rotação (relativamente ao eixo  $XX'$ ) de um símbolo seleccionados. A selecção desta opção faz aparecer uma janela com uma escala, como a representada na Figura 7.16, para definição da rotação do símbolo.

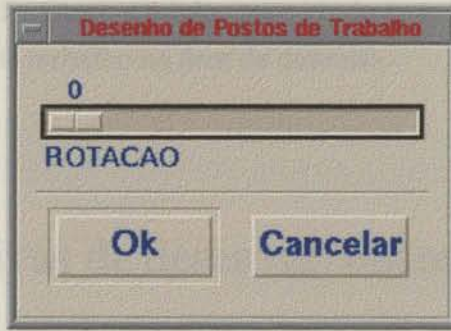


Figura 7.16 - Escala para a definição do ângulo de rotação de símbolos

- v) **Apagar:** limpa completamente a área de desenho.
- vi) **Redesenhar:** redesenha o posto de trabalho. Esta opção foi introduzida uma vez que, por forma a melhorar o desempenho do sistema, optou-se por não se redesenhar a área de desenho após cada operação. Assim, quando o utilizador achar que é necessário redesenhar o posto de trabalho na área de desenho, activa esta opção.

### 7.3.5 Operações sobre o desenho de postos de trabalho

As operações aplicáveis ao posto de trabalho visualizado na área de desenho são as seguintes:

- i) **Guardar:** armazena na base de dados a configuração do posto de trabalho. Uma lista de selecção (como a apresentada na Figura 4.7) com os identificadores de postos de trabalho existentes na base de dados (para o problema de implantação corrente) é exibida. A selecção de um dos identificadores modifica uma configuração previamente armazenada. A introdução de um novo identificador na caixa de texto da lista de selecção cria um novo posto de trabalho.
- ii) **Cancelar:** anula as operações efectuadas para o desenho do posto de trabalho corrente e limpa a área de desenho.

- iii) **Sair:** abandona este módulo, permitindo guardar a configuração do posto de trabalho na área de desenho.

## 7.4 Perspectivas de desenvolvimento do módulo

Com este módulo pretende-se fornecer as facilidades mínimas necessárias ao desenho de objectos gráficos e de postos de trabalho.

Este módulo foi o primeiro a ser desenvolvido, e as rotinas de desenho que contém equiparavam-se às dos pacotes comerciais básicos, existentes na altura, para o desenho assistido por computador (CAD). No entanto, o esforço necessário para manter um módulo como este actualizado aconselha a que se encare a possibilidade de integração de um pacote comercial de CAD no sistema. Além da vantagem associada à permanente actualização do módulo, o utilizador beneficiaria de uma melhor qualidade de representação gráfica. Por outro lado, muitas empresas dispõem de sistemas de CAD onde já têm armazenados desenhos dos seus equipamentos, os quais se poderiam facilmente integrar no sistema.

# 8

---

## Implantações fabris

- **Introdução**
- **Modelos para o problema das implantações fabris**
- **Critérios alternativos para o problema das implantações fabris**
- **Heurísticas para o problema da implantação de secções com áreas desiguais**
- **Heurísticas para a resolução do problema da implantação de máquinas (ou de secções com configuração geométrica fixa)**
- **Heurística utilizada no sistema**
- **Interacção com o utilizador**
- **Perspectivas de desenvolvimento do módulo**

## 8.1 Introdução

Em capítulos anteriores abordaram-se os problemas da afectação de operações a máquinas e da agregação destas em secções de fabrico. Da resolução destes problemas derivam, respectivamente, a especificação do conjunto de operações efectuadas em cada uma das máquinas dos diferentes tipos e a definição do modo como as máquinas se agrupam nas secções de fabrico. Agora o objectivo é o de definir o posicionamento relativo das máquinas nas secções de fabrico e destas na área fabril.

O problema das implantações fabris tem sido abordado de três formas distintas, em função do tipo de recursos a dispor na área fabril:

- (i) secções com áreas iguais,
- (ii) secções com áreas diferentes,
- (iii) máquinas ou secções com configuração geométrica fixa.

Se todas as secções tiverem a mesma área ou puderem ser fisicamente permutadas sem que se alterem as distâncias entre si, o problema das implantações resume-se então à determinação da melhor afectação das secções às localizações possíveis, de acordo com um critério pré-definido.

Quando as secções têm áreas diferentes, não é possível especificar antecipadamente as suas localizações potenciais, uma vez que estas dependem da configuração das secções. As principais dificuldades associadas à implantação de secções com áreas desiguais decorrem do elevado número de implantações possíveis e da existência de um grande número de configurações que conduzem a óptimos locais, muito afastados do óptimo global. Normalmente, as técnicas aplicadas a este tipo de problemas dividem a área fabril numa grelha rectangular, afectando cada secção a um conjunto de células desta grelha. Este procedimento conduz a secções com formas irregulares, pelo que não podem ser aplicadas aos casos em que a geometria das secções é fixa.

O problema da implantação de máquinas ou de secções com geometria fixa, apesar de ser o problema que tem atraído menos atenção por parte dos investigadores, reveste-se de grande importância do ponto de vista prático, pois é o único cuja

resolução pode conduzir ao projecto detalhado de implantações. Um conjunto de técnicas, normalmente baseadas em programação não-linear, que encaram a área fabril como um plano contínuo, têm sido propostas para a resolução deste problema.

Neste capítulo revêem-se os modelos mais frequentemente adoptados para cada um dos problemas atrás referidos, os critérios de optimização mais utilizados e alguns dos métodos desenvolvidos para a resolução dos problemas de implantação de secções com áreas diferentes e de máquinas, nos quais se inclui a heurística que integra o SAD.

As soluções para o problema das implantações fabris podem ter um forte impacto em aspectos tão variados como os custos de transporte de materiais, a utilização dos espaços, a configuração geométrica das secções, a facilidade de expansão, a flexibilidade das instalações, etc. O grande número de factores envolvidos na avaliação de uma implantação conduziu à necessidade de incorporar o conhecimento do decisor acerca do problema e ao consequente aparecimento de sistemas interactivos (O'Brien e Barr (1980), Malakooti e D'Souza (1985), Wäscher e Chamoni (1987)) e Ziai e Sule (1991)).

De acordo com Carrie (1980), Halles (1985) e Masud e Sathyana (1992), a abordagem integrada para o problema das implantações fabris necessita de recorrer a diferentes tipos de sistemas de informação - sistemas de apoio à decisão (DSS), sistemas para projecto assistido por computador (CAD) e sistemas de informação de gestão (MIS) - por forma a integrar o conhecimento do projectista com a capacidade de cálculo do computador.

O módulo de projecto de implantações fabris, cujas interacções e funcionalidade se descrevem na parte final deste capítulo, integra-se nesta nova filosofia de resolução do problema de implantações fabris.

## 8.2 Modelos para o problema das implantações fabris

### 8.2.1 Secções com áreas iguais

O problema da implantação de secções com áreas iguais pressupõe que as localizações disponíveis para receber as secções são conhecidas e fixas à partida. Assim sendo, a distância  $d_{ij}$  entre duas quaisquer localizações  $i$  e  $j$  é independente das secções nelas colocadas.

De entre os diferentes modelos usados para representar este problema, o mais conhecido é o modelo de afectação quadrática (Koopmans e Beckman (1957)).

Para definir este modelo, introduza-se a seguinte notação:

- $N$  - número de secções (e de localizações possíveis),
- $c_{ikjl}$  - custo associado à colocação das secções  $i$  e  $j$  nas localizações  $k$  e  $l$ , respectivamente,
- $x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{se a secção } i \text{ é colocada na localização } k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

O problema de afectação quadrática para a implantação de secções com áreas iguais define-se então nos seguintes termos:

$$\min Z = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^N c_{ikjl} \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} \quad (1a)$$

$$\text{sujeito a } \sum_{i=1}^N x_{ik} = 1, \quad k = 1, \dots, N \quad (1b)$$

$$\sum_{k=1}^N x_{ik} = 1, \quad i = 1, \dots, N \quad (1c)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\}, \quad i, k = 1, \dots, N \quad (1d)$$

A função objectivo (1a) minimiza o custo total em que se incorre por se colocarem as diferentes secções num conjunto de localizações possíveis. As restrições garantem



que duas ou mais secções não são colocadas no mesmo local (1b) e que cada secção é afectada a uma única localização (1c).

Este problema de afectação quadrática pertence à classe dos problemas NP-completos (Garey e Johnson (1979)) e a dimensão dos problemas que podem ser resolvidos optimamente é limitada a 15 secções (Nugent et al (1968)). Para problemas de dimensão mais elevada - que ocorrem frequentemente na prática - somente se conseguem obter soluções subóptimas.

Kusiak e Heragu (1987) apresentam uma extensa pesquisa dos modelos existentes para a resolução do problema das implantações de secções com áreas iguais, bem como algumas técnicas óptimas e subóptimas para a resolução do problema da afectação quadrática.

### 8.2.2 Secções com áreas diferentes

Na maioria dos problemas práticos as áreas das secções são desiguais e, conseqüentemente, não é possível definir um conjunto de localizações potenciais para as colocar. Armour e Buffa (1963) reformularam o modelo para o problema da afectação quadrática, por forma a ter em conta este aspecto:

$$\min Z = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^N c_{ikjl}^M \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} \quad (2a)$$

$$\text{sujeito a } \sum_{i=1}^N x_{ik} = 1, \quad k = 1, \dots, N \quad (2b)$$

$$\sum_{k=1}^N x_{ik} = 1, \quad i = 1, \dots, N \quad (2c)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\}, \quad i, k = 1, \dots, N \quad (2d)$$

onde  $c_{ikjl}^M$  representa o custo associado à colocação das secções  $i$  e  $j$  nas localizações  $k$  e  $l$ , respectivamente, quando se considera a  $M$ -ésima disposição das secções na implantação. O domínio de  $M$  é o número de diferentes arranjos que as secções podem ter na implantação, o qual depende das áreas das secções. Teoricamente, o valor máximo de  $M$  é  $N!$ , mas nos casos práticos é sempre muito inferior, por questões de simetria das implantações (Armour e Buffa (1963)).

Um outro modelo para este problema, baseado no problema quadrático da cobertura de conjuntos, foi proposto por Bazaraa (1975). Nesta formulação, a área de implantação é dividida numa grelha e cada secção ocupará um conjunto de células dessa grelha.

Para definir este problema, introduza-se a seguinte notação adicional:

- C - número de células da grelha que divide a área de implantação,
- L(i) - número de localizações potenciais para a secção i,
- B<sub>i</sub>(k) - conjunto de células ocupadas pela secção i, se esta for afectada à localização k,
- $y_{ikc} = \begin{cases} 1, & \text{se a célula } c \in B_i(k) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

O problema quadrático da cobertura de conjuntos para a implantação de secções com áreas desiguais define-se então nos seguintes termos:

$$\min Z = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{L(i)} \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^{L(j)} c_{ikjl} \cdot X_{ik} \cdot X_{jl} \tag{3a}$$

$$\text{sujeito a } \sum_{k=1}^{L(i)} X_{ik} = 1 \quad , \quad i = 1, \dots, N \tag{3b}$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{L(i)} y_{ikc} \cdot X_{ik} \leq 1 \quad , \quad c = 1, \dots, C \tag{3c}$$

$$X_{ik} \in \{0,1\} \quad , \quad i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, L(i) \tag{3d}$$

A função objectivo (3a) minimiza o custo total em que se incorre por se colocarem as diferentes secções num conjunto de localizações possíveis. As restrições (3b) e (3c) garantem, respectivamente, que cada secção é afectada a uma única localização e que cada célula não é ocupada por mais do que uma secção. Este modelo não é mais do que a formalização matemática de algumas heurísticas existentes para o problema da implantação que utilizam este conceito de divisão da área fabril em células.

### 8.2.3 Implantação de máquinas (ou de secções com configuração geométrica fixa)

A grande maioria dos métodos desenvolvidos para a resolução dos modelos descritos na secção anterior dividem a área de implantação em células de tamanho fixo e afectam cada uma das secções a um conjunto destas células. Deste modo, as características geométricas das secções são ignoradas, o que torna tais métodos de utilidade restrita, tanto nos casos em que se pretende implantar máquinas, como naqueles em que a configuração geométrica das secções não pode ser modificada de forma arbitrária.

Este aspecto esteve na origem de um conjunto de modelos que consideram a área de implantação como um plano contínuo e na qual as máquinas podem ser colocadas em qualquer posição, respeitando a sua configuração geométrica.

A título de exemplo, considere-se a implantação de um conjunto de máquinas todas com configuração geométrica rectangular. Tal implantação pode fazer-se tentando minimizar uma medida ponderada da distância entre os pares de máquinas  $(i, j)$ :

$$Z = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_{ij} \cdot d_{ij} \quad (4)$$

onde  $N$  é o número de máquinas,  $c_{ij}$  é o peso por unidade de distância entre o par de máquinas  $(i, j)$  e  $d_{ij}$  é a distância entre o par de máquinas  $(i, j)$ .

Designando por  $(x_i, y_i)$  e  $(x_j, y_j)$  as coordenadas dos pontos entre os quais a distância,  $d_{ij}$ , é calculada, as medidas de distância mais utilizadas são as seguintes:

- (i) distância rectilinear:  $d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$
- (ii) distância euclideana:  $d_{ij} = [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2]^{1/2}$ .

Em qualquer solução admissível para o problema da implantação de máquinas com configuração geométrica rectangular, é necessário garantir que não existe sobreposição entre as diferentes máquinas. Considerando-se a seguinte notação

- $L_i$  - comprimento da máquina  $i$  (isto é, a sua dimensão ao longo do eixo  $XX'$ ),

- $W_i$  - largura da máquina  $i$  (isto é, a sua dimensão ao longo do eixo  $YY'$ ),
- $(x_i, y_i)$  - coordenadas do centro geométrico da máquina  $i$ ,

a satisfação de uma das seguintes condições garante que o par de máquinas  $(i, j)$  não se sobrepe:

$$|x_i - x_j| \geq \frac{1}{2}(L_i + L_j) \quad (5a)$$

$$|y_i - y_j| \geq \frac{1}{2}(W_i + W_j) \quad (5b)$$

Adicionalmente, é possível delimitar a área de implantação. Supondo que esta área é um rectângulo de comprimento  $L$  e largura  $W$ , o seguinte conjunto de restrições garante que a máquina  $i$  é colocada dentro da área de implantação:

$$x_i + \frac{L_i}{2} \leq L \quad (6a)$$

$$x_i - \frac{L_i}{2} \geq 0 \quad (6b)$$

$$y_i - \frac{W_i}{2} \geq 0 \quad (6c)$$

$$y_i + \frac{W_i}{2} \leq W \quad (6d)$$

Este modelo permite ainda definir facilmente a existência de máquinas fixas ou de zonas não utilizáveis da área de implantação, bastando para isso introduzir as restrições correspondentes.

Uma outra extensão a este modelo permite definir pontos de entrada e de saída de materiais (fixos relativamente à configuração de cada máquina), introduzindo assim um outro aspecto importante no problema das implantações fabris, já referido na secção 7.3.

Diferentes procedimentos têm sido propostos para o problema da implantação de máquinas (ou de secções com configuração geométrica fixa); alguns destes procedimentos, entre os quais o que figura no SAD, serão discutidos em secções posteriores.

## 8.3 Critérios alternativos para o problema das implantações fabris

O projecto de uma implantação fabril deve ser avaliado tendo em conta um conjunto de factores tão variados como o custo de transporte de materiais, a utilização da área fabril, a facilidade de expansão futura, a flexibilidade da implantação, etc. A condensação de todos estes factores num único critério, de acordo com o qual configurações alternativas sejam avaliadas, é tarefa impossível. Na literatura conhecida, a opção, quase universalmente adoptada, é a do recurso ao custo de transporte de materiais como medida de avaliação da qualidade das implantações fabris. A razão de ser de tal opção prende-se com o forte impacto que os custos de transporte têm nos custos totais de operação das unidades industriais (Tompkins e White (1984)).

Nesta secção apresentam-se, para além desta medida, outras que têm sido utilizadas na avaliação da qualidade das implantações fabris. Na secção 8.3.2 discute-se uma outra medida proposta por Muther (1960) e na secção 8.3.3 descrevem-se critérios baseados na ponderação das duas medidas consideradas.

### 8.3.1 Minimização do custo de transporte de materiais

De entre os critérios quantitativos para o problema das implantações, a minimização dos custos globais associados à movimentação de materiais tem sido o mais utilizado.

Alguns autores (por exemplo, Nugent et al (1968)) pressupõem que o custo total de transporte de materiais é proporcional à distância, tendo como única constante de proporcionalidade o fluxo. Neste caso o critério vem:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{ij} \cdot d_{ij} \quad (7)$$

onde:

- $f_{ij}$  - fluxo de materiais entre os recursos<sup>1</sup>  $i$  e  $j$ ,  
 $d_{ij}$  - distância entre os recursos  $i$  e  $j$ .

A consideração deste critério para avaliação do custo global de transporte de materiais é muito restritiva, uma vez que pressupõe que o fluxo entre pares de recursos representa o custo unitário de transporte de materiais (isto é, o custo de transporte por unidade de distância entre os recursos). Esta condição só se verifica nos casos em que o sistema de transporte de materiais utiliza um único tipo de equipamento, cujo custo unitário de operação é independente das operações de transporte que efectua.

Um dos critérios mais citados na literatura para a definição do custo total de transporte de materiais foi proposto por Armour e Buffa (1966) e define-se do seguinte modo:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N f_{ij} \cdot c_{ij} \cdot d_{ij} \quad (8)$$

onde

- $c_{ij}$  - custo de transporte por unidade de fluxo e por unidade de distância entre os recursos  $i$  e  $j$ ,  
 $f_{ij}$  - fluxo entre os recursos  $i$  e  $j$ ,  
 $d_{ij}$  - distância entre os recursos  $i$  e  $j$ .

Esta medida pressupõe que entre cada par de recursos se utiliza um tipo de equipamento de transporte cujos custos de operação estão linearmente relacionados com a distância percorrida.

No SAD que se apresenta, utilizou-se uma extensão deste critério, baseada nos seguintes pressupostos:

- (i) a cada par de recursos e a cada componente que circula entre eles corresponde uma operação de transporte de materiais, a qual é sempre efectuada no mesmo tipo de equipamento,

<sup>1</sup> Note-se que o termo recursos pode denotar indistintamente departamentos, células, postos de trabalho, máquinas ou armazéns.

- (ii) o fluxo associado a cada operação de transporte ao longo do horizonte de planeamento,  $f_{ij}^k$ , é conhecido e corresponde ao número de unidades transportadas do componente  $k$  entre os recursos  $i$  e  $j$ ,
- (iii) o lote de transporte do componente  $k$  entre os recursos  $i$  e  $j$ ,  $s_{ij}^k$ , corresponde à quantidade transportada em cada viagem e admite-se constante ao longo do horizonte de planeamento,
- (iv) o tempo despendido em cada operação de transporte entre os recursos  $i$  e  $j$  para o componente  $k$ ,  $t_{ij}^k$ , decompõe-se em três parcelas: tempo de carga,  $l_{ij}^k$ , tempo de descarga,  $u_{ij}^k$ , e tempo de deslocação,  $o_{ij}^k$ ,
- (v) os tempos de carga e de descarga são constantes para cada operação de transporte,
- (vi) o tempo de deslocação é proporcional à distância entre os recursos,  $d_{ij}$ , sendo a constante de proporcionalidade a velocidade do transportador para a operação em causa,  $v_{ij}^k$ ,
- (vii) o custo por unidade de tempo da operação de transporte do componente  $k$  entre os recursos  $i$  e  $j$ ,  $c_{ij}^k$ , depende exclusivamente do tipo de equipamento de movimentação de materiais utilizado.

O custo de transporte do componente  $k$  entre os recursos  $i$  e  $j$  é então dado por:

$$c_{ij}^k \cdot \left( l_{ij}^k + u_{ij}^k + \frac{d_{ij}}{v_{ij}^k} \right) \quad (9)$$

O menor custo global de transporte é obtido a partir de:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_{ij}} r_{ij}^k c_{ij}^k \cdot \left( l_{ij}^k + u_{ij}^k + \frac{d_{ij}}{v_{ij}^k} \right) \quad (10)$$

onde:

$n_{ij}$  - número de diferentes tipos de componentes a serem transportados entre os recursos  $i$  e  $j$ ,

$r_{ij}^k$  - número de viagens (operações de transporte) entre os recursos  $i$  e  $j$  necessárias para transportar todas as unidades do componente  $k$ , ao longo do período do planeamento,  $r_{ij}^k = \left[ \frac{f_{ij}^k}{l_{ij}^k} \right]$ .

Este critério permite ter em conta a utilização de diferentes tipos de equipamentos de transporte entre os mesmos pares de recursos.

Fazendo  $l_{ij}^k = u_{ij}^k = 0$  e  $v_{ij}^k = 1$  e definindo  $c_{ij}^k$  como sendo o custo de transporte por unidade de distância e por viagem do componente  $k$  entre os recursos  $i$  e  $j$ , o qual depende exclusivamente do tipo de equipamento de movimentação utilizado, a função objectivo pode ser reescrita, por forma a considerar somente o custo de transporte por unidade de distância:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_{ij}} r_{ij}^k \cdot c_{ij}^k \cdot d_{ij} \quad (11)$$

Esta simplificação corresponde ao critério implícito na expressão (8), considerado componente a componente.

### 8.3.2 Maximização da medida global de desejabilidade de adjacência entre as secções

Com o objectivo de incluir critérios qualitativos no projecto de implantações, Muther (1961) propôs uma tabela de relações entre actividades (REL), na qual se classificam as preferências relativas às adjacências entre pares de secções. Esta classificação é baseada na avaliação pelo decisor de um conjunto de factores determinantes dessas relações como, por exemplo, o fluxo, o controle da produção, a organização fabril, o ambiente, etc. Um exemplo de uma tabela REL, conjuntamente com a escala proposta por Muther, é exibida na Figura 8.1. De acordo com este exemplo, a adjacência entre os escritórios e os armazéns é considerada absolutamente



necessária (por motivo de facilidade de supervisão) e a adjacência entre a secção de montagem e os escritórios é considerada indesejável (devido ao ruído).

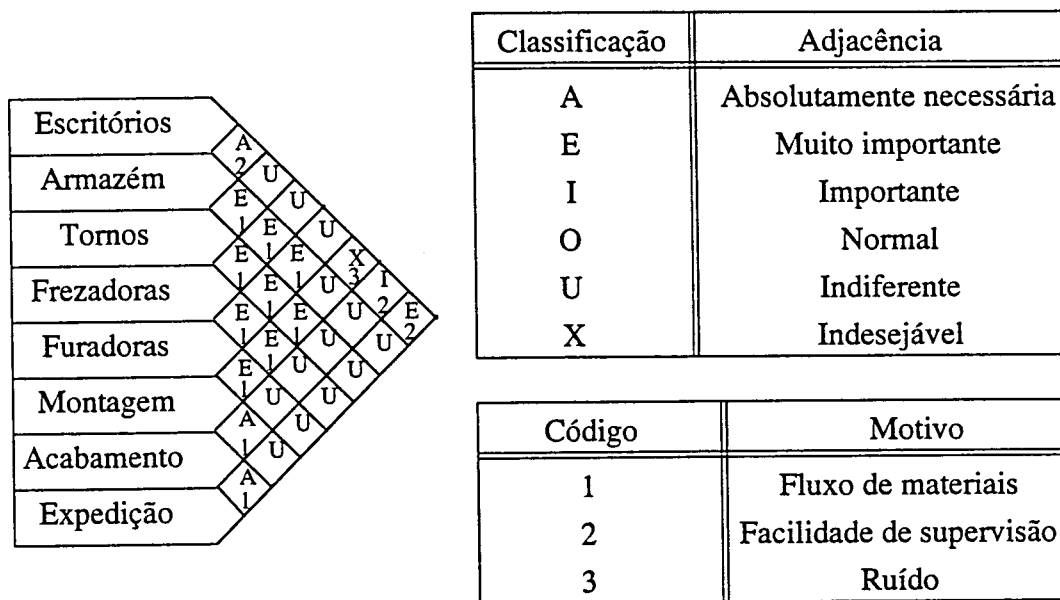


Figura 8.1 - Exemplo de uma tabela REL

Inicialmente, a tabela de relações entre actividades era utilizada na construção manual de implantações fabris. A aplicação deste método a problemas de dimensões médias conduziu ao aparecimento de técnicas computacionais baseadas na tabela REL e, conseqüentemente, à necessidade de conversão da escala de adjacências em valores numéricos, para permitir o seu processamento.

Diferentes critérios têm sido utilizados para traduzir esta correspondência. Por exemplo, Seehof e Evans (1967) utilizam a seguinte correspondência:

$$A=4^3 \quad E=4^2 \quad I=4^1 \quad O=4^0 \quad U=0 \quad X=-4^5$$

A função objectivo implícita nas heurísticas que utilizam a tabela REL é dada por:

$$\text{Maximizar } Z = \sum_i \sum_j r_{ij} \cdot x_{ij} \tag{12}$$

em que  $r_{ij}$  é o valor numérico da desejabilidade de adjacência entre as secções  $i$  e  $j$  e  $x_{ij} = 1$ , se as secções  $i$  e  $j$  são adjacentes, e  $x_{ij} = 0$ , no caso contrário.

Se interpretada do ponto de vista do custo de transporte de materiais, esta função objectivo pressupõe que o custo de movimentação de materiais entre duas secções somente é reduzido significativamente quando estas forem adjacentes, uma vez que a variável binária,  $x_{ij}$ , sugere, erradamente, que a colocação das secções pode ser ignorada quando estas não sejam adjacentes. Daqui resulta que implantações distintas com o mesmo valor da medida global de desejabilidade de adjacência podem corresponder a custos de movimentação de materiais muito diferentes.

A resolução deste problema passa pela substituição da variável binária,  $x_{ij}$ , pela distância entre secções,  $d_{ij}$  (como propõem, por exemplo, Lee e Moore (1967)). No entanto, nem todos os critérios utilizados na definição das medidas de desejabilidade de adjacência entre secções estão necessariamente correlacionados com a distância e, por isso, o resultado pretendido é falseado.

A dificuldade em agregar os diferentes factores (quantitativos e qualitativos) num único critério e a consequente subjectividade associada ao estabelecimento das relações entre actividades estão na base de outras críticas aos métodos baseados na tabela REL.

O campo de aplicação por excelência dos critérios qualitativos tem sido o dos problemas para os quais a noção de fluxo entre secções é destituída de sentido. Tal ocorre, por exemplo, em certos serviços, como escritórios ou hospitais.

### 8.3.3 Critérios compostos

Na função objectivo proposta por Rosenblat (1979), as duas medidas anteriormente consideradas, designadamente o custo de transporte de materiais e a medida global de desejabilidade de adjacência entre secções, são combinadas linearmente. Para o caso em que as secções têm áreas desiguais, tal função objectivo corresponde a

$$\text{Minimizar } Z = \alpha \cdot \sum_i \sum_j f_{ij} \cdot d_{ij} - (1 - \alpha) \cdot \sum_i \sum_j r_{ij} \cdot x_{ij} \quad (13)$$

onde  $f_{ij}$ ,  $d_{ij}$ ,  $r_{ij}$  e  $x_{ij}$  têm o mesmo significado que nas expressões (7) e (12) e  $\alpha \in [0,1]$ .

Dado que os valores de  $d_{ij}$  não são comparáveis com os de  $x_{ij}$ , é difícil interpretar o significado da constante  $\alpha$ , ou, o que é equivalente, é difícil perceber a relação entre o

valor da constante e o peso realmente atribuído a cada uma das medidas que são combinadas.

Fortenberry e Cox (1985) apresentaram um modelo no qual a selecção das soluções deriva da minimização de uma medida em que a relação de desejabilidade de adjacência entre duas secções quaisquer é ponderada, simultaneamente, pelo fluxo e pela distância entre elas. Na função objectivo adoptada,

$$\text{Minimizar } Z = \sum_i \sum_{j>i} f_{ij} \cdot d_{ij} \cdot r_{ij}, \quad (14)$$

combinam-se implicitamente e de forma pouco clara as medidas consideradas nas duas secções anteriores: o custo de transporte (através dos fluxos,  $f_{ij}$ , e das distâncias,  $d_{ij}$ ) e a medida global de desejabilidade de adjacência (através dos parâmetros  $r_{ij}$ ).

Registe-se que os pares de secções entre as quais o fluxo for nulo não contribuem para a função objectivo, mesmo que tenham relações de desejabilidade de adjacência elevadas. Por exemplo, embora seja óbvia a vantagem de manter próximas uma secção de produção e uma secção de tempos e métodos, elas podem ficar muito afastadas.

Urban (1987) ultrapassou esta dificuldade, propondo um nova função objectivo:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_i \sum_{j>i} d_{ij} \cdot (f_{ij} + \alpha \cdot r_{ij}) \quad (15)$$

O peso  $\alpha \geq 0$  determina a importância da medida global de desejabilidade de adjacência relativamente ao custo total de transporte.

Nos critérios que acabaram de ser analisados nesta secção, há duas medidas que são explícita ou implicitamente ponderadas; naturalmente, tal ponderação é extensível a outros critérios (ver Harmonosky e Totho (1992)).

A maior limitação dos procedimentos analisados nesta secção decorre do próprio conceito de ponderação de critérios distintos, que em muitas circunstâncias é considerada uma forma inadequada de resolver situações multicritério (Cohon (1978)).

## 8.4 Heurísticas para o problema da implantação de secções com áreas desiguais

Muther (1961) introduziu um método sistemático para o projecto de implantações fabris, o qual tem sido amplamente utilizado. Este método, designado por Planeamento Sistemático de Implantações (SLP - 'Systematic Layout Planning'), é um procedimento manual baseado quer na matriz de fluxos quer na tabela de relações entre actividades (REL).

A análise da matriz de fluxos ou da tabela REL permite ao decisor perceber as relações entre as diferentes secções. A partir da análise efectuada, desenvolve-se um diagrama de relações, o qual posiciona as diferentes actividades num plano, de acordo com as relações existentes entre elas. No passo seguinte, determinam-se as áreas necessárias a cada secção e constrói-se um diagrama espacial de relações. Este diagrama estende o diagrama obtido no passo anterior, incluindo as áreas requeridas por cada secção. Com base em considerações e limitações práticas, um conjunto de implantações alternativas é desenvolvido e avaliado, escolhendo-se finalmente a alternativa preferida.

A dificuldade de aplicação deste método a problemas de média e grande dimensão, dada a sua dependência exclusiva da avaliação subjectiva do analista, conjuntamente com a banalização do uso de computadores, conduziu ao aparecimento de um vasto conjunto de técnicas passíveis de serem automatizadas.

A complexidade computacional associada aos modelos para a resolução do problema das implantações fabris tem induzido o desenvolvimento de métodos heurísticos, que fornecem soluções aceitáveis com um esforço computacional razoável.

As heurísticas aplicadas ao problema da implantação de secções com áreas diferentes podem ser classificadas em três tipos: de construção, de melhoramento e híbridas.

### 8.4.1 Métodos de construção

Nos procedimentos de construção, a implantação é construída colocando-se sequencialmente as secções na área de implantação, com base em regras heurísticas, até se obter uma implantação completa.

Os algoritmos de construção não necessitam de uma solução inicial e produzem resultados com um esforço computacional reduzido. Contudo, as soluções produzidas são de pior qualidade que as geradas pelos outros tipos de heurísticas (Sherali e Rajgopal (1986)).

De entre os algoritmos de construção que utilizam a tabela de relações de adjacência (REL), destacam-se ALDEP (Seehof e Evans (1967)) e CORELAP (Lee e Moore(1967)), dos quais resultaram dois programas comerciais que se descrevem seguidamente. Em qualquer destes procedimentos, o utilizador tem de definir, à partida, para além da tabela REL, o número de secções e a área de cada uma delas.

No procedimento ALDEP, a primeira secção a colocar na implantação é seleccionada aleatoriamente. Em cada uma das iterações seguintes, pesquisa-se a tabela REL e, de entre as secções ainda disponíveis, forma-se um conjunto contendo aquelas cuja medida de desejabilidade de adjacência com a secção colocada na iteração anterior é a mais elevada. Se a medida de desejabilidade de adjacência estiver aquém de um limite mínimo pré-especificado pelo utilizador, a secção seleccionada é escolhida aleatoriamente de entre o conjunto de todas as secções ainda disponíveis; no caso contrário, é escolhida, também aleatoriamente, de entre as secções com medida de desejabilidade de adjacência mais elevada.

A rotina de colocação do algoritmo ALDEP posiciona a primeira secção no canto superior esquerdo do rectângulo que delimita a área de implantação definida pelo utilizador. As secções são colocadas nesta área seguindo o padrão de varrimento da área de implantação que se mostra na Figura 8.2, e o espaço ocupado por cada secção depende da largura de varrimento definida pelo utilizador.

Na Figura 8.3 apresenta-se um exemplo da implantação de 5 secções (numeradas de 1 a 5, segundo a sequência de posicionamento na implantação), com áreas de 7, 9,

8, 11 e 5 unidades, sobre uma área de implantação com 8 unidades de comprimento e 5 de largura, adoptando-se uma largura de varrimento de 2 unidades.

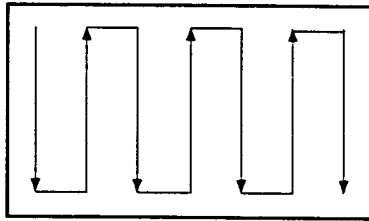


Figura 8.2 - Padrão de varrimento da área de implantação - ALDEP

1	1	2	2	3	3	4	4
1	1	2	2	3	3	4	4
1	1	2	2	4	4	4	5
1	2	3	3	4	4	5	5
2	2	3	3	4	4	5	5

Figura 8.3 - Exemplo de aplicação do procedimento ALDEP

O programa ALDEP gera várias implantações fabris e imprime, para posterior avaliação pelo decisor, todas as que têm uma classificação superior a um valor pré-definido pelo utilizador. Esta classificação, também impressa, é obtida somando os valores numéricos correspondentes às relações de desejabilidade de adjacência entre todas as secções.

A diferença procedimental mais importante entre os algoritmos CORELAP e ALDEP está na forma de selecção da secção a colocar em cada iteração, de entre as secções candidatas (ou seja, de entre as secções com medida de desejabilidade de adjacência mais elevada relativamente às secções já colocadas na implantação). No procedimento CORELAP, utiliza-se o conceito de classificação de proximidade total (TCR - 'Total Closeness Rating'). Para cada secção, o valor de TCR é a soma dos valores numéricos associados às medidas de desejabilidade de adjacência com todas as outras secções. No procedimento CORELAP, a primeira secção a colocar na implantação é aquela que tem um valor de TCR mais elevado. Em cada uma das

iterações seguintes, pesquisa-se a tabela REL e, de entre as secções ainda disponíveis cuja medida de desejabilidade de adjacência com as secções colocadas nas iterações anteriores é a mais elevada, selecciona-se aquela que tem um valor de TCR mais elevado.

No procedimento CORELAP a implantação cresce, como um cristal, em torno do seu centro. As duas primeiras secções seleccionadas são colocadas adjacientemente no centro da implantação e, a partir daí, as secções são posicionadas em função da soma pesada da menor distância rectilinear entre a secção a colocar e cada uma das secções já colocadas (onde os pesos correspondem aos valores numéricos das suas medidas de desejabilidade de adjacência). A configuração geométrica das secções é quase rectangular, mas a sua implantação é irregular. Ao contrário do algoritmo ALDEP, este procedimento só gera uma implantação final e, como esta não tem uma forma geométrica definida, pode ser necessário ajustá-la manualmente. A valoração de uma implantação é efectuada com base na soma pesada da menor distância rectilinear entre cada par de secções.

Na Tabela 8.1, apresentam-se os valores numéricos correspondentes à medida de desejabilidade de adjacência entre cada par de secções e os valores de TCR e da área requerida para cada secção, para um exemplo compreendendo 7 secções. A implantação resultante da aplicação do procedimento CORELAP a este exemplo é apresentada na Figura 8.4. As secções foram colocadas na implantação segundo a seguinte ordem: 6, 5, 7, 2, 4, 1 e 3.

Tabela 8.1 - Valores numéricos associados à medida de desejabilidade de adjacência entre cada par de secções e os valores de TCR e da área requerida para cada secção

Secção	Secção							TCR	Área
	1	2	3	4	5	6	7		
1		16	1	4	1	0	0	22	2
2	16		0	16	4	4	0	40	1
3	1	0		0	0	1	0	2	1
4	4	16	0		4	0	0	24	2
5	1	4	0	4		64	4	77	1
6	0	4	1	0	64		16	85	2
7	0	0	0	0	4	16		20	7

De entre os algoritmos de construção que utilizam a matriz de fluxo, destaca-se o PLANET (Deisenroth e Apple (1972)). Além da matriz de fluxo, o utilizador tem de definir à partida o número de secções e, para cada uma delas, a área e um valor para a

sua prioridade de colocação na implantação (1 corresponde à prioridade máxima e 9 à mínima).

1	4	4	3
1	2	6	6
	7	7	5

Figura 8.4- Exemplo de uma implantação obtida pelo procedimento CORELAP

A rotina do procedimento PLANET, para selecção de secções a colocar na implantação, recorre a três estratégias alternativas:

- (i) As duas primeiras secções seleccionadas são aquelas que, de entre as que têm a prioridade mais elevada, têm o maior valor de fluxo entre si. Nas iterações seguintes selecciona-se, de entre as secções por colocar e respeitando as prioridades, aquela que tem maior fluxo com uma das secções já colocadas.
- (ii) O primeiro par de secções é seleccionado como em (i). Nas iterações seguintes selecciona-se, de entre as secções por colocar e respeitando as prioridades, aquela que tem maior fluxo total com as já colocadas.
- (iii) Selecciona-se como primeira secção a colocar aquela que, de entre as que têm o nível de prioridade mais elevado, apresenta o maior fluxo total com todas as outras secções. Nas iterações seguintes as secções são seleccionadas como em (ii).

A rotina de colocação começa por posicionar adjacientemente, no centro da implantação, as duas primeiras secções seleccionadas. Cada secção adicional é colocada por forma a minimizar o aumento do custo de transporte de materiais. Assim, a secção é deslocada em torno do perímetro formado pelas secções já colocadas e o produto do fluxo pela distância a cada uma das outras secções é



calculado em cada ponto. O ponto que produz o menor incremento do custo de transporte é então seleccionado.

O procedimento PLANET não restringe a área de implantação e, por isso, pode produzir implantações que necessitam de ser ajustadas manualmente.

Métodos alternativos baseados na matriz de fluxos têm sido propostos recentemente, mas no essencial traduzem melhoramentos nas rotinas de selecção (Yaman et al (1993)) ou de colocação (Hassan et al (1986)) do procedimento PLANET.

Uma das aplicações mais frequentes dos algoritmos de construção é a sua integração em algoritmos híbridos, que os utilizam para gerar soluções iniciais, que são posteriormente introduzidas em procedimentos de melhoramento.

#### 8.4.2 Métodos de melhoramento

Nos métodos de melhoramento, parte-se de uma solução inicial e, com base nesta, efectuam-se permutas sistemáticas de secções e avaliam-se os resultados. Quando, como resultado de uma permuta, a solução melhorar, a nova solução é retida, continuando-se até que não seja possível conseguir novos ganhos.

Apesar da qualidade da implantação final ser muito dependente da inicial (Liggett (1981)), os métodos de melhoramento conduzem invariavelmente a melhores soluções do que os métodos de construção, se bem que à custa de um maior esforço computacional, resultante da geração de um maior número de diferentes implantações (Lewis e Block (1980)).

O procedimento de melhoramento mais utilizado designa-se por melhor troca entre duas secções (ou, na designação inglesa, SDPI - 'Steepest Descent Pairwise Interchange'). Para uma dada afectação de  $N$  secções a  $N$  localizações, o procedimento compara todas as  $\frac{N \cdot (N - 1)}{2}$  permutas possíveis de pares de secções e selecciona aquela que conduz ao melhor valor para a função objectivo.

Esta técnica de troca de pares de secções, desenvolvida por Hillier (Hillier (1963) e Hillier e Connors (1966)), e os melhoramentos subsequentes com permutas de mais

de duas secções (Lewis e Block (1980), Ligget (1981) e Picone e Wilhelm (1984)) são a base de inúmeros procedimentos de melhoramento, como, por exemplo, CRAFT (Armour e Buffa (1963) e Buffa et al (1964)), H63 (Hillier (1963)), H66 (Hillier e Connors (1966)), BST (Nugent et al (1968)), COL (Vollmann et al (1968)), FRAT (Khalil (1973)) e COFAD (Tompkins e Reed (1976)).

O procedimento CRAFT tem influenciado significativamente a maior parte dos métodos de construção que têm vindo a ser desenvolvidos.

A função objectivo utilizada é dada pela expressão (8). O procedimento começa pela avaliação da implantação, inicial introduzida pelo utilizador. No passo seguinte, avaliam-se todas as permutas admissíveis entre pares de secções, retendo a implantação correspondente à permuta que produziu a maior diminuição do valor da função objectivo. Note-se que, para uma troca entre duas secções ser admissível, é necessário que as secções sejam adjacentes ou que tenham a mesma área.

Este passo é então sucessivamente repetido até se obter uma implantação em que todas as permutas admissíveis entre pares de secções não produzam uma redução da função objectivo.

Outro aspecto a realçar, e que é comum a grande parte das heurísticas de construção, é que a configuração geométrica das secções é modificada pelo algoritmo.

Uma vez que o algoritmo faz a pesquisa directa das soluções, termina no primeiro mínimo local que encontrar. Por isso, a solução inicial é, em geral, determinante na qualidade da solução final encontrada.

Uma técnica baseada no procedimento CRAFT foi desenvolvida por Tompkins e Reed (1976) e designa-se por COFAD. Esta técnica consiste, basicamente, numa modificação de CRAFT que permite integrar os problemas da implantação fabril e da selecção do sistema de transporte de materiais.

O custo global das soluções geradas compreende uma componente fixa e uma outra variável. A componente fixa está relacionada com o número de unidades de cada tipo de equipamento utilizadas no sistema de movimentação de materiais e a componente variável depende da utilização dos equipamentos (isto é, dos fluxos e das distâncias).

A solução inicial é melhorada por um processo idêntico ao utilizado no procedimento CRAFT e, seguidamente, minimiza-se a componente variável do custo

global, ou seja, determina-se, para cada operação de transporte, o tipo de equipamento de movimentação de materiais (de entre os admissíveis para essa operação) que conduz ao menor custo variável.

Um primeiro melhoramento do sistema de transporte de materiais procura minimizar a componente fixa do custo, maximizando a utilização de todos os tipos de equipamento. Seguidamente, procura-se melhorar o custo global, testando-se, em cada operação de transporte cujo custo aumentou relativamente à solução inicial, os diferentes equipamentos admissíveis nessa operação e retendo-se aquele que conduz à maior diminuição do custo global.

Este procedimento é repetido até que em duas iterações consecutivas a diminuição do custo global não exceda uma determinada percentagem, definida pelo utilizador.

Tam (1991) introduziu um algoritmo de melhoramento para o problema da implantação de secções com áreas desiguais que incorpora uma estratégia de pesquisa por recristalização simulada. Uma característica deste procedimento é que todas as secções estão limitadas a formas rectangulares, devido ao modo como a área de implantação é particionada. Como, mesmo assim, o procedimento pode originar formas indesejáveis para as secções, restrições relativas à sua geometria foram introduzidas neste procedimento, através da inclusão de uma função de penalização na função objectivo.

O procedimento CLASS (Jajodia et al (1992)) aplica-se à implantação de secções com áreas iguais, substituindo a pesquisa directa utilizada no algoritmo CRAFT pelo procedimento de recristalização simulada, diminuindo assim a dependência da solução final relativamente à implantação inicial. Uma extensão proposta para a sua utilização com secções de áreas desiguais limita a sua aplicação a problemas de pequena dimensão, pois obriga à divisão das secções em subsecções de igual área e força um valor elevado de fluxo entre estas subsecções, por forma a que na implantação final sejam colocadas contiguamente.

O procedimento MULTIPLE (Bozer et al (1994)) é outro algoritmo de pesquisa directa, mas que contempla a possibilidade de permuta de pares de secções com áreas diferentes. A área de implantação é dividida numa grelha com células de igual dimensão e a implantação das secções é efectuada recorrendo ao conceito de curva de preenchimento do espaço ('spacefilling curve'). Esta curva percorre todas as células da grelha por forma a garantir que pelo menos duas células adjacentes são visitadas sequencialmente. Na Figura 8.5, apresenta-se um exemplo de como uma implantação

pode ser definida por uma curva de preenchimento do espaço. A implantação é determinada pela afectação sequencial das secções às células, de acordo com o caminho percorrido pela curva de preenchimento do espaço (os números em cada célula indicam a secção que a ocupa).

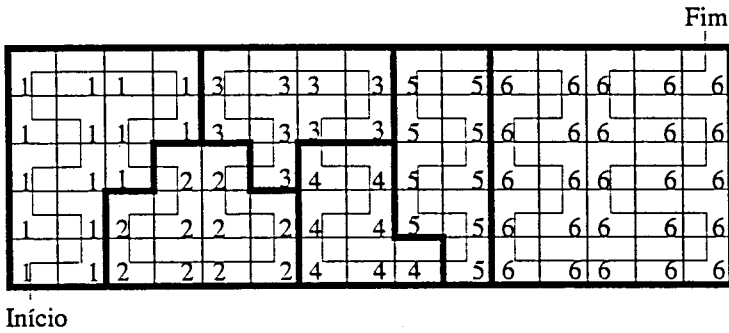


Figura 8.5 - Exemplo da utilização de curvas de preenchimento de espaço na definição de uma implantação

Depois de determinado o par de secções a permutar (correspondente à maior diminuição do valor da função objectivo), a nova implantação obtém-se trocando a sequência segundo a qual as secções são colocadas na grelha e afectando novamente cada célula à secção apropriada. Na Figura 8.6 apresenta-se o resultado da permuta das secções 2 e 5.

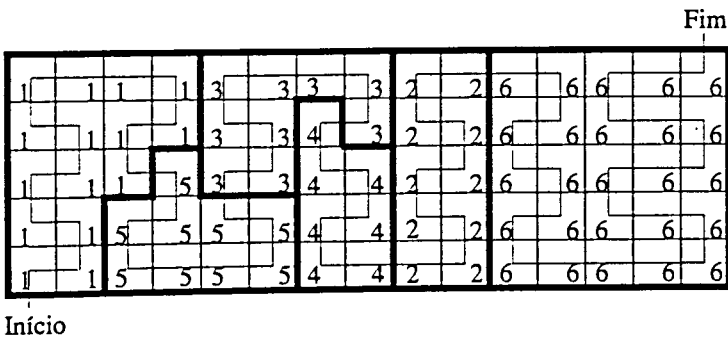


Figura 8.6 - Permuta das secções 2 e 5, no exemplo considerado

Além da vantagem associada ao facto de poder permutar secções com áreas diferentes sem que estas tenham que ser adjacentes, os resultados computacionais apresentados pelos autores mostram que as soluções obtidas são de qualidade superior

às produzidas pelo procedimento CRAFT. A substituição da pesquisa directa das soluções por um outro método, por exemplo por recristalização simulada, poderá, provavelmente, melhorar ainda mais o desempenho desta heurística. A aplicação deste método a implantações fabris distribuídas por vários andares é também ilustrada pelos autores.

### 8.4.3 Outros métodos

Além de inúmeras variantes dos métodos descritos nas secções anteriores, existem outros métodos que não são nem de construção nem de melhoramento. Entre tais métodos, destacam-se nesta secção, por um lado, os métodos híbridos (que utilizam primeiro um procedimento de construção e sobre ele aplicam um outro de melhoramento) e, por outro, métodos que não usam nenhum destes tipos de procedimentos.

Um dos primeiros sistemas interactivos propostos, designado por INLAYT (O'Brien e Barr (1980)), recorre a um método híbrido aplicável à implantação de secções com configuração geométrica variável. Embora este sistema permita, uma vez estabelecidas as secções, o desenho das máquinas dentro destas, o sistema não permite de facto a implantação directa das máquinas (com configuração geométrica fixa).

No procedimento de construção, a área de implantação é dividida numa grelha com células iguais, tantas quantas o número das secções a colocar. Nesta fase, o número de linhas e de colunas da grelha é irrelevante e, por exemplo, se se pretenderem colocar 24 secções, a grelha poderá ter dimensões 2x12, 3x8 ou 4x6 (linhas x colunas).

A afectação das secções às células é efectuada pelo decisor e serve somente para determinar o seu posicionamento relativo na implantação inicial. O sistema apoia o decisor fornecendo-lhe informação relativa aos conjuntos de secções que têm um grau de interacção mais elevado entre si; em particular, o sistema forma e indica a composição de conjuntos constituídos por secções tais que, entre cada uma delas e as restantes, o fluxo ultrapassa um limite mínimo (que é um parâmetro pré-fixado pelo utilizador). Tendo em conta esta informação, o utilizador indica sobre a grelha pré-definida o posicionamento das secções. A implantação inicial detalhada é então

fornecida pelo sistema, com base no posicionamento relativo das secções sugerido na primeira fase.

Seguidamente, é utilizado um procedimento de permuta de pares de secções. Em cada iteração são armazenadas as três permutações que conduzem à maior redução do custo. De entre estas soluções, que são apresentadas sequencialmente ao decisor, este escolherá uma.

No final de cada iteração, o utilizador é chamado a fazer uma implantação que, tendo em conta as áreas das secções, garanta que estas não ficam sobrepostas. Neste processo, o utilizador pode proceder à reorientação das secções.

Nas iterações seguintes, o procedimento de melhoramento é aplicado à última implantação aceite pelo decisor na iteração anterior. O procedimento termina quando o algoritmo não consegue melhorar a solução obtida ou quando o utilizador encontra uma solução satisfatória.

Este sistema distingue-se pelo facto de possuir uma interface com o utilizador que lhe permite visualizar as diferentes implantações que são geradas. No entanto, a dependência excessiva dos juízos efectuados pelo decisor, tanto no percurso de pesquisa de soluções como na garantia da admissibilidade das soluções, é uma limitação importante.

O procedimento FLAC (Scriabin e Vergin (1985)) é outro exemplo de um método híbrido e compreende três fases. Na primeira fase utiliza a técnica de análise de 'clusters' para posicionar as secções num plano, de modo a que as distâncias entre elas sejam, tanto quanto possível, inversamente relacionadas com o fluxo. Na segunda fase utiliza-se um modelo de afectação linear para colocar as secções na área de implantação, por forma a manterem, tanto quanto possível, as posições relativas obtidas na primeira fase. Finalmente, esta implantação inicial é melhorada por um procedimento de troca de pares de secções. Este procedimento limita a aplicação do método, uma vez que, para a troca de um par de secções ser admissível, é necessário que as secções sejam adjacentes ou que tenham a mesma área.

O subproblema do posicionamento relativo das secções tem sido amplamente abordado na literatura. As técnicas propostas para resolver este tipo de problema recorrem a modelos de optimização para gerar diagramas que representam a melhor distribuição espacial das secções. Com tais diagramas, procura-se apoiar os projectistas no desenvolvimento de implantações. As técnicas utilizadas baseiam-se

em programação não-convexa (Drezner (1980, 1987)), na teoria dos grafos (Carrie et al (1978) e Foulds (1983)), em 'b-matching' (Montreuil et al (1987)) ou em 'cut-trees' (Montreuil e Ratliff (1989)). Recentemente, Montreuil et al (1993) propuseram um modelo de programação linear que converte tais diagramas em implantações.

## **8.5 Heurísticas para a resolução do problema da implantação de máquinas (ou de secções com configuração geométrica fixa)**

Quando a configuração geométrica dos objectos a implantar é fixa, os métodos descritos nas secções anteriores não são aplicáveis. O problema associado é normalmente designado por problema da implantação de máquinas e, do ponto de vista prático, é aquele cuja resolução mais interessa, uma vez que permite a obtenção de implantações detalhadas. O mesmo problema pode ocorrer na implantação de secções, quando não for aceitável que a configuração geométrica destas seja modificável. Um exemplo é a configuração de instalações industriais por tecnologia de grupo. Neste caso, há que projectar em primeiro lugar a implantação detalhada de cada célula e depois proceder à sua colocação na área fabril. Nesta segunda fase não é então admissível que a técnica utilizada mude a configuração das células obtidas na fase anterior.

Uma característica importante a contemplar no problema de implantação de máquinas (ou secções com configuração geométrica pré-estabelecida) é a definição de pontos de entrada e saída de materiais nas máquinas. A justificação da importância deste aspecto já foi referida na secção 7.3.

Algumas técnicas desenvolvidas recentemente abordam a resolução deste problema num plano contínuo, recorrendo a modelos do tipo do apresentado na secção 8.2.3.

Heragu (1990) apresenta um modelo no plano contínuo que contempla a existência de pontos de entrada e de saída de materiais, mas com as seguintes limitações:

- a orientação das máquinas tem de ser pré-definida,
- a forma geométrica das máquinas é obrigatoriamente rectangular,

- os pontos de entrada e saída de materiais não são fixos relativamente à configuração das máquinas.

O autor, que desenvolveu um procedimento de recristalização simulada para a resolução do problema, não dá qualquer informação útil relativamente à qualidade das soluções obtidas a partir de tal procedimento.

Tam e Li (1991) apresentaram um modelo de programação não-linear que contempla a possibilidade de orientação livre (horizontal ou vertical) de secções com configuração geométrica rectangular fixa, não prevendo, contudo, a inclusão de pontos de entrada e de saída.

O procedimento adoptado na resolução deste modelo compreende três fases: (i) a decomposição do problema em secções, (ii) o posicionamento das máquinas nas secções ou das secções na área de implantação e (iii) o ajustamento da implantação de cada secção ou global.

Se o número de máquinas é muito grande, na primeira fase do algoritmo, o problema é decomposto em subproblemas de menor dimensão através do agrupamento das máquinas em secções. Para o efeito, recorre-se a um procedimento de análise de 'clusters' que permite agrupar as máquinas em secções de acordo com o fluxo entre elas. Nas fases seguintes, procede-se sequencialmente à implantação das máquinas dentro de cada secção e das secções na área fabril.

Na segunda fase, o objectivo é o de determinar o posicionamento relativo dos recursos (máquinas ou secções). Uma vez que a sua configuração geométrica é irrelevante, nesta fase, cada recurso é representado por um círculo e o objectivo é o de definir as posições dos seus centros que minimizam a interacção global e, simultaneamente, garantir que os círculos não se sobrepõem. O modelo resultante é um problema de optimização sem restrições, que é resolvido recorrendo a um programa disponível comercialmente.

Na fase de ajustamento da implantação (terceira fase), as localizações relativas dos recursos, determinadas na fase anterior, são consolidadas. Os recursos são representados por rectângulos e obedecem às seguintes condições:

- (i) não pode existir sobreposição de recursos,
- (ii) cada recurso pode ser posicionado na vertical ou na horizontal e o rectângulo que o define tem área fixa, mas a relação entre o



seu comprimento e a sua largura pode variar entre dois valores pré-definidos,

- (iii) a área de implantação é delimitada por um rectângulo com dimensões definidas.

O objectivo é, tal como na fase anterior, o de minimizar as interacções entre os recursos. O modelo resultante é um programa não-linear com restrições. Este modelo é decomposto, por decomposição Lagrangeana, e cada um dos subproblemas resultantes é resolvido recorrendo a um programa comercial.

Welgama e Gibson (1993) apresentam uma heurística de construção num plano contínuo, contemplando os seguintes aspectos:

- as máquinas são representadas por rectângulos de dimensões fixas,
- os pontos de entrada e saída são definidos pelo utilizador, mas só podem ocupar uma de quatro posições pré-definidas no perímetro da máquina,
- as máquinas orientam-se livremente (na horizontal ou na vertical),
- as máquinas não se podem sobrepor na implantação.

O objectivo deste procedimento é o de colocar as máquinas de modo a minimizar o custo global de transporte de materiais, considerando os pontos de entrada e de saída:

$$\text{Min } Z = \sum_i \sum_j f_{ij} \cdot (|sx_i - ex_j| + |sy_i - ey_j|) + f_{ji} \cdot (|sx_j - ex_i| + |sy_j - ey_i|) \quad (16)$$

onde:

- $f_{ij}$  - fluxo entre as máquinas  $i$  e  $j$ ,  
 $(ex_i, ey_i)$  - coordenadas do ponto de entrada da máquina  $i$ ,  
 $(sx_i, sy_i)$  - coordenadas do ponto de saída da máquina  $i$ .

Tal como os procedimentos de construção convencionais, este método compreende uma rotina de selecção, que determina a sequência de implantação das máquinas, e uma rotina de colocação, que dita o posicionamento das máquinas na área fabril.

A rotina de selecção das máquinas escolhe para primeira máquina a entrar na implantação aquela que interage com o maior número de máquinas (ou seja, aquela

que apresenta o maior número de fluxos não nulos com as restantes máquinas). Opcionalmente, o procedimento permite ao utilizador a escolha dessa máquina. As máquinas colocadas a seguir são seleccionadas progressivamente, por forma a maximizar o fluxo com as máquinas já colocadas.

O procedimento de colocação das máquinas é semelhante ao PLANET (Deisenroth e Apple (1972)), mas tem em conta os pontos de entrada e de saída, as dimensões fixas e a possibilidade de orientação das máquinas.

De acordo com o procedimento proposto, selecciona-se a melhor localização e a melhor orientação para cada máquina, calculando o valor da função objectivo para diferentes posições da nova máquina. O conjunto de posições consideradas para esta, relativamente ao rectângulo envolvente das máquinas já colocadas, encontra-se definido na Figura 8.7. Em cada uma destas posições, consideram-se ainda quatro orientações alternativas da máquina (a indicada na Figura 8.7 e as que se obtêm por rotações de 90°, 180° e 270°).

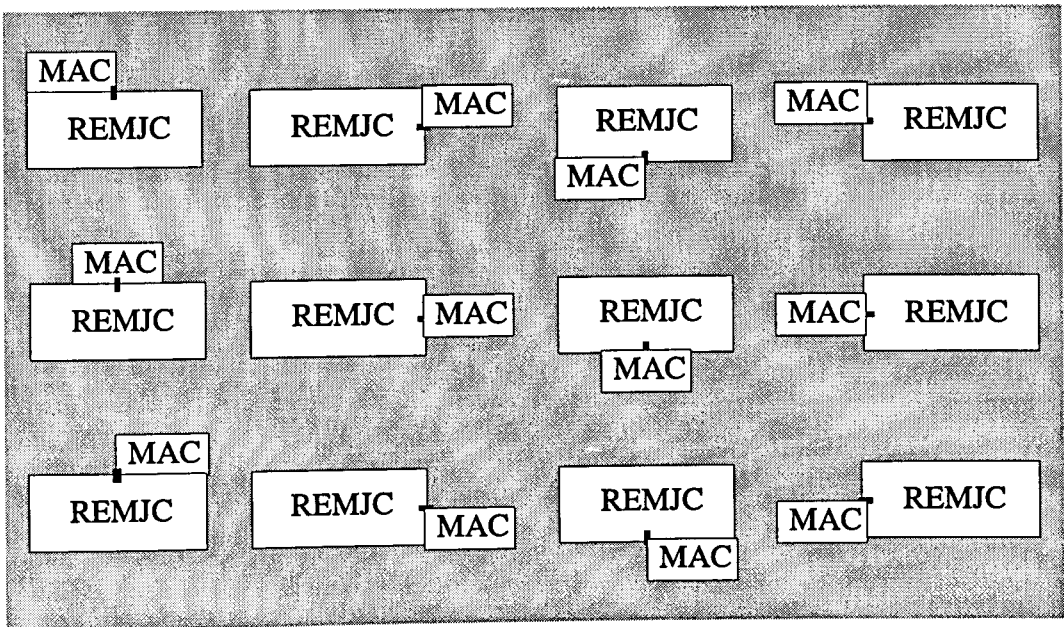


Figura 8.7 - Conjunto de posições consideradas para a máquina a colocar (MAC) relativamente ao rectângulo envolvente das máquinas já colocadas (REMJC)

Uma função objectivo alternativa à considerada anteriormente é também proposta pelos autores (Welgama e Gibson (1993)). Trata-se de uma função objectivo bicritério:

$$Z' = W_1 Z_1 + W_2 Z_2 \quad (17)$$

onde:

$$W_1 + W_2 = 1,$$

$Z_1$  é o objectivo definido pela equação (16) e

$$Z_2 = \frac{\text{ÁreaTotal} - \sum_i \text{Área}[i]}{\text{ÁreaTotal}}.$$

Nesta expressão,  $\text{Área}[i]$  representa a área da máquina  $i$  e  $\text{ÁreaTotal}$  a área do menor rectângulo envolvente de todas as máquinas colocados na implantação, pelo que  $Z_2$  representa a proporção da área do rectângulo envolvente que não é ocupada pelas máquinas. Variando sistematicamente os pesos  $W_1$  e  $W_2$ , é possível gerar soluções alternativas, com diferentes graus de compacidade.

A natureza sequencial do procedimento de selecção e de colocação leva a que - a exemplo do que sucede com outros métodos, que genericamente podem ser descritos como de construção - a solução finalmente obtida seja muito dependente da sequência de colocação das máquinas.

Um exemplo que ilustra a miopia dos procedimentos sequenciais adoptados é dado na Figura 8.8. A máquina 1 é colocada em primeiro lugar porque tem a maior interacção com todas as outras máquinas. A máquina 2 é colocada seguidamente, porque tem forte interacção com a máquina 1. As máquinas 3, 4 e 5 são colocadas por esta ordem, porque têm uma forte interacção com a máquina 2 e alguma com a máquina 1. Se a próxima máquina a ser colocada tiver uma interacção com a máquina 1 pouco menor do que a máquina 2 e não tiver interacção com nenhuma das outras máquinas, a sua colocação não será obviamente a melhor, porque está limitada ao perímetro formado pelas máquinas com as quais não interage.

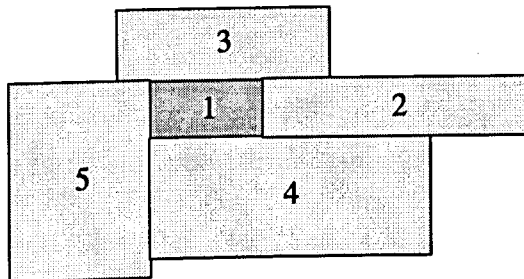


Figura 8.8 - Exemplo de aplicação dos procedimentos sequenciais

Imam e Mir (1993) observaram este fenómeno e introduziram os conceitos de convergência controlada e blocos envolventes por forma a anular este efeito. Uma extensão ao método proposto por estes autores foi desenvolvida para inclusão no SAD e é apresentada em detalhe na secção seguinte.

## 8.6 Heurística utilizada no sistema

### 8.6.1 Aspectos gerais

O módulo de implantações fabris, que se apresenta neste capítulo, permite resolver o problema de implantação de máquinas ou secções com geometria fixa.

Para a resolução deste problema, o sistema recorre a uma heurística que constitui uma extensão ao procedimento proposto por Imam e Mir (1993).

As principais características da heurística incluída no sistema são as seguintes:

- O objectivo é o de minimizar o custo global de transporte de materiais segundo a expressão (10), anteriormente apresentada na secção 8.3.1.
- A medida de distância utilizada é a rectilinear (isto é, a distância entre dois pontos quaisquer -  $(x_i, y_i)$  e  $(x_j, y_j)$  - é dada por  $d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$ ).
- Os recursos a colocar na implantação podem ser de dois tipos, designadamente postos de trabalho e secções fabris:
  - um posto de trabalho é associado a uma máquina individual e a sua representação geométrica inclui: (i) uma área rectangular que define a área do posto de trabalho, (ii) um modelo geométrico do tipo de máquina em causa (incluído na referida área) e (iii) um ponto de entrada e um ponto de saída do posto de trabalho,
  - uma secção fabril compreende um conjunto de postos de trabalho e a sua representação geométrica inclui: (i) uma área rectangular

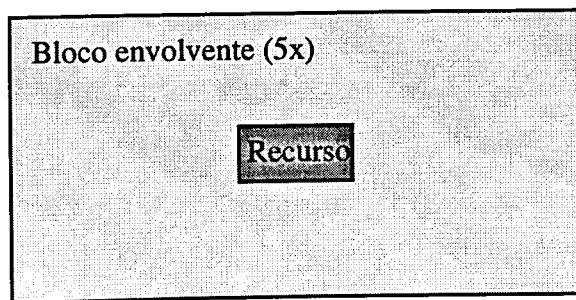
que define a área da secção, (ii) as representações geométricas dos postos de trabalho que integram a secção e (iii) um ponto de entrada e um ponto de saída da secção.

As áreas rectangulares dos postos de trabalho ou das secções têm dimensão fixa.

- As posições dos pontos de entrada e de saída de materiais são, normalmente, pré-definidas. No caso contrário, admite-se que tais posições coincidem com o centro geométrico da área rectangular associada ao posto de trabalho ou à secção em causa.
- As áreas rectangulares associadas aos postos de trabalho ou às secções não podem ser sobrepostas na implantação, isto é, são satisfeitas as restrições (5a) e (5b) apresentadas anteriormente na secção 8.2.3.
- Sobre cada posto de trabalho ou cada secção podem efectuar-se rotações de  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  ou  $270^\circ$ , em torno do seu centro geométrico.
- A área global de implantação não é delimitada.

A heurística utilizada recorre aos conceitos de bloco envolvente e de convergência controlada (Imam e Mir (1993)). Tais conceitos, que se apresentam seguidamente, permitem eliminar o fenómeno de formação precoce de grupos de recursos referido na secção 8.5.

Um bloco envolvente é uma ampliação do contorno geométrico de um recurso, que preserva o seu centro geométrico (ver Figura 8.9).



**Figura 8.9** - Exemplo que ilustra um recurso e o respectivo bloco envolvente (ampliação de 5 vezes)

Em cada iteração da heurística, aplica-se um procedimento de optimização não-linear para se proceder à implantação dos blocos envolventes dos recursos (postos de trabalho ou secções) em causa. Tal procedimento procura minimizar a função objectivo e satisfazer as restrições de não-sobreposição dos blocos envolventes. Na iteração inicial os blocos são definidos com um factor de ampliação máximo. Tal factor é reduzido de iteração para iteração, nas iterações seguintes, até atingir a unidade (caso no qual as dimensões do bloco envolvente coincidem com as do recurso). Através da redução progressiva da dimensão dos blocos envolventes (convergência controlada), que conduz à criação de espaços livres entre os recursos, procura-se atenuar o fenómeno de agrupamento precoce dos recursos.

### 8.6.2 Descrição da heurística incorporada no sistema para o problema de implantações fabris

Nesta secção, identificam-se os parâmetros de entrada e descreve-se a heurística para a obtenção de soluções para o problema de implantações fabris.

Os parâmetros de entrada são os seguintes:

- (i) Número de recursos ( $N$ ),
- (ii) Para cada recurso  $i$ :
  - comprimento ( $L_i$ ) e largura ( $W_i$ ),
  - as distâncias dos pontos de entrada ( $e_{xi}$ ,  $e_{yi}$ ) e de saída ( $s_{xi}$ ,  $s_{yi}$ ) ao centro geométrico do recurso, segundo cada uma das direcções  $XX'$  e  $YY'$ .
- (iii) Para cada componente  $k$ :
  - o número de viagens entre cada par de recursos ( $i, j$ ), ao longo do período de planeamento ( $r_{ij}^k$ ).
- (iv) Para cada tipo de equipamento de transporte  $t$ :
  - o custo por unidade de tempo ( $c_t$ ).

- (v) Para cada operação de transporte (entre os recursos  $i$  e  $j$  para o componente  $k$ ):
- os tempos de carga e de descarga ( $l_{ij}^k$  e  $u_{ij}^k$ ),
  - a velocidade do transportador ( $v_{ij}^k$ ).
- (vi) Factor inicial de ampliação dos recursos (FIAMP).
- (vii) Taxa de redução do factor de ampliação em cada iteração (RFAMP).
- (viii) Semente do gerador de números aleatórios utilizado na obtenção da solução inicial (SEED).

As variáveis de decisão utilizadas no procedimento são as coordenadas do centro geométrico de cada bloco envolvente  $((x_i, y_i), i=1, \dots, N)$ .

A distância entre cada par de blocos  $(i, j)$  é medida entre o ponto de saída do bloco  $i$  e o ponto de entrada do bloco  $j$ , sendo dada pela expressão:

$$d_{ij} = \left| (x_i + s_{xi}) - (x_j + e_{xj}) \right| + \left| (y_i + s_{yi}) - (y_j + e_{yj}) \right|, \quad i, j = 1, \dots, N \quad (18)$$

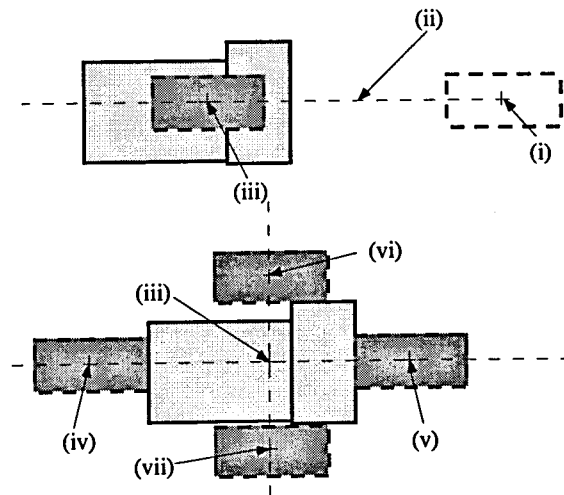
De acordo com a heurística utilizada, começa-se por distribuir aleatoriamente os  $N$  blocos envolventes (que correspondem à ampliação dos  $N$  recursos por um factor igual a FIAMP) por uma área suficientemente ampla para garantir um espaçamento entre blocos que não comprometa a qualidade da solução inicial. Na implementação utilizada, o comprimento dessa área corresponde à soma dos comprimentos de cada bloco e um critério semelhante foi utilizado para a largura. Uma sequência de pares de números aleatórios é gerada para definir as coordenadas do centro de cada bloco. Nos casos em que as restrições de não sobreposição são violadas, um novo par de números aleatórios é gerado até que o posicionamento do bloco seja admissível.

Em cada iteração, a ordem pela qual as  $2.N$  variáveis de decisão são optimizadas é determinada aleatoriamente.

Cada variável de decisão é optimizada, recorrendo ao método de pesquisa univariada de Coggins (Box et al (1969)), com o bloco orientado segundo cada uma das quatro rotações possíveis ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$ ). O conjunto que conduz ao melhor

valor da função objectivo é retido e o bloco colocado na posição e orientação correspondente.

No caso de o processo de optimização colocar o centro geométrico do bloco  $(x_i, y_i)$  num ponto que conduza à violação das restrições de não sobreposição, o bloco é deslocado para fora da região não admissível e o valor da função objectivo é testado com o bloco colocado em quatro pontos: (i) e (ii), segundo a linha seguida na optimização, os pontos mais próximos da posição do centro geométrico do bloco após a optimização em direcções opostas que não violem as restrições de não sobreposição, (iii) e (iv), segundo a linha perpendicular à de optimização que passa pelo centro geométrico do bloco após a optimização, os pontos mais próximos desta posição em direcções opostas, que não violem a restrição de não sobreposição. A posição do bloco que conduzir ao menor valor da função objectivo é retida e é esta que é utilizada posteriormente na comparação com as outras orientações do bloco. Este procedimento é ilustrado na Figura 8.10, onde se mostram: (i) a posição inicial do bloco, (ii) a linha de optimização, (iii) a posição do bloco após a optimização univariada, (iv), (v), (vi) e (vii) as posições do teste que não violam a restrição de não sobreposição.



**Figura 8.10** - Teste das posições do bloco que não violam as restrições de não sobreposição

Uma vez optimizadas as  $2.N$  variáveis de decisão, conclui-se uma iteração. Nas iterações seguintes, o valor do factor de ampliação (FAMP) é diminuído em função da taxa de redução (RFAMP) introduzida pelo utilizador. A última iteração é executada com um factor de ampliação igual a um, ou seja, com as dimensões dos blocos iguais



às dos recursos, obtendo-se assim a melhor solução para o problema da implantação de recursos. Nos casos em que o valor de FAMP não é múltiplo de RFAMP, força-se o valor de FAMP a ser igual a um na última iteração.

Na Figura 8.11 apresenta-se um exemplo de aplicação da heurística. O valor inicial de FAMP (FIAMP) é de 25 e a taxa de redução do factor de ampliação (RFAMP) é de 5, o que conduziu a três iterações (com FAMP=25, 5 e 1). Do lado esquerdo, apresentam-se as soluções iniciais para cada um destes valores e, do lado direito, a solução final obtida em cada iteração. Note-se que, de iteração para iteração, a escala de representação das soluções varia.

Como se pode constatar, o posicionamento relativo de cada bloco é igual entre a solução final de uma iteração e a solução inicial da iteração seguinte. Contudo, devido à redução dos blocos envolventes, é criado um espaço entre estes, o que permite que a posição relativa dos recursos seja modificada entre iterações.

Quando existem grupos de recursos que têm uma fraca interacção entre si e uma forte interacção entre os recursos que os compõem, pode ocorrer um fenómeno indesejável de 'clustering'. Nestas condições, dado que as dimensões da área de implantação inicial são muito maiores do que as da implantação final, pode ocorrer que os grupos se formem muito afastados uns dos outros. Uma vez que no processo de optimização só se considera um recurso de cada vez, este é atraído pelo grupo com o qual tem forte interacção e, conseqüentemente, é impedido de se aproximar dos recursos que não integram o grupo, criando-se assim, na solução final, grupos de recursos espalhados pela área de implantação. Este fenómeno produz duas conseqüências indesejáveis no processo de obtenção da implantação: (i) a área ocupada pode ser muito maior do que o desejável, o que conduz a um mau aproveitamento do espaço, e (ii) se máquinas com alguma interacção entre si são colocadas em grupos diferentes, o seu posicionamento relativo não é considerado.

Estes aspectos levaram a que, em cada iteração, se introduzisse uma segunda fase no procedimento, na qual se utiliza o mesmo processo de optimização, mas para a seguinte função objectivo:

$$\text{Min } Z' = Z + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N d_{ij}^2 \quad (19)$$

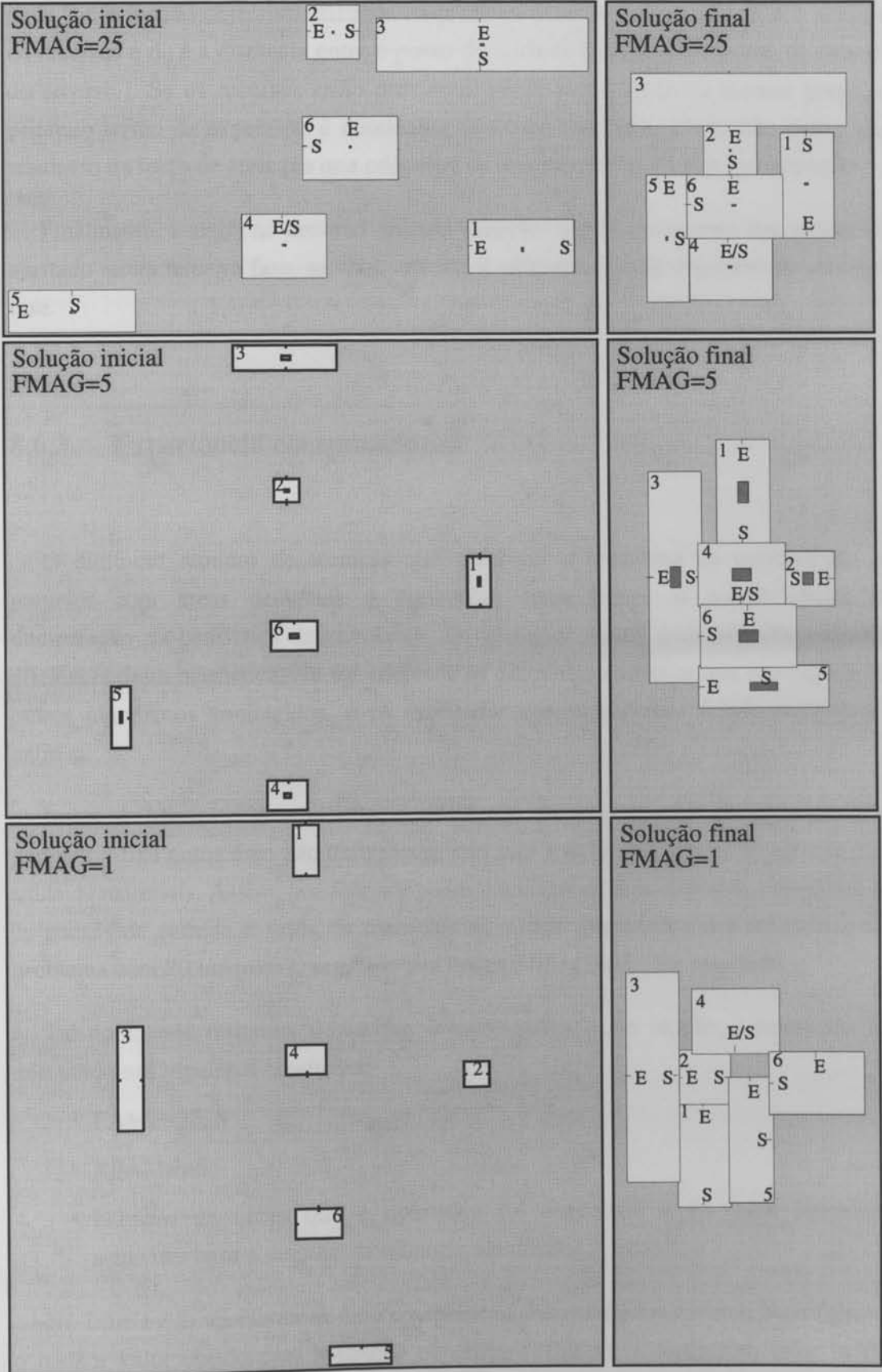


Figura 8.11 - Exemplo de aplicação da heurística incorporada no SAD

onde  $Z$  é a função objectivo utilizada na primeira fase (equação (10)),  $N$  é o número de recursos e  $d_{ij}$  é a distância entre o ponto de saída do recurso  $i$  e o ponto de entrada do recurso  $j$ . Se os recursos estão próximos, pertencendo então ao mesmo grupo, o primeiro termo da expressão é dominante. No caso contrário, o segundo termo, em resultado da força de atracção que cria entre os recursos, obriga à sua aproximação.

Finalmente, e ainda no decurso de cada iteração, o posicionamento dos recursos é ajustado numa terceira fase, na qual se volta a utilizar a função objectivo da primeira fase.

### 8.6.3 Experiência computacional

O diminuto número de técnicas que resolvem o problema da implantação de recursos com áreas desiguais e dimensões fixas limita as possibilidades de comparação da heurística desenvolvida. De qualquer modo, para permitir avaliar a eficiência desta heurística, ela foi adaptada às diferentes situações que são objecto de outros algoritmos conhecidos, e os resultados correspondentes foram comparados entre si.

Imam e Mir (1993) resolvem o problema da implantação de recursos com geometria fixa numa área não delimitada, mas não consideram pontos de entrada e de saída de materiais. Assim, por forma a poder comparar os dois métodos, colocaram-se os pontos de entrada e saída de materiais no centro geométrico dos recursos e um problema com 20 máquinas, sugerido por Imam e Mir (1993), foi resolvido.

Tal como nos restantes testes que se apresentam nesta secção, a heurística foi executada nas seguintes condições:

- FAMP=25,
- RFAMP=5,
- Número de vezes que a heurística foi executada = 10 (com diferentes sementes para o gerador de números aleatórios).

Na Tabela 8.2, apresenta-se uma comparação dos resultados obtidos. Nela figuram o melhor valor obtido para a função objectivo (Melhor), o respectivo valor médio (Média) e desvio padrão (DP) e o tempo de execução em minutos (Tempo (min)).

Tabela 8.2 - Comparação de resultados para o problema teste de Imam e Mir (1993)

FLOAT (Imam e Mir (1993))			Heurística			
Melhor	Média	DP	Melhor	Média	DP	Tempo (min)
1264.9	1333.8	27.51	1220.1	1313.1	10.13	7.8

O melhor desempenho da heurística, relativamente ao procedimento FLOAT, proposto por Imam e Mir (1993), pode ser justificado pelas seguintes razões:

- (i) na heurística proposta, o melhor posicionamento de cada bloco envolvente é testado segundo as quatro orientações possíveis, ao passo que, no procedimento FLOAT, a orientação dos blocos é fixa,
- (ii) o procedimento FLOAT não utiliza a segunda fase proposta na heurística, e
- (iii) no caso de sobreposição dos recursos, o procedimento FLOAT prevê o posicionamento do recurso que está a ser colocado no ponto da linha de optimização mais próximo do óptimo, não efectuando o teste nos outros três pontos (ver secção 8.6.2).

Naturalmente que o esforço computacional associado à heurística proposta é maior do que aquele que é envolvido no procedimento FLOAT; no entanto, o tempo médio de execução da heurística (7.8 minutos) é tido como razoável, tendo em atenção a dimensão do problema e a ordem polinomial da complexidade temporal da heurística.

O algoritmo de Welgama e Gibson (1993) resolve o problema da implantação de recursos com áreas desiguais e dimensões fixas numa área não delimitada e considera pontos de entrada e de saída de materiais colocados numa de quatro posições possíveis no perímetro do recurso. Como já foi referido anteriormente, a função objectivo deste procedimento é bicritério, enquanto na heurística proposta apenas um dos critérios é utilizado: o de minimização do custo global de transporte. O problema teste de Welgama e Gibson (1993), com 12 recursos, foi utilizado na comparação dos dois métodos. Os resultados que se apresentam na Tabela 8.3 foram obtidos, para ambos os algoritmos, minimizando o custo global de transporte e calculando a proporção da área não ocupada (DSR). Na Tabela 8.3 figuram então:

- Para o algoritmo de Welgama e Gibson:
  - o custo mínimo e o respectivo valor de DSR.
- Para a heurística proposta:
  - o menor valor do custo e o respectivo valor de DSR,
  - os valores médios do custo, de DSR e do tempo médio de execução (em segundos).

Tabela 8.3 - Comparação de resultados para o problema teste de Welgama e Gibson (1993)

Nº de recursos	Welgama e Gibson (1993)		Heurística				
	Custo	DSR	Menor		Média		
			Custo	DSR	Custo	DSR	Tempo (s)
12	5903.0	0.57	5563.8	0.59	5822.5	0.54	91

O pior comportamento do algoritmo de Welgama e Gibson (1993) para problemas de dimensão razoável é previsível, uma vez que não utiliza qualquer mecanismo para contrariar a formação precoce de grupos de recursos.

## 8.7 Interacção com o utilizador

### 8.7.1 Descrição geral da interface

Nesta secção, são apresentadas as interacções incorporadas no módulo de projecto de implantações fabris e descreve-se, sumariamente, a funcionalidade de cada uma daquelas interacções.

Da janela principal do SAD (que se apresentou na Figura 3.2) reproduz-se na Figura 8.12 a área a partir da qual se tem acesso aos comandos deste módulo. A árvore, representando os percursos de acesso ao primeiro nível de comandos disponíveis a partir desta área, é apresentada na Figura 8.13 .

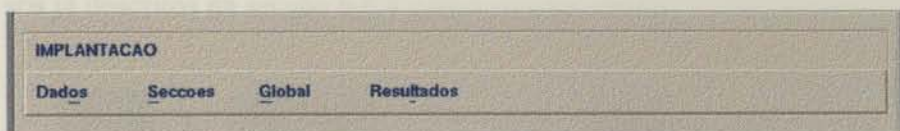


Figura 8.12 - Área da janela principal relativa ao módulo de implantações fabris

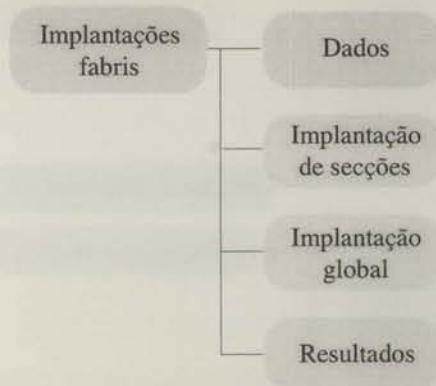


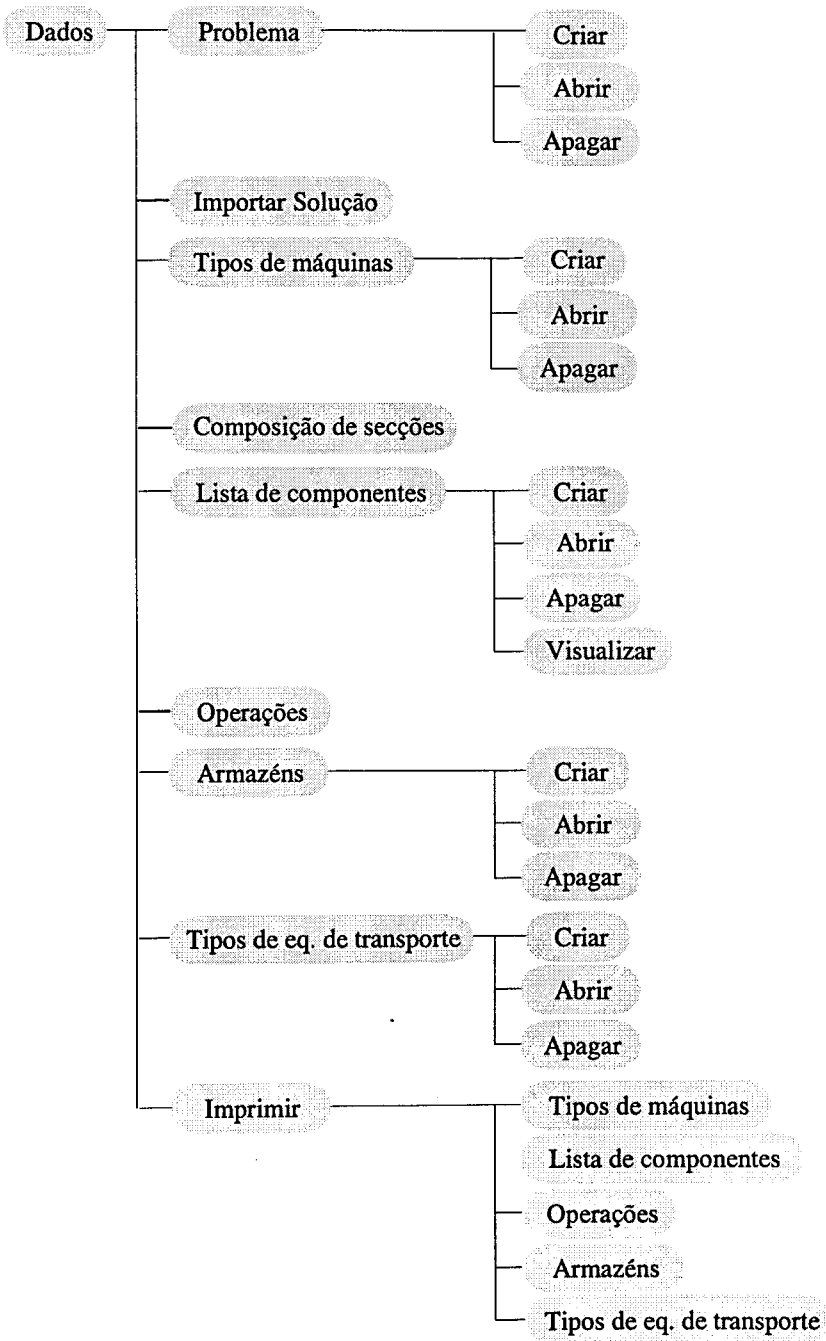
Figura 8.13 - Percursos de acesso ao primeiro nível de comandos do módulo de implantações fabris

## 8.7.2 Introdução de dados

Os dados para o projecto de implantações fabris podem ser introduzidos directamente neste módulo ou importados quer do módulo de afectação de operações de fabrico a máquinas (no caso da implantação de postos de trabalho na área fabril), quer do módulo de agregação de máquinas em secções (no caso da implantação de postos de trabalho em secções e destas na área fabril).

A árvore com os percursos de acesso aos comandos para introdução de dados é apresentada na Figura 8.14. A informação a introduzir e os procedimentos a seguir são idênticos aos que foram descritos no módulo de agregação de máquinas em secções de fabrico (ver secção 6.6.2). No caso da introdução directa dos dados neste módulo, há que definir manualmente a composição das secções (somente aplicável no

caso da implantação de secções), utilizando-se um procedimento e uma interface iguais aos já descritos na secção 6.6.4 para o mesmo efeito.



**Figura 8.14** - Percursos de acesso aos comandos para introdução de dados no módulo de implantações fabris

### 8.7.3 Implantação de postos de trabalho em secções de fabrico

A activação do botão *Secções* na área da janela principal correspondente a este módulo (que se reproduziu na Figura 8.12), faz abrir a janela que se apresenta na Figura 8.15, a partir da qual se tem acesso aos comandos desta opção, segundo a árvore que se apresenta na Figura 8.16.

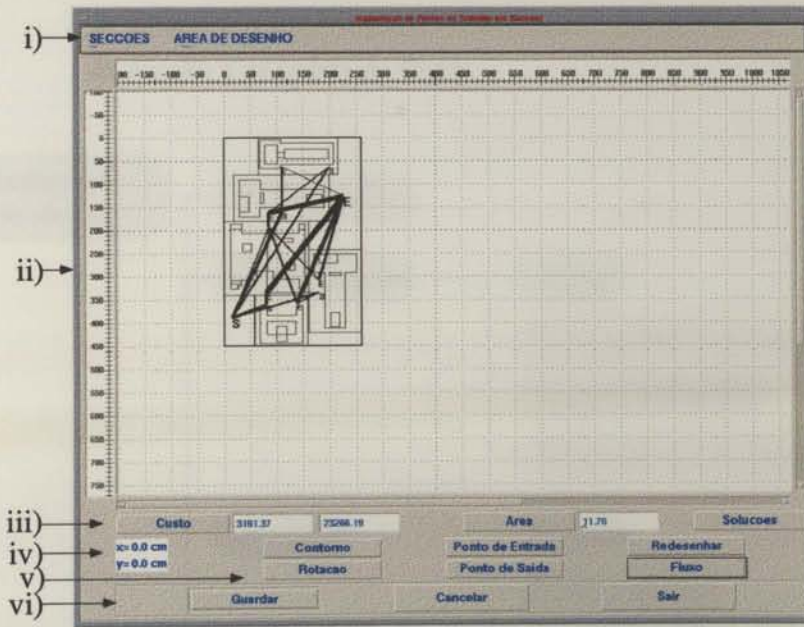


Figura 8.15 - Janela principal do módulo de implantação de postos de trabalho em secções

Na janela da Figura 8.15 podem-se distinguir os seguintes componentes:

- i) **Menu de operações:** inclui os comandos que permitem seleccionar as secções a implantar e definir os parâmetros da área de desenho.
- ii) **Área de desenho:** inclui a folha na qual se representam os objectos gráficos e duas régua (uma horizontal e outra vertical) graduadas em coordenadas reais (em função da escala seleccionada). A posição do zero das régua pode ser alterada (zero móvel), bastando para tal accionar o botão esquerdo do rato com o cursor posicionado sobre a régua na posição



pretendida para o zero. A porção da área de desenho visualizada depende das dimensões da janela principal, as quais têm como limite máximo o tamanho do monitor. Os cursores horizontal e vertical (colocados na parte inferior e à direita da área de desenho, respectivamente) permitem controlar a porção da área de desenho que é visualizada. Na Figura 8.15 pode-se visualizar a configuração de uma secção, compreendendo os símbolos dos postos de trabalho respectivos, os pontos de entrada (E) e de saída (S) dos postos de trabalho e das secções, o rectângulo que define o contorno da secção e as linhas de fluxo.

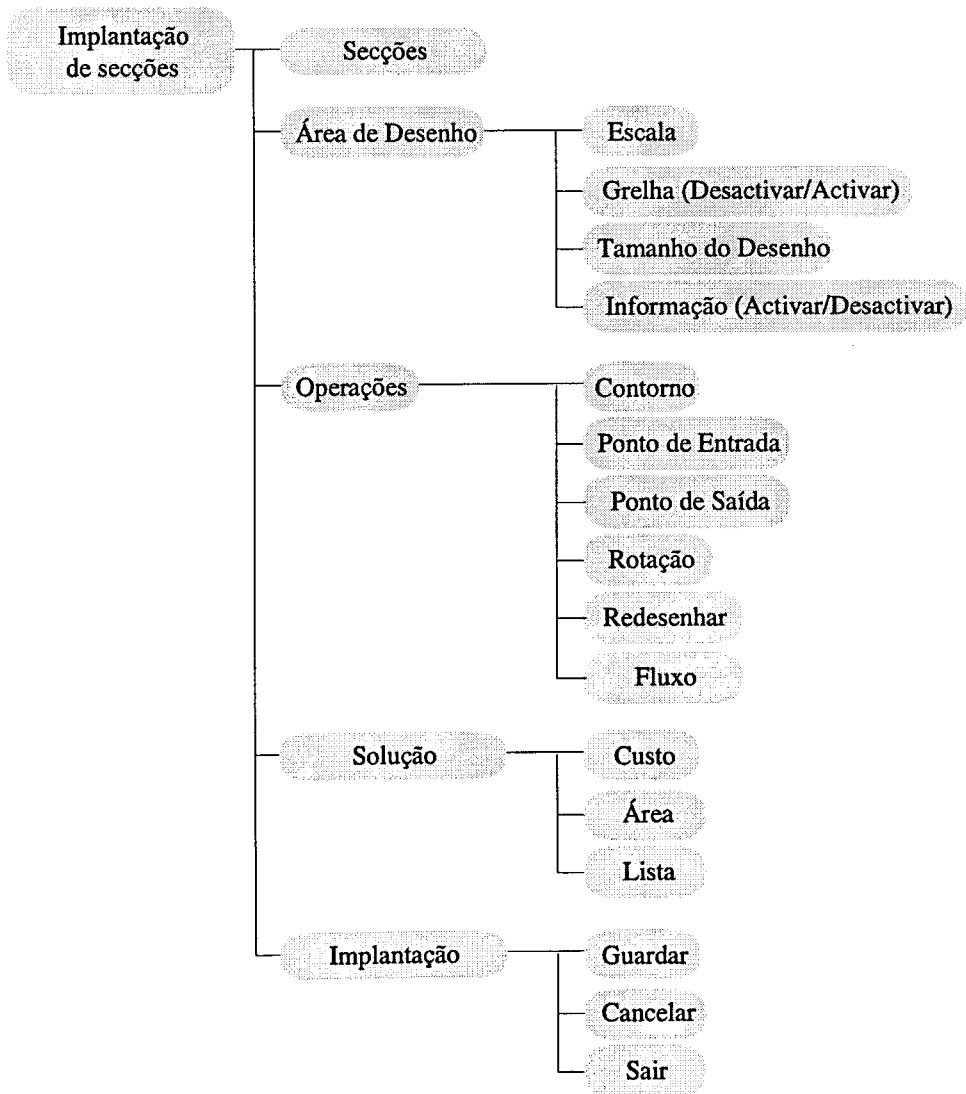


Figura 8.16 - Percursos de acesso aos comandos para definição da implantação de secções

- iii) **Janela dos parâmetros da solução:** inclui os botões que permitem visualizar o custo e a área ocupada pela implantação corrente e consultar as soluções armazenadas na base de dados para o problema corrente.
- iv) **Janela de informação:** representa, em tempo real, as coordenadas do cursor.
- v) **Operações de configuração das secções:** inclui os botões que permitem definir alguns dos elementos constituintes das secções e efectuar operações sobre os símbolos associados a estas secções.
- v) **Operações sobre a configuração de secções:** inclui os botões que permitem guardar e cancelar a implantação corrente e abandonar este módulo.

### 8.7.3.1 Selecção da secção

A selecção da opção Secções no menu de operações da Figura 8.15 faz aparecer uma lista de selecção (como a apresentada na Figura 4.7) com todos os identificadores de secções armazenados na base de dados para o problema em análise. A selecção de um identificador de secção da lista faz aparecer a caixa de diálogo que se apresenta na Figura 8.17, a qual permite definir os parâmetros para a resolução do problema da implantação de postos de trabalho nessa secção.

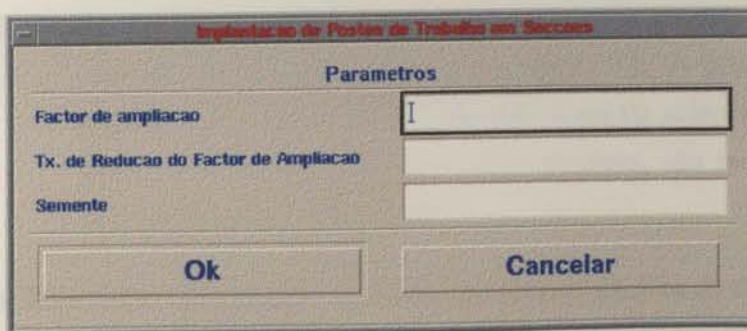


Figura 8.17 - Caixa de diálogo para a definição dos parâmetros para o problema da implantação de secções

Uma caixa de diálogo de erro (como a apresentada na Figura 4.8), com uma mensagem apropriada ao contexto, aparecerá nos seguintes casos:

- não introdução dos valores do factor de ampliação ou da taxa de redução deste factor,
- inserção de um valor não inteiro em qualquer uma das caixas de texto.

Caso o utilizador não introduza um valor para a semente do gerador de números aleatórios, o programa obtém este valor do relógio do sistema.

Depois de introduzidos os parâmetros, e caso o utilizador não cancele a operação, o sistema resolve o problema da implantação de máquinas numa secção de fabrico (recorrendo à heurística descrita na secção 8.6) e exhibe a solução na área de desenho (ver Figura 8.15-ii)).

### 8.7.3.2 Operações sobre a área de desenho

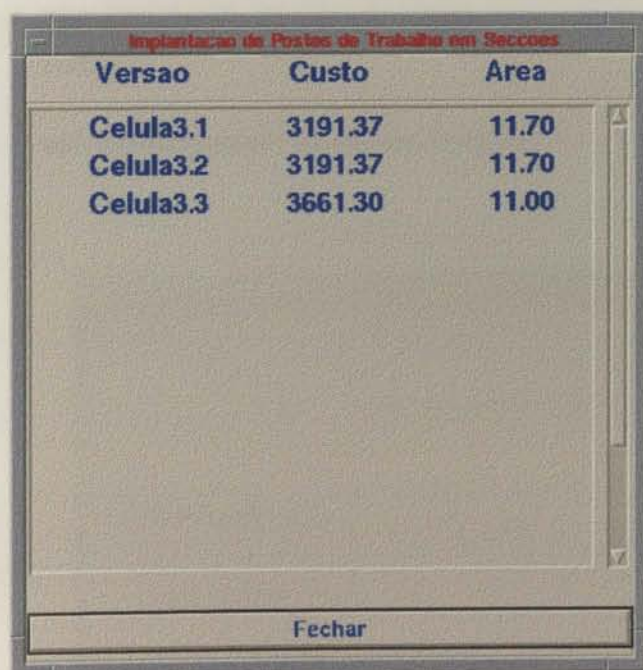
O sistema permite as seguintes operações sobre a área de desenho:

- Activar/Desactivar Grelha:** coloca ou retira a grelha da área de desenho.
- Activar/Desactivar Localização:** activa ou desactiva a visualização de informações na janela de informação (ver Figura 8.15-iv)). Note-se que o sistema torna-se mais lento se esta opção estiver activada.
- Escala:** define a escala do desenho. As opções disponíveis são as mesmas que se apresentaram na Figura 7.8. A graduação das régua é actualizada de acordo com a escala seleccionada e os objectos na área de desenho, caso existam, são redesenhados de acordo com a nova escala.
- Tamanho do desenho:** define as dimensões da área de desenho. As opções disponíveis são as mesmas que se apresentaram na Figura 7.9.

### 8.7.3.3 Visualização dos parâmetros das soluções

O sistema permite obter as seguintes informações sobre o problema corrente:

- i) **Custo:** indica o valor da função objectivo para a solução corrente, contemplando duas situações: (i) custo associado ao fluxo entre postos de trabalho e (ii) idem, mas incluindo ainda o fluxo entre os pontos de entrada e de saída da secção e os postos de trabalho.
- ii) **Área:** indica a área total ocupada pela secção.
- iii) **Soluções:** exhibe uma lista das soluções existentes para o problema em análise, na qual se incluem, para cada solução, o identificador, o custo e a área ocupada (ver Figura 8.18).



Versao	Custo	Area
Celula3.1	3191.37	11.70
Celula3.2	3191.37	11.70
Celula3.3	3661.30	11.00

Figura 8.18 - Janela para visualização das soluções para o problema corrente

### 8.7.3.4 Operações de configuração de secções

As operações disponíveis para a configuração de secções são as seguintes:

- i) **Contorno:** define o rectângulo que delimita o espaço associado à secção. A activação desta opção (ver Figura 8.15-v)) faz aparecer uma janela de diálogo como a representada na Figura 8.19. Nesta janela definem-se as coordenadas do canto superior esquerdo (X, Y), o comprimento e a largura do rectângulo. A alteração de um contorno associado a uma secção é efectuada pela simples redefinição de um novo contorno.

Um diálogo de erro (como o apresentado na Figura 4.8) será exibido nas seguintes situações:

- não introdução do tipo de dados correcto em cada um dos campos,
- não preenchimento de um dos campos.

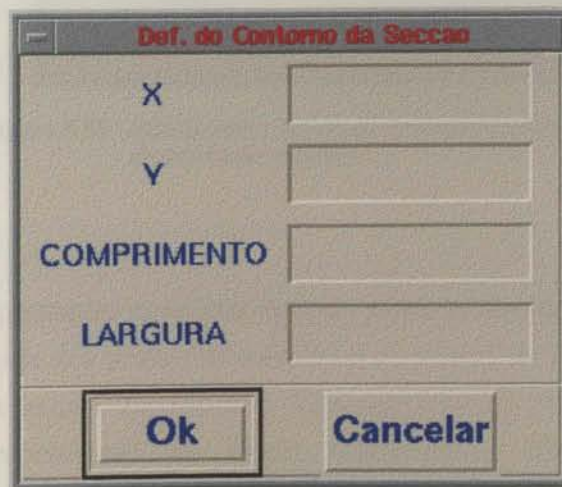


Figura 8.19 - Caixa de diálogo para definição do contorno de um posto de trabalho

- ii) **Pontos de entrada/saída:** definem as coordenadas dos pontos de entrada e de saída de materiais da secção. Seleccionando-se qualquer uma destas opções (ver Figura 8.15-v) e activando-se o cursor no ponto desejado da área de desenho, definem-se, para a secção, as coordenadas do ponto de entrada (ou do de saída). O cursor é modificado durante esta operação para indicar ao utilizador a opção seleccionada (o cursor fica com o formato de um E no caso da opção de definição do ponto de entrada e com o formato de um S no caso de definição do ponto de saída). A modificação de um ponto de entrada ou de saída é efectuada redefinindo-se simplesmente o ponto.
- iii) **Rotação:** define a rotação (relativamente ao eixo XX') do posto de trabalho seleccionado. A selecção desta opção faz aparecer uma janela com uma escala, como a representada na Figura 8.20, para definição da rotação do posto de trabalho.

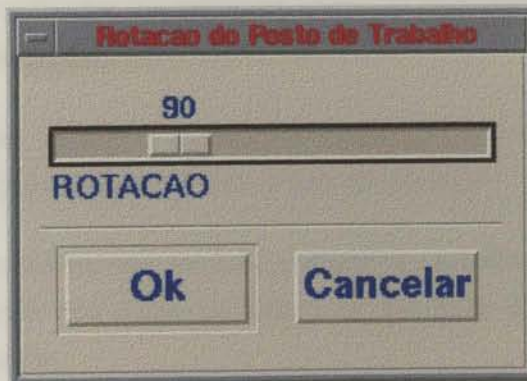


Figura 8.20 - Escala para a definição do ângulo de rotação de postos de trabalho

- iv) **Fluxo:** permite visualizar o fluxo entre os pontos de entrada e de saída dos postos de trabalho e os pontos de entrada e de saída da secção. As linhas de fluxo são traçadas com uma espessura proporcional ao fluxo representado. Pretende-se assim transmitir ao utilizador informação visual que lhe permita verificar a adequabilidade do posicionamento dos pontos de entrada e de saída da secção e, se for caso disso, modificar a solução.

- v) **Redesenhar:** redesenha a secção. Quando o utilizador achar que é necessário redesenhar a secção na área de desenho activa esta opção.

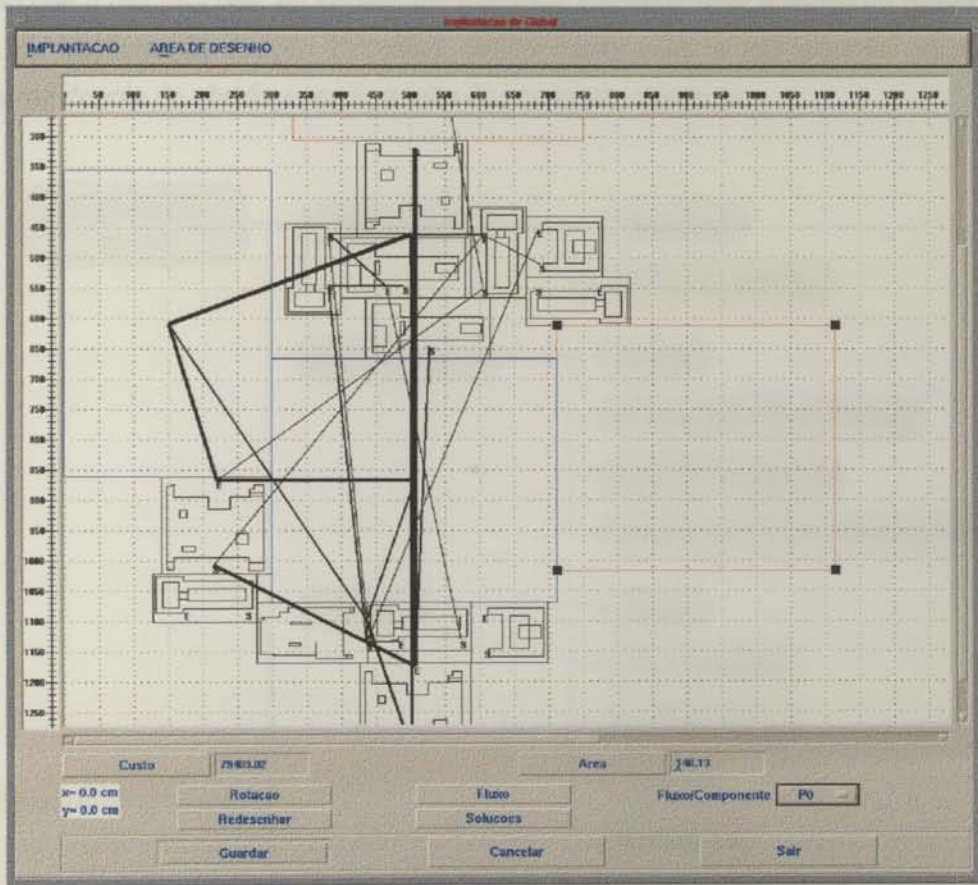
### 8.7.3.5 Operações sobre a configuração de secções

As operações aplicáveis à secção visualizada na área de desenho são as seguintes:

- i) **Guardar:** armazena na base de dados a implantação da secção. Uma lista de selecção (como a apresentada na Figura 4.7) com os identificadores de secções existentes na base de dados (para o problema de implantação de secções em análise) é exibida. A selecção de um dos identificadores modifica uma implantação previamente armazenada. A introdução de um novo identificador na caixa de texto da lista de selecção cria uma nova secção.
- ii) **Cancelar:** anula as operações efectuadas para a implantação da secção corrente e limpa a área de desenho.
- iii) **Sair:** abandona este módulo, permitindo guardar a configuração da secção que nesse momento se encontra definida na área de desenho.

### 8.7.4 Implantação global de postos de trabalho ou de secções

Esta opção permite efectuar a implantação dos postos de trabalho, dos armazéns e das secções na área fabril. A activação do botão Global na área da janela principal correspondente a este módulo (que se reproduziu na Figura 8.12) faz abrir a janela que se apresenta na Figura 8.21, a partir da qual se tem acesso aos comandos desta opção, segundo a árvore que se apresenta na Figura 8.22.



**Figura 8.21** - Janela principal do módulo de implantação de secções, postos de trabalho e armazéns na área fabril (Exemplo de implantação de postos de trabalho)

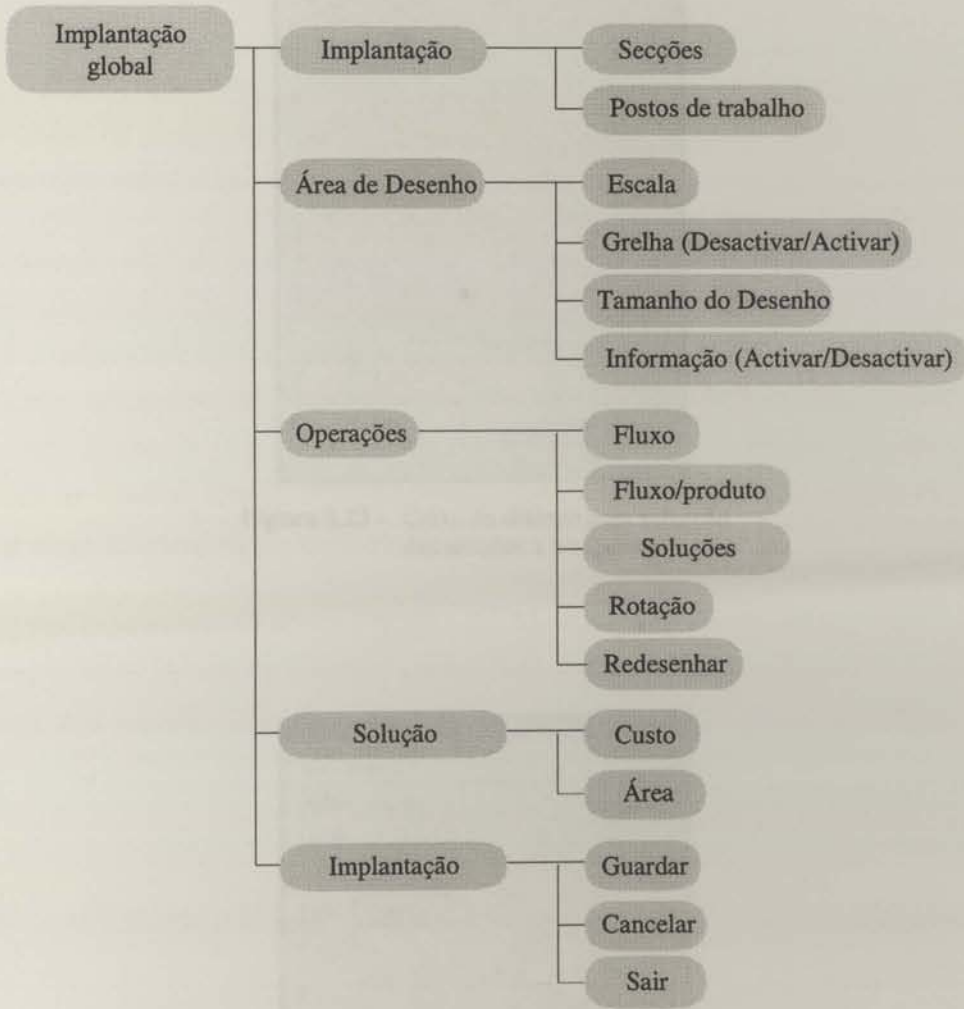
Dado que a maioria dos comandos é idêntica, tanto na designação como na funcionalidade, aos do módulo da implantação de secções, somente se descrevem os aspectos em que diferem.

A selecção da opção Implantação na janela da Figura 8.21 permite ao utilizador optar, para o problema em análise, pela implantação de secções ou de postos de trabalho.

No caso da implantação de secções o sistema apresenta sequencialmente as caixas de diálogo que se reproduzem nas Figuras 8.23 e 8.24. Na primeira destas caixas selecciona-se, para cada uma das secções, a versão da implantação que se pretende utilizar. Na segunda caixa de diálogo selecciona-se a posição relativa de cada um dos armazéns. Os armazéns podem ser colocados em qualquer posição da área de



implantação (opção Interior), sendo, neste caso, a sua posição otimizada do mesmo modo que a das secções; ou podem ser forçados a ocupar uma posição na periferia na área de implantação (opção Exterior), sendo, neste caso, a sua posição otimizada somente depois de obtida a implantação dos restantes recursos.



**Figura 8.22** - Percursos de acesso aos comandos para definição da implantação global

No caso da implantação de postos de trabalho o sistema somente apresenta a caixa de diálogo para selecção da posição relativa dos armazéns (Figura 8.24).

Em ambos os casos o sistema apresenta seguidamente a caixa de diálogo para introdução dos parâmetros para a resolução do problema (como a que se apresentou na Figura 8.17) e o procedimento seguido é idêntico ao do módulo de implantação de secções.

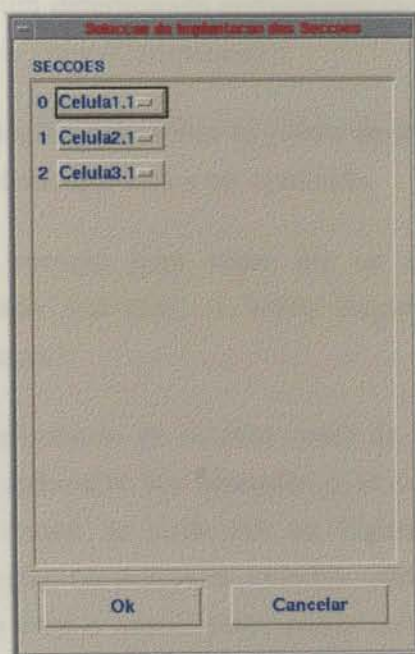


Figura 8.23 - Caixa de diálogo para selecção das secções a implantar

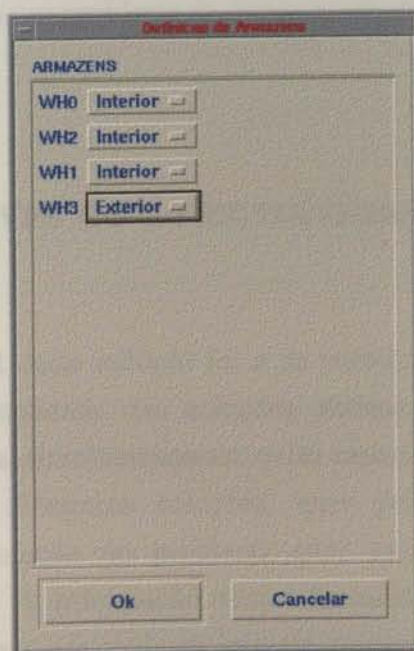


Figura 8.24 - Caixa de diálogo para definição da posição relativa dos armazéns

As linhas de fluxo podem ser visualizadas globalmente (seleccionando-se a opção Fluxo) ou somente para um determinado componente (seleccionando-se o produto no menu associado ao campo Fluxo/Componente).

Podem efectuar-se rotações quer sobre os postos de trabalho quer sobre as secções, consoante o tipo de problema que está a ser resolvido.

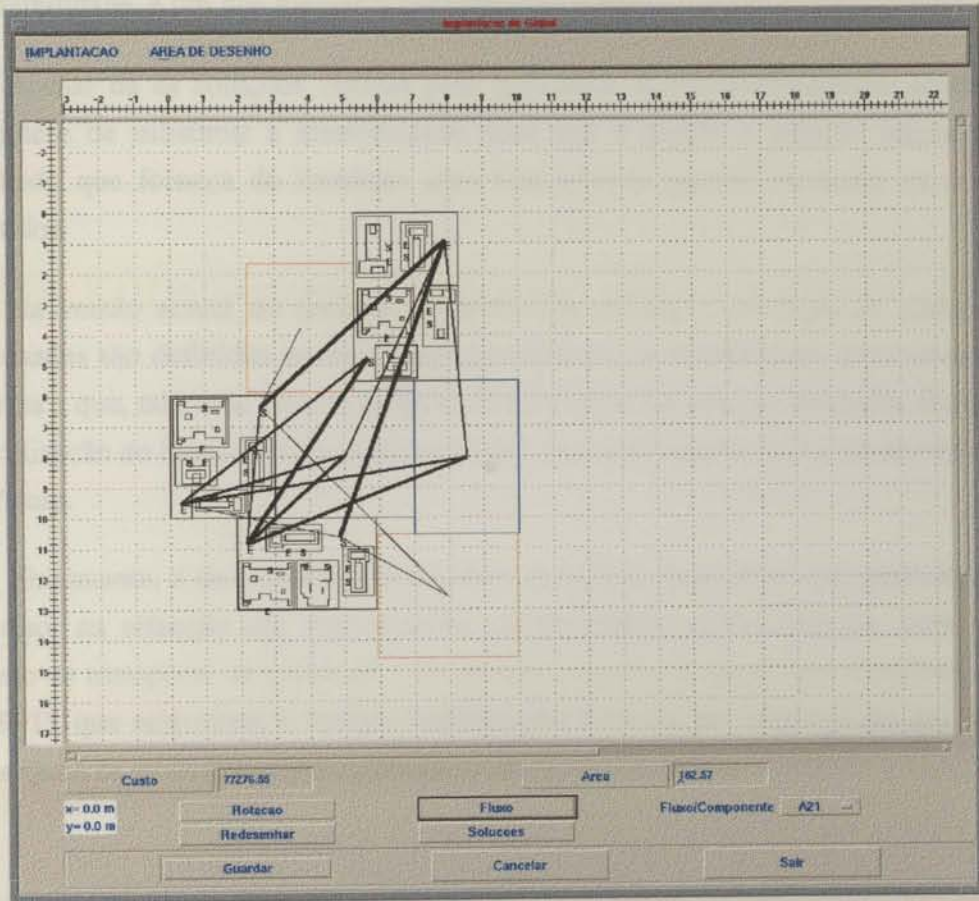
A selecção de um recurso para sobre ele se operar uma rotação ou um deslocamento é efectuada activando o botão esquerdo do rato com o cursor posicionado sobre o recurso.

Tanto no caso da implantação de secções como de postos de trabalho, o sistema contempla igualmente a colocação dos armazéns e, se se pretender, exhibe as linhas de fluxo correspondentes (como se pode ver na Figura 8.21). A identificação dos diferentes armazéns, secções ou postos de trabalho, pode ser efectuada por activação do botão direito do rato com o cursor posicionado sobre o recurso que se pretende identificar. Nessa altura, a configuração do cursor é alterada e aparece com a designação do recurso.

O exemplo apresentado na Figura 8.21 mostra uma solução para um problema de implantação de postos de trabalho e armazéns e o exemplo reproduzido na Figura 8.25 mostra uma solução para um problema de implantação de secções e armazéns.

## 8.8 Perspectivas de desenvolvimento do módulo

O objectivo principal deste módulo foi o de permitir o projecto de implantações fabris detalhadas. A qualidade das soluções obtidas é garantida pela heurística incorporada no sistema e, simultaneamente, pelas capacidades gráficas disponíveis. O utilizador pode gerar diferentes soluções, quer pela introdução de diferentes parâmetros para a resolução do problema quer pela modificação das soluções sugeridas pelo sistema. A informação visual fornecida pelas linhas de fluxo e a capacidade de se visualizar, em qualquer instante, os custos associados a uma solução, são aspectos que contribuem para ajudar o decisor a incorporar o seu conhecimento na modificação das soluções fornecidas pelo sistema.



**Figura 8.25-** Janela principal do módulo de implantação de secções, postos de trabalho e armazéns na área fabril (Exemplo de implantação de secções)

Reconhece-se, contudo, que o sistema ainda é passível de ser melhorado e, nesta secção, apresentam-se algumas sugestões a serem incorporadas em versões futuras do sistema.

A consideração de secções fixas é particularmente importante nos casos em que se pretende modificar uma implantação existente. Igualmente importante é a definição de áreas restritas, onde não haja possibilidade de colocar recursos. A inclusão destes dois aspectos no sistema proposto deve ser contemplada. Admite-se que as maiores complicações que daqui decorrem se verificarão ao nível da interface com o utilizador.

A delimitação da área de implantação e a definição de recursos com formas geométricas não obrigatoriamente rectangulares são outros aspectos que seria

desejável incluir no sistema. A modificação do modelo, por forma a ter em conta esta possibilidade, é um dos tópicos a investigar no futuro.

Apesar de as soluções obtidas pela heurística serem perfeitamente aceitáveis, a hipótese de substituir a aleatoriedade com que é gerada a solução inicial por um método que forneça de imediato uma boa solução poderá melhorar os resultados obtidos.

Na versão actual do sistema os pontos de entrada e de saída de materiais dos armazéns são definidos no seu centro geométrico. A modificação desta situação, por forma a que, tal como para as secções, estes pontos possam ser definidos em qualquer localização no interior dos armazéns deverá ser contemplada numa futura versão deste módulo.

Finalmente, é de considerar a hipótese de incluir uma opção que permita apoiar o decisor na selecção das implantações, incorporando outros critérios, para além do custo de transporte de materiais. Um método, como o proposto por Cambron e Evans (1991), que selecciona a melhor implantação à luz de um conjunto de dez critérios, aos quais se atribuem pesos variáveis, poderá contribuir para melhorar o sistema.

## 9.1 Conclusões gerais

No trabalho que acabou de ser descrito, caracterizou-se o processo de decisão associado ao projecto de implantações fabris e descreveu-se a concepção e o desenvolvimento de um Sistema de Apoio ao Projecto de Implantações Fabris (SAD) que compreende as seguintes fases:

- planeamento dos recursos necessários e selecção dos processos de fabrico,
- afectação de operações de fabrico a máquinas,
- agrupamento de máquinas em secções fabris,
- implantação das máquinas nas secções fabris e destas na área fabril.

A necessidade do SAD foi justificada, porque, devido à impossibilidade de anular completamente as interacções entre os problemas associados a cada uma das fases referidas, o processo global de decisão não se restringe, em geral, à mera resolução sequencial dos referidos problemas, existindo frequentemente a necessidade de estabelecer retroacções entre eles.

O SAD foi desenvolvido especificamente para ambientes de produção por processo e por tecnologia de grupo, uma vez que, nestes tipos de sistemas de produção, o problema de implantações fabris apresenta dificuldades muito particulares. Acresce ainda o facto de estes tipos representarem a maioria dos sistemas de produção existentes.

O problema do planeamento de recursos foi modelizado por forma a envolver a selecção dos processos de fabrico e dos recursos (máquinas e mão-de-obra), com vista a minimizar os custos globais associados ao sistema de produção em análise. A definição simultânea de equipamentos e de mão-de-obra foi considerada por forma a tornar possível a abordagem de situações nas quais haja necessidade de estabelecer compromissos entre diferentes processos alternativos (mais capital intensivos ou mais mão-de-obra-intensivos), ou nas quais os trabalhadores podem operar simultaneamente várias máquinas. A utilização de um programa comercial (CPLEX) para a resolução do programa inteiro utilizado para modelizar o problema de planeamento de recursos revelou-se adequada para problemas de dimensão razoável e, dado o salto qualitativo das novas versões deste programa, é previsível que a

atualização do programa diminua substancialmente o esforço computacional necessário para a resolução destes problemas.

Da resolução do problema de planeamento de recursos deriva, por um lado, a definição do tipo de máquina em que cada operação é realizada e, por outro, a especificação do número necessário de máquinas de cada tipo para, no seu conjunto, permitirem a realização de todas as operações. O objectivo do problema de afectação de operações de fabrico a máquinas é o de definir em detalhe a máquina específica para cada operação de fabrico.

No procedimento proposto para a resolução deste problema, procurou-se que a afectação de operações a máquinas fosse definida por forma que, para cada máquina, sejam tanto quanto possível idênticos entre si, por um lado, os destinos dos fluxos nela gerados e, por outro, as origens dos fluxos nela recebidos. Assim, pretendeu-se facilitar o agrupamento das máquinas em função das necessidades de circulação de materiais.

No procedimento proposto para a resolução do problema de afectação de operações a máquinas, há necessidade de afectar operações (ou partes de operações) que têm de partilhar as máquinas em que são realizadas, dado que nenhuma dessas operações ocupa integralmente uma máquina do tipo em causa. Este problema foi modelizado como um problema de programação binária que procura satisfazer o objectivo atrás referido. Um algoritmo baseado na técnica de recristalização simulada para a resolução deste problema foi também desenvolvido e os teste computacionais efectuados revelaram que a qualidade das soluções obtidas é aceitável para um esforço computacional razoável, mesmo para problemas de grande dimensão.

Uma vez especificado o conjunto de operações efectuadas em cada uma das máquinas dos diferentes tipos, procede-se ao agrupamento das máquinas em secções.

No caso em que as máquinas são agrupadas em departamentos de acordo com a sua funcionalidade, a agregação de máquinas em secções é trivial.

No caso da organização fabril ser por tecnologia de grupo, as máquinas são agrupadas em função dos componentes que processam. No SAD proposto, incluíram-se duas heurísticas para apoiar o decisor na agregação de máquinas nesta situação. Estas heurísticas, baseadas em trabalhos já publicados, utilizam duas abordagens que se distinguem primordialmente pelos dados de entrada utilizados: (i) matriz de incidência e (ii) matriz de fluxos.

Desenvolveu-se ainda uma interface que permite que o utilizador agregue as máquinas manualmente, sendo-lhe para o efeito fornecidas indicações relativas aos fluxos inter-secções e intra-secções para cada configuração considerada.

Uma vez especificada a composição de cada secção de fabrico, o problema das implantações fabris é resolvido definindo-se o posicionamento relativo das máquinas nas secções de fabrico e destas na área fabril, por forma a minimizar o custo global de transporte de materiais.

No sistema que se apresentou neste trabalho, as máquinas não são colocadas directamente na área fabril, mas sim associadas ao posto de trabalho que as integra. Cada posto de trabalho compreende: (i) o espaço necessário para a operação da máquina respectiva, o qual pode incluir, além da própria máquina, espaços para armazenamento de materiais ou ferramentas auxiliares e para movimentação do operário, (ii) um ponto de entrada de materiais e (iii) um ponto de saída de materiais.

Um modelo de programação não-linear, que encara a área fabril como um plano contínuo, foi desenvolvido para a resolução do problema da implantação de postos de trabalho em secções e destes na área fabril. Este modelo distingue-se de outros publicadas na literatura conhecida por contemplar simultaneamente os seguintes aspectos: (i) os postos de trabalho e as secções têm geometria fixa, (ii) a cada posto de trabalho e a cada secção associam-se pontos de entrada e de saída de materiais e (iii) cada posto de trabalho ou secção pode rodar livremente em torno do seu centro geométrico ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  ou  $270^\circ$ ) relativamente ao eixo  $XX'$ .

O modelo foi resolvido utilizando uma técnica de pesquisa univariada e os resultados computacionais obtidos revelaram que, tendo em conta a complexidade do modelo, o seu desempenho é aceitável.

A interface desenvolvida permite ao utilizador o ajustamento das soluções obtidas, fornecendo-lhe para tal diversas informações, em particular, informação visual relativa à intensidade do fluxo entre os postos de trabalho e entre as secções.

Um dos objectivos estabelecidos inicialmente requeria a obtenção de representações das implantações com um nível de detalhe razoável. Tal objectivo foi assegurado pela inclusão de um módulo de desenho assistido por computador que permite a representação à escala dos objectos gráficos incluídos nas implantações.



O SAD que se apresentou nesta tese é, inevitavelmente, um trabalho incompleto e passível de melhoramentos, alguns dos quais foram discutidos em capítulos anteriores e outros serão propostos na secção seguinte. No entanto, a quase totalidade dos objectivos delineados inicialmente foram cumpridos. Em primeiro lugar, desenvolveu-se um sistema que, apesar das suas fragilidades, integra as fases mais importantes do projecto de implantações fabris e, uma vez melhor outras pior, resolve os problemas associados a cada uma destas fases. Em segundo lugar, assegurou-se a modularidade do sistema, sendo possível ao utilizador entrar por qualquer um dos seus módulos, sem necessidade de resolução dos restantes problemas. Em terceiro lugar, ficou demonstrado que os componentes seleccionados para integrar a arquitectura adoptada para o SAD se revelaram adequados para o fim em causa. Este aspecto, que aparentemente pode parecer de reduzida importância, não o é de facto. Note-se que a decisão associada à selecção destes componentes é, normalmente, tomada numa fase inicial do projecto e, por isso, pode, em fases mais avançadas, limitar o seu desenvolvimento. Neste caso, nada houve que sacrificar nem modificar em prole da arquitectura escolhida inicialmente. Mais, a expansibilidade e portabilidade do sistema permanecem absolutamente asseguradas, garantindo assim a possibilidade de desenvolvimento futuro do projecto.

Para além destes aspectos globais positivos do sistema, é útil referir as características que, em cada uma das fases, distinguem os procedimentos de outros referidos na literatura:

- **Planeamento das necessidades de equipamentos e de mão-de-obra**
  - Definição simultânea dos equipamentos e da mão-de-obra.
  - Selecção dos processos de fabrico.
  - Representação de turnos e horas extraordinárias.
- **Afectação de operações de fabrico a máquinas**
  - Afectação das operações de fabrico a cada máquina em função da semelhança dos destinos dos fluxos nelas gerados e das origens dos fluxos nela recebidos.
  - Procedimento de recristalização simulada para a resolução do problema da afectação residual de operações de fabrico a máquinas.

- **Agregação de máquinas em secções de fabrico**
  - **Heurística baseada na matriz de incidência:**
    - Eliminação da necessidade de fixar à partida o número de células.
    - Introdução de um parâmetro que permite ao decisor controlar o peso da subocupação de células no cálculo da medida de eficácia do agrupamento.
  - **Heurística baseada na matriz de fluxos:**
    - Utilização do número de viagens na definição do fluxo entre cada par de máquinas.
    - Utilização do valor relativo do fluxo no processo de selecção das máquinas nucleares e na definição da matriz células-máquinas.
- **Implantações fabris**
  - Definição de pontos de entrada e de saída de materiais.
  - Possibilidade de rotação das secções e dos postos de trabalho.
  - Inclusão de duas fases complementares que anulam a possibilidade de 'clustering' dos recursos em zonas distantes na área de implantação.
  - Utilização de uma função objectivo com um maior grau de detalhe na definição dos custos de transportes.
  - Utilização de um método de pesquisa univariada mais eficiente.
  - No caso de violação das restrições de sobreposição após a optimização, o valor da função objectivo é testado com o bloco envolvente colocado fora da região não-admissível em quatro pontos diferentes.

Infelizmente, as restrições de tempo impostas a um trabalho deste tipo, não permitiram o teste do sistema para um caso real. Este é, porventura, o aspecto mais negativo do trabalho desenvolvido, o qual se procurou colmatar testando o sistema com problemas gerados artificialmente por forma a traduzir situações do mundo real, mas que, como é evidente, não substituem o teste definitivo num ambiente industrial.

## 9.2 Perspectivas de desenvolvimento do sistema

O trabalho que se apresentou nesta tese fica longe de esgotar todos os requisitos desejáveis para um Sistema de Apoio ao Projecto de Implantações Fabris. Além das actualizações necessárias, devido ao desenvolvimento dos inúmeros programas que serviram de base ao SAD (X-Windows, Xt-Toolkits, OSF-Motif, CPLEX, db-Vista, gcc, etc.), e dos desenvolvimentos propostos para cada um dos módulos, dois aspectos relacionados com as perspectivas de desenvolvimento do sistema merecem um particular destaque nesta secção.

Em primeiro lugar, o apoio ao decisor no projecto do sistema de transporte de materiais, o qual não foi contemplado no SAD que se propôs. Este problema é, possivelmente, um dos de mais difícil resolução, uma vez que é completamente impossível anular a forte interacção que tem com o problema de implantações fabris. A modelização e resolução conjunta destes dois problemas levanta um grande desafio que, no entanto, poderá ser de difícil consecução prática, se se quiserem manter todas as características introduzidas no modelo para o problema de implantações fabris incluído no SAD.

O segundo aspecto está relacionado com a avaliação do comportamento dinâmico das implantações geradas pelo sistema, em particular, a avaliação das necessidades de espaço para os parques intermédios de armazenagem de componentes em curso de fabrico. A utilização de técnicas de simulação é uma hipótese plausível; no entanto, esta metodologia, apesar de muito flexível na análise deste tipo de sistemas, parece complicada, dados os graus de liberdade de que o decisor dispõe, e é dispendiosa.

Por outro lado, os tipos de sistemas de produção para os quais o SAD foi desenvolvido podem ser representados convenientemente e realisticamente como redes de filas de espera. As soluções analíticas dos modelos de redes de filas de espera fornecem ao decisor a capacidade de compreender os sistemas modelizados de uma forma muito eficiente e os desenvolvimentos recentes nesta área têm-na tornado cada vez mais atractiva para a avaliação do desempenho dos tipos de sistemas de produção tratados neste trabalho.

A inclusão no SAD do programa RESQ -'Research Queueing Package' (Gordon et al (1991) e MacNair e Gordon (1991)), o qual compreende um conjunto de programas para construção e resolução de modelos complexos de redes de filas de espera,

---

permitirá avaliar o comportamento dinâmico das implantações obtidas. Os componentes básicos disponíveis no sistema RESQ permitem desenvolver modelos de sistemas de produção que incluam elementos tais como: máquinas, ferramentas, 'robots', componentes em curso de fabrico, áreas de armazenamento, lotes de fabrico, transportadores e junção e separação de tarefas.

# Referências bibliográficas

---

Alford, H. (1994), Cellular Manufacturing: the Development of the Idea and its Application, *New Technology, Work and Employment*, 9, pp.3-18.

Armour, G. C. e E. S. Buffa (1963), A Heuristic Algorithm and Simulation Approach to Relative Location of Facilities, *Management Science*, 9, pp. 294-300

Arthnary, T. S. e Y. Dodge (1981), *Mathematical Programming and Statistics*, John Wiley & Sons, New York, NY.

Askin, R. G. e K. S. Chiu (1990), A Graph Partitioning Procedure for Machine Assignment and Cell Formation in Group Technology, *International Journal of Production Research*, 28, pp. 1555-1572.

Askin, R. G. e M. G. Mitwasi (1992), Integrating Facility Layout with Process Selection and Capacity Planning, *European Journal of Operational Research*, 57, pp. 162-173.

Askin, R. G. e S. P. Subramanian (1987), A Cost-Based Heuristic for Group Technology Configuration, *International Journal of Production Research*, 25, pp. 101-113.

Atkinson, K. E. (1978), *An Introduction to Numerical Analysis*, John Wiley & Sons, New York, NY.

Atmani, A., R. S. Lashkari e R. J. Caron (1995), A Mathematical Programming Approach to Joint Cell Formation and Operation Allocation in Cellular Manufacturing, *International Journal of Production Research*, 33, pp. 1-15.

Bard, J. F. e T. A. Feo (1991), An Algorithm for the Manufacturing Equipment Selection Problem, *IIE Transactions*, 23, pp. 83-90.

Bazaraa, M. S. (1975), Computerized Layout Design: A Branch and Bound Approach, *AIIE Transactions*, 7, pp. 432-437.

- Block, T. E. (1977), A Note on "Comparison of Computer Algorithms and Visual Based Methods for Plant Layout" by M. Scriabin and R. C. Vergin, *Management Science*, 24, pp. 235-237.
- Boctor, F. F. (1991), A Linear Formulation of the Machine-Part Cell Formation Problem, *International Journal of Production Research*, 29, pp. 343-356.
- Boctor, F. F. (1996), The Minimum-Cost, Machine-Part Cell Formation Cost, *International Journal of Production Research*, 34, pp. 1045-1063.
- Bozer, Y. A., R. D. Meller e S. J. Erlebacher (1994), An Improvement-type Layout Algorithm for Single and Multiple-floor Facilities, *Management Science*, 40, pp. 918-932.
- Box, M. J., D. Davies e W. H. Swann (1969), *Non-Linear Optimization Techniques*, Oliver & Boyd, Edinburgh.
- Bretthauer, K. M. e M. A. Venkataramanan (1990), Machine Loading and Alternate Routing in a Flexible Manufacturing System, *Computers and Industrial Engineering*, 18, pp. 341-350.
- Buffa, E. S. (1976), On a Paper by Scriabin and Vergin, *Management Science*, 23, pp. 76.
- Buffa, E. S., G. C. Armour e T. E. Vollman (1964), Allocating Facilities with CRAFT, *Harvard Business Review*, 42, pp. 136-158.
- Burbridge, J. L. (1982), The Simplification of Material Flow Systems, *International Journal of Production Research*, 20, pp. 339-347.
- Burbridge, J. L. (1992), Change to Group Technology: Process Organization is Obsolete, *International Journal of Production Research*, 30, pp. 1209-1219.
- Cambron, K.E. e G. Evans (1991), Layout Design Using the Analytic Hierarchy Process, *Computers and Industrial Engineering*, 20, pp. 211-229.
- Carrie, A.S. (1980), Computer-Aided Layout Planning: The Way Ahead, *International Journal of Production Research*, 18, pp. 283-294.

- Carrie, A. S., J. M. Moore, M. Roczniak e J. J. Seppanen (1978), Graph Theory and Computer Aided Facility Design, *OMEGA International Journal of Management*, 6, pp. 353-361.
- Chan, H. M. e D. A. Milner (1982), Direct Clustering Algorithm for Group Formulation in Cellular Manufacturing, *Journal of Manufacturing Systems*, 1, pp. 65-74.
- Chandrasekharan, M. P. e R. Rajagopalan (1986), An Ideal Seed Non-Hierarchical Clustering Algorithm for Cellular Manufacturing, *International Journal of Production Research*, 24, pp. 451-463.
- Chandrasekharan, M. P. e R. Rajagopalan (1987), ZODIAC - An Algorithm for Concurrent Formation of Part Families and Machine Cells, *International Journal of Production Research*, 27, pp. 1035-1052.
- Chandrasekharan, M. P. e R. Rajagopalan (1989), Groupability: An Analysis of the Properties of Binary Data Matrices in Group Technology, *International Journal of Production Research*, 24, pp. 451-463.
- Chen, C.-L., N. A. Cotruvo e W. Baek (1995), A Simulated Annealing Solution to the Cell Formation Problem, *International Journal of Production Research*, 33, pp. 2601-2614.
- Chen, S.-J. e C.-S. Cheng (1995), A Neural Network-based Cell Formation Algorithm in Cellular Manufacturing, *International Journal of Production Research*, 33, pp. 293-318.
- Cheng, C. (1992), Algorithms for Grouping Machine Groups in Group Technology, *OMEGA International Journal of Management*, 21, pp. 493-501.
- Cheng, C.-H., M. S. Madan e J. Motwani (1996), Designing Cellular Manufacturing Systems by a Truncated Search Tree, *International Journal of Production Research*, 34, pp. 349-361.
- Chu, C. H. e P. Pan (1988), A Comparison of Hierarchical Clustering Techniques for Manufacturing Cell Formation, *Proceedings of the Third International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factory of the Future*, ed. B. Prasad, Springer Verlag, New York, NY.

- Co, H. C. e A. Araar (1988), Configuring Cellular Manufacturing Systems, *International Journal of Production Research*, 26, pp. 1511-1522.
- Cohon, J. L. (1978), *Multiobjective Programming and Planning*, Academic Press, New York, NY.
- CPLEX Optimization, Inc. (1991a), Using the CPLEX™ Linear Optimizer.
- CPLEX Optimization, Inc. (1991b), Using the CPLEX™ Mixed Integer Optimizer.
- Crama, Y. e M. Oosten (1996), Models for Machine-Part Grouping in Cellular Manufacturing, *International Journal of Production Research*, 34, pp. 1693-1713.
- Deisenroth, M. P. e J. M. Apple (1972), A Computerized Plant Layout Analysis and Evaluation Technique, *23rd Annual AIIE Conference*, Norcross, Virginia, pp. 121-127.
- Del Valle, A. G., S. Balarezo e J. Tejero (1994), A Heuristic Workload-Based Model to Form Cells By Minimizing Intercellular Movements, *International Journal of Production Research*, 32, pp. 2275-2285.
- Dilworth, J. B. (1992), *Operations Management: Design, Planning and Control for Manufacturing and Services*, McGraw-Hill, Singapore.
- Drezner, Z. (1980), DISCON: A New Method for the Layout Problem, *Operations Research*, 28, pp. 1375-1384.
- Drezner, Z. (1987), A Heuristic Procedure for the Layout of a Large Number of Facilities, *Management Science*, 33, pp. 907-915.
- Dutta, S. P., R. S. Lashkari, G. Nadoli e T. Ravi (1986), A Heuristic Procedure for Determining Manufacturing Families from Design-Based Groupings for Flexible Manufacturing Systems, *Computers and Industrial Engineering*, 10, pp. 193-201.
- El-Rayah, T.E. e R. H. Hollier (1970), A Review of Plant Design Techniques, *International Journal of Production Research*, 8, pp. 263-279.
- Fortenberry, J. C. e J. F. Cox (1985), Multiple Criteria Approach to Facilities Layout Problem, *International Journal of Production Research*, 23, pp. 773-782.



- Foulds, L. R. (1983), Techniques for Facilities Layout: Deciding which Pairs of Activities Should be Adjacent, *Management Science*, 29, pp. 1414-1426.
- Francis, R. L. e J. A. White (1974), *Facility Layout and Location: An Analytical Approach*, Prentice-Hall, NJ.
- Ganesh, M. V. e G. Srinivasan (1994), A Heuristic Algorithm for the Cell Formation Problem, *Computers and Industrial Engineering*, 26, pp. 193-201.
- Garey, M. R. e D. S. Johnson (1979), *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, W. H. Freeman, San Francisco, CA.
- Gordon R. F., P. G. Loewner e E. A. MacNair (1991), The Research Queueing Package Version 3 - Language Reference Manual, IBM Thomas J. Watson Research Center, Yorktown Heights, NY.
- MacNair, E. A. e R. F. Gordon (1991), An Introduction to The Research Queueing Package for Modeling Manufacturing Systems, IBM Thomas J. Watson Research Center, Yorktown Heights, NY.
- Guerreiro, J., A. Magalhães e M. Ramallete (1985), *Programação Linear (Volume II)*, McGraw-Hill, Lisboa.
- Gunasekaran, A., S. K. Goyal, T. Martkainen e P. Yli-Olli (1993), Equipment Selection Problems in Just-in-Time Manufacturing Systems, *Journal of the Operational Research Society*, 44, pp. 345-353.
- Gupta, Y., M. Gupta, A. Kumar e C. Sundaram (1996), A Genetic Algorithm-Based Approach to Cell Composition and Layout Design Problems, *International Journal of Production Research*, 34, pp. 447-482.
- Hales, H. L. (1985), Computerized Facilities Planning and Design: Sorting Out the Options Available Now, *Computerized Facilities Planning* (ed. Lee Hales), Industrial Engineering and Management Press, Norcross, GE, pp. 5-10.
- Harhalakis, G., T. Lu, I. Minis e R. Nagi (1996), A Practical Method for Design of Hybrid-Type Production Facilities, *International Journal of Production Research*, 34, pp. 897-918.
- Harmonosky, C. M. e G. K. Tothoro (1992), A Multi-Factor Plant Layout Methodology, *International Journal of Production Research*, 30, pp. 1773-1789.

- Hassan, M. M. D., G. L. Hogg e D. R. Smith (1986), SHAPE : A Construction Algorithm For Area Placement Evaluation, *International Journal of Production Research*, 24, pp. 1283-1295.
- Heragu, S. (1990), Modeling the Machine Layout Problem, *Computers and Industrial Engineering*, 19, pp. 294-298.
- Heragu S. S. e A. S. Alfa (1992), Experimental Analysis of Simulated Annealing Based Algorithms for the Layout Problem, *European Journal of Operational Research*, 57, pp. 190-202.
- Heragu S. S. e Y. P. Gupta (1994), A Heuristic For Designing Cellular Manufacturing Facilities, *International Journal of Production Research*, 32, pp. 125-140.
- Herroelen, W. e A. V. Gils (1985), On the Use of Flow Dominance in Complexity Measures for Facility Layout Problems, *International Journal of Production Research*, 23, pp. 97-108.
- Hillier, F.S. (1963), Quantitative Tools for Plant Layout Analysis, *Industrial Engineering*, 14, pp. 33-40.
- Hillier, F.S. e M. M. Connors (1966), Quadratic Assignment Problem Algorithm and the Location of Indivisible Facilities, *Management Science*, 13, pp. 42-57.
- Imam, M. H. e M. Mir (1993), Automated Layout of Facilities of Unequal Areas, *Computers and Industrial Engineering*, 24, pp. 355-366.
- Irani, S. A., P. H. Cohen e T. M. Cavalier (1992), Design of Cellular Manufacturing Systems, *Journal of Engineering for Industry*, 114, pp. 352-361.
- Jajodia, S., I. Minis, G. Harhalakise e J. M. Proth (1992), CLASS: Computerized Layout Solutions using Simulated Annealing, *International Journal of Production Research*, 30, pp. 95-108.
- Khalil, T. M. (1973), Facilities Relative Allocation Technique: FRAT, *International Journal of Production Research*, 11, pp. 183-194.
- King, J. R. (1980), Machine-Component Group Formation in Production Flow Analysis: An Approach Using a Rank Order Clustering Algorithm, *International Journal of Production Research*, 18, pp. 213-232.

- King, J. R. e V. Nakornchai (1982), Machine-Component Group Formation in Group Technology: Review and extension, *International Journal of Production Research*, 20, pp. 117-133.
- Kirkpatrick, S., C. Gelatt e M. Vecchi (1983), Optimization by Simulated Annealing, *Science*, 220, pp. 671-680.
- Koopmans, T. e M. Beckmann (1957), Assignment Problems and the Location of Economic Activities, *Econometrica*, 25, pp. 53-76.
- Kouvelis, P., W.-C. Chiange e J. Fitzsimmons (1992), Simulated Annealing for Machine Layout Problems in the Presence of Zoning Constraints, *European Journal of Operational Research*, 57, pp. 203-223.
- Kroll, D. e X. Wang (1994), Using Group Technology to Improve Quality and Response Time, *Industrial Management*, July/August, pp. 21-22.
- Kumar, C. S. e M. P. Chandrasekharan (1990), Grouping Efficacy: A Quantitative Criterion for Goodness of Block Diagonal Forms of Binary Matrices in Group Technology, *International Journal of Production Research*, 28, pp. 1035-1052.
- Kusiak, A. (1985), The Part Families Problem in Flexible Manufacturing Systems, *Annals of Operational Research*, 3, pp. 279-300.
- Kusiak, A. (1986), Formation of Machine Cells and Part Families in Flexible Manufacturing Systems, *Proceedings of the 2nd. International Conference on Production Systems*, INRIA, Paris, France, 1, pp. 15-28
- Kusiak, A. (1987a), The Production Equipment Requirements Problem, *International Journal of Production Research*, 25, pp. 319-325.
- Kusiak, A. (1987b), The Generalized Group Technology Concept, *International Journal of Production Research*, 25, pp. 561-597.
- Kusiak, A. e S. S. Heragu (1987), The Facility Layout Problem, *European Journal of Operational Research*, 29, pp. 229-251.
- Kusiak, A., A. Vannelli e K. R. Kumar (1986), Clustering Analysis: Models and Algorithms, *Control and Cybernetics*, 15, pp. 139-154.

- Kusiak, A. e W. S. Chow (1987), Efficient Solving of the Group Technology Problem, *Journal of Manufacturing Systems*, 6, pp. 117-124.
- Lee, R. C. e J. M. Moore (1967), CORELAP - Computerized Relationship Layout Planning, *Journal of Industrial Engineering*, 18, pp. 195-200.
- Leskowsky, L., L. Logan e A. Vannelli (1987), Group Technology Decision Aids in an Expert System For Plant Layout, *Modern Production Management Systems*, ed. A. Kusiak, North-Holland, Amsterdam, pp. 561-585.
- Lewis, W. P. e T. E. Block (1980), On the Application of Computer Aids to Plant Layout, *International Journal of Production Research*, 18, pp. 11-20.
- Liang, M. (1994), Integrating Machining Speed, Part Selection and Machine Loading Decisions in Flexible Manufacturing Systems, *Computers and Industrial Engineering*, 26, pp. 599-608.
- Liang, M. e S. P. Dutta (1993), An Integrated Approach to the Part Selection and Machine Loading Problem in a Class of Flexible Manufacturing Systems, *European Journal of Operational Research*, 67, pp. 387-404.
- Liggett, R. S. (1981), The Quadratic Assignment Problem: An Analysis of Applications and Solution Strategies, *Environment and Planning*, 7, pp. 141-162.
- Logendran, R. (1994), A Binary Integer Programming Approach for Simultaneous Machine-Part Grouping in Cellular Manufacturing Systems, *Computers and Industrial Engineering*, 24, pp. 329-336.
- Malakooti, B. e G. D'Souza (1985), An Interactive Approach for Computer Aided Facility Layout Selection (CAFLAS), *Computerized Facilities Planning* (ed. Lee Hales), Industrial Engineering and Management Press, Norcross, GE, pp. 67-73.
- Masud, A. S. M. e V. Sathyana (1992), A CAD-Based Layout Procedure, *Computers and Industrial Engineering*, 23, pp. 385-388.
- McAulley, J. (1982), Machine Grouping for Efficient Production, *The Production Engineer*, 51, pp. 53-57.
- Miller, D. M. e R. P. Davis (1977), The Machine Requirements Problem, *International Journal of Production Research*, 15, pp. 219-231.

- Miller, D. M. e R. P. Davis (1978), A Dynamic Resource Allocation Model for a Machine Requirements Problem, *AIIE Transactions*, 10, pp. 237-248.
- Miltenburg, J. e W. Zhang (1992), A Comparative Evaluation of Nine Well-known Algorithms for Solving the Cell Formation Problem in Group Technology, *Journal of Operations Management*, 10, pp. 44-72.
- Montreuil, B. e H. D. Ratliff (1989), Utilizing Cut Trees as Design Skeletons For Facility Layout, *IIE Transactions*, 21, pp. 136-143.
- Montreuil, B., M. Ratliff e M. Goetschalckx (1987), Matching Based Interactive Facility Layout, *IIE Transactions*, 19, pp. 271-279.
- Montreuil, B., U. Venkatadri e H. D. Ratliff (1993), Generating a Layout from a Design Skeleton, *IIE Transactions*, 25, pp. 3-15.
- Mukhopadhyay, S. K., P. Sarkar e R. P. Panda (1994), Machine-Component Grouping in Cellular Manufacturing by Multidimensional Scaling, *International Journal of Production Research*, 32, pp. 457-477.
- Mulvey, J. M. e H. P. Crowder (1979), Cluster Analysis: An Application of Lagrangian Relaxation, *Management Science*, 25, pp. 329-340.
- Muther, R. (1961), *Systematic Layout Planning*, Industrial Education Institute, Boston, MA.
- Nugent, C.E., T. E. Vollmann e J. Ruml (1968), An Experimental Comparison of Techniques for the Assignment of Facilities to Locations, *Operations Research*, 16, pp. 150-173.
- O'Brien, C. e S. E. Z. Abdul Barr (1980), An Interactive Approach to Computer Aided Facility Layout, *International Journal of Production Research*, 18, pp. 201-211.
- Okogbaa, O. G., M. Chen, C. Changchit e R. L. Shell (1992), Manufacturing System Cell Formation and Evaluation Using a New Inter-Cell Flow Reduction Heuristic, *International Journal of Production Research*, 30, pp. 1101-1118.
- Picone, C. J. e W. E. Wilhelm (1984), A Perturbation Scheme to Improve Hillier's Solution to Facilities Layout Problem, *Management Science*, 30, pp. 1238-1249.

- Rajagopalan, R. e J. L. Batra (1975), Design of Cellular Production Systems - A graph theoretic approach, *International Journal of Production Research*, 13, pp. 567-579.
- Ribeiro, J. F. F. e B. Pradin (1993), A Methodology for Cellular Manufacturing Design, *International Journal of Production Research*, 31, pp. 235-250.
- Rosenblatt, M. J. (1979), The Facilities Layout Problem: A Multigoal Approach, *International Journal of Production Research*, 17, pp. 323-332.
- Rumbaugh, J., M. Blaha, W. Premerlani, F. Eddy e W. Lorensen (1991), *Object-Oriented Modeling and Design*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Sahni, S. e T. Gonzalez (1976), P-Complete Approximation Problem, *Journal of the Association For Computing Machinery*, 23, pp. 555-565.
- Sarin, S. C. e C. S. Chen (1986), *A Model For Manufacturing System Selection, Flexible Manufacturing Systems: Methods and Studies*, A. Kusiak (ed.), North-Holland.
- Sarker, B. R. (1996), The Resemblance Coefficients in Group Technology: A survey and comparative study of relational metrics, *Computers and Industrial Engineering*, 30, pp. 103-116.
- Scriabin, M. e R. C. Vergin (1975), Comparison of Computer Algorithms and Visual Based Methods for Plant Layout, *Management Science*, 16, pp. 172-181.
- Scriabin, M. e R. C. Vergin (1985), A Cluster-Analytic Approach to Facility Layout, *Management Science*, 31, pp. 33-49.
- Seehof, J. M. e W. O. Evans (1967), Automated Layout Design Program, *Journal of Industrial Engineering*, 18, pp. 690-695.
- Seifoddini, H. e M. Djassemi (1994), Analysis of Efficiency Measures for Block Diagonal Machine-Component Charts, *Computer and Industrial Engineering*, 27, pp. 237-240.
- Seifoddini, H. e M. Djassemi (1996), A New Grouping Measure for Evaluation of Machine-Component Matrices, *International Journal of Production Research*, 34, pp. 1179-1193.

- Seifoddini, H. e C. Hsu (1994), Comparative Study of Similarity Coefficients and Clustering Algorithms in Cellular Manufacturing, *Journal of Manufacturing Systems*, 13, pp. 119-127.
- Shafer, S. M., G. M. Kern e J. C. Wei (1992), A Mathematical Programming Approach for Dealing with Exceptional Elements in Cellular Manufacturing, *International Journal of Production Research*, 30, pp. 1029-1036.
- Shafer, S. M e D. F. Rogers (1993), Similarity and Distance Measures For Cellular Manufacturing Systems. Part I: A survey, *International Journal of Production Research*, 31, pp. 1113-1142.
- Shargal, M., S. Shekhar e S. A. Irani (1995), Evaluation of Search Algorithms and Clustering Efficiency Measures For Machine-Part Matrix Clustering, *IIE Transactions*, 27, pp. 43-59.
- Sherali, M. D. e P. Rajgopal (1986), A Flexible Polynomial-Time, Construction and Improvement Heuristic For the Quadratic Assignment Problem, *Computers and Operations Research*, 13, pp. 587-600
- Souilah, A. (1995), Simulated Annealing for Manufacturing Systems Layout Design, *European Journal of Operational Research*, 82, pp. 592-614.
- Sridhar, J. e C. Rajendran (1993), Scheduling in a Cellular Manufacturing System: A Simulated Annealing Approach, *International Journal of Production Research*, 31, pp. 2927-2945
- Srinivasan, G. (1994), A Clustering Algorithm For Machine Cell Formation in Group Technology Using Minimum Spanning Trees, *International Journal of Production Research*, 32, pp. 2149-2158.
- Srinivasan, G. e T. T. Narendran (1991), GRAFICS - A Nonhierarchical Clustering Algorithm for Group Technology, *International Journal of Production Research*, 29, pp. 463-478.
- Stecke, K. E. (1983), Formulation and Solution of Nonlinear Integer Production Planning Problems for Flexible Manufacturing Systems, *Management Science*, 29, pp. 273-288.

- Sule, D. R. (1988), *Manufacturing Facilities - Location, Planning and Design*, PWS-KENT, Boston, MA
- Tam, K. Y. (1990), An Operation Sequence Based Similarity Coefficient for Part Families Formation, *Journal of Manufacturing Systems*, 9, pp. 45-68.
- Tam, K. Y. (1991), A Simulated Annealing Algorithm for Allocating Space to Manufacturing Cells, *International Journal of Production Research*, 30, pp. 63-87.
- Tam, K. Y. e G. L. Li (1991), A Hierarchical Approach to the Facility Layout Problem, *International Journal of Production Research*, 29, pp. 165-184.
- Tompkins, J.A. e R. Reed (1976), An Applied Model for the Facilities Design Problem, *International Journal of Production Research*, 14, pp. 583-596.
- Tompkins, J. A. e J. A. White (1984), *Facility Planning*, John Wiley & Sons, New York, NY.
- Urban, T.L. (1987), A Multiple Criteria Model for the Facilities Layout Problem, *International Journal of Production Research*, 25, pp. 1805-1812.
- Verma, P. e F.-Y. Ding (1995), A Sequence-Based Materials Flow Procedure for Designing Manufacturing Cells, *International Journal of Production Research*, 33, pp. 3267-3281.
- Viswanathan, S. (1995), Configuring Cellular Manufacturing Systems: A Quadratic Integer Programming Formulation and a Simple Interchange Heuristic, *International Journal of Production Research*, 33, pp. 361-376.
- Vollmann, T. E., C. E. Nugent e R. L. Zartler (1968), A Computerized Model for Office Layout, *Industrial Engineering*, 18, pp. 321-327.
- Wäscher, G. e P. Chamoni (1987), MICROLAY: An Interactive Computer Program for Factory Layout Planning on Microcomputers, *European Journal of Operational Research*, 31, pp. 185-193.
- Welgama, P. S. e P. R. Gibson (1993), A Construction Algorithm for Machine Layout, *International Journal of Production Research*, 31, pp. 2575-2590.



---

Wu, N. e G. Salvendy (1993), A Modified Network Approach for the Design of Cellular Manufacturing Systems, *International Journal of Production Research*, 31, pp. 1409-1421.

Wu, H. L., R. Venugopal e M. M. Baraash (1986), Design of a Cellular Manufacturing System: A Syntatic Pattern Recognition Approach.

Yaman, R., D. T. Gethin, e M. J. Clarke (1993), An Effective Sorting Method for Facility Layout Construction, *International Journal of Production Research*, 31, pp. 413-427.

Ziai, M. R. e D. R. Sule (1991), Computerized Facility Layout Design, *Computers and Industrial Engineering*, 21, pp. 385-389.

# Apêndice A

---

## Definição das bases de dados

Neste apêndice apresentam-se os dicionários de dados para a base de dados do planeamento de recursos, a principal e a de desenho de objectos gráficos.

As unidades de medida utilizadas são abstractas: u.t. - unidade de tempo, u.m. - unidade monetária e u.d. - unidade de distância, cabendo ao utilizador garantir a sua concordância.

### A.1. Base de dados do planeamento de recursos

#### A.1.1. Dados de entrada

O diagrama de dados correspondente a este sub-módulo da base de dados do planeamento de recursos foi apresentado na Figura 3.11.

##### - Classe *Projecto*

Cada objecto desta classe identifica o conjunto de dados de entrada associado a cada problema de planeamento de recursos e define um conjunto de restrições associadas a esse problema. Os atributos associados a esta classe são:

- *NomeProjecto*: identificador associado ao conjunto de dados de entrada de um problema de planeamento de recursos,
- *LimInvestimento*: limite ao volume de investimento (u.m.),

- *LimCustoMO*: limite ao custo global de mão-de-obra no período de planeamento(u.m.),
- *DimPeríodo*: dimensão do período de planeamento (u.t.).

#### - Classe TipoMáquina

Cada tipo de máquina, associado a um projecto, define um conjunto de equipamentos que têm características operacionais, de custo e de investimento semelhantes, é identificado pelo atributo *IdTipoMáquina* e é caracterizado por:

- *CFixo*: custo associado à disponibilidade de uma máquina ao longo do período de planeamento (u.m.),
- *CInvestimento*: custo de aquisição (u.m.),
- *LInferior* e *LSuperior*: limites inferior e superior ao número de unidades a adquirir,
- *Existência*: número de maquinas existentes no início do período de planeamento.

#### - Classe MãoObra

Cada classe de mão-de-obra é identificada pelo atributo *IdClasseMãoObra* e é associada ao que normalmente se designa por categoria profissional (o que corresponde a um grupo de trabalhadores que desempenham as suas funções de forma homogénea). O número de trabalhadores a contratar em cada classe pode ser limitado inferiormente (*LInferior*) e superiormente (*LSuperior*).

#### - Classe Turno

Para cada classe de mão-de-obra, os turnos são identificados pelo atributo *NumTurno* e são caracterizados pela sua duração (*Duração* (u.t.)) e pelo custo de contratar cada trabalhador nesse turno (*CustoFixo* (u.m.)), ao longo do período de planeamento especificado para o projecto.

O período normal de trabalho corresponde ao primeiro dos turnos (*NumTurno*=1).

#### - Classe PeríodoExtra

Os períodos extraordinários são identificados pelo atributo *NumPeríodoExtra* e caracterizados pelo custo por unidade de tempo (*CustoHora* (u.m.)) e pela

duração a que tal período extraordinário corresponde ao longo do horizonte temporal (*Limite* (u.t.)).

#### - Classe Componente

Cada componente - que pode ser um produto acabado, um produto intermédio ou uma matéria prima - é identificado pelo atributo *CódigoComponente*. As necessidades de cada produto acabado ao longo do período de planeamento são definidas no atributo *Procura*. Está prevista a possibilidade de subcontratação de componentes com um custo unitário definido no atributo *CSubContComp* (u.m.).

#### - Classe Estrutura

A lista de materiais de cada componente é definida por uma estrutura em árvore, a qual identifica a quantidade de cada sub-componente que o integra (*Quantidade*) e pode ser percorrida no sentido directo (BOM - 'Bill of materials') ou inverso (PU - 'Part utilization').

#### - Classe Rota

Cada componente pode ter mais do que uma sequência de processamento (rota), a qual é identificada pelo atributo *NumRota* e tem um tamanho de lote definido (*TamLote*).

#### - Classe Operação

Cada rota pode ter várias operações de processamento identificadas pelo atributo *NumOperação* e caracterizadas por:

- *IdTipoMáquina*: tipo de máquina no qual se efectua a operação,
- *TSU*: tempo de preparação da máquina (u.t.),
- *TProcessamento*: tempo de processamento de um lote (u.t.),
- *CProcessamento*: custo de processamento de um lote (u.m.),
- *IdClasseMãoObra*: classe de mão-de-obra utilizada na operação,
- *TMãoObra*: tempo de mão-de-obra gasto no processamento de um lote (u.m.),
- *CSubContOper*: custo de subcontratação de um lote da operação (u.m.).

## A.1.2. Soluções

O diagrama de dados correspondente a este sub-módulo da base de dados de planeamento de recursos foi apresentado na Figura 3.12.

### - Classe Solução

Para cada problema de planeamento de recursos podem obter-se várias soluções, identificadas no atributo *IdSolução*. Cada uma delas deriva da resolução de um problema de programação inteira mista, para o qual são pré-fixados o tempo máximo de execução (*TLimite* (u.t.)) e condições de proximidade mínima à 'lower bound', obtida pela relaxação das condições de integralidade do problema (*ErroRelativo*).

Os valores armazenados na base de dados, para cada solução e para cada uma das seguintes classes, são:

#### (i) Tipo de máquina:

- *TaxaUtilização*: taxa de utilização de cada máquina, correspondente à operação dessa máquina, ao longo de cada turno do horizonte de planeamento,
- *TaxaUtilMax*: parâmetro definido pelo utilizador que corresponde ao valor máximo da taxa de utilização,
- *NumMinMáquinas*: é o número mínimo de máquinas definido em função da taxa de utilização.

#### (ii) Classe de mão-de-obra:

- *NumTrabalhadores*: número de trabalhadores dessa classe, utilizados em cada turno,
- *UtilTrabalhadores*: taxa média de ocupação dos trabalhadores dessa classe em cada turno,
- *NumHoras*: número de horas realizadas pela totalidade dos trabalhadores desta classe em cada período de horas extraordinárias (u.t.).

#### (iii) Componente

- *QtdSubcontComp*: número de unidades subcontratadas.

## (iv) Rota

- *QtdProdRota*: número de lotes produzidos em cada rota.

## (v) Operação

- *QtdSubcontOper*: número de lotes subcontratados,
- *QtdProdOpExtra*: número de lotes produzidos em cada período de horas extraordinárias por classe de mão-de-obra,
- *QtdProdTurno*: número de lotes produzidos em cada turno por classe de mão-de-obra.

A partir dos valores armazenados para cada solução, o sistema permite calcular os seguintes indicadores financeiros incorridos no período de planeamento:

## (i) Custos no período (u.m.):

- Máquinas:

- Volume de investimento em máquinas =

$$\sum_{\text{IdTipoMaquina}} \text{NumMaquinas} \times \text{CInvestimento}$$

- Custo fixo das máquinas =  $\sum_{\text{IdTipoMaquina}} \text{NumMaquinas} \times \text{CFixo}$

- Custo de operação das máquinas =

$$\sum_{\text{CódigoComponente}} \sum_{\text{NumRota}} \text{QtdProdRota} \times \sum_{\text{NumOperação}} \text{CProcessamento}$$

- Custos de mão-de-obra:

- Horas normais =  $\sum_{\text{IdClasseMãoObra}} (\text{CustoFixo} \times \text{NumTrabalhadores})_{\text{NumTurno}=1}$

- Horas extraordinárias =  $\sum_{\text{IdClasseMãoObra}} \sum_{\text{NumPeriodoExtra}} \text{NumHoras} \times \text{CustoHora}$

- Turnos =  $\sum_{\text{IdClasseMãoObra}} \sum_{\text{NumTurno}>1} \text{CustoFixo} \times \text{NumTrabalhadores}$

- Custos de subcontratação de:

- Componentes =  $\sum_{\text{CódigoComponente}} \text{QtdSubcontComp} \times \text{CSubcontComp}$

$$\text{- Operações} = \sum_{\text{CódigoComponente}} \sum_{\text{NumRota}} \sum_{\text{NumOperação}} \text{QtdSubcontOper} \times \text{CSubcontOper}$$

## A.2. Base de dados principal

### A.2.1. Afecção de operações de fabrico a máquinas

O diagrama de dados correspondente a este sub-módulo da base de dados principal foi apresentado na Figura 3.13.

#### - Classe AfecçãoOperações

Esta classe caracteriza os problemas de afecção de operações de fabrico a máquinas e, para cada um destes problemas, o conjunto de soluções obtidas. Cada um destes problemas, bem como o respectivo conjunto de soluções, é identificado pelo atributo *IdAfecção*.

#### - Classe TipoMáquina

Cada tipo de máquina é identificado pelo atributo *IdTipoMáquina* e caracterizado pelos seguintes atributos:

- *Símbolo*: identificador do símbolo geométrico utilizado para representar cada unidade individual deste tipo de máquina,
- *QtdTipoMáquina*: número de máquinas disponíveis, do tipo em causa,
- *Disponibilidade*: tempo disponível da totalidade das máquinas deste tipo, ao longo do horizonte de planeamento (u.t.).

#### - Classe Máquina

A cada tipo de máquina associa-se um conjunto de máquinas, em número dado por *QtdTipoMáquina*, sendo cada uma delas identificada por um código (*CódigoRGF*), cujo significado será explicado posteriormente.

### - Classe TipoEquipTransporte

Cada tipo de equipamento de transporte é identificado pelo atributo *IdEquipTransporte* e caracterizado pelos seguintes atributos:

- *CustoUnTempo*: custo de operação por unidade de tempo (u.m./u.t.),
- *TempoCarga* e *TempoDescarga*: tempos médios de carga e descarga (u.t.),
- *Velocidade*: velocidade média (u.d./u.t.).

As classes Componente, Estrutura, Rota e Operação diferem das incluídas na base de dados de planeamento de recursos somente em alguns atributos:

### - Classe Componente

- *Cor*: identificador da cor utilizada para a representação do fluxo associado ao componente em causa.

### - Classe Rota

- *QtdLote*: número de lotes produzidos na rota.

### - Classe Operação

As operações podem ser de um de três tipos:

- Processamento e inspecção: realizada num dado tipo de máquina e definida pelos tempos de preparação da máquina, ou de 'set-up' (*TSU*), e de processamento (*TProcessamento*),
- Armazenamento: associada ao armazém em que ocorre,
- Transporte: caracterizada pelo tipo de equipamento de transporte de materiais que a executa (*IdTipoEquipTransporte*) e pela dimensão do lote de transporte (*LoteTransporte*). A possibilidade da redefinição, para cada operação, dos parâmetros *TempoCarga*, *TempoDescarga* e *Velocidade* foi prevista.

### - Classe SolOperação

Cada solução do problema de afectação de operações a equipamentos é identificada pelo atributo *IdSolAfectação* e associa a cada par (máquina, operação de processamento-inspecção) o número de lotes processados (*NumLotes*) e a respectiva taxa de ocupação do equipamento (*Ocupação*).



### - Classe RGF

Cada recurso gerador de fluxo é identificado pelo atributo *CódigoRGF* e pertence a um de dois tipos possíveis:

- *Máquina*: refere-se a cada unidade individual de equipamento e é identificada pelos atributos *IdTipoMaquina* e *CódigoRGF*,
- *Armazém*: é qualquer área de retenção de produtos, subprodutos ou matérias primas, à excepção daquelas que fazem parte integrante dos postos de trabalho. É identificado pelo atributo *CódigoRGF* e utiliza o atributo *Símbolo* para identificar o objecto gráfico utilizado para o representar.

### - Classe Fluxo

Esta classe associa as operações de transporte a cada par de recursos geradores de fluxos, em que um deles define a origem do fluxo (*De*) e o outro o destino (*Para*), sendo caracterizada pelos seguintes atributos:

- *NumLotes*: número de lotes movimentados em cada fluxo,
- *NumViagens*: número de viagens necessárias para transportar a totalidade dos componentes, relativos à operação em causa, no período de planeamento.

O número de lotes movimentados em cada fluxo é calculado a partir da solução do problema de afectação, tendo em conta a procura de cada componente, a dimensão de cada lote e a sequência de operações.

O número de viagens é dado por

$$\left\lceil \frac{\text{Rota.TamanhoLote}}{\text{Transporte.LoteTransporte}} \right\rceil \times \text{Fluxo.NumLotes},$$

onde  $\lceil \text{argumento} \rceil$  é o menor inteiro que contém o argumento.

Note-se que, para as matérias-primas, o tamanho do lote é igual ao número de unidades necessárias no produto que as incorpora.

Um exemplo do cálculo do número de viagens é apresentado no Apêndice B.

## A.2.2. Agregação de equipamentos em secções e implantação de secções

O diagrama de dados correspondente a este sub-módulo da base de dados principal foi apresentado na Figura 3.14.

### - Classe Secção

As máquinas são distribuídas por secções, identificadas pelo atributo *IdSecção*, no módulo de agregação de equipamentos em secções. Cada uma das diferentes partições criadas é identificada por *IdAgregação*.

### - Classe ImplantaçãoSecção

A implantação de uma secção representa geometricamente (de acordo com uma dada escala, definida pelo atributo *ImplantaçãoSecção.Escala*) a localização dos postos de trabalho nela agrupados, as coordenadas do contorno rectangular envolvente (*ImplantaçãoSecção.Contorno*) e os pontos de entrada (*ImplantaçãoSecção.PontoEntrada*) e saída (*ImplantaçãoSecção.PontoSaída*) de materiais.

Para cada secção podem-se obter diferentes versões da implantação dos postos de trabalho correspondentes, as quais são identificadas pelo atributo *ImplantaçãoSecção.Versão*.

### - Classe PostoTrabalho

Um posto de trabalho é a representação gráfica do espaço afecto a uma máquina. É identificado pelo código da máquina correspondente (*Máquina.CódigoRGF*), desenhado numa escala definida no atributo *PostoTrabalho.Escala* e inclui:

- Símbolo do equipamento (identificado pelo atributo *TipoMaquina.Simbolo*), localização do seu centro (dado pelo atributo *PTxMáquina.Centro*) e a rotação relativamente ao eixo  $xx'$  (definida no atributo *PTxMáquina.Rotação*),
- Símbolos de equipamentos auxiliares (identificados por um atributo da classe Símbolo), o ponto de inserção do canto superior esquerdo de cada símbolo

(dado pelo atributo *PTxSímbolo.PontoInserção*) e a rotação relativamente ao eixo  $xx'$  (definida no atributo *PTxSímbolo.Rotação*),

- Coordenadas do contorno rectangular do posto do trabalho (definidas no atributo *PostoTrabalho.Contorno*)
- Coordenadas dos pontos de entrada (*PostoTrabalho.PontoEntrada*) e de saída (*PostoTrabalho.PontoSaída*) dos materiais.

### A.2.3. Implantação global

O diagrama de dados correspondente a este sub-módulo da base de dados principal apresentado na Figura 3.15 .

#### - Classe Implantação

A implantação global agrupa as representações geométricas das diferentes entidades que constituem a instalação industrial (postos de trabalho, secções e armazéns). Cada uma destas entidades é colocada na área fabril nas coordenadas indicadas pelo atributo *Entidade.Centro* (em que *Entidade* representa uma das classes Armazém, PostoTrabalho ou ImplantaçãoSecção) e de acordo com uma determinada rotação relativamente ao eixo  $xx'$  (definida pelo atributo *Entidade.Rotação*). Para cada secção, somente a implantação seleccionada (correspondente ao atributo *Versão* ) é colocada.

## A.3. Base de dados de desenho de objectos gráficos

O diagrama de dados correspondente à base de dados de desenho de objectos gráficos foi apresentado na Figura 7.1.

### - Classe BibliotecaSímbolos

Cada objecto desta classe identifica, através do atributo *NomeBiblioteca*, um conjunto de objectos geométricos (Símbolos) que, de algum modo, estão relacionados entre si.

### - Classe Símbolo

Cada Símbolo é identificado por *CódigoSímbolo* e caracteriza um conjunto de objectos geométricos que representam um recurso. A cada Símbolo associa-se um identificador através do atributo *NomeSímbolo*.

### - Classes Objecto, Elemento e Grupo

Um Objecto é um conjunto com pelo menos um elemento geométrico básico (Elemento). Os elementos geométricos básicos são: polígono, linha poligonal, elipse, área de elipse, segmento de recta e texto.

Os elementos geométricos básicos podem ser agrupados num Grupo, por forma a que o conjunto definido por esses elementos seja encarado como um objecto único.

A disponibilidade de um Objecto para sobre ele se efectuarem operações é dada pelo atributo *Objecto. ?Disponibilidade*.

Os Objectos também podem ser inseridos em Grupos conjuntamente com os elementos geométricos básicos. Quando o utilizador selecciona um conjunto de elementos geométricos básicos ou de objectos para agrupar, os pontos correspondentes aos vértices do menor rectângulo que os delimita é armazenado no atributo *Grupo.Pontos*.

Os elementos geométricos básicos são desenhados com a cor determinada pelo atributo *Elemento.Cor*.

### - Classes Buffer, Corte, ObjectoAnterior e Selecção

Os objectos podem ser copiados para um registo temporário (*Buffer-Corte*) para posterior inserção na área de desenho. Este registo só armazena um objecto de cada vez, pelo que só o ultimo objecto copiado é armazenado.

Quando se inicia a execução de qualquer operação na área de desenho, o sistema armazena o objecto geométrico corrente num registo temporário (Buffer-ObjectoAnterior). Este funcionamento permite o restabelecimento do símbolo anterior, se após a execução da operação a quizer anular.

Um conjunto de objectos pode ser seleccionado para sobre ele se efectuar uma transformação (por exemplo, apagar, rodar, etc.). Esta selecção é armazenada num registo temporário (Buffer-Seleccção) e o utilizador visualiza os objectos seleccionados através do conjunto dos vértices do menor rectângulo que os delimita. As coordenadas destes vértices são dadas pelo atributo *Seleccção.Pontos*.

#### - Classes Elemento-1D, Linha, LinhaPoligonal e Elipse

Os elementos geométricos básicos segmento de recta (Linha), linha poligonal (LinhaPoligonal) e elipse (Elipse) podem ser representados por um traço contínuo ou interrompido, sendo o tipo de traço definido pelo atributo *Elemento-1D.EstiloLinha*. A grossura do traço é definida no atributo *Elemento-1D.GrossuraTraço*.

Uma Linha é definida pelos dois pontos extremos do segmento de recta que representa.

Uma LinhaPoligonal é definida pelo conjunto ordenado de pontos que unem os segmentos de recta que a representam. As linhas poligonais podem ser abertas ou fechadas, sendo este facto traduzido no valor do atributo *LinhaPoligonal.IndFecho*.

Uma elipse é definida pelo ponto correspondente ao canto superior esquerdo do menor rectângulo que a envolve e pelas dimensões do seu eixo maior (*Elipse.Comprimento*) e menor (*Elipse.Largura*).

#### - Classe Polígono

Um Polígono é uma linha poligonal fechada cuja superfície interior é preenchida com a cor definida no atributo *Elemento.Cor*.

#### - Classe ÁreaElipse

Cada elemento desta classe representa uma elipse cuja superfície interior é preenchida pela cor definida no atributo *Elemento.Cor*.

### - Classe Texto

Cada elemento desta classe define um conjunto de caracteres (em número dado pelo atributo *NumCaracteres*) aos quais se associam o tipo e tamanho de letra utilizados para os representar (dados nos atributos *EstiloFonte* e *TamanhoFonte*, respectivamente). A localização do texto na área de desenho é definida pelo ponto correspondente ao canto superior esquerdo do rectângulo que o delimita e as dimensões deste rectângulo são dadas nos atributos *Comprimento* e *Largura*).

### - Classe Ponto

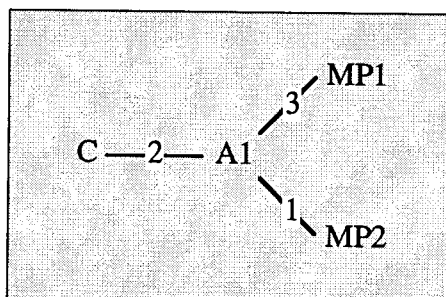
Um ponto é definido pelas suas coordenadas (dadas no atributo  $(x,y)$ ) e pelo símbolo utilizado para o representar (dado no atributo *TipoMarca*).

# Apêndice B

---

## Exemplo do cálculo do número de viagens

Considere-se um produto C com a seguinte estrutura



e os seguintes pressupostos:

- Procura de C = 50 unidades, o que implica a produção de 100, 300 e 100 unidades de A1, MP1 e MP2, respectivamente.
- MP1 e MP2 são matérias-primas armazenadas nos armazéns W1 e W2, respectivamente.
- Sequências de operações:  $C = 1M1 \rightarrow 2M3$

$$A1 = (1M2, 2M2) \rightarrow 1M3$$

A primeira operação de A1 é efectuada em duas máquinas, sendo 20 unidades processadas na máquina 1M2 e as restantes 80 em 2M2.

- Tamanhos de lote: C=50, A1=20, MP1=300 e MP2=100.

O fluxo resultante e o número de viagens (supondo o lote de transporte indicado) são dados na tabela seguinte:

De→Para	Componente	Fluxo (nº de lotes)	Lote transporte	Nº Viagens
W1→1M2	MP1	1	30	2
W1→2M2	MP1	1		8
W2→1M2	MP2	1	20	1
W2→2M2	MP2	1		4
1M2→1M3	A1	1	10	2
2M2→1M3	A1	4		8
1M3→1M1	A1	5	20	5
1M1→2M3	C	1	50	1



# Apêndice C

---

## Gerador de problemas

Os seguintes parâmetros foram utilizados no gerador de problemas referido na secção 4.2.4:

**(1) Parâmetros fixos (isto é, parâmetros que permanecem inalterados para todos os problemas)**

- (1.1) Número de turnos,  $S = 3$
- (1.2) Número de períodos extraordinários,  $E = 3$
- (1.3) Tempo total de mão-de-obra em cada turno,  $T_S = 1760$
- (1.4) Número de máquinas de cada tipo disponíveis,  $(x_0)_m = 0$
- (1.5) Limites ao número de máquinas a serem adquiridas,  $(E_m)_{\min} = 0$  and  $(E_m)_{\max} = \infty$ , para  $m=1, \dots, M$
- (1.6) Limites ao número de trabalhadores a contratar,  $(L_h)_{\min} = 0$  and  $(L_h)_{\max} = \infty$  for  $h=1, \dots, H$
- (1.7) Limite superior de investimento,  $I = \infty$

**(2) Parâmetros gerados aleatoriamente de distribuições fixas (isto é, distribuições que permaneceram inalteradas para todos os problemas)**

- (2.1) Número de rotas por componente,  $R_p$   
 $R_p \sim \text{Normal} (\mu = 3, \sigma = 1)$
- (2.2) Número de operações por rota,  $O_{pr}$   
 $O_{pr} \sim \text{Normal} (\mu = 5, \sigma = 2)$

- (2.3) Tipo de máquina utilizada em cada operação,  $m$   
 $m \rightsquigarrow$  Uniforme Discreta ( $m = 1, \dots, M$ )
- (2.4) Classe de mão-de-obra do trabalhador afecto a cada operação  $h$   
 $h \rightsquigarrow$  Uniforme Discreta ( $h = 1, \dots, H$ )
- (2.5) Custo de processamento por operação,  $cv_{pro}$   
 $cv_{pro} \rightsquigarrow$  Normal ( $\mu = 13000, \sigma = 3000$ )
- (2.6) Tempo total por operação ('set-up' + processamento),  $t_{pmro}$   
 $t_{pmro} \rightsquigarrow$  Exponencial( $\mu = 25$ )
- (2.7) Tempo gasto por um trabalhador numa máquina, expresso como uma proporção do tempo de 'set-up' mais o tempo de processamento de qualquer operação,  $tr$

$tr$	$p(tr)$
0.25	0.10
0.50	0.20
0.75	0.20
1.00	0.50

- (2.8) Limite superior do tempo extraordinário realizado por qualquer trabalhador no período  $e$ , ao longo de todo o horizonte de planeamento,  $T_{he}$   
 $T_{he} \rightsquigarrow$  Uniforme (0, 660) ( $e = 1, 2$ )  
 $T_{he} \rightsquigarrow$  Uniforme (0, 440) ( $e = 3$ )
- (2.9) Custo fixo por tipo de máquina,  $cf_m$   
 $cf_m \rightsquigarrow$  Uniforme (50 000, 400 000)
- (2.10) Custo fixo por classe de mão-de-obra no turno normal de trabalho,  $cf_{h1}$   
 $cf_{h1} \rightsquigarrow$  Uniforme (700 000, 2 000 000)
- Para os outros turnos, considerou-se uma penalização de 15% relativamente ao turno normal de trabalho

- (2.11) Razão entre o custo unitário de mão-de-obra durante o primeiro período de horas extraordinárias e o turno normal de trabalho,  $prat_1$

$$prat_1 \sim \text{Normal}(\mu=0.25, \sigma=0.05).$$

Para cada um dos outros períodos extraordinários,

$$prat_2 = prat_1 + 0.25$$

$$prat_3 = prat_1 + 0.50$$

- (3) **Parâmetros com um valor que permaneceu inalterado para cada conjunto de problemas, mas variou entre conjuntos de problemas (valores definidos na secção 4.2.4, Tabela 4.1)**

(3.1) Número de tipos de máquinas,  $M$

(3.2) Número de classes de mão-de-obra,  $H$

(3.3) Número de tipos de componentes,  $P$

- (4) **Parâmetro gerado aleatoriamente de uma distribuição Normal, cujos parâmetros permaneceram inalterados para cada conjunto de problemas, mas variaram entre conjuntos de problemas (valores definidos na secção 4.2.4, Tabela 4.1)**

(4.1) Procura do produto  $p$ ,  $N_p$

# Apêndice D

---

## Problema exemplo

- **Dados do projecto:**

Duração do horizonte de planeamento: 1760 u.t.

Limites:

- Investimento em equipamento: ilimitado
- Custo de mão-de-obra no período: ilimitado
- Número de máquinas de cada tipo a adquirir: ilimitado
- Número de trabalhadores de cada classe de mão-de-obra a contratar: ilimitado

A subcontratação quer de componentes quer de operações não foi considerada

- **Produtos acabados:**

Produto	Procura (un.)
P0	3500
P1	3100
P2	3400

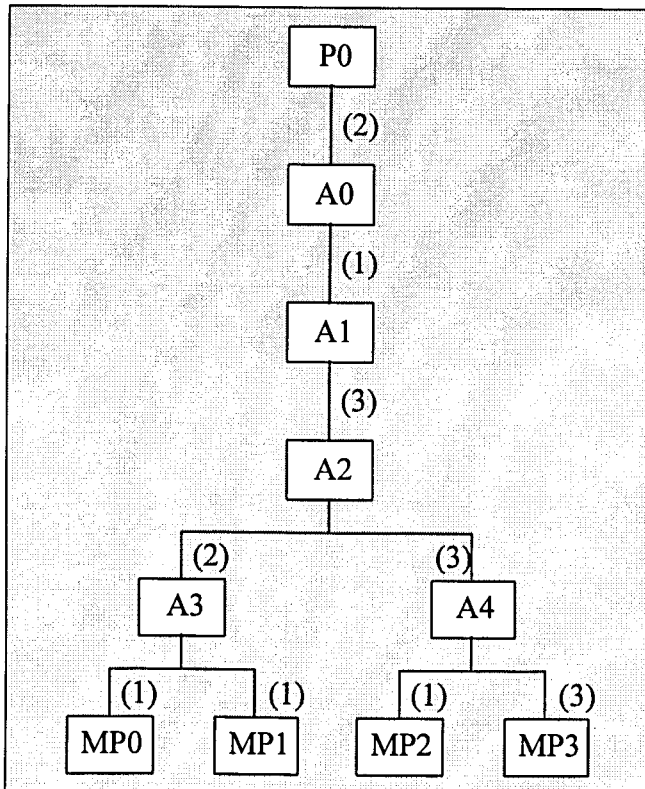
- **Tipos de máquinas:**

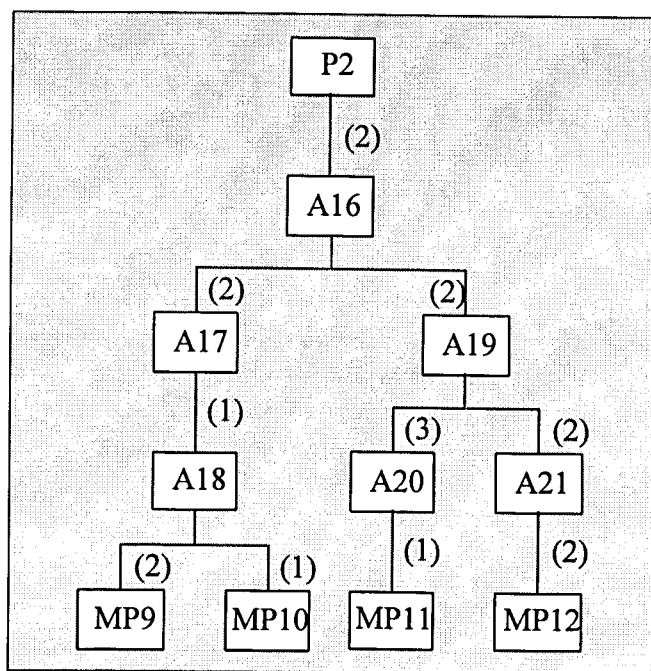
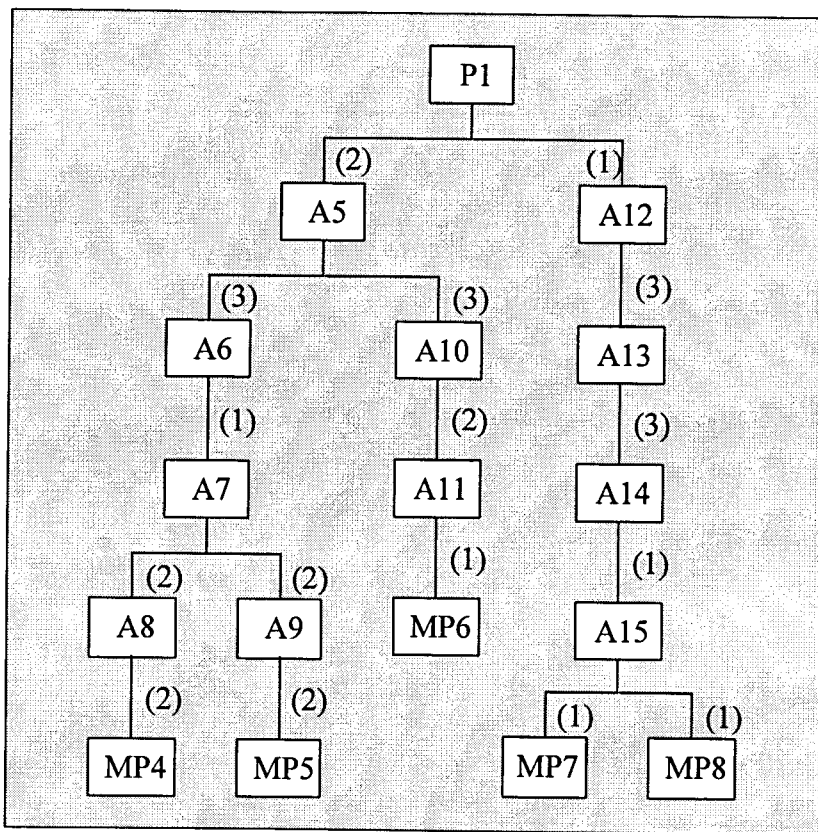
Tipo	Custo fixo (u.m.)	Eficiência (%)
M0	204 570	100
M1	335 556	100
M2	325 411	100
M3	302 913	100
M4	127 078	100

• **Classes de mão-de-obra:**

Classe	Turno	Custo fixo (u.m.)	Duração (u.t.)	Período	Custo unitário (u.m./u.t.)	Limite (u.t.)
H0	1	1 120 783	1760	1	767,3	419
				2	926,6	240
				3	1 085,8	341
H1	1	1 678 164	1760	1	1 149,0	437
				2	1 387,3	245
				3	1 625,7	195
H2	1	1 423 338	1760	1	974,5	474
				2	1 176,7	97
				3	1 378,9	385
H3	1	1 254 128	1760	1	858,6	287
				2	1 036,8	394
				3	1 214,9	227
H4	1	1 098 050	1760	1	751,8	341
				2	907,8	66
				3	1 063,7	404

• **Listas de materiais:**





## Rotas/Operações:

Comp.	Rota	Tam. do Lote	Oper.	Mão-de-obra		Máquina			
				Classe	Tempo (u.t.)	Tipo	Processamento Custo (u.m.)	Tempo (u.t.)	Set-up (u.t.)
P0	1	224	1	H0	3.5	M3	126	3.5	0.3
			2	H2	2.2	M0	94	8.9	0.3
			3	H0	2.2	M2	170	2.2	0.2
A0	2	171	1	H0	1.8	M4	143	7.2	0.3
	1	219	1	H3	22.6	M2	142	22.6	0.1
2			H3	0.5	M3	86	0.5	0.2	
A1	1	159	1	H2	1.5	M4	157	6.1	0.5
			2	H3	1.0	M0	119	4.1	0.0
			2	H3	1.0	M0	119	4.1	0.0
A2	1	246	1	H2	2.7	M4	153	10.6	0.1
			2	H0	3.4	M1	133	3.4	0.3
			3	H2	0.7	M4	94	2.6	0.2
A3	1	210	1	H0	1.0	M0	193	4.1	0.5
			2	H3	1.9	M1	86	1.9	0.3
			3	H2	0.9	M0	121	3.4	0.2
			4	H2	8.2	M2	134	8.2	0.2
A4	1	224	1	H0	5.4	M1	188	5.4	0.2
			2	H1	2.6	M3	138	2.6	0.1
P1	1	197	1	H1	2.6	M3	138	2.6	0.1
			2	H1	2.6	M3	138	2.6	0.1
A5	1	254	1	H0	2.7	M0	158	10.6	0.0
			2	H0	2.7	M0	158	10.6	0.0
A6	1	254	1	H3	0.4	M1	151	0.4	0.6
			2	H3	3.2	M2	135	3.2	0.1
A7	1	255	1	H3	0.1	M4	114	0.2	0.0
			2	H1	1.4	M2	153	1.4	0.4
A8	1	280	1	H2	7.6	M3	124	7.6	0.1
			2	H2	1.2	M4	102	4.7	0.4
			2	H2	1.2	M4	102	4.7	0.4
			2	H2	1.2	M4	102	4.7	0.4
A9	2	102	1	H2	1.7	M0	160	6.7	0.3
			2	H1	0.8	M4	137	3.2	0.4
			2	H1	0.8	M4	137	3.2	0.4
			2	H1	0.8	M4	137	3.2	0.4
A10	1	255	1	H4	2.9	M2	150	2.9	0.1
			2	H0	3.0	M3	120	3.0	0.3
			3	H2	4.1	M1	128	4.1	0.0
			3	H2	4.1	M1	128	4.1	0.0
A11	2	162	1	H2	7.2	M2	116	7.2	0.6
			2	H1	1.0	M0	96	3.9	0.0
			3	H3	1.0	M1	158	1.0	0.0
			4	H4	1.3	M3	190	1.3	0.2

## Rotas/Operações (continuação)

Comp.	Rota	Tam. do Lote	Oper.	Mão-de-obra			Máquina		
				Classe	Tempo (u.t.)	Tipo	Processamento Custo (u.m.)	Tempo (u.t.)	Set-up (u.t.)
A8	1	239	1	H3	2.0	M0	128	8.1	0.0
			2	H2	2.9	M4	130	11.6	0.1
A9	1	298	1	H0	9.6	M3	156	9.6	0.1
			2	H4	0.4	M0	138	1.7	0.4
			3	H1	3.5	M3	94	3.5	0.3
			4	H0	0.9	M0	151	3.7	0.5
A10	1	158	1	H2	10.9	M1	118	10.9	0.4
			2	H4	7.3	M3	104	7.3	0.2
			3	H4	2.1	M0	84	8.5	0.2
			4	H4	0.5	M1	106	0.5	0.3
A11	1	221	1	H1	0.6	M2	128	0.6	0.1
			2	H0	0.6	M1	165	0.6	0.1
			3	H2	4.5	M4	84	18.1	0.0
			4	H0	3.9	M3	168	3.9	0.2
A12	1	82	1	H0	0.5	M4	157	2.0	0.1
			2	H3	4.6	M2	133	4.6	0.4
			3	H0	4.6	M1	124	4.6	0.1
	2	244	1	H2	1.1	M4	121	4.4	0.3
			2	H4	9.2	M3	128	9.2	0.1
			3	H4	0.3	M0	148	1.1	0.4
A13	1	181	1	H4	14.3	M3	136	14.3	0.0
			2	H1	0.2	M2	137	0.2	0.1
			3	H3	0.1	M4	132	0.4	0.6
A14	1	176	1	H1	2.7	M3	166	2.7	0.2
A15	1	216	1	H0	3.5	M4	81	13.8	0.1
			2	H1	2.1	M3	97	2.1	0.3
			3	H2	2.1	M0	111	8.4	0.6
			4	H1	10.9	M1	99	10.9	0.2
	2	113	1	H0	0.6	M0	102	2.4	0.1
			2	H4	12.6	M4	170	0.0	0.1
			3	H3	1.3	M3	113	1.3	0.3
P2	1	256	1	H1	10.9	M1	99	10.9	0.2
A16	1	182	1	H0	0.3	M3	139	0.3	0.1
			2	H1	2.0	M0	118	7.9	0.3
			3	H1	19.2	M2	120	19.2	0.1
	2	172	1	H4	2.8	M4	128	11.0	0.1
			2	H3	1.4	M0	145	5.4	0.3
			3	H1	15.0	M3	133	15.0	0.4
			3	H1	7.2	M1	139	7.2	0.1



• Rotas/Operações (continuação)

Comp.	Rota	Tam. do Lote	Oper.	Mão-de-obra			Máquina		
				Classe	Tempo (u.t.)	Tipo	Processamento Custo (u.m.)	Tempo (u.t.)	Set-up (u.t.)
A17	1	274	1	H3	0.4	M0	128	1.6	0.1
A18	1	180	1	H2	14.8	M1	100	14.8	0.3
			2	H0	0.2	M0	161	0.7	0.5
			3	H4	0.8	M3	152	0.8	0.7
A19	1	218	1	H2	2.7	M1	107	2.7	0.4
			2	H1	1.1	M4	98	4.3	0.1
			3	H3	10.9	M2	150	10.9	0.2
			4	H1	0.3	M0	147	1.2	0.4
A20	1	182	1	H4	1.7	M2	127	1.7	0.4
	2	105	1	H1	0.5	M0	123	1.8	0.1
A21	1	277	1	H4	2.2	M2	113	2.2	0.2
A21	1	102	1	H4	8.4	M3	184	8.3	0.1
A22	1	204	1	H3	3.8	M2	98	3.6	0.2
			2	H2	1.1	M4	94	3.5	0.9
			3	H4	6.7	M2	117	6.3	0.4
			4	H4	10.3	M1	137	10.0	0.3
A23	2	171	1	H1	1.0	M3	44	0.8	0.2
			2	H1	1.2	M0	120	1.2	0.0
			3	H1	3.0	M2	147	3.4	0.6
A23	1	168	1	H2	3.2	M1	130	2.8	0.4
			2	H0	1.2	M4	133	3.8	0.4
A24	2	268	1	H1	1.8	M2	114	1.7	0.1
			1	223	1	H0	8.4	M1	88
A25	1	295	2	H4	1.2	M3	169	1.2	0.0
			1	H2	0.8	M1	165	0.6	0.2
			2	H4	6.0	M4	169	0.1	0.3
			3	H2	3.9	M3	90	2.8	1.1
A25	2	308	4	H1	2.0	M0	102	6.1	0.8
			1	H3	1.0	M4	99	2.1	0.1
			1	213	1	H2	5.1	M2	111
A26	1	213	2	H4	2.0	M3	129	0.2	0.0
			3	H4	2.0	M2	106	0.4	0.5

# Apêndice E

---

## Descrição detalhada do algoritmo de recristalização simulada para o problema da afectação residual de operações de fabrico a máquinas

Na Figura E.1 apresenta-se o algoritmo de recristalização simulada para o problema da afectação residual de operações a máquinas, o qual utiliza a seguinte notação:

- $T$  - temperatura corrente,
- $T_0$  - temperatura inicial,
- $M$  - número de máquinas,
- $O$  - número de operações,
- $A$  - matriz dos coeficientes associada às restrições (3a) e (3b) apresentadas na secção 5.3.2.2,
- $b$  - vector dos termos independentes associado às restrições (3a) e (3b) apresentadas na secção 5.3.2.2,
- $C$  - matriz das penalidades,
- $S$  - matriz da solução corrente,
- $S'$  - matriz da solução candidata,
- $S^*$  - matriz da melhor solução encontrada,
- $Z(S)$  - valor da função objectivo para a solução  $S$ ,
- $\{NB(S)\}$  - conjunto das variáveis não básicas associadas à solução  $S$ ,
- $\{B(S)\}$  - conjunto das variáveis básicas associadas à solução  $S$ ,
- $B^{-1}(S)$  - matriz inversa da base associada à solução  $S$ ,
- $var\_ent$  - variável de entrada na base,
- $fact$  - constante definida pelo utilizador,

- act - contador do número de soluções aceites para um determinado patamar de temperatura,
- crist - contador do número de patamares de temperatura consecutivos em que o número de soluções aceites não ultrapassa 15% do número total de soluções geradas,
- temp - contador do número de soluções geradas em cada patamar de temperatura.

O procedimento apresentado merece os seguintes comentários:

- (i) a solução inicial é calculada pela regra do canto noroeste, a partir da matriz dos coeficientes (A) e do vector de termos independentes (b),
- (ii) a inversa da base da matriz da solução inicial é determinada por métodos numéricos convencionais (Atkinson (1978)),
- (iii) os elementos da matriz solução são numerados sequencialmente de 1 a D ( $D=O.M$  é o produto do número de linhas pelo número de colunas da matriz solução). Assim, gerando aleatoriamente um número inteiro entre 1 e D determina-se um elemento da matriz solução (correspondente a uma variável do problema). Se este elemento corresponde a uma variável não básica, esta é seleccionada como variável de entrada na base. Caso contrário, o processo é repetido até que se encontre uma variável não básica para entrar na base.
- (iv) para se determinar a solução vizinha de S é necessário, em primeiro lugar, escolher a variável que irá sair da base. Para tal, tem que se determinar o ciclo<sup>1</sup> associado à matriz S, o qual é dado por  $B^{-1}P_{var\_ent}$  ( $P_{var\_ent}$  é a coluna na matriz dos coeficientes correspondente à variável var\_ent e  $B^{-1}$  é a matriz inversa da base correspondente à solução S).

---

<sup>1</sup> A noção de ciclo é a mesma que se associa ao algoritmo de transportes: uma sequência de elementos em que cada par adjacente pertence à mesma linha ou coluna, o início e o fim de um ciclo constituem um par adjacente e há apenas dois elementos consecutivos em cada linha ou coluna (Guerreiro e outros (1985)).

**Procedimento Recristalização - Afectação residual de operações a máquinas**Parâmetros de entrada: A, b,  $T_0$ , fact, C.Parâmetros de saída:  $S^*$ ,  $Z(S^*)$ . $T=T_0$ ; act=0; temp=0; crist=0;

Determina a solução inicial, S, pela regra do canto do noroeste;

Inicializa  $\{B(S)\}$  e  $\{NB(S)\}$ ;

(ver comentário (i))

Calcula  $B^{-1}(S)$ ;

(ver comentário (ii))

 $S^* \leftarrow S$ ;

faz

faz

Gera var\_ent;

(ver comentário (iii))

se (var\_ent  $\in$  {NB})

Determina a solução vizinha, S', de S;

(ver comentário (iv))

se ( $Z(S') - Z(S) \leq 0$ ) $S \leftarrow S'$ ;

(ver comentário (v))

Actualiza  $\{B(S)\}$ ,  $\{NB(S)\}$  e  $B^{-1}(S)$ ;act  $\leftarrow$  act + 1;se ( $Z(S^*) - Z(S) \leq 0$ ) $S^* \leftarrow S$ ;

crist=0;

fimse

senão

 $p = e^{-\Delta T}$ ;Gera um número aleatório u ( $0 \leq u \leq 1$ );se ( $u \leq p$ ) $S \leftarrow S'$ ;Actualiza  $\{B(S)\}$ ,  $\{NB(S)\}$  e  $B^{-1}(S)$ ;act  $\leftarrow$  act + 1;

fimse;

fimse;

temp  $\leftarrow$  temp + 1;

fimse;

se ( $\{NB\} = \emptyset$  e temp > fact \* M \* O)

(ver comentário (vi))

se ( $S \neq S^*$ ) $S \leftarrow S^*$ ;Actualiza  $\{B(S)\}$ ,  $\{NB(S)\}$  e  $B^{-1}(S)$ ;act  $\leftarrow$  0; temp  $\leftarrow$  0;

senão

Determina uma nova solução inicial, S;

Actualiza  $\{B(S)\}$ ,  $\{NB(S)\}$  e  $B^{-1}(S)$ ;

fimse;

fimse;

enquanto (temp  $\leq$  fact \* M \* O);per  $\leftarrow$  act / temp;se (per  $\leq$  0.15) crist  $\leftarrow$  crist + 1; $T \leftarrow T * 0.9$ ; act  $\leftarrow$  0; temp  $\leftarrow$  0;enquanto (crist  $\leq$  5 e temp  $\geq$  10);**fim.**

Figura E.1 - Algoritmo de recristalização simulada para o problema de afectação de operações

No passo seguinte escolhe-se, de entre as variáveis com sinal positivo incluídas no ciclo, aquela que tem menor valor na solução  $S$ . A variável  $var\_ent$  entra na base com este valor, o qual é adicionado às variáveis com sinal negativo no ciclo e subtraído das que têm sinal positivo.

- (v) acrescentando a coluna  $B^{-1}P_{var\_ent}$  à matriz  $B^{-1}$ , pode-se recalcular facilmente a inversa da base para a nova solução. Para tal efectua-se a operação de 'pivotação' sobre todos os elementos de  $B^{-1}$ , considerando-se como elemento 'pivot' o correspondente à intersecção da linha da variável de saída e da coluna  $B^{-1}P_{var\_ent}$ .
- (vi) é possível atingir uma situação em que, para uma dada solução, se tenham testado todas as variáveis não básicas, sem que tal tenha conduzido a uma nova solução e sem que os critérios de paragem da heurística estejam satisfeitos. Neste caso é necessário definir uma nova solução por forma a continuar o procedimento. Caso a solução testada não seja a melhor solução encontrada ( $S \neq S^*$ ) esta passa a ser a solução corrente ( $S \leftarrow S^*$ ), senão utiliza-se a solução inicial, obtida pela regra do canto do noroeste.

Os conceitos associados aos pontos (iv) e (v) são ilustrados seguidamente, recorrendo-se ao exemplo introduzido na secção 5.3.2.2.

A matriz dos coeficientes (A) do problema é:

$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{31}$	$x_{32}$	$x_{41}$	$x_{42}$	$x_{51}$	$x_{52}$	$x_{61}$	$x_{62}$
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1

A matriz da solução inicial (S) é dada por:

	1	2
1	7.24	
2	14.71	
3	17.59	
4	31.10	
5	29.36	17.31
6		82.69

A inversa da base ( $B^{-1}(S)$ ) da matriz solução é dada por:

1	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0
-1	-1	-1	-1	0	0	1
1	1	1	1	1	0	-1
0	0	0	0	0	1	0

Sendo a variável de entrada  $x_{22}$ , o ciclo é determinado por  $B^{-1}P_{x_{22}}$ :

$$\begin{array}{l}
 x_{11} \\
 x_{21} \\
 x_{31} \\
 x_{41} \\
 x_{51} \\
 x_{52} \\
 x_{62}
 \end{array}
 \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|}
 \hline
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 \hline
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 \hline
 \end{array}
 \cdot
 \begin{array}{|c|}
 \hline
 0 \\
 \hline
 1 \\
 \hline
 0 \\
 \hline
 0 \\
 \hline
 0 \\
 \hline
 0 \\
 \hline
 0 \\
 \hline
 \end{array}
 =
 \begin{array}{|c|}
 \hline
 0 \\
 \hline
 1 \\
 \hline
 0 \\
 \hline
 0 \\
 \hline
 -1 \\
 \hline
 1 \\
 \hline
 0 \\
 \hline
 \end{array}$$

Assim, o ciclo compreende as variáveis  $x_{21}=14.71$ ,  $x_{51}=17.31$  e  $x_{52}=17.31$ , além da variável de entrada  $x_{22}$ :

	1	2
1	7.24	
2	⊕	⊖
3	17.59	
4	31.10	
5	⊖	⊕
6		82.69

A variável que sai da base é então  $x_{21}$ . Assim, podemos construir a nova matriz inversa da base:

	$B^{-1}P_{x_{22}}$						
$x_{11}$	1	0	0	0	0	0	0
$x_{21}$	0	1	0	0	0	0	1
$x_{31}$	0	0	1	0	0	0	0
$x_{41}$	0	0	0	1	0	0	0
$x_{51}$	-1	-1	-1	-1	0	0	-1
$x_{52}$	1	1	1	1	1	0	1
$x_{62}$	0	0	0	0	0	1	0

Aplicando as operações de 'pivotação' (o elemento 'pivot' é indicado pela célula sombreada), obtemos a matriz inversa da base da nova solução:

1	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0
-1	0	-1	-1	0	0	1
1	0	1	1	1	0	-1
0	0	0	0	0	1	0

Note-se que estes procedimentos para a determinação da variável de saída e para a actualização da inversa da base são cruciais na optimização do tempo de execução do algoritmo.

# Apêndice F

---

## Descrição detalhada do algoritmo baseado num método não-hierárquico de 'clustering'

Nas Figuras F.1 a F.10 apresenta-se o algoritmo para o problema da formação de células de produção descrito na secção 6.5.1. A seguinte notação é utilizada:

- M - número de máquinas,
- P - número de componentes,
- A[1..M][1..P] - matriz de incidência,
- D - matriz de dissemelhanças,
- DMIN[1..M] - vector de dissemelhanças mínimas,
- MCNO[1..M] - vector MCNO,
- {MA} - conjunto de máquinas afectadas a uma célula de produção,
- GM\* - vector de comprimento variável, cujo comprimento em cada instante é #GM\* e corresponde ao número de células criadas. Cada elemento desse vector, GM\*[p] (p=1, ..., #GM\*), contém a lista das #GM\*[p] máquinas que integram a célula p,
- GP\* - vector de comprimento variável definido do mesmo modo que GM\*, mas relativo às famílias de componentes,
- GM e GP - vectores definidos do mesmo modo que GM\* e GP\*, onde se armazena a melhor solução corrente,
- {MN} - conjunto de máquinas nucleares,
- eff - valor da eficácia de agrupamento,
- nones - número de elementos unitários da matriz de incidência,
- blanks - número de elementos nulos nos blocos da MDB,
- excep - número de elementos excepcionais da MDB.



**Procedimento Ganesh-Srinivasan**

Parâmetros de entrada: M, P e A[1...M][1...P]

Parâmetros de saída: GM[1...#GM] e GP[1...#GP]

 $\{MA\} \leftarrow \emptyset; \{MN\} \leftarrow \emptyset; \text{eff} \leftarrow 0;$ 

D ← CalcularMatrizDissemelhanças(M,A) /\* Ver Figura F.2 \*/

DMIN ← CalcularVectorDistânciasMínimas(D) /\* Ver Figura F.3 \*/

para (p=1 até M)

MCNO ← CalcularMCNO(M, D); /\* Ver Figura F.4 \*/

n ← DeterminaMáquinaNuclear(M,MCNO,DMIN,MN); /\* Ver Figura F.5 \*/

 $\{MN\} \leftarrow \{MN\} \cup n; \{MA\} \leftarrow \{MA\} \cup n; GM^*[p] \leftarrow n;$ GM\*[p] ← FormarCélula(M, {MA}, DMIN, D, GM\*[p], n); /\* Ver Figura F.6 \*/  
fimpara;

GM\*[p] ← CompletarFormaçãoDeCélula({MA}, GM\*, p, D) /\* Ver Figura F.7 \*/

/\* As famílias de componentes são criadas e, se a solução é admissível, a \*/

/\* eficácia do agrupamento é calculada. A solução é então sucessivamente \*/

/\* melhorada (reactando-se as máquinas e os componentes) até que duas \*/

/\* soluções admissíveis consecutivas diverjam \*/

repete

GP\* ← AfectaComponentes(GM,A,P) /\* Ver Figura F.8 \*/

se (#GP\* = #GM\*)

eff\* ← CalculaEficácia(A,GP\*,GM\*); /\* Ver Figura F.10 \*/

se (eff\* &lt; eff) eff ← eff\*; GM ← GM\*; GP ← GP\*;

senão fim

fimse

fimse

GM\* ← AfectaMáquinas(GP,A,M) /\* Ver Figura F.9 \*/

se (#GM\* = #GP\*)

eff\* ← CalculaEficácia(A,GP\*,GM\*) /\* Ver Figura F.10 \*/

se (eff\* &lt; eff) eff ← eff\*; GM ← GM\*; GP ← GP\*;

senão fim

fimse

fimse

fimrepete

fim.

Figura F.1 - Procedimento para a formação de células de produção

**Procedimento CalcularMatrizDissemelhanças**

Parâmetros de entrada: M, A

Parâmetro de saída: D

para (i=1 até M)

$$\text{para (j=1 até M e i}\neq\text{j)} \quad D[i][j] \leftarrow \sum_{k=1}^P |A[i][k] - A[j][k]|$$

fimpara

fimpara

fim.

Figura F.2 - Procedimento para a determinação de matriz de dissemelhanças

**Procedimento CalcularVectorDistânciasMínimas**

Parâmetro de entrada: D

Parâmetro de saída: DMIN

para (j=1 até M)

DMMIN[j]=∞,

para (i=1 até i=M e i≠j)

se (D[i][j]&lt;DMMIN[j]) D[i][j]=DMMIN[j];

fimse

fimpara

fimpara

fim.

Figura F.3 - Procedimento para a determinação do vector de dissemelhanças mínimas

**Procedimento CalcularMCNO**

Parâmetros de entrada: M, D, DMIN e {MA}

Parâmetro de saída: MCNO

```

para (i=1 até i=M)
  MCNO[i]=0;
  se (i∉{MA})
    para (j=1 até j=M)
      se (j∉{MA} e D[j][i]=DMIN[j]) MCNO[i]=MCNO[i]+1
    fimse
  fimpara
fimse
fimpara
fim.

```

Figura F.4 - Procedimento para o cálculo do vector MCNO

**Procedimento DeterminaMáquinaNuclear**

Parâmetros de entrada: M, MCNO, DMIN e MN

Parâmetro de saída: n - máquina nuclear da célula seguinte

```

para (i=1 até M)
  /* Calcula limites inferiores */
  se (MCNO[i]=0) LB[i]←-∞;
  senão

$$LB[i] = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i \\ MCNO[j] \neq 0}}^M DMIN[j] - \sum_{j \in \{MA\}} DMIN[j] - DMIN[i]$$

  fimse
fimpara
/* Selecciona-se como máquina nuclear a que tem menor valor de LB ou, em */
/* caso de empate, a com maior valor de MCNO */
n ← { n: LB[n] = Mini=1, ..., M {LB[i]} } ou, em caso de empate,

n ← { n: MCNO[n] = Minj: LB[j] = Mini=1, ..., M {LB[i]} {MCNO[j]} }
fim.

```

Figura F.5 - Procedimento para a determinação de máquinas nucleares

**Procedimento FormarCélula**

Parâmetros de entrada: M, {MA}, DMIN, D, GM\* [p], n

Parâmetros de saída: GM\* [p], {MA}

/\* Uma máquina disponível ( $i \notin MA$ ) é afectada à célula p se tem distância \*/  
 /\* mínima à máquina nuclear dessa célula e vice-versa. \*/

para (i=1 até M e  $i \notin MA$ )

se (DMIN[i]=D[i][n] e DMIN[n]=D[n][i])

GM\* [p] ← GM\* [p] ∪ i;

{MA} ← {MA} ∪ i;

fimse

fimpara

fim.

Figura F.6 - Procedimento para a formação inicial das células

**Procedimento CompletarFormaçãoDeCélula**

Parâmetros de entrada: {MA}, GM\* , p, D

Parâmetros de saída: GM\* [p], {MA}

/\* As máquinas ainda disponíveis ( $i \notin MA$ ) são afectadas à célula com a \*/  
 /\* qual a soma das distâncias entre i e as máquinas dessa célula é mínima ou, \*/  
 /\* em caso de empate, à célula com menor número de máquinas \*/  
 repete ( $\forall i \notin MA$ )

$$p \leftarrow \left\{ p: \sum_{j \in GM^*[p]} D[i][j] = \text{Min}_{k=1, \dots, \#GM^*} \left\{ \sum_{j \in GM^*[k]} D[i][j] \right\} \right\} \text{ ou, em caso de empate,}$$

$$p \leftarrow \left\{ p: \#GM^*[p] = \text{Min}_{k=1, \dots, \#GM^*} \left\{ \#GM^*[k] \right\} \right\}$$

GM\* [p] ← GM\* [p] ∪ i;

{MA} ← {MA} ∪ i;

fimrepete

fim.

Figura F.7 - Procedimento para completar a formação inicial das células

**Procedimento AfectaComponentes(GM,A,P)**

Parâmetros de entrada: GM, A e P

Parâmetro de saída: GP e GM

ind ← Falso

/\* Cada componente é afectado à célula que contem o maior número de \*/  
 /\* máquinas que o processam ou, em caso de empate, à célula com menor \*/  
 /\* número de máquinas \*/

para (k=1 até P)

$$p \leftarrow \left\{ p: \sum_{j \in GM[p]} A[j][k] = \text{Min}_{i=1, \dots, \#GM} \left\{ \sum_{j \in GM[i]} A[j][k] \right\} \right\} \text{ ou, em caso de empate,}$$

$$p \leftarrow \left\{ p: \#GM[p] = \text{Min}_{i=1, \dots, \#GM} \{ \#GM[i] \} \right\}$$

GP[p] ← GP[p] ∪ k

fimpara

/\* Se uma célula tem sómente um componente, as máquinas dessa célula são \*/  
 /\* reafectadas à célula com a qual têm menor distância média. O número de \*/  
 /\* células é reajustado e a afectação de componentes é refeita \*/

para (i=1 até #GP)

se (#GP[i]=1)

ind ← Verdadeiro

repete (∀j ∈ GM[i])

$$p \leftarrow \left\{ p: \frac{|\{j \in GM[p]\}|}{\#GM[p]} = \text{Min}_{\substack{k=1, \dots, \#GM \\ k \neq i}} \left\{ \frac{|\{j \in GM[k]\}|}{\#GM[k]} \right\} \right\}$$

GM[p] ← GM[p] ∪ j

fimrepete

fimse

fimpara

se (ind)

GP ← AfectaComponentes(GM,A,P)

fimse

fim.

Figura F.8 - Procedimento para a afectação de componentes a células

**Procedimento AfectaMáquinas(GP,A,M)**

Parâmetros de entrada: GP, A e M

Parâmetro de saída: GP e GM

/\* Cada equipamento é afectado à célula que contém o maior número de \*/  
 /\* componentes que processa ou, em caso de empate, à célula com menor \*/  
 /\* número de componentes. \*/  
 para (j=1 até M)

$$p \leftarrow \left\{ p: \sum_{k \in GP[p]} A[j][k] = \underset{i=1, \dots, \#GP}{\text{Min}} \left\{ \sum_{k \in GP[i]} A[j][k] \right\} \right\} \text{ ou, em caso de empate,}$$

$$p \leftarrow \left\{ p: \#GP[p] = \underset{i=1, \dots, \#GP}{\text{Min}} \{ \#GP[i] \} \right\}$$

GM[p] ← GM[p] ∪ j

fimpara

/\* Se uma célula tem sómente um equipamento, este é reafectado à célula com a \*/  
 /\* a qual tem menor distância média, os componentes são reafectados, as \*/  
 /\* máquinas reafectadas e o número de células é reajustado \*/

ind ← Falso

para (i=1 até #GM)

se (#GM[i]=1)

ind ← Verdadeiro

$$p \leftarrow \left\{ p: \frac{\sum_{j \in GM[p]} D[j][k]}{\#GM[p]} = \underset{\substack{l=1, \dots, \#GM \\ l \neq i}}{\text{Min}} \left\{ \frac{\sum_{k \in GM[l]} D[j][k]}{\#GM[l]} \right\} \right\}$$

GM[p] ← GM[p] ∪ GM[i]

fimse

fimpara

se (ind)

GP ← AfectaComponentes(GP,A,M);

GM ← AfectaMáquinas(GM,A,M);

fimse

fim.

Figura F.9 - Procedimento para a afectação de máquinas a células

**Procedimento CalculaEficácia(M, P, GM, GP, A)**

Parâmetros de entrada: M, P, GM, GP e A

Parâmetro de saída: eff

```

nones=0;
para (i=1 até i=M)
  para (j=1 até i=P)
    nones=nones+A[j][i];
  fimpara;
fimpara
blanks=0;
excep=0,
para (i=1 até i=#GM)
  para (j=1 até j=#GM[i])
    para (k=1 até k=#GP)
      para (l=1 até l=#GP[k])
        se (A[GM[j]][GP[l]]=0)
          blanks=blanks+1;
        senão
          excep=excep+1;
      fimse
    fimpara
  fimpara
fimpara
excep=nones-excep;
eff=(nones-excep)/(nones+((1.0/quoc)*blanks))
fim.

```

Figura F.10 - Procedimento para o cálculo da medida de eficácia do agrupamento

# Apêndice G

---

## Descrição detalhada do algoritmo de redução do fluxo intercelular

Nas Figuras G.1 a G.7 apresenta-se o algoritmo para o problema da formação de células de produção descrito na secção 6.5.2. A seguinte notação é utilizada:

- $M$  - número de máquinas,
- $P$  - número de componentes,
- $F[1...M][1...M]$  - matriz de fluxos entre máquinas,
- $A[1...M][1...P]$  - matriz máquinas-componentes, em que cada elemento  $(i,j)$  corresponde ao número de operações que a máquina  $i$  efectua no componente  $j$ ,
- $NComp[1...M]$  - vector que contém o número de componentes processados em cada máquina,
- $NOper[1...P]$  - vector que contém os índices dos componentes na matriz de incidência, ordenados por ordem decrescente do número de operações envolvidas no seu processamento e, em caso de empate, pelo seu índice na matriz de incidência,
- $TF[1...M]$  - vector que contém o fluxo total que passa por cada máquina,
- $MaxCell$  - número máximo de células,
- $MaxMaq$  - número máximo de máquinas por célula,
- $VRFD$  - limite inferior desejável para o valor relativo do fluxo desejável entre uma máquina e uma família de máquinas.
- $\{MNA\}$  - conjunto de máquinas não afectadas a uma célula de produção.



- $CM[MaxCell][*]$  - matriz células-máquinas. O número de linhas da matriz é igual ao número máximo de células e o número de colunas é variável.
- $GM$  - vector de comprimento variável, cujo comprimento em cada instante é  $\#GM$  e corresponde ao número de células criadas. Cada elemento desse vector,  $GM[i]$  ( $i=1, \dots, \#GM$ ), contém a lista das  $\#GM[i]$  máquinas que integram a célula  $i$ ,
- $GP$  - vector de comprimento variável definido de modo semelhante a  $GM$ , mas relativo às famílias de componentes,

### Procedimento Okogbaa-Chen-Changchit-Shell

Parâmetros de entrada:  $M, P, A[1\dots M][1\dots P], F[1\dots M][1\dots M], NComp, NOper, TF, MaxCell, MaxMaq$  e  $VRFD$

Parâmetros de saída:  $GM[1\dots \#GM]$  e  $GP[1\dots \#GP]$

$\{MNA\} \leftarrow \emptyset;$

para ( $i=1$  até  $M$ )

$$TF[i] = \sum_{j=1}^M F[i][j]$$

fimpara;

para ( $i=1$  até  $M$ )

$\{MNA\} \leftarrow \{MNA\} \cup i$

fimpara;

$GM = \text{DeterminaMáquinasNucleares}(MNA, M, P, MaxCell, F, TF, NComp);$

/\* Ver Figura G.2 \*/

$GM = \text{AfectaçãoDeMáquinasACélulas}(GM, VRFD, MaxCell, MaxMaq,$

$F, TF, MNA);$  /\* Ver Figura G3 \*/

enquanto ( $\{MNA\} \neq \emptyset$ ) faz

$CM = \text{CriaMatrizCélulasMáquinas}(GM, MaxCell, MaxMaq, F, TF, MNA)$

/\* Ver Figura G4 \*/

$GM = \text{AfectaçãoDeMáquinasNãoSolicitadas}(GM, MaxCell, MaxMaq,$

$CM, MNA)$  /\* Ver Figura G7 \*/

fimfaz

$GM = \text{MelhoramentoDaSolução}(GM, M, MaxCell, MaxMaq, VRFD, F, TF)$

/\* Ver Figura G5 \*/

$GP = \text{AfectaComponentes}(P, MaxCell, GM, NOper, NComp)$  /\* Ver Figura G.6 \*/

fim.

Figura G.1 - Procedimento para a formação de células de produção

**Procedimento DeterminaMáquinasNucleares**

Parâmetros de entrada: M, P, MaxCell, F, TF, NComp

Parâmetros de saída: MNA, GM

```

GM[1] ← {m: Maxm=1,...,M {Noper[m]}}; /* m é a máquina que processa maior número
{MNA} ← {MNA} \ m de operações */
cell ← 1; /* variável auxiliar que regista o número de células criadas */
enquanto (cell ≤ MaxCell) faz
  mimf ← ∞;
  para (i ∈ {MNA})
    soma ← 0;
    para (j = 1 até j = cell)
      para (k ∈ GM[j])
        soma ← soma + F[k][i]
      fimpara;
    fimpara;
    se (soma < mimf)
      mimf ← soma / TF[i];
      maq ← i;
    fimse
    se (soma = mimf)
      se (NComp[i] > NComp[maq])
        maq ← i;
      fimse
    fimse
  fimse
  cell ← cell + 1;
  GM[cell] ← maq;
  {MNA} ← {MNA} \ maq;
fimfaz;
fim.

```

Figura G.2- Procedimento para a determinação das máquinas nucleares

**Procedimento AfecçãoDeMáquinasACélulas**

Parâmetros de entrada: VRFD, MaxCell, MaxMaq, F, TF

Parâmetros de saída: GM, MNA

para ( $i \in \{MNA\}$ )

max ← 0;

para ( $j=1$  até  $j \leq \text{MaxCell}$ )se ( $\#G[j] < \text{MaxMaq}$ )
$$m \leftarrow \left\{ k: \text{Max}_{k \in G[j]} \{F[k][i]\} \right\};$$

/\* m é a máquina da célula j com a qual a máquina i tem maior fluxo \*/

se ( $\text{max} < F[m][i]/TF[i]$ )max ←  $F[m][i]/TF[i]$ ;

cmax ← j;

/\* cmax é a célula que contém a máquina com a qual a máquina i tem maior fluxo \*/

fimse;

fimse;

fimpara;

se ( $\text{max} > \text{VRFD}$ ) $\{MNA\} \leftarrow \{MNA\} \setminus \text{maq}$ ; $GM[\text{cmax}] \leftarrow GM[\text{cmax}] \cup m$ ;

fimse;

fimpara;

fim.

Figura G3 - Procedimento para afecção de máquinas a células

**Procedimento CriaMatrizCélulasMáquinas**

Parâmetros de entrada: GM, MaxCell, MaxMaq, F, TF, MNA

Parâmetro de saída: CM

para ( $i \in \{MNA\}$ )para ( $j=1$  até  $j \leq \text{MaxCell}$ )se ( $\#G[j] < \text{MaxMaq}$ )
$$C[j][i] \leftarrow \frac{\sum_{k \in G[j]} F[i][k]}{TF[i]};$$

fimse;

fimpara;

fimpara;

fim.

Figura G4 - Procedimento para criação da matriz células-máquinas

**Procedimento MelhoramentoDaSolução**

Parâmetros de entrada: GM, M, MaxCell, MaxMaq, F, TF

Parâmetro de saída: GM

repete

min←-∞;

/\* Célula (j) é um procedimento que determina o índice da célula à qual \*/

/\* se encontra afectada a máquina j \*/

para (j=1 até M)

$$\text{ICFR}[j] = \frac{\sum_{\substack{i \in \text{Célula}(j) \\ i \neq j}} F[i][j]}{\text{TF}[i]}$$

se (ICFR[j]&lt;min)

min←ICFR[j];

mmin←j;

fimse;

fimpara

se (min&lt;VFRD)

/\* A máquina mmin é retirada da célula respectiva \*/

G[Célula(mmin)]←G[Célula(mmin)]\mmin;

/\* A célula não completa com a qual a máquina mmin tem o maior valor \*/

/\* relativo de fluxo é determinada \*/

max←0;

para (i=1 até MaxCell)

se (i≠Célula(mmin) e #G[i]&lt;MaxMaq)

soma←0;

para (j∈G[i])

soma←soma+F[i][j]/TF[i];

fimpara

se (soma&gt;max)

max=soma;

cmax=i;

fimse

fimse

fimpara

G[cmax]←G[cmax]Ummin;

fimse

até (min&lt;VFRD);

fim.

Figura G5 - Procedimento para melhoramento da solução inicial

**Procedimento AfectaComponentes**

Parâmetros de entrada: P, MaxCell, GM, NOper, NComp

Parâmetro de saída: GP

para (i=1 até P)

max←0;

min←∞;

para (j=1 até MaxCell)

GP[j]←∅;

se (#GM[j]≠0)

soma1←0;

soma2←0;

para (k∈G[j])

soma1←soma1+A[k][i];

soma2←soma2+NComp[k];

fimpara;

se (soma1&gt;max)

max←soma1;

cmax←j;

fimse

se (soma1=max e soma2&lt;min)

cmax←j;

min←soma2;

fimse;

fimse;

fimpara;

GP[cmax]←GP[cmax]∪i;

fimpara;

fim.

Figura G.6 - Procedimento para a formação de famílias de componentes

**Procedimento AfecçãoDeMáquinasNãoAfectadas**

Parâmetros de entrada: GM, MaxCell, MaxMaq, CM, MNA

Parâmetro de saída: GM, MNA

```
/* O elemento da matriz células-máquinas com valor mais elevado (k, l) é */
/* selecionado e faz-se a afecção máquina-célula correspondente */
```

$$(k, l) \leftarrow \left\{ (i, j) : \underset{\substack{i \in \text{MNA} \\ j=1, \dots, \text{MaxCell} \\ G[j] < \text{MaxMaq}}}{\text{Max}}(\text{CM}[i][j]) \right\};$$

 $\{\text{MNA}\} \leftarrow \{\text{MNA}\} \cup i;$  $\text{GM}[\text{cmax}] \leftarrow \text{GM}[k] \cup l;$ 

fim.

Figura G7 - Procedimento para afecção de máquinas ainda não afectadas