José Hamilton Chaves Gorgulho Júnior

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS
ARRANJOS FÍSICOS DISTRIBUÍDOS EM
AMBIENTE DE ROTEAMENTO DE
TAREFAS COM FLEXIBILIDADE DE
SEQÜÊNCIA DE FABRICAÇÃO**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Vila Gonçalves Filho

São Carlos – SP
Fevereiro de 2007

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

G667a Gorgulho Júnior, José Hamilton Chaves
Análise do desempenho dos arranjos físicos
distribuídos em ambiente de roteamento de tarefas com
flexibilidade de seqüência de fabricação / José Hamilton
Chaves Gorgulho Júnior ; orientador Eduardo Vila
Gonçalves Filho. -- São Carlos, 2007.

Tese (Doutorado-Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Manufatura) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São
Paulo, 2007.

1. Arranjo físico distribuído. 2. Células fractais. 3.
Roteamento de tarefas. 4. Simulação. 5. Flexibilidade de
seqüência. 6. Desempenho. I. Título.

A minha esposa Valéria Cristina e aos meus filhos Nicolás Henrique e Guilherme Augusto, pelos momentos que não pudemos passar juntos. A meu pai José Hamilton e minha mãe Maria Aparecida pela forma como me educaram.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Eduardo Vila Gonçalves Filho, por toda dedicação e atenção oferecidas durante a orientação de meu trabalho.

À Escola de Engenharia de São Carlos pela oportunidade de realização do curso de doutorado no Departamento de Mecânica e aos seus professores com quem tive o prazer de aprender: Glauco Augusto de Paula Caurin, Eduardo Vila Gonçalves Filho, Reginaldo Teixeira Coelho (Departamento de Produção), Oswaldo Luís Agostinho, Ricardo Yanamasu, Arthur José Vieira Porto e Ruth de Gouvêa Duarte (Departamento de Hidráulica e Saneamento).

À UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá) que permitiu meu afastamento em tempo integral para completa dedicação às atividades de pós-graduação.

Aos meus colegas do Instituto de Engenharia de Produção e Gestão (IEPG) da UNIFEI pelo apoio oferecido durante o período de afastamento destacando os professores Luiz Gonzaga Mariano e João Batista Turrioni (bem como sua esposa Ana Maria Silveira Turrioni).

Às pessoas que tive o prazer de conhecer durante minha passagem pela EESC-USP: Ana Rita Tiradentes Terra Argoud, Andréa Ribari Yoshizawa da Silva, Antônio Carlos Lima de Santana, Antônio “Savi”, Elizabeth Maria A. Alexandre (secretária do Laboratório de Simulação), Creusa Sayuri Tahara, Fábio Viana Perfetto, Heleno Murilo Campeão Vale, Heráclito Lopes Jaguaribe Pontes, Hilano José Rocha de Carvalho, João Gilberto Zalla Filho, Mamoro Carlos Yamada, Marcelo Ferreira Batista, Marcos Roberto Fortulan, Queiroz Benega, Shih Yung Chin, Silmara Aparecida Nonato e Wellington Carlos Lopes.

À Equipe LigDoc (Adriana Coscia Perez Gomes, Elena Palloni Gonçalves, Marielza Roma, Gertrud Isabel Bosbach Romanelli, Diego Talarico e Elenise Araújo) pelos artigos e teses de difícil obtenção pelos meios convencionais.

À Paulo Mohallem Guimarães, Maristela Assis Coura Gorgulho e Carlos Henrique Pereira Mello pela ajuda com o inglês.

Aos meus familiares pelo apoio total e integral.

“Viver em um mundo mental de certos e errados absolutos pode levar a imaginar que todas as teorias são erradas. O que acontece na verdade é que uma vez que os cientistas tomam um bom conceito, eles o refinam gradualmente e o estendem com sutileza crescente à medida que seus instrumentos se aprimoram. As teorias não são erradas, são incompletas. Mesmo quando uma nova teoria parece representar uma revolução, ela geralmente surge de pequenos refinamentos.”

Isaac Asimov (Skeptical Inquirer, v.14, n.1, 1989, p. 35-44)

RESUMO

GORGULHO JÚNIOR, J. H. C. (2007). *Análise do desempenho dos arranjos físicos distribuídos em ambiente de roteamento de tarefas com flexibilidade de seqüência de fabricação*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

Este trabalho analisou o desempenho obtido pelos arranjos físicos distribuídos levando em consideração a flexibilidade de seqüenciamento das operações das peças. Foram comparados os arranjos físicos funcional, parcialmente distribuído, aleatoriamente distribuído e maximamente distribuído em três tamanhos (20, 40 e 80 máquinas), em duas configurações (equilibrado e desequilibrado) e usando dois métodos de roteamento (rígido e flexível). Para obtenção do arranjo físico maximamente distribuído foi desenvolvido um algoritmo genético e uma metodologia heurística de baixo impacto computacional denominada ALVO. A flexibilidade de seqüenciamento das operações foi baseada em relações de precedência e um procedimento automático para criação de peças com essas características foi desenvolvido. Os métodos e procedimentos propostos foram computacionalmente implementados em Visual Basic 6. Foram elaborados 152 arranjos físicos para cada tamanho e configuração sendo 50 funcionais, 50 parcialmente distribuídos, 50 aleatoriamente distribuídos e 2 maximamente distribuídos (um pelo algoritmo ALVO e outro pelo algoritmo genético). As simulações rotearam, para cada tipo de arranjo físico, 30 conjuntos com 150 peças cada um para obter o tempo total de programação (makespan) e a distância total percorrida. Os resultados mostraram que o desempenho do arranjo físico maximamente distribuído é sensivelmente superior ao parcialmente distribuído, mostrando que a desagregação completa dos departamentos é altamente vantajosa. As análises também mostraram que os arranjos físicos equilibrados, quando maximamente distribuídos, formam células fractais.

Palavras-chave: arranjo físico distribuído; células fractais; roteamento de tarefas; simulação; flexibilidade de seqüência, desempenho.

ABSTRACT

GORGULHO JÚNIOR, J. H. C. (2007). *Performance analysis of the distributed layouts in routing environment with manufacture sequence flexibility*. Thesis (Doctoral) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

This work analyzes the performance obtained for the distributed layouts when the task routing environment takes in consideration the operations sequence flexibility of the parts.

The functional, partially distributed, random distributed and maximally distributed layouts were compared in three sizes (20, 40 and 80 machines), in two configurations (balanced and unbalanced) and using two routing methods (rigid and flexible).

For obtainment of the maximally distributed layout a genetic algorithm and a heuristically methodology of low computational impact was developed (ALVO algorithm). The sequence flexibility of the operations is based on precedence diagram and an automatic procedure for creation of parts with these characteristics was developed. The proposed methods and procedures had been implemented in Visual Basic 6. Have been builds 152 layouts for each size and configuration being 50 functional, 50 partially distributed, 50 random distributed and 2 maximally distributed (one by ALVO algorithm and another by genetic algorithm). The simulations routing, for each layout type, 30 groups with 150 parts each to obtain the makespan and the traveled total distance.

The results showed that performance of the maximally distributed layout has a performance slightly superior to the partially layout, showing that the complete disaggregation of the departments is highly advantageous. The analysis also showed that balanced layouts, when maximally distributed, forms fractal cells.

Keywords: distributed layout; fractal cells; job routing; simulation; sequence flexibility; performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa.....	9
Figura 3.1 - Três células virtuais.....	14
Figura 3.2- Os seis tipos de módulos.....	16
Figura 3.3 - Exemplo de um fractal.....	17
Figura 3.4 - Exemplo de arranjo fractal.....	18
Figura 3.5 - Arranjos funcional e distribuído	19
Figura 3.6 - Arranjo parcialmente distribuído.....	20
Figura 3.7 - Diferentes caminhos retilineares entre dois pontos	22
Figura 3.8 – Arranjos físicos distribuído e funcional	24
Figura 3.9 - Média das distâncias mínimas entre estações	24
Figura 3.10 - Procedimento de cálculo do índice.....	25
Figura 3.11 - Dez melhores rotas para a seqüência 8-12-9-13.....	26
Figura 3.12 - Resultado do algoritmo <i>center</i>	27
Figura 3.13 - Ilustração do conceito <i>target</i>	28
Figura 3.14 - Curva de preenchimento para arranjo com 30 máquinas.....	35
Figura 3.15 - Exemplo de seqüência de preenchimento.....	38
Figura 3.16 - Diferentes graus de desagregação dos departamentos	40
Figura 3.17 - Representação de instalação de usinagem com REs	45
Figura 3.18 - Cálculo da pontuação de um arranjo.....	46
Figura 3.19 - Pontuação para o arranjo distribuído ótimo.....	47
Figura 3.20 - Arranjos funcional e distribuído	48
Figura 4.1 - Relacionamento entre as flexibilidades	56
Figura 4.2 - Hierarquia entre flexibilidades	56
Figura 4.3 - Representação de processos por grafos.....	59
Figura 4.4 - Flexibilidade de processo	59
Figura 4.5 - Grafo representando o processo de uma peça	60
Figura 4.6 - Mudança de nível de uma operação	62
Figura 4.7 - Exemplo de diagrama de precedência com duas raízes	63
Figura 5.1 - Gráfico de Gantt para a seqüência T3-T1 (Passo 3).....	71

Figura 5.2 - Gráfico de Gantt para a seqüência T1-T3 (Passo 3)	71
Figura 5.3 - Gráficos de Gantt para o passo 4	72
Figura 5.4 - Árvore de rotas	73
Figura 5.5 - Arranjo físico.....	73
Figura 5.6 - Gráfico de Gantt e matriz de alocação	75
Figura 5.7 - Gráfico de Gantt e matriz de alocação com 4 peças	77
Figura 5.8 - Gráfico de Gantt e matriz de alocação (P1 flexível)	78
Figura 5.9 - Gráfico de Gantt e matriz de alocação após alocar a peça P2.....	79
Figura 5.10 - Resultado da alocação das 4 peças com flexibilidade total	79
 Figura 6.1 - Fluxograma do procedimento experimental.....	82
Figura 6.2 - Quatro modelos de precedência para peças com 6 operações.....	85
Figura 6.3 - Fluxograma de funcionamento do gerador automático de peças ..	86
Figura 6.4 - Procedimento de geração de arranjo físico funcional	88
Figura 6.5 - Procedimento para gerar arranjo físico parcialmente distribuído...	89
Figura 6.6 - Curva de preenchimento para o exemplo.....	90
Figura 6.7 - Arranjo físico parcialmente distribuído do exemplo	92
Figura 6.8 - Geração de arranjo físico aleatoriamente distribuído	93
Figura 6.9 - Fluxograma de funcionamento do algoritmo ALVO	94
Figura 6.10 - Busca por uma posição livre (etapa 1)	95
Figura 6.11 - Busca por uma posição livre (etapa 2)	96
Figura 6.12 - Busca por uma posição livre (etapa 3)	96
Figura 6.13 - Busca por uma posição livre (etapa 4)	97
Figura 6.14 - Posição ideal para 1 máquina	98
Figura 6.15 - Quatro disposições ideais para 2 máquinas	98
Figura 6.16 - Posições calculadas para 17 máquinas.....	100
Figura 6.17 - Exemplo de um elemento da população.....	101
Figura 6.18 - Roleta após manipulação dos índices	104
Figura 6.19 - Fluxograma detalhado do algoritmo genético implementado	105
Figura 6.20 - Roteamento de um conjunto de peças em um arranjo físico.....	106
Figura 6.21 - Procedimento de busca pela melhor rota no arranjo físico.....	107
Figura 6.22 - Busca pelo primeiro instante disponível para alocação	109
Figura 6.23 - Avaliação dos intervalos entre alocações existentes.....	112
Figura 6.24 - Exemplos de satisfação de três condições de avaliação.....	113

Figura 6.25 - Situações onde a alocação é possível	114
Figura 7.1 - Configuração do símbolo decimal	117
Figura 7.2 - Janela inicial do programa.....	118
Figura 7.3 - Informação ao término do processo	119
Figura 7.4 - Alguns arquivos de um conjunto de peças	119
Figura 7.5 - Número de operações de cada peça.....	120
Figura 7.6 - Número de peças geradas para cada número de operações.....	121
Figura 7.7 - Número de vezes que cada processo foi atribuído.....	121
Figura 7.8 - Dados das peças do conjunto gerado	122
Figura 7.9 - Visualização gráfica da peça P001	123
Figura 7.10 - Número de atribuições de cada processo	124
Figura 7.11 - Informações de um arranjo físico	125
Figura 7.12 - Número de vezes que cada processo foi atribuído.....	126
Figura 7.13 - Número de vezes que cada processo foi atribuído (método 2) .	126
Figura 7.14 - Entrada de dados	128
Figura 7.15 - Menu com opções de arranjo físico.....	129
Figura 7.16 - Criação manual de arranjo físico	129
Figura 7.17 - Seleção do número de faixas	130
Figura 7.18 - Exemplo de arranjo físico funcional gerado.....	130
Figura 7.19 - Informações sobre a geração do arranjo.....	130
Figura 7.20 - Informando o divisor de departamentos	131
Figura 7.21 - Exemplo de arranjo físico parcialmente distribuído	131
Figura 7.22 - Exemplo de arranjo físico aleatoriamente distribuído	132
Figura 7.23 - Exemplo de arranjo físico maximamente distribuído	132
Figura 7.24 - Janela de criação de múltiplos arranjos físicos	133
Figura 7.25 - Grau de distribuição na geração de múltiplos arranjos.....	133
Figura 7.26 - Posição das máquinas de acordo com o processo	134
Figura 7.27 - Evolução do grau de distribuição.....	135
Figura 7.28 - Configurações do gráfico do algoritmo genético.....	136
Figura 7.29 - Visualização do gráfico de algoritmo genético.....	136
Figura 7.30 - Dados para arranjo com 1296 máquinas.....	138
Figura 7.31 - Tempo estimado para maximizar arranjo com 1296 máquinas .	138
Figura 7.32 - Arranjo físico dos dados do Quadro 7.4	141

Figura 7.33 - Seleção de arranjos físicos.....	142
Figura 7.34 - Modo de visualização com destaque.....	143
Figura 7.35 - Exemplo de falha em um arranjo físico.....	144
Figura 7.36 - Falta de conjunto de peças.....	144
Figura 7.37 - Preparação para verificar peças.....	144
Figura 7.38 - Peça incompatível com o arranjo.....	145
Figura 7.39 - Seleção de arquivos de dados	146
Figura 7.40 - Evolução do processamento	153
Figura 7.41 - Gráfico de barras do makespan médio.....	154
Figura 7.42 - Gráfico com as diferenças destacadas.....	154
Figura 7.43 - Visualizando graus de distribuição (arquivos GDD).....	155
Figura 7.44 - Visualizando arquivos GRA (gráfico de barras).....	156
Figura 7.45 - Visualizando arquivos GRA (dados)	157
Figura 7.46 - Visualização de arquivos SCH (Gráfico de Gantt).....	158
Figura 7.47 - Detalhe do Gráfico de Gantt	158
Figura 7.48 - Visualização destacada da peça P001	159
Figura 7.49 - Comparando arquivos SCH.....	160
Figura 7.50 - Distâncias individuais	161
Figura 7.51 - Makespan individual	161
Figura 7.52 - Diferença entre tempos	161
 Figura 8.1 - AFDP maximamente distribuídos	 165
Figura 8.2 - Ocorrência de cada processo (conjuntos de peça 1 e 20).....	166
Figura 8.3 - AFDM maximamente distribuídos.....	171
Figura 8.4 - Ocorrência de cada processo (conjuntos de peças 1 e 5).....	172
Figura 8.5 - AFDG maximamente distribuídos.....	177
Figura 8.6 - Ocorrência de cada processo (conjuntos de peças 1 e 7).....	178
Figura 8.7 - AFEP maximamente distribuídos.....	183
Figura 8.8 - Ocorrência de cada processo (conjunto de peças 1, 10 e 20).....	184
Figura 8.9 - AFEM maximamente distribuídos	189
Figura 8.10 - Ocorrência de cada processo (conjunto de peças 1, 10 e 20)...	190
Figura 8.11 - AFEG maximamente distribuídos	195
Figura 8.12 - Ocorrência de cada processo (conjunto de peças 1 e 15).....	196
Figura 8.13 - Exemplos de arranjos físicos.....	202

Figura 8.14 - Ocorrência de cada processo (conjuntos de peças 1 e 15).....	203
Figura 8.15 - AFEP maximamente distribuído (AG).....	208
Figura 8.16 - AFEM maximamente distribuído (AG)	208
Figura 8.17 - AFEG maximamente distribuído (AG)	209
Figura 8.18 - Arranjo físico maximamente distribuído.....	209
Figura 8.19 - 2 processos com 8 máquinas (GDD= 1).....	210
Figura 8.20 - 4 processos com 4 máquinas (GDD= 3.25).....	210
Figura 8.21 - 8 processos com 2 máquinas (GDD= 11.75).....	211
Figura 8.22 - 2 processos com 18 máquinas (GDD= 1).....	211
Figura 8.23 - 4 processos com 9 máquinas (GDD= 3.166667).....	211
Figura 8.24 - 9 processos com 4 máquinas (GDD= 13.4444).....	212
Figura 8.25 - 18 processos com 2 máquinas (GDD= 42.38889).....	212
Figura 8.26 - 2 processos com 24 máquinas (GDD= 1).....	213
Figura 8.27 - 4 processos com 12 máquinas (GDD= 3.08333).....	214
Figura 8.28 - 6 processos com 8 máquinas (GDD= 6.583333).....	215
Figura 8.29 - 12 processos com 4 máquinas (GDD= 20.97917).....	215
Figura 8.30 - 24 processos com 2 máquinas (GDD= 66.16667).....	216
Figura 8.31 - AFDP maximamente distribuído (AG)	217
Figura 8.32 - AFDM maximamente distribuído (AG).....	217
Figura 8.33 - AFDG maximamente distribuído (AG)	217
Figura 8.34 - Arranjo físico 4x6 (GDD= 6.972221).....	218
Figura 8.35 - Arranjo físico 6x8 (GDD= 9.916666).....	218
Figura 8.36 - Arranjo físico 6x8 (GDD= 9.916666).....	219
 Figura 9.1 - Grau de distribuição médio (AFDP)	 221
Figura 9.2 - Gráfico referente ao teste de hipótese	222
Figura 9.3 - Comparação das distâncias percorridas (AFDP).....	224
Figura 9.4 - Comparação percentual (AFDP)	224
Figura 9.5 - Grau de distribuição médio (AFDM)	225
Figura 9.6 - Comparação das distâncias percorridas (AFDM)	227
Figura 9.7 - Comparação percentual (AFDM).....	227
Figura 9.8 - Grau de distribuição médio (AFDG)	228
Figura 9.9 - Comparação das distâncias percorridas (AFDG)	230
Figura 9.10 - Comparação percentual (AFDG)	230

Figura 9.11 - Grau de distribuição médio (AFEP)	231
Figura 9.12 - Comparação das distâncias percorridas (AFEP)	233
Figura 9.13 - Comparação percentual (AFEP).....	233
Figura 9.14 - Grau de distribuição médio (AFEM).....	234
Figura 9.15 - Comparação das distâncias percorridas (AFEM)	236
Figura 9.16 - Comparação percentual (AFEM)	236
Figura 9.17 - Grau de distribuição médio (AFEG).....	237
Figura 9.18 - Comparação das distâncias percorridas (AFEG).....	239
Figura 9.19 - Comparação percentual (AFEG)	239
Figura 9.20 - Grau de distribuição médio (Div)	240
Figura 9.21 - Comparação das distâncias percorridas (Div)	242
Figura 9.22 - Comparação percentual (Div)	242
Figura 9.23 - Melhoria percentual do makespan.....	243
Figura 9.24 - Melhoria percentual da distância percorrida	244
Figura 9.25 - Variação percentual das distâncias (AFD).....	244
Figura 9.26 - Variação percentual das distâncias (AFE).....	245
Figura 9.27 - Diferença percentual do GDD obtido pelo AG sobre o ALVO....	246
Figura 9.28 - Diferença percentual da distância percorrida (AG sobre ALVO).	247
Figura 9.29 - Três diferentes sementes fractais.....	249
Figura 9.30 - Comparação entre algoritmos genéticos	249
Figura 9.31 - Comparação entre algoritmos genéticos	250
Figura 9.32 - Arranjos físicos com GDD= 3.25	251
Figura 9.33 - Arranjos físicos com GDD= 1	251
 Figura A.1 - Arranjo físico posicional.	 283
Figura A.2 - Arranjo físico funcional	284
Figura A.3 - Distribuição do tempo de produção de uma peça	285
Figura A.4 - Arranjo físico em linha.....	286
Figura A.5 - Arranjo físico celular.....	288
 Figura B.1- Mapeamento e curva de Peano	 291
Figura B.2 - Curva de Peano com 6 divisões por lado.....	292
Figura B.3 - Curvas de Peano com 9 e 27 divisões nas faces.....	292

Figura B.4 - Curva de Peano <i>Switch-back Type</i> (Peano-S).....	293
Figura B.5 - Curva de Peano <i>Switch-back Type</i> (Peano-R).....	293
Figura B.6 - Curva de Peano <i>Meander Type</i> (Peano-M)	293
Figura B.7 - Criação da curva de preenchimento espacial de Hilbert	294
Figura B.8 - Criação da curva de preenchimento de Moore	294
Figura B.9 - Construção da curva de Sierpinski.....	295
Figura B.10 - Construção da curva modificada de Sierpinski	295
Figura B.11 - Construção da curva modificada de Sierpinski	295
Figura B.12 - Construção da curva de Hilbert em 3D	296
Figura B.13 - Tela do programa SFC.....	296
 Figura C.1 - Arranjo físico funcional com 4 processos e 9 máquinas	298
Figura C.2 - Janela com o resultado do cálculo	300
 Figura D.1 - Exemplo de grafo.....	302
Figura D.2 - Grafo exemplo	304
Figura D.3 - Grafo separado em níveis.....	305
Figura D.4 - Grafo referente à Tabela D.1	306
Figura D.5 - Implementação do Algoritmo 8	306
Figura D.6 - Exemplo com elementos numéricos	307
 Figura E.1 - Estrutura geral de um algoritmo genético	310
Figura E.2 - Arranjo físico funcional adotado para iniciar para o AG	311
Figura E.3 - Tela após a execução do algoritmo genético	312
Figura E.4 – Arranjo físico obtido pelo algoritmo genético.....	312
 Figura G.1 - Dimensões para 3 máquinas	328
Figura G.2 - Dimensões para 4 máquinas	328
Figura G.3 - Dimensões para 5 máquinas	329
Figura G.4 - Dimensões para 6 máquinas	329
Figura G.5 - Dimensões para 7 máquinas	329
Figura G.6 - Dimensões para 8 máquinas	330
Figura G.7 - Dimensões para 9 máquinas	330
Figura G.8 - Dimensões para 10 máquinas	330

Figura H.1 - Arranjo físico	332
Figura H.2 - Árvore de rotas.....	332
Figura H.3 - Gráfico de Gantt e matriz de alocação (rígido)	333
Figura H.4 – Gráfico de Gantt e matriz de alocação (flexibilidade)	336
Figura I.1 - Vetor P com o primeiro elemento	364
Figura I.2 - Vetor P antes e depois da primeira inserção do elemento B	365
Figura I.3 - Vetor P antes e depois da segunda inserção do elemento B	365
Figura I.4 - Inserções do elemento C na primeira origem	366
Figura I.5 - Últimas 3 inserções do elemento C	366
Figura I.6 - Passos para inserção de um quarto elemento	367
Figura I.7 - Tela do programa de permutação.....	368
Figura I.8 - Permutação dos elementos da Figura I.7	368
Figura I.9 - Teste de permutação com 10 elementos.....	369
Figura J.1 - Relações de precedência de uma peça.....	371
Figura J.2 - Fluxograma do gerador de seqüências.....	373
Figura J.3 - Tela do programa protótipo.....	374
Figura J.4 - Arquivos gerados para a peça da Figura J.1	375
Figura J.5 - Exemplo de Groover (1987, p.169).....	376
Figura J.6 - Tela com os dados do exemplo de Groover (1987, p.169)	376
Figura J.7 - Arquivos gerados para o exemplo de Groover (1987, p.169)	377
Figura K.1 - Arranjo físico	382
Figura K.2 - Gráfico de Gantt e matriz de alocação	382
Figura K.3 - Peças para arranjo com 15 processos	385
Figura K.4 - Organização dos dados de roteamento	386
Figura L.1 - Teste de hipótese (AFDP)	389
Figura L.2 - Teste de hipótese (AFDM).....	390
Figura L.3 - Teste de hipótese (AFDG).....	391
Figura L.4 - Teste de hipótese (AFEP)	392
Figura L.5 - Teste de hipótese (AFEM).....	393

Figura L.6 - Teste de hipótese (AFEG).....	394
Figura L.7 - Teste de hipótese	395

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Nomenclatura relacionada ao arranjo físico distribuído	20
Tabela 3.2 - Características das estações de trabalho	22
Tabela 3.3 - Dados para cada tipo de estação de trabalho	23
Tabela 3.4 - Probabilidade de ocorrência de cada nível de demanda	30
Tabela 3.5 - Probabilidade para diferentes combinações de demanda	30
Tabela 3.6 - Quantidade de peças para cada nível de demanda	30
Tabela 3.7 - Seqüências de manufatura das peças.....	31
Tabela 3.8 - Matriz de fluxo para a combinação de demanda AAAA.....	31
Tabela 3.9 - Fatores de simulação.....	36
Tabela 3.10 - Nível dos fatores dos casos observados	36
Tabela 3.11 - Dados dos experimentos de Benjaafar e Sheikhzadeh (2000) ...	37
Tabela 3.12 - Exemplo de distribuição de demanda para o Caso 2.....	37
Tabela 3.13 - Níveis de duplicação de departamentos	44
Tabela 3.14 - Características de alguns tipos de arranjo.....	50
 Tabela 4.1 - Matriz Peça x Máquina com flexibilidade	 57
Tabela 4.2 - Peças com processos flexíveis.....	58
Tabela 4.3 - Relações de precedência	60
Tabela 4.4 - Divisão do processo em níveis	61
 Tabela 5.1 - Dados de tempos de processamento	 70
Tabela 5.2 - Cálculo do <i>makespan</i> para a seqüência T3-T1	70
Tabela 5.3 - Cálculo do <i>makespan</i> para a seqüência T1-T3	70
Tabela 5.4 - Cálculo do <i>makespan</i> para a seqüência T2-T3-T1	71
Tabela 5.5 - Cálculo do <i>makespan</i> para a seqüência T3-T2-T1	71
Tabela 5.6 - Cálculo do <i>makespan</i> para a seqüência T3-T1-T2.....	72
 Tabela 6.1 - Máquinas do exemplo.....	 90
Tabela 6.2 - Cálculo da relação percentual entre os índices	104
 Tabela 7.1 - Espaço ocupado pelos arquivos	 152

Tabela 8.1 - Número de máquinas por processo (AFDP)	165
Tabela 8.2 - Grau de distribuição dos AFDP	165
Tabela 8.3 - Número de máquinas por processo (AFDM)	171
Tabela 8.4 - Grau de distribuição dos AFDM	171
Tabela 8.5 - Número de máquinas por processo (AFDG)	177
Tabela 8.6 - Grau de distribuição dos AFDG	177
Tabela 8.7 - Grau de distribuição dos AFEP	183
Tabela 8.8 - Grau de distribuição dos AFEM	189
Tabela 8.9 - Grau de distribuição dos AFEG	195
Tabela 8.10 - Grau de distribuição dos arranjos físicos	201
Tabela 9.1 - Redução percentual entre os graus de distribuição (AFDP)	221
Tabela 9.2 - Diferença percentual entre distâncias (AFDP - RR)	223
Tabela 9.3 - Diferença percentual entre distâncias (AFDP - RF)	223
Tabela 9.4 - Redução percentual da RF sobre a RR (AFDP)	223
Tabela 9.5 - Redução percentual entre os graus de distribuição (AFDM)	225
Tabela 9.6 - Diferença percentual entre distâncias (AFDM - RR)	226
Tabela 9.7 - Diferença percentual entre distâncias (AFDM - RF)	226
Tabela 9.8 - Redução percentual da RF sobre a RR (AFDM)	226
Tabela 9.9 - Redução percentual entre os graus de distribuição (AFDG)	228
Tabela 9.10 - Diferença percentual entre distâncias (AFDG - RR)	229
Tabela 9.11 - Diferença percentual entre distâncias (AFDG - RF)	229
Tabela 9.12 - Redução percentual da RF sobre a RR (AFDG)	229
Tabela 9.13 - Redução percentual entre os graus de distribuição (AFEP)	231
Tabela 9.14 - Diferença percentual entre distâncias (AFEP - RR)	232
Tabela 9.15 - Diferença percentual entre distâncias (AFEP - RF)	232
Tabela 9.16 - Redução percentual da RF sobre a RR (AFEP)	232
Tabela 9.17 - Redução percentual entre os graus de distribuição (AFEM)	234
Tabela 9.18 - Diferença percentual entre distâncias (AFEM - RR)	235
Tabela 9.19 - Diferença percentual entre distâncias (ADEM - RF)	235
Tabela 9.20 - Redução percentual da RF sobre a RR (AFEM)	235
Tabela 9.21 - Redução percentual entre os graus de distribuição (AFEG)	237
Tabela 9.22 - Diferença percentual entre distâncias (AFEG - RR)	238
Tabela 9.23 - Diferença percentual entre distâncias (AFEG - RF)	238

Tabela 9.24 - Redução percentual da RF sobre a RR (AFEG)	238
Tabela 9.25 - Redução percentual entre os graus de distribuição (Div)	240
Tabela 9.26 - Diferença percentual entre distâncias (Div - RR)	241
Tabela 9.27 - Diferença percentual entre distâncias (Div - RF)	241
Tabela 9.28 - Redução percentual da RF sobre a RR (Div)	241
Tabela 9.29 - Média das melhorias percentuais (AFD)	245
 Tabela 10.1 - Valores de melhoria para arranjos físicos equilibrados.....	254
 Tabela D.1 - Representação de grafo por precedências	305

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Algoritmo para gerar o arranjo mais flexível	31
Quadro 3.2 - Método heurístico	33
Quadro 3.3 - Procedimento para identificar o arranjo mais flexível	34
Quadro 3.4 - Algoritmo <i>Holonic Random</i> (HR).....	35
Quadro 3.5 - Matriz Máquinas x RE's	49
Quadro 4.1 - Seqüências de processamento possíveis.....	61
Quadro 4.2 - Novas seqüências de processamento	62
Quadro 5.1 - Análise do primeiro par de operações	74
Quadro 5.2 - Análise do segundo par de operações	74
Quadro 5.3 - Análise do último par de operações.....	75
Quadro 5.4 - Resumo da busca pela rota de menor distância percorrida.....	75
Quadro 5.5 - 24 possíveis seqüências (completamente flexível)	77
Quadro 5.6 - Resultado da análise de alocação para a peça P2.....	78
Quadro 6.1 - Conteúdo (comentado) do arquivo modelo para 6 operações.....	84
Quadro 6.2 - Disposições ideais para processos entre 3 e 10 máquinas	99
Quadro 6.3 - Cálculo das posições para mais de 10 máquinas.....	100
Quadro 6.4 - Pseudocódigo da varredura do arranjo físico	108
Quadro 6.5 - Pseudocódigo da contagem de NA	111
Quadro 7.1 - Exemplo de um arquivo de peça	123
Quadro 7.2 - Arquivo GAG (Gráfico de Algoritmo Genético)	137
Quadro 7.3 - Arquivo DPA (Dados Para Arranjo)	139
Quadro 7.4 - Arquivo ARR (ARRanjo)	140
Quadro 7.5 - Estrutura do arquivo Resumo	147
Quadro 7.6 - Estrutura do arquivo Alocação.....	148
Quadro 7.7 - Estrutura do arquivo Detalhado	149
Quadro 7.8 - Estrutura do arquivo de Gráficos	150
Quadro 7.9 - Estrutura do arquivo Gráficos_Gerais.....	151

Quadro 8.1 - Tempos no roteamento rígido (AFDP)	167
Quadro 8.2 - Distâncias no roteamento rígido (AFDP)	168
Quadro 8.3 - Tempos no roteamento flexível (AFDP)	169
Quadro 8.4 - Distâncias no roteamento flexível (AFDP)	170
Quadro 8.5 - Tempos no roteamento rígido (AFDM)	173
Quadro 8.6 - Distâncias no roteamento rígido (AFDM)	174
Quadro 8.7 - Tempos no roteamento flexível (AFDM)	175
Quadro 8.8 - Distâncias no roteamento flexível (AFDM)	176
Quadro 8.9 - Tempos no roteamento rígido (AFDG)	179
Quadro 8.10 - Distâncias no roteamento rígido (AFDG)	180
Quadro 8.11 - Tempos no roteamento flexível (AFDG)	181
Quadro 8.12 - Distâncias no roteamento flexível (AFDG)	182
Quadro 8.13 - Tempos no roteamento rígido (AFEP)	185
Quadro 8.14 - Distâncias no roteamento rígido (AFEP)	186
Quadro 8.15 - Tempos no roteamento flexível (AFEP)	187
Quadro 8.16 - Distâncias no roteamento flexível (AFEP)	188
Quadro 8.17 - Tempos no roteamento rígido (AFEM)	191
Quadro 8.18 - Distâncias no roteamento rígido (AFEM)	192
Quadro 8.19 - Tempos no roteamento flexível (AFEM)	193
Quadro 8.20 - Distâncias no roteamento flexível (AFEM)	194
Quadro 8.21 - Tempos no roteamento rígido (AFEG)	197
Quadro 8.22 - Distâncias no roteamento rígido (AFEG)	198
Quadro 8.23 - Tempos no roteamento flexível (AFEG)	199
Quadro 8.24 - Distâncias no roteamento flexível (AFEG)	200
Quadro 8.25 - Tempos no roteamento rígido	204
Quadro 8.26 - Distâncias no roteamento rígido	205
Quadro 8.27 - Tempos no roteamento flexível	206
Quadro 8.28 - Distâncias no roteamento flexível	207
 Quadro 9.1 - Dados para o teste de hipóteses	 222
 Quadro C.1 - Cálculo partindo do processo 1	 299
Quadro C.2 - Cálculo partindo do processo 2	299
Quadro C.3 - Cálculo partindo dos processos 3 e 4	300

Quadro D.1 - Algoritmo para determinação de níveis	304
Quadro F.1 - Relações de precedência para peças com 3 operações	314
Quadro F.2 - Relações de precedência para peças com 4 operações	315
Quadro F.3 - Relações de precedência para peças com 5 operações	316
Quadro F.4 - Relações de precedência para peças com 6 operações	317
Quadro F.5 - Relações de precedência para peças com 7 operações	318
Quadro F.6 - Relações de precedência para peças com 8 operações	319
Quadro F.7 - Relações de precedência para peças com 9 operações	320
Quadro F.8 - Relações de precedência para peças com 10 operações	321
Quadro F.9 - Relações de precedência para peças com 11 operações	322
Quadro F.10 - Relações de precedência para peças com 12 operações	323
Quadro F.11 - Relações de precedência para peças com 13 operações	324
Quadro F.12 - Relações de precedência para peças com 14 operações	325
Quadro F.13 - Relações de precedência para peças com 15 operações	326
Quadro I.1 - Pseudocódigo do gerador de permutações	364
Quadro J.1 - Permutações de cada nível.....	372
Quadro J.2 - Composição dos níveis 1 e 2.....	372
Quadro J.3 - Composições finais.....	372
Quadro J.4 - Composição dos níveis 1 e 2.....	378
Quadro J.5 - Dados das composições.....	378
Quadro K.1 - Arquivo SCH.....	383
Quadro K.2 - Dados das peças.....	385

LISTA DE ABREVIATURAS

AFD	Arranjo físico desequilibrado
AFDP	Arranjo físico desequilibrado pequeno
AFDM	Arranjo físico desequilibrado médio
AFDG	Arranjo físico desequilibrado grande
AFE	Arranjo físico equilibrado
AFEP	Arranjo físico equilibrado pequeno
AFEM	Arranjo físico equilibrado médio
AFEG	Arranjo físico equilibrado grande
AG	Algoritmo Genético
Amp	Amplitude (diferença entre os valores máximo e mínimo)
DP	Desvio padrão de um conjunto de dados
FFPP	Fully Flexible Process Plan (Plano de Processo Completamente Flexível)
FIFO	First In First Out (Primeiro que entra Primeiro que sai)
FGS	Form Generating Schema (Esquema de Geração de Forma)
GA	Genetic Algorithm
GDD	Grau de distribuição
Max	Valor máximo de um conjunto de dados
Méd	Valor médio de um conjunto de dados
Min	Valor mínimo de um conjunto de dados
RE	Resource Elements (Elementos de Recurso)
RF	Roteamento flexível
RR	Roteamento rígido
SA	Simulated Annealing (Têmpera ou Resfriamento Simulado)
SFC	Space Filling Curve (Curva de Preenchimento Espacial)
TPP	Traditional Process Plan (Plano de Processo Tradicional)

LISTA DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS COMPUTACIONAIS

Arranjo(L, C) Matriz que representa o arranjo físico

c Variável para contagem de colunas

C Número de colunas do arranjo físico

DI Duração de um Intervalo de tempo livre em uma máquina

DO Duração de uma Operação

FA Final da operação Anterior

i Variável para contagem

II(i) Instante de Início da operação i

IF(i) Instante de Finalização da operação i

IO Início da Operação

IP Início da Próxima operação

j Variável para contagem

L Número de linhas do arranjo físico

L Variável para contagem de linhas

MAII(NA) Matriz de Alocação – Instantes de Início das NA alocações

MAIF(NA) Matriz de Alocação – Instantes de Finalização das NA alocações

N Número de máquinas do processo i

NA Número de alocações em uma máquina

NC Número de colunas de um arranjo físico

ND Número de departamentos

NL Número de linhas de um arranjo físico

NMD(i) Número de máquinas do departamento i

NMP(i) Número de máquinas do processo i

NO(p) Número de operações da peça p

NP Número de processos de um arranjo físico

NumCj	Número de conjuntos a serem gerados
NumPec	Número de peças por conjunto a serem geradas
Nome	Nome dos arquivos de peças
op	Variável indicadora da operação de uma peça
OpMax	Número máximo de operações das peças de um conjunto
OpMin	Número mínimo de operações das peças de um conjunto
p	Contador de peças
R	Raiz do número de máquinas
Tmax	Tempo máximo que pode ser atribuído a uma operação
Tmin	Tempo mínimo que pode ser atribuído a uma operação
x	Usado para receber um valor escolhido aleatoriamente
X	Divisão do arranjo físico no eixo X
Y	Divisão do arranjo físico no eixo Y

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	IV
RESUMO.....	VI
ABSTRACT.....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	XVII
LISTA DE QUADROS.....	XX
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XXIII
LISTA DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS COMPUTACIONAIS.....	XXIV
SUMÁRIO.....	XXVI
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Motivação.....	4
1.4 Organização do trabalho.....	5
2 METODOLOGIA DE PESQUISA.....	6
2.1 Considerações iniciais.....	6
2.2 Classificação das metodologias de pesquisa.....	6
2.3 Metodologia de pesquisa adotada.....	8
2.4 Considerações finais.....	10
3 ARRANJO FÍSICO.....	11
3.1 Considerações iniciais.....	11
3.2 Conceituando arranjo físico (<i>layout</i>).....	11
3.3 Novos arranjos físicos.....	12
3.3.1 Arranjo físico ágil.....	13
3.3.2 Células virtuais de manufatura.....	13
3.3.3 Arranjo físico holônico.....	14
3.3.4 Arranjo físico modular.....	15
3.3.5 Arranjo físico fractal.....	17
3.3.6 Arranjo físico distribuído.....	18
3.4 O arranjo físico distribuído.....	21
3.5 Arranjo físico distribuído para cada período.....	29
3.6 Comparação de desempenho.....	34
3.7 Arranjo físico parcialmente distribuído.....	37

3.8	Arranjo físico distribuído para vários períodos	40
3.9	Elementos de recurso.....	44
3.10	Células virtuais em arranjo físico distribuído	50
3.11	Comentários sobre a literatura (arranjo físico distribuído)	51
3.12	Considerações finais	53
4	FLEXIBILIDADE DE SEQUENCIAMENTO	54
4.1	Considerações iniciais.....	54
4.2	Tipos de flexibilidade.....	54
4.3	Representação de processos com flexibilidade de seqüência	57
4.4	Considerações finais	63
5	PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO	64
5.1	Considerações iniciais.....	64
5.2	Programação da produção	64
5.3	Planejamento do processo, roteamento e programação	65
5.4	Programação de tarefas	65
5.5	Exemplo de algoritmo de programação <i>flow shop</i>	68
5.6	Roteamento.....	72
5.6.1	Busca pela melhor rota - roteando a primeira peça	73
5.6.2	Programando outras peças.....	76
5.6.3	Buscando a melhor rota (com flexibilidade)	77
5.7	Considerações finais	80
6	DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	81
6.1	Considerações iniciais.....	81
6.2	Procedimento geral	81
6.3	Procedimento automático para geração de peças	83
6.4	Procedimentos para geração de arranjos físicos	87
6.4.1	Gerando arranjo físico funcional	87
6.4.2	Gerando arranjo físico parcialmente distribuído	89
6.4.3	Gerando arranjo físico aleatoriamente distribuído	93
6.4.4	Gerando arranjo físico maximamente distribuído	94
6.5	Algoritmo genético para maximização da distribuição.....	101
6.5.1	Codificação	101
6.5.2	População inicial.....	101
6.5.3	Função de aptidão (avaliação).....	102

6.5.4	Condição de encerramento	102
6.5.5	Nova população.....	103
6.5.6	Seleção pelo Método da Roleta.....	103
6.6	Roteamento das peças nos arranjos físicos.....	106
6.6.1	Contagem do número de alocações	110
6.6.2	Intervalo inicial	111
6.6.3	Avaliando intervalos de tempo livres	112
6.6.4	Alocando no final	114
6.7	Considerações finais	114
7	IMPLEMENTAÇÃO DAS FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS	117
7.1	Considerações iniciais.....	117
7.2	Gerador de peças.....	118
7.2.1	Métodos de seleção de processo	124
7.2.2	Comentários sobre o gerador de peças.....	127
7.3	Gerador de arranjos físicos	128
7.3.1	Dados de entrada	128
7.3.2	Gerando arranjos físicos.....	129
7.3.3	Analisando arranjos físicos gerados	134
7.3.4	Maximizando a distribuição de arranjos físicos.....	135
7.3.5	Comentários sobre o gerador de arranjos	138
7.4	Roteamento.....	141
7.4.1	Selecionando os arranjos físicos	142
7.4.2	Iniciando a simulação	145
7.4.3	Simulando.....	153
7.4.4	Visualizando os dados da simulação.....	155
7.4.5	Comentários sobre o roteador	162
7.5	Considerações finais	162
8	RESULTADOS OBTIDOS.....	164
8.1	Considerações iniciais.....	164
8.2	Arranjos físicos desequilibrados pequenos	165
8.2.1	Peças.....	165
8.2.2	Resultados.....	166
8.3	Arranjos físicos desequilibrados médios	171
8.3.1	Peças.....	172

8.3.2 Resultados.....	172
8.4 Arranjos físicos desequilibrados grandes.....	177
8.4.1 Peças.....	178
8.4.2 Resultados.....	178
8.5 Arranjos físicos equilibrados pequenos.....	183
8.5.1 Peças.....	183
8.5.2 Resultados.....	184
8.6 Arranjos físicos equilibrados médios.....	189
8.6.1 Peças.....	189
8.6.2 Resultados.....	190
8.7 Arranjos físicos equilibrados grandes.....	195
8.7.1 Peças.....	195
8.7.2 Resultados.....	196
8.8 Influência da divisão dos departamentos.....	201
8.8.1 Peças.....	203
8.8.2 Resultados.....	203
8.9 Formação espontânea de células fractais.....	208
8.9.1 Arranjos físicos 4x4.....	210
8.9.2 Arranjos físicos 6x6.....	211
8.9.3 Arranjos físicos 6x8.....	213
8.9.4 Formação de células em arranjos físicos desequilibrados.....	216
8.10 Considerações finais.....	219
9 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	220
9.1 Considerações iniciais.....	220
9.2 Arranjos físicos desequilibrados pequenos.....	221
9.2.1 Grau de distribuição.....	221
9.2.2 Tempo total consumido.....	221
9.2.3 Distância total percorrida.....	223
9.2.4 Comparação das variáveis.....	224
9.3 Arranjos físicos desequilibrados médios.....	225
9.3.1 Grau de distribuição.....	225
9.3.2 Tempo total consumido.....	225
9.3.3 Distância total percorrida.....	226
9.3.4 Comparação das variáveis.....	227

9.4	Arranjos físicos desequilibrados grandes.....	228
9.4.1	Grau de distribuição.....	228
9.4.2	Tempo total consumido	228
9.4.3	Distância total percorrida	229
9.4.4	Comparação das variáveis	230
9.5	Arranjos físicos equilibrados pequenos.....	231
9.5.1	Grau de distribuição.....	231
9.5.2	Tempo total consumido	231
9.5.3	Distância total percorrida	232
9.5.4	Comparação das variáveis	233
9.6	Arranjos físicos equilibrados médios.....	234
9.6.1	Grau de distribuição.....	234
9.6.2	Tempo total consumido	234
9.6.3	Distância total percorrida	235
9.6.4	Comparação das variáveis	236
9.7	Arranjos físicos equilibrados grandes.....	237
9.7.1	Grau de distribuição.....	237
9.7.2	Tempo total consumido	237
9.7.3	Distância total percorrida	238
9.7.4	Comparação das variáveis	239
9.8	Influência da divisão dos departamentos	240
9.8.1	Grau de distribuição.....	240
9.8.2	Tempo total consumido	240
9.8.3	Distância total percorrida	241
9.8.4	Comparação das variáveis	242
9.9	Comparação dos tempos	243
9.10	Comparação das distâncias percorridas	243
9.11	Arranjo físico equilibrado maximamente distribuído	246
9.11.1	Algoritmo Alvo	246
9.11.2	Algoritmo Genético	247
9.11.3	Formação de células fractais simétricas.....	248
9.11.4	Diferentes configurações para o mesmo grau de distribuição...250	
9.12	Considerações finais	251
10	COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES.....	253

10.1 Considerações iniciais.....	253
10.2 Tempo total de execução	253
10.3 Distância total percorrida – modo de roteamento.....	253
10.4 Distância total percorrida – tipo de arranjo físico.....	254
10.5 Algoritmo ALVO x Algoritmo Genético.....	255
10.6 Formação espontânea de células	255
10.7 Sugestões para desenvolvimentos futuros.....	256
10.8 Considerações finais	259
REFERÊNCIAS	260
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	274
APÊNDICE A - ARRANJOS FÍSICOS CLÁSSICOS.....	280
A.1 Desenvolvimento dos arranjos físicos clássicos	281
A.2 Características dos arranjos físicos clássicos.....	282
A.2.1 Arranjo físico posicional	282
A.2.2 Arranjo físico funcional	283
A.2.3 Arranjo físico em linha.....	286
A.2.4 Arranjo físico celular	287
APÊNDICE B - CURVAS DE PREENCHIMENTO ESPACIAL	290
B.1 Introdução	291
B.2 A curva de Peano	291
B.3 Variações da curva de Peano	292
B.4 Outras curvas de preenchimento	294
B.5 Implementação	296
APÊNDICE C - CÁLCULO DO GRAU DE DISTRIBUIÇÃO.....	297
C.1 Introdução.....	298
C.2 Exemplo.....	298
APÊNDICE D - GRAFOS.....	301
D.1 Introdução.....	302
D.2 Conceitos básicos.....	302
D.3 Algoritmo para determinação de níveis em grafos sem laços.....	303
D.4 Representação do grafo	305
D.5 Implementação do algoritmo.....	306
APÊNDICE E - ALGORITMO GENÉTICO.....	308
E.1 Introdução	309

E.2 Exemplo.....	311
APÊNDICE F - ESTRUTURAS DE PRECEDÊNCIA	313
F.1 Introdução	314
APÊNDICE G - MODELOS PARA POSICIONAMENTO DE MÁQUINAS	327
G.1 Introdução	328
APÊNDICE H - EXEMPLOS DE ROTEAMENTO.....	331
H.1 Introdução.....	332
H.2 Roteamento rígido	333
H.3 Roteamento flexível.....	336
APÊNDICE I - PERMUTAÇÃO	361
I.1 Introdução	362
I.2 Recursividade	363
I.3 Técnica adotada.....	363
I.4 Implementação computacional.....	367
APÊNDICE J - GERADOR DE SEQUÊNCIAS	370
J.1 Introdução	371
J.2 Procedimento básico	371
J.3 Implementação computacional.....	373
J.4 Comentários sobre o desempenho computacional.....	377
J.5 Comentários finais sobre o gerador de seqüências.....	379
APÊNDICE K - ESTRUTURA DO ARQUIVO SCH.....	381
K.1 O arquivo SCH.....	382
APÊNDICE L - TESTES DE HIPÓTESE	387
L.1 Comentários iniciais	388
L.2 Arranjos físicos desequilibrados pequenos	389
L.3 Arranjos físicos desequilibrados médios	390
L.4 Arranjos físicos desequilibrados grandes.....	391
L.5 Arranjos físicos equilibrados pequenos.....	392
L.6 Arranjos físicos equilibrados médios	393
L.7 Arranjos físicos equilibrados médios	394
L.8 Arranjos físicos para influência da divisão dos departamentos.....	395

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Desde a revolução industrial, no século XVIII, os arranjos físicos adotados pelas empresas de manufatura passam por modificações para adaptarem-se às necessidades de cada mercado em cada época. Os arranjos físicos considerados clássicos são: posicional, por processo (ou funcional), por produto (ou em linha) e celular (SLACK et al., 1996, p.212).

O arranjo físico posicional se diferencia dos demais por atender a produtos e peças de grandes dimensões, dificultando ou impossibilitando seu deslocamento entre as máquinas dos diversos processos.

Os outros três arranjos físicos têm objetivos claramente distintos. O arranjo físico funcional tem grande flexibilidade e atende muito bem aos mercados que trabalham com pequenos lotes sob encomenda. Porém, com tal flexibilidade, sua produtividade acaba por ser baixa (GROOVER, 1987, p.28).

No início do século XX, quando o mercado passou a desejar grandes produções, foi desenvolvido o arranjo em linha onde a produtividade era o foco principal (BLACK, 1991, p.58). A produção em massa atendeu às necessidades enquanto a baixa variação entre os produtos era aceita.

Durante meados do século XX modificações nas exigências dos consumidores levaram alguns setores a novas adaptações. Tratava-se da produção de itens com maior quantidade de variações para atender ao crescente desejo de personalização do mercado consumidor (GROOVER e ZIMMERS, 1984, p.275). O arranjo físico celular foi a solução adotada para atingir níveis de flexibilidade e produtividade adequados.

Apesar de cada arranjo físico atender a um tipo de mercado específico Slack et al. (1996, p.217) lembram que é prática comum as empresas adotarem

arranjos físicos mistos que combinem elementos de algum ou de todos os tipos básicos de arranjo físico ou, alternativamente, usam tipos básicos de arranjo físico de forma *pura* em diferentes partes da instalação.

A grande difusão desses arranjos físicos levou ao desenvolvimento de diversas técnicas e metodologias de planejamento e controle da produção que foram adaptadas a cada caso (previsão de demanda, balanceamento de linha, controle de estoques, automação da manufatura, projeto de arranjo físico etc).

Benjaafar, Heragu e Irani (2002, p.58) mostram que as recentes tendências de alguns setores da indústria sugerem que as configurações clássicas de arranjo físico não reúnem as características necessárias para atender aos empreendimentos multi-produtos e que é necessária uma nova geração de arranjos físicos que devem ser flexíveis, modulares e fáceis de serem reconfiguráveis.

Alguns novos arranjos físicos foram propostos para atender a essas condições. Benjaafar, Heragu e Irani (2002, p.66) citam os arranjos físicos ágil, modular e distribuído. Além desses Askin, Ciarallo e Lundgren (1999, p.962) apresentam o arranjo holônico e o arranjo fractal como opções para atuar nesse ambiente.

Diversos trabalhos têm abordado esses arranjos físicos, seja formulando métodos de projeto, seja comparando seu desempenho com outras distribuições. Esta pesquisa irá abordar o arranjo físico distribuído e suas variações.

1.2 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa foi comparar, usando simulação, o desempenho dos arranjos físicos distribuídos levando em consideração a flexibilidade de processo das peças. Foram comparados os arranjos físicos funcional, parcialmente distribuído, aleatoriamente distribuído e maximamente distribuídos. Para atingir esse objetivo geral os seguintes objetivos específicos nortearam o desenvolvimento do trabalho:

- Implementar um programa computacional que gere arranjos físicos funcional, parcialmente distribuído e aleatoriamente distribuído. Gerar conjuntos de 50 arranjos físicos de cada tipo

em três diferentes tamanhos (pequeno - 20 máquinas, médio - 40 máquinas e grande - 80 máquinas)¹ e em duas configurações (desequilibrado - departamentos com número de máquinas diferentes e equilibrado - departamentos com mesmo número de máquinas);

- Desenvolver uma metodologia para gerar o arranjo maximamente distribuído (holográfico). Implementar computacionalmente essa metodologia e gerar um arranjo físico deste tipo para cada uma das 6 configurações citadas anteriormente;
- Implementar um algoritmo genético para maximizar a distribuição dos arranjos físicos. Comparar os resultados obtidos por essa técnica com os obtidos pela metodologia proposta no item anterior;
- Desenvolver uma metodologia para gerar automaticamente peças com flexibilidade de processo seguindo as relações de precedência entre suas operações. Implementar essa metodologia para gerar 30 conjuntos de peças para cada tamanho de arranjo físico;
- Desenvolver um método para rotear as tarefas levando em consideração sua prioridade de execução e todas as suas possíveis seqüências de fabricação. Implementar esse método computacionalmente;
- Obter o tempo total de execução de cada conjunto de peças em cada um dos arranjos físicos e comparar o desempenho do arranjo físico maximamente distribuído com relação aos demais. Repetir os experimentos sem considerar a flexibilidade de processo.
- Analisar a influência do grau de divisão dos departamentos em arranjos físicos com mesmo número de máquinas em todos os departamentos.

¹ Esses tamanhos de arranjos físicos foram baseados principalmente nos trabalhos de Montreuil e Venkatadri (1991), Askin, Ciarallo e Lundgren (1999), Benjaafar e Sheikhzadeh (2000) e Benjaafar, Heragu e Irani (2002).

1.3 Motivação

Para Benjaafar (1995, p.421) a flexibilidade das instalações de manufatura é de extrema importância para que as empresas possam atuar em ambientes caracterizados por possuir alto grau de variedade e volatilidade. O autor acrescenta ainda que existe abundante literatura sobre flexibilidade em manufatura que aborda máquinas, manuseio de material, conjunto de produtos, roteamento de peças e seqüenciamento de operações, porém pouco desta literatura trata da flexibilidade do arranjo físico.

O arranjo físico maximamente distribuído desponta como uma opção para atender a esses ambientes, mas nenhum trabalho da literatura realizou uma análise de seu desempenho levando em consideração peças com flexibilidade de seqüenciamento de suas operações.

Os primeiros trabalhos que abordaram o arranjo físico distribuído basearam-se em informações que, segundo Baykasoglu (2003, p.2598), não estariam disponíveis em um ambiente turbulento, colocando em dúvida alguns dos resultados obtidos.

Dentre esses resultados o que mais motivou esta pesquisa foi a pequena vantagem do arranjo físico maximamente distribuído sobre o parcialmente distribuído relatado por Benjaafar e Sheikhzadeh (200, p.320) e também por Lahmar e Benjaafar (2001, 2002a, 2002b, e 2005). Nesses trabalhos os autores afirmam que a desagregação completa dos departamentos não se justifica pois a maior parte dos benefícios são obtidos quando os departamentos são divididos em dois.

Também é motivante o comentário de Askin, Ciarallo e Lundgren (1999) onde afirmam que a pesquisa sobre arranjos físicos distribuído e fractal, tanto relacionado com projeto quanto com desempenho, são bastante limitadas.

Assim, espera-se que com o uso da flexibilidade no seqüenciamento das operações o arranjo físico maximamente distribuído possa mostrar um desempenho significativamente maior.

1.4 Organização do trabalho

Esta tese está organizada em 10 capítulos, incluindo este que apresentou o contexto no qual o trabalho se insere, seu objetivo geral e os objetivos específicos.

O capítulo 2 apresenta alguns conceitos sobre metodologia científica e descreve a metodologia de pesquisa adotada para o desenvolvimento do trabalho.

A pesquisa bibliográfica foi dividida em três partes. No capítulo 3 tem-se o estado da arte sobre o arranjo distribuído. O capítulo 4 trata da flexibilidade de seqüenciamento das operações, que é um dos pontos chave da proposta. No capítulo 5 são apresentados conceitos sobre programação da manufatura.

A metodologia proposta é detalhada no capítulo 6 e as implementações computacionais desenvolvidas estão no capítulo 7.

No capítulo 8 estão os resultados obtidos nas simulações enquanto as análises e discussões são apresentadas no capítulo 9.

Comentários, conclusões e sugestões para futuros desenvolvimentos formam o conteúdo do capítulo 10.

Informações importantes, mas que não são fundamentais, foram colocadas em 11 apêndices para não tirar a fluidez do texto principal.

2 METODOLOGIA DE PESQUISA

2.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos sobre metodologia científica. Em seguida descreve-se a metodologia de pesquisa adotada para o desenvolvimento deste trabalho com o detalhamento de cada fase.

2.2 Classificação das metodologias de pesquisa

Segundo Cervo e Bervian (1983, p.50) pesquisa é a atividade voltada para a solução de problemas através do emprego de métodos científicos, partindo de uma dúvida ou problema e buscando uma resposta ou solução. Gil (1987, p.19) cita que a pesquisa é desenvolvida com base nos conhecimentos disponíveis e com a utilização cuidadosa de métodos, técnicas e outros procedimentos científicos.

Gewandsznajder (1989, p.3) define método como uma série de regras para tentar resolver um problema, sendo que no caso do método científico estas regras são bem gerais e não são infalíveis. Acrescenta ainda que uma de suas características básicas é a tentativa de resolver problemas por meio de suposições (hipóteses) que possam ser testadas em observações ou experiências. Lakatos e Marconi (1991, p.83) definem método como o conjunto das atividades sistemáticas e racionais que, com maior segurança e economia, permite alcançar o objetivo (conhecimentos válidos e verdadeiros), traçando o caminho a ser seguido, detectando erros e auxiliando as decisões do pesquisador.

Lakatos e Marconi (1991, p.86) apresentam os seguintes tipos de métodos: indutivo, dedutivo, hipotético-dedutivo, dialético e métodos

específicos das ciências sociais (histórico, comparativo, monográfico, estatístico, tipológico, funcionalista e estruturalista). De forma resumida tem-se:

- Método indutivo: o estudo dos fenômenos leva, geralmente, a planos cada vez mais abrangentes, indo das constatações particulares para leis e teorias.
- Método dedutivo: parte de teorias e leis para prever a ocorrência de fenômenos particulares;
- Método hipotético-dedutivo: pela percepção de uma lacuna nos conhecimentos são formuladas hipóteses e, pelo processo de inferência dedutiva, testa-se a predição da ocorrência de fenômenos abrangidos pelas hipóteses;
- Método dialético: que penetra o mundo dos fenômenos através de sua ação recíproca, da contradição inerente ao fenômeno e da mudança dialética que ocorre na natureza e na sociedade.

Quanto à natureza da pesquisa Gewandsznajder (1989, p.16) classifica como básica e aplicada. Enquanto a pesquisa básica busca gerar conhecimentos novos úteis para o avanço da ciência (mesmo que sem aplicação prática imediata) a pesquisa aplicada procura compreender fenômenos específicos que possam ter uso prático. Salomon (1973, p.141) denomina a pesquisa básica de pura ou teórica e comenta ainda que outros autores dão preferência ao termo pesquisa fundamental.

Com relação aos tipos de dados coletados e pela análise que se fará desses dados Chizzotti (1991, p.52) classifica as pesquisas como:

- Quantitativa: baseia-se na mensuração de variáveis preestabelecidas, procurando verificar e explicar sua influência sobre outras variáveis,
- Qualitativa: fundamenta-se em dados coligidos nas interações interpessoais, na co-participação das situações dos informantes, analisadas a partir da significação que estes dão aos seus atos.

Gil (1987, p.45) classifica as pesquisas, com base em seus objetivos gerais, em três grandes grupos: exploratórias, descritivas e explicativas. A pesquisa exploratória tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema de modo a torná-lo mais evidente. Envolve levantamento

bibliográfico e estudos de casos. A pesquisa descritiva busca descrever as características de determinado fenômeno ou estabelecer relações entre variáveis. Envolve técnicas padronizadas de coleta de dados como questionários e observação sistemática. A pesquisa explicativa é realizada quando se deseja identificar os fatores que determinam (ou que contribuem) para a ocorrência dos fenômenos.

Com relação ao procedimento geral adotado Cervo e Bervian (1983, p.54) citam três tipos de pesquisa: bibliográfica (permite conhecer e analisar as contribuições existentes sobre o tema), descritiva (observa, analisa e correlaciona as variáveis sem manipulá-las) e experimental (o pesquisador controla as variáveis do objeto em estudo). A pesquisa descritiva divide-se ainda em: estudos exploratórios, estudos descritivos, pesquisa de opinião, pesquisa de motivação, estudo de caso e pesquisa documental. Gil (1987, p.51) acrescenta outros tipos de pesquisa: documental (semelhante à bibliográfica, mas diferente na natureza das fontes), ex-post-facto (experimento realizado depois da ocorrência de um evento sobre o qual o pesquisador não teve influência ou controle), levantamento, pesquisa-ação e pesquisa participante.

2.3 Metodologia de pesquisa adotada

De acordo com o conteúdo abordado no item anterior este trabalho é de natureza aplicada com objetivo exploratório. Usará o método hipotético-dedutivo com abordagem quantitativa por meio de pesquisa bibliográfica e pesquisa experimental.

O fluxograma apresentado pela Figura 2.1 mostra a seqüência de etapas percorridas no desenvolvimento da pesquisa, desde a fase de pesquisa bibliográfica exploratória, que permitiu a definição do tema, até a redação final. Para fornecer embasamento a cada elemento da metodologia proposta, novas pesquisas à literatura mostraram-se necessárias, conforme o trabalho foi sendo desenvolvido.

Figura 2.1 - Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa

Para obter uma melhor representação a etapa denominada *implementação computacional* foi posicionada após todo o processo de pesquisa bibliográfica. Porém, na realidade, foram implementados diversos pequenos programas simultaneamente a cada assunto pesquisado na literatura. Essa opção permitiu explorar cada elemento com maior profundidade, levando a uma assimilação mais sólida e consistente dos conceitos.

De forma similar, a redação foi realizada praticamente durante todo o processo de pesquisa. A etapa denominada *redação final* refere-se realmente ao processo de verificação e finalização do texto.

2.4 Considerações finais

Este capítulo abordou alguns conceitos sobre metodologia científica e apresentou a metodologia adotada para desenvolver a pesquisa. No capítulo seguinte tem-se a revisão bibliográfica sobre o arranjo físico, destacando o arranjo físico distribuído.

3 ARRANJO FÍSICO

3.1 Considerações iniciais

O início deste capítulo apresenta o conceito de arranjo físico e, em seguida, apresenta as novas propostas existentes para empresas que atuam em ambientes caóticos. Em seguida detalha as diferentes abordagens usadas por diversos autores sobre o arranjo distribuído, destacando o fato de que nenhum trabalho utilizou flexibilidade de processo em suas análises.

3.2 Conceituando arranjo físico (*layout*)

Layout é uma palavra da língua inglesa que faz parte da terminologia de diversas áreas profissionais. A título de exemplo pode-se citar que em editoração e diagramação significa a forma de organização de elementos textuais e gráficos nas páginas de um documento (COUTO, 1961, p.168). Já, no projeto de circuitos eletrônicos, significa a disposição dos componentes na placa de circuito impresso (WEIGEL, 2005, p.56). Em manufatura este termo está relacionado com a disposição dos recursos de produção na instalação industrial (GROOVER, 1987, p.27).

Dessa forma nota-se que o conceito geral para *layout* é o mesmo e, de acordo com Ferreira (1988, p.389), há um brasileirismo para esse termo.

leiaute. Substantivo masculino. Brasileirismo 1. Populares. Esboço de anúncio, em que se apresentam ressaltados os seus diversos elementos (título, texto, ilustração etc.). 2. Por extensão. Esboço, projeto, planejamento ou esquema de uma obra, apresentados graficamente. 3. Distribuição física de elementos num determinado espaço.

Com relação aos trabalhos em língua portuguesa não há uma padronização. Autores como Torres (2001), Porto et al. (2002) e Martins et al.

(2003) usam a palavra *layout* em seus textos. Seu equivalente em português também é usado em diversos trabalhos, podendo-se citar como exemplo, Lucero (2001) e Rodrigues, Branco e Rosa (2003). Com frequência o termo arranjo físico aparece juntamente com outros termos como, por exemplo, em Fischer (2000), Tavares (2000), Torres (2001) e Zattar (2004).

Neste trabalho foi dada preferência aos termos existentes na língua portuguesa, mas sempre apresentando a nomenclatura original.

3.3 Novos arranjos físicos

Benjaafar, Heragu e Irani (2002, p.58) mostram que as recentes tendências da indústria sugerem que as configurações clássicas² de arranjo físico não reúnem as características necessárias para atender aos empreendimentos multi-produtos e que é necessária uma nova geração de arranjos que devem ser flexíveis, modulares e fáceis de serem reconfiguráveis. Isso se deve ao fato de alguns segmentos da indústria de manufatura estarem expostos a um ambiente turbulento. De acordo com Rheault, Drolet e Abdulnour (1995, p.221) um ambiente turbulento é caracterizado por:

- Alta variação na demanda;
- Alta variação nos tamanhos de lotes de produção;
- Alta variação nos tempos de processamento;
- Alta variação nos tempos de preparação;
- Demanda estocástica (parcialmente ou totalmente);
- Frequentes mudanças no conjunto de produtos;
- Seqüências de produção variáveis;
- Forte competição.

Os novos arranjos citados por Benjaafar, Heragu e Irani (2002, p.66) são: arranjo ágil, arranjo modular e arranjo distribuído. Askin, Ciarallo e Lundgren (1999, p.962) apresentam o arranjo holônico e o arranjo fractal. Além disso, é necessário citar as células virtuais de manufatura que, apesar de não se tratar de um arranjo físico propriamente dito, estão diretamente relacionadas com o tema em questão.

² Maiores informações sobre os arranjos físicos clássicos estão no Apêndice A.

3.3.1 Arranjo físico ágil

Apesar desse nome o arranjo físico ágil (*agile layout*) não é um tipo específico de configuração de chão de fábrica. Benjaafar, Heragu e Irani (2002, p.71) usam esta denominação quando a instalação permite freqüentes reconfigurações na disposição dos equipamentos. Quando necessário o arranjo físico é reprojetoado para maximizar o desempenho operacional ao invés de minimizar o custo de movimentação de material. Porém os autores acrescentam que capturar a relação entre a configuração do arranjo físico e o desempenho operacional é muito difícil.

Montreuil et al. (1993, p.1) também destacam que o problema de reprojetado não é grave se as estações de trabalho são leves e fáceis de serem movidas, fazendo com que a mudança de leiaute seja rápida e de baixo custo. Benjaafar, Heragu e Irani (2002, p.65) citam as máquinas portáteis (*portable machine*) como uma forte tendência para solucionar as dificuldades e custos de alteração da distribuição física.

3.3.2 Células virtuais de manufatura

Também não se trata especificamente de um arranjo físico propriamente dito pois pode ser aplicado em qualquer disposição de máquinas. O conceito de células virtuais (*virtual cells* ou *virtual manufacturing cells*) foi proposto, segundo Irani, Cavalier e Cohen (1993, p.793), pelo National Bureau of Standards para solucionar um problema específico de controle para a Automated Manufacturing Research Facility (AMRF). A primeira vez que um sistema de produção baseado em células virtuais foi chamado de Sistema Virtual de Manufatura Celular (Virtual Cellular Manufacturing System - VCMS) foi em 1996, como mostrado por Ko e Egbelu (2003, p.2367).

O termo *virtual* foi adotado nesta estrutura de controle da produção para se distinguir das células de manufatura *reais* que são definidas por grupos fixos de equipamentos no chão de fábrica (MCLEAN, BLOOM e HOPP, 1982, p.108, grifos dos autores). As células virtuais estendem o conceito de células definido em tecnologia de grupo por permitirem o compartilhamento de estações de trabalho com outras células virtuais que produzem diferentes famílias de peças e que tem sobreposição de recursos requeridos.

Sarker e Li (2001, p.673) destacam que as células virtuais são agrupamentos lógicos das máquinas e não são mais reconhecidas por sua proximidade física, ou seja, os grupos não são fisicamente identificáveis. A Figura 3.1 mostra três células virtuais, com uma máquina compartilhada em um chão de fábrica com vinte máquinas de quatro tipos diferentes.

Adaptado de Sarker e Li (2001, p.674)

Figura 3.1 - Três células virtuais

A Figura 3.1 permite notar que não há um padrão na disposição das máquinas no chão de fábrica. Irani, Cavalier e Cohen (1993, p.807) sugerem que as máquinas que são compartilhadas permaneçam em um arranjo físico funcional, próximo ou entre as células. Benjaafar e Sheikhzadeh (1996, p.853) sugerem o uso de um arranjo físico completamente distribuído, onde as cópias de cada tipo de máquina são completamente dispersas no chão de fábrica. Na opinião de Baykasoglu (2003, p.2599) o arranjo físico distribuído é, provavelmente, a mais apropriada opção para implementação de células virtuais de manufatura. O arranjo físico distribuído será discutido posteriormente.

3.3.3 Arranjo físico holônico

O termo arranjo físico holônico (*holonic layout*) não é um consenso entre os pesquisadores. Askin, Ciarallo e Lundgren (1999, p.964) denominam um arranjo físico dessa forma quando as máquinas são dispostas aleatoriamente no chão de fábrica, porém, essa é a característica de um arranjo físico distribuído, como será discutido posteriormente. Baykasoglu (2003, p.2599) comenta que o arranjo físico holônico é similar ao arranjo físico distribuído. Ozcelik e Islier (2003, p.2712) consideram o arranjo físico holônico como sendo

a configuração mais geral, pois os leiautes por processo, celular e fractal podem ser visualizados como casos especiais dessa configuração. Nomden e Slomp (2003, p.2) destacam que o arranjo físico distribuído também é chamado de holônico, holográfico ou espalhado e citam o trabalho de Montreuil et al. (1993) que distingue estes arranjos físicos pela forma como os recursos são duplicados³. De qualquer forma, a intenção é providenciar rotas mais eficientes para qualquer tipo de peça que o sistema deva produzir. Conforme as ordens chegam ao sistema as rotas necessárias à sua execução são construídas pela procura de máquinas disponíveis e capazes de executar cada operação.

É muito difundido na literatura o termo Sistema Holônico de Manufatura (*holonic manufacturing systems*) que não está envolvido diretamente com o arranjo físico do chão de fábrica e sim com o inter-relacionamento entre os elementos de produção, ou seja, a ênfase é dada no sistema de controle da manufatura como mostram os trabalhos de McFarlane (1995), Valckenaers et al. (1998), Bussmann e McFarlane (1999), Wang (2001), Wullink, Giebels e Kals (2002) e Cheng, Chang e Wu (2004).

Askin, Ciarallo e Lundgren (1999, p.962) mostram que o filósofo húngaro chamado Arthur Koestler⁴ propôs a palavra *holon* para descrever a unidade básica das organizações sociais e biológicas. Kriz (1995) acrescenta que holon é a combinação da palavra grega holos, que significa todo, e do sufixo on, significando partícula ou parte. A força de uma organização holônica, denominada de holarquia (holarchy) está na habilidade de construir sistemas muito complexos que, entretanto, são eficientes no uso de recursos, resistentes a distúrbios (tanto internos quanto externos) e adaptáveis às alterações no ambiente no qual existe.

3.3.4 Arranjo físico modular

O arranjo físico modular (*layout modules*) foi apresentado por Irani e Huang (2000). Ao contrário dos arranjos tradicionais esta proposta não assume

³ Esta referência não está correta, pois esse artigo de 1993 não define estes arranjos físicos. O trabalho que os autores desejavam citar é MONTREUIL, B.; VENKATADRI, U.; LEFANÇOIS, P. (1991). Holographic layout of manufacturing systems. Technical Report No. 91-76, Faculty of Management, Laval University, Québec, Canada.

⁴ KOESTLER, A. (1968). *The ghost in the machine*. New York, Macmillan.

padrões de fluxo ou critérios de agrupamento de máquinas. O fluxo de material é decomposto em uma rede de módulos e cada módulo representa parte da instalação. Um módulo é um grupo de máquinas conectadas por um fluxo de material bem definido. Como mostra a Figura 3.2 os autores definiram seis tipos de módulo.

Adaptado de Irani e Huang (2000, p.260)

Figura 3.2- Os seis tipos de módulos

Módulo fluxo em linha (*flowline module*): é um arranjo linear de máquinas onde todos os produtos movem-se em seqüência, sem retorno a uma operação anterior e sem saltar nenhum equipamento.

Módulo fluxo em linha ramificado (*branched flowline module*): ocorre quando um conjunto de produtos possui alguma diferença e divide o fluxo em ramificações paralelas com operações específicas. Posteriormente essas ramificações unem-se novamente ao fluxo único.

Módulo célula (*cell module*): é composto por um conjunto de máquinas que produzem uma família de peças ou produtos sem necessitar de nenhuma máquina externa ou visita a outro módulo. As peças da família podem não usar todas as máquinas do módulo e/ou ter a mesma seqüência de operação.

Módulo centro de usinagem (*machine center module*): é uma variação do módulo célula. É uma única máquina automática multifuncional que combina diferentes processos de manufatura.

Módulo funcional (*functional layout module*): este módulo é análogo ao tradicional departamento funcional com fluxo de material aleatório entre as máquinas, ou seja, não há um fluxo dominante.

Módulo fluxo padronizado (*patterned flow module*): o material possui um fluxo dominante e também há a presença de uma hierarquia. Este módulo pode ser decomposto em módulos de fluxo em linha e fluxo em linha ramificado.

3.3.5 Arranjo físico fractal

Segundo Saad e Lassila (2004, p.3530) os conceitos de manufatura fractal (*fractal manufacturing*) e fábrica fractal (*fractal factory*) foram propostos por Warnecke⁵ (1993). Em matemática a palavra fractal é usada para descrever objetos cuja estrutura repete-se em cada detalhe quando a resolução aumenta, como mostra a Figura 3.3.

Baseado de Quaresma, Oliveira e Faria (2000)

Figura 3.3 - Exemplo de um fractal

⁵ WARNECKE, H. J. (1993). *The fractal company - a revolution in corporate culture*. Berlin, Germany, 1992, reprint, New York: Springer-Verlag.

A primeira metodologia que aplica a teoria de fábrica fractal no projeto de arranjo físico foi proposta por Venkatadri, Rardin e Montreuil (1997, p.912). Os autores definem o arranjo fractal como sendo uma extensão do arranjo celular, pois o chão de fábrica é dividido em pequenos grupos denominados células fractais ou simplesmente fractais.

Na definição original as células fractais são idênticas e podem produzir toda a gama de produtos da empresa, pois possuem pelo menos uma estação de trabalho de cada tipo. Devido a isso Ozcelik e Islier (2003, p.2711) usam o termo *fábrica dentro da fábrica* (*Plant Within a Plant - PWP*). Porém diferentes tipos de fractais podem existir na mesma empresa, como mostra a Figura 3.4. Essa especialização das células fractais é abordada com maiores detalhes por Montreuil, Venkatadri e Rardin (1999).

Adaptado de Venkatadri, Rardin e Montreuil (1997, p.912)

Figura 3.4 - Exemplo de arranjo fractal

Saad e Lassila (2004, p.3531) destacam que a abordagem de Venkatadri, Rardin e Montreuil (1997) está baseada em um conjunto conhecido de produtos e respectivas demandas e acrescentam que em um ambiente ágil isso é muito difícil de prever.

3.3.6 Arranjo físico distribuído

Benjaafar, Heragu e Irani (2002, p.66) mostram que este arranjo físico é definido pela distribuição das estações de trabalho por todo o chão de fábrica, como mostra a Figura 3.5, onde é feita uma comparação entre um leiaute funcional e um leiaute distribuído. O objetivo é permitir que a instalação suporte flutuações no volume de produção e nos padrões de fluxo de material.

Segundo esses autores “os planejadores podem encontrar **facilmente** fluxos eficientes para uma larga faixa de volume e conjunto de produtos” (p.66, grifo nosso).

Adaptado de Benjaafar, Heragu e Irani (2002, p.67)

Figura 3.5 - Arranjos funcional e distribuído

A apresentação desta forma de configuração do chão de fábrica foi feita por Montreuil e Venkatadri (1991) e foram usados os seguintes nomes: arranjo físico distribuído (*distributed layout*), arranjo físico disperso (*dispersed layout*) e arranjo físico espalhado (*scattered layout*). Posteriormente, em Montreuil, Venkatadri e Lefrançois (1991, p.10), os autores passam a usar o termo arranjo físico holográfico (*holographic layout*). Benjaafar e Sheikhzadeh (2000, p.318) usaram um procedimento puramente aleatório para distribuir máquinas no chão de fábrica e denominaram o resultado como arranjo físico aleatório (*random layout*), mas comentam que os arranjos obtidos por esse procedimento são chamados de distribuído. Também apresentam um procedimento que busca maximizar a distribuição das máquinas de cada tipo e denominaram o resultado de arranjo físico maximamente distribuído (*maximally distributed layout*). Lahmar e Benjaafar (2002b, p.3) definem que as nomenclaturas arranjo físico maximamente distribuído e arranjo físico holográfico representam a mesma distribuição de máquinas, ou seja, são sinônimos. Também apresentam o arranjo físico parcialmente distribuído onde os setores não são completamente desagregados, como mostra a Figura 3.6. Nomden e Slomp (2003, p.2) citam o uso dos termos distribuído, espalhado, holográfico e holônico, mas adotam o primeiro.

Adaptado de Lahmar e Benjaafar (2002, p.3)

Figura 3.6 - Arranjo parcialmente distribuído

A Tabela 3.1 resume a questão relacionada à nomenclatura. Nota-se a opção de não se utilizar o termo holônico com relação a este tipo de configuração.

Tabela 3.1 - Nomenclatura relacionada ao arranjo físico distribuído

Nome	Sinônimos
Arranjo físico distribuído	Arranjo físico aleatório Arranjo físico disperso Arranjo físico espalhado
Arranjo físico parcialmente distribuído	-
Arranjo físico maximamente distribuído	Arranjo físico holográfico

Apesar da influência das pesquisas de Benjaafar e Sheikhzadeh (2000) e Lahmar e Benjaafar (2002) este trabalho não irá diferenciar arranjo físico distribuído e arranjo físico aleatório, adotando a mesma postura de outros autores. Nesses dois artigos as figuras e tabelas comparam quatro tipos de arranjos físicos: funcional, maximamente distribuído, aleatório e distribuído. Porém os textos não definem o que é um arranjo físico distribuído e nem como ele é gerado, ao contrário dos outros três. O arranjo físico parcialmente distribuído também é abordado nesses dois trabalhos.

3.4 O arranjo físico distribuído

O trabalho de Montreuil e Venkatadri (1991) apresentou o arranjo físico distribuído. Os autores destacaram que em um ambiente externo extremamente volátil o conjunto de produtos muda com frequência, de forma rápida e drástica, sendo impossível reconhecer um padrão de fluxo estável. As únicas entradas estáveis disponíveis para o estudo do projeto do leiaute estão relacionadas com as estações de trabalho: tipos, número de réplicas de cada tipo, utilização esperada, tempo de processamento dos lotes transferidos e unidade de carga equivalente de lotes transferidos (MONTREUIL e VENKATADRI, 1991, p.295).

Os autores assumiram que um sistema inteligente de planejamento e controle da produção seria capaz de aproveitar as vantagens da proximidade entre estações de trabalho de diferentes tipos. Quando a instalação não estivesse altamente carregada, as peças que estariam em uma estação de trabalho de um tipo seriam roteadas para a mais próxima estação de trabalho do tipo requerido na etapa seguinte do processo de fabricação. Mesmo que a instalação estivesse mais carregada essa peça seria roteada para a máquina disponível mais próxima (MONTREUIL e VENKATADRI, 1991, p.295).

A estratégia heurística de projeto foi dividida em duas fases. Para cada tipo de estação de trabalho, a primeira fase encontra posições minimax⁶ para cada estação, dado o número dessas estações. Isto é realizado de forma ótima em um tempo polinomial, caso sejam adotadas distâncias retilineares, ou de forma heurística quando as distâncias são computadas usando uma métrica mais complexa. A segunda fase atribui todo o conjunto de estações de trabalho às locações disponíveis. Um modelo de atribuição linear foi usado para atribuir as estações às localizações de modo a minimizar a soma, sobre todas as estações, da distância ponderada entre a localização onde a estação de trabalho foi definida e a localização minimax computada na fase 1. Em outras

⁶ De acordo com Francis e White (1974, p.378) minimax é o procedimento que busca minimizar o máximo valor do objeto em estudo. Como exemplo cita a localização de equipes de combate ao fogo em uma grande metrópole. Deve-se minimizar a máxima distância entre estas equipes e qualquer localização da cidade.

palavras, a fase 2 é responsável por uma relação de compromisso quando duas ou mais estações compartilham uma mesma posição alvo.

Segundo Francis e White (1974, p.170) a distância retilinear, retangular, metropolitana ou Manhattam, é uma medida de distância apropriada para um grande número de problemas de locação. A Figura 3.7 mostra três diferentes caminhos retilineares entre dois pontos e que tem a mesma distância retilinear.

Adaptado de Francis e White (1974, p.170)

Figura 3.7 - Diferentes caminhos retilineares entre dois pontos

O artigo não entre em detalhes sobre a técnica minimax citando que a metodologia apresentada por Francis e White (1974) é bem conhecida. O exemplo apresentado envolve 40 máquinas de 15 tipos diferentes. Os dados desse exemplo estão na Tabela 3.2 onde t é o tipo de processo, n_t é o número de máquinas do processo t , u_t é a taxa de utilização média das máquinas, p_t é o tempo de processamento e e_t é um fator adotado pelo projetista (itens fáceis de manipular receberam 0.5, os normais 1 e os difíceis 1.5).

Tabela 3.2 - Características das estações de trabalho

t	n_t	u_t (%)	p_t (hs)	e_t
1	1	.9	1	1
2	1	.8	2	1.5
3	1	.6	1.5	1
4	1	.4	2.5	1
5	1	.9	2.5	0.5
6	2	.95	0.5	1.5
7	2	.8	1.5	1
8	2	.7	2	1
9	2	.9	1	1
10	2	.8	0.5	0.5
11	3	.85	1	1
12	4	.95	1.5	1
13	5	.9	1	1
14	6	.85	3	1
15	7	.9	4	1

Adaptado de Montreuil e Venkatadri (1991, p.297)

Para definir a posição de cada estação de trabalho no arranjo é necessário calcular dois componentes. O primeiro é obtido pelo procedimento minimax e o segundo é a taxa média de deslocamento de/para cada estação de trabalho definida pela eq.(1).

$$r_t = \frac{2.e_t.u_t}{p_t} \quad (1)$$

Com o resultado dessa equação pode-se calcular a probabilidade de ocorrer um deslocamento para cada estação de trabalho como mostra a eq.(2).

$$p(t) = \frac{(r_t.n_t)}{\sum_{\forall t} r_t.n_t} \quad (2)$$

A Tabela 3.3 apresenta o resultado dos cálculos de r_t e $p(t)$ para o exemplo em questão.

Tabela 3.3 - Dados para cada tipo de estação de trabalho

Tipo de Estação	r_t	$p(t)$
1	1.80	0.035
2	1.20	0.023
3	0.80	0.015
4	0.32	0.006
5	0.36	0.007
6	5.70	0.220
7	1.07	0.041
8	0.70	0.027
9	1.80	0.069
10	1.60	0.062
11	1.70	0.098
12	1.27	0.098
13	1.80	0.173
14	0.57	0.065
15	0.45	0.061

Adaptado de Montreuil e Venkatadri (1991, p.297)

A Figura 3.8 mostra o arranjo físico distribuído obtido pelo procedimento, bem como o melhor arranjo físico funcional que foi obtido com os dados fornecidos e que serviu de base de comparação. Cada máquina é representada por um número real onde a parte decimal indica o número da máquina no departamento e a parte inteira indica a qual processo a máquina pertence.

4.1	14.1	12.3	14.3	8.1	12.1	14.5	15.4
15.1	13.1	11.3	7.2	2.1	9.2	13.3	15.5
15.3	10.2	6.2	9.1	1.1	6.1	11.1	15.6
15.2	13.2	11.2	3.1	13.5	10.1	13.4	14.6
5.1	14.2	12.2	8.2	14.4	7.1	12.4	15.7

Arranjo físico distribuído

Adaptado de Montreuil e Venkatadri (1991, p.298)

5.1	8.2	2.1	10.1	10.2	7.2	14.5	14.6
4.1	8.1	11.2	9.1	9.2	7.1	14.2	14.4
15.4	15.1	11.1	6.1	6.2	1.1	14.1	14.3
15.6	15.2	11.3	13.1	13.2	13.3	12.1	12.2
15.7	15.3	15.5	13.5	13.5	3.1	12.3	12.4

Arranjo físico funcional

Figura 3.8 – Arranjos físicos distribuído e funcional

A Figura 3.9⁷ apresenta os valores médios da distância mínima entre cada estação de um tipo para a mais próxima estação dos demais tipos.

Montreuil, Venkatadri e LeFrançois (1991)

Calcula

Fim

Para estação

Da estação

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0.00	1.00	2.00	6.00	6.00	1.00	2.00	2.00	1.00	2.00	2.00	3.00	1.00	2.00	3.00
2	1.00	0.00	3.00	5.00	7.00	2.00	1.00	1.00	1.00	3.00	2.00	2.00	2.00	2.00	3.00
3	2.00	3.00	0.00	6.00	4.00	2.00	2.00	1.00	1.00	2.00	1.00	2.00	1.00	2.00	3.00
4	6.00	5.00	6.00	0.00	4.00	4.00	4.00	4.00	5.00	3.00	3.00	2.00	2.00	1.00	1.00
5	6.00	7.00	4.00	4.00	0.00	4.00	5.00	3.00	5.00	3.00	3.00	2.00	2.00	1.00	1.00
6	1.50	2.50	2.50	5.50	5.50	0.00	2.00	3.00	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	3.00	2.00
7	2.50	2.50	2.50	6.50	5.50	2.00	0.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.50	2.00	1.00	2.50
8	2.50	2.50	2.50	5.50	5.50	3.00	2.00	0.00	2.00	3.50	2.50	1.00	2.50	1.00	3.50
9	1.50	1.50	2.50	5.50	6.50	1.00	1.50	2.00	0.00	2.00	2.00	2.00	1.50	2.00	2.50
10	2.50	3.50	2.50	5.50	4.50	1.00	2.00	3.50	2.00	0.00	2.00	2.50	1.00	2.00	2.00
11	2.67	3.00	2.67	5.33	5.33	1.00	2.33	3.00	2.00	2.00	0.00	1.33	1.00	2.00	1.67
12	3.75	3.75	3.75	5.75	5.75	2.25	2.25	1.75	2.75	2.75	1.75	0.00	1.75	1.25	2.25
13	3.00	3.20	3.00	5.80	5.40	2.00	2.60	3.20	2.40	1.40	1.20	2.00	0.00	1.00	1.80
14	3.83	3.83	3.83	5.50	5.83	3.00	2.67	2.33	3.17	2.67	2.17	1.33	1.33	0.00	2.17
15	4.43	4.57	5.00	5.86	6.14	3.00	3.86	4.29	3.43	2.86	2.29	2.71	1.57	1.71	0.00

Baseado em Montreuil e Venkatadri (1991, p.298)

Figura 3.9 - Média das distâncias mínimas entre estações

Por exemplo, da estação tipo 1 para a estação tipo 15 há 7 possíveis percursos com as seguintes distâncias retilineares: 5, 4, 5, 5, 4, 3 e 5. Dessa forma a distância mínima é de 3 unidades, como mostra a célula da linha 1 e coluna 15 ou, simplesmente (1, 15). Este caso não é uma média por existir somente uma estação de origem.

No caso, por exemplo, da origem ser uma estação 8 e o destino ser uma estação 15 tem-se as seguintes distâncias retilineares: 5, 6, 7, 3, 4, 5 e 7 para

⁷ Na tabela original há 7 valores incorretos. São eles: (Linha, Coluna)=(1, 8)=3.00, (3, 4)=7.00, (6, 14)=2.50, (9, 10)=2.50, (11, 15)=1.33, (13, 3)=3.20 e (14, 1)=4.00

uma das origens e 4, 5, 6, 4, 6, 7 e 8 para a outra. A distância mínima para cada origem são 3 e 4 respectivamente. Portanto, a média é 3.50, como mostra a célula (8, 15).

Para comparar os arranjos físicos os autores calcularam um índice que leva em consideração os dados da matriz da Figura 3.9 e a probabilidade $p(t)$ calculada na Tabela 3.3. O artigo não exemplifica o cálculo que é apenas descrito de forma pouco clara em um único parágrafo. Porém, após compreender o procedimento explicado percebe-se que o cálculo é simples e composto de três etapas: primeiro multiplica-se a matriz de distâncias mínimas (Figura 3.9) pelo vetor de probabilidades $p(t)$, obtendo um novo vetor. A segunda etapa consiste em multiplicar esse vetor pelo vetor $p(t)$, obtendo outro vetor. A terceira etapa consiste em realizar o somatório dos elementos desse último vetor. Esse procedimento é apresentado pela Figura 3.10.

0.00	1.00	2.00	6.00	6.00	1.00	2.00	2.00	1.00	2.00	2.00	3.00	1.00	2.00	3.00	0.035	1.65601	0.035	0.0574
1.00	0.00	3.00	5.00	7.00	2.00	1.00	1.00	1.00	3.00	2.00	2.00	2.00	2.00	3.00	0.023	1.97259	0.023	0.0456
2.00	3.00	0.00	6.00	4.00	2.00	2.00	1.00	1.00	2.00	1.00	2.00	1.00	2.00	3.00	0.015	1.72367	0.015	0.0266
6.00	5.00	6.00	0.00	4.00	4.00	4.00	4.00	5.00	3.00	3.00	2.00	2.00	1.00	1.00	0.006	3.08794	0.006	0.0190
6.00	7.00	4.00	4.00	0.00	4.00	5.00	3.00	5.00	3.00	3.00	2.00	2.00	1.00	1.00	0.007	3.11438	0.007	0.0216
1.50	2.50	2.50	5.50	5.50	0.00	2.00	3.00	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	3.00	2.00	0.220	1.47198	0.220	0.3231
2.50	2.50	2.50	6.50	5.50	2.00	0.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.50	2.00	1.00	2.50	0.041	1.92249	0.041	0.0790
2.50	2.50	2.50	5.50	5.50	3.00	2.00	0.00	2.00	3.50	2.50	1.00	2.50	1.00	3.00	0.027	2.37384	0.027	0.0640
1.50	1.50	2.50	5.50	6.50	1.00	1.50	2.00	0.00	2.00	2.00	2.00	1.50	2.00	2.50	0.069	1.59654	0.069	0.1107
2.50	3.50	2.50	5.50	4.50	1.00	2.00	3.50	2.00	0.00	2.00	2.50	1.00	2.00	2.00	0.062	1.67174	0.062	0.1030
2.67	3.00	2.67	5.33	5.33	1.00	2.33	3.00	2.00	2.00	0.00	1.33	1.00	2.00	1.67	0.098	1.46613	0.098	0.1440
3.75	3.75	3.75	5.75	5.75	2.25	2.25	1.75	2.75	2.75	1.75	0.00	1.75	1.25	2.25	0.098	2.03683	0.098	0.1987
3.00	3.20	3.00	5.80	5.40	2.00	2.60	3.20	2.40	1.40	1.20	2.00	0.00	1.00	1.80	0.173	1.66975	0.173	0.2894
3.83	3.83	3.83	5.50	5.83	3.00	2.67	2.33	3.17	2.67	2.17	1.33	1.33	0.00	2.17	0.065	2.27495	0.065	0.1489
4.43	4.57	5.00	5.86	6.14	3.00	3.86	4.29	3.43	2.86	2.29	2.71	1.57	1.71	0.00	0.061	2.63505	0.061	0.1598
															1.7908			

Figura 3.10 - Procedimento de cálculo do índice

O índice obtido para o arranjo distribuído foi de 1.79 enquanto que para o arranjo funcional foi 2.54⁸ o que permite concluir que houve uma melhoria de 29.4%⁹ nos tempos de traslado entre uma estação de trabalho e a próxima estação requerida pelo processo de fabricação.

Nas conclusões destacou-se que o alcance da melhora apresentada é fortemente dependente do sucesso que o sistema de planejamento e controle

⁸ Provavelmente devido a um erro de transcrição de valores esse índice é apresentado no artigo como 2.74 ao invés de 2.5374 que é o valor que se obtém quando se realiza o cálculo com os valores e procedimentos fornecidos no artigo.

⁹ No artigo a melhoria calculada foi de 35%, mas está incorreta, pois usou o índice de 2.74 para o arranjo funcional.

da produção terá na programação dos lotes, tirando vantagens da proximidade entre tipos de máquinas, em tempo real, que o arranjo físico proporciona (MONTREUIL e VENKATADRI, 1991, p.298). Os autores também conjecturam que o desempenho do arranjo físico distribuído, quando comparado ao arranjo funcional, deve se elevar quando o número de estações de trabalho e seus tipos aumentam. Supuseram que em um sistema com 200 máquinas terá melhorias ainda maiores do que o pequeno exemplo apresentado.

No artigo Montreuil, Venkatadri e Lefrançois (1991), que é muito similar ao primeiro, os autores adotam o nome holográfico ao invés de distribuído, disperso ou espalhado. A razão apresentada é que apesar desses três nomes representarem bem a característica física do leiaute, falham em capturar a lógica intrínseca que o torna uma alternativa potencial aos arranjos físicos clássicos. Além disso, acrescentaram um exemplo para mostrar a possibilidade de encontrar rotas eficientes. O artigo apresenta uma tarefa que requer a seguinte seqüência de estações de trabalho: 8, 12, 9 e 13.

A melhor rota é providenciada pela seqüência 8.1 - 12.1 - 9.2 - 13.3 com uma distância retilinear de 3 unidades. A média das dez melhores rotas é de 6.3 unidades (a décima rota tem 8 unidades de distância). Em comparação, no arranjo físico funcional, a melhor rota é 8.1 - 12.1 - 9.2 - 13.3 com distância de 11 unidades (a décima melhor rota tem distância de 13 e a média das dez melhores rotas é 12.2). A Figura 3.11 exibe as dez melhores rotas no arranjo físico distribuído sendo cinco delas iniciando em 8.1 - 12.1 - 9.2 (em vermelho) e as outras cinco iniciando em 8.2 - 12.2 - 9.1 (em azul).

Baseado em Montreuil, Venkatadri e Lefrançois (1991, p.11)

Figura 3.11 - Dez melhores rotas para a seqüência 8-12-9-13

Apesar dos dois artigos citados serem os primeiros a divulgarem o arranjo físico distribuído, o trabalho de Montreuil et al. (1993) é considerado a fonte inicial por ser mais completo e detalhado. Compara leiautes funcionais e distribuídos em três configurações: 40 estações com 10 tipos de processo, 150 estações com 30 tipos de processo e 1296 estações com 125 tipos de processo. Todos os experimentos usaram dados gerados aleatoriamente

Foi desenvolvido um algoritmo denominado *center* para gerar o leiaute funcional. A idéia básica é identificar entre todos os processos qual é mais solicitado e colocá-lo no centro do leiaute de forma a minimizar sua distância em relação aos demais processos. Na seqüência os demais processos de grande solicitação são colocados o mais próximo do centro e assim sucessivamente. Os processos de menor utilização acabam nas extremidades.

A Figura 3.12 exibe um arranjo físico criado com esse algoritmo contendo 150 estações de trabalho de 30 tipos diferentes. De acordo com os dados apresentados pelos autores, o processo 24 é o mais crítico e, por isso, foi centralizado pelo algoritmo. No outro extremo tem-se o processo 23 que é o menos crítico e que, devido a isso, foi alocado na extremidade do arranjo físico.

Adaptado de Montreuil et al. (1993, p.3)

Figura 3.12 - Resultado do algoritmo *center*

Para gerar o arranjo físico distribuído os autores desenvolveram dois algoritmos. O primeiro, denominado *target*, prioriza os processos e espalha as máquinas de forma aproximadamente eqüidistante. Se o departamento possuir apenas uma máquina ela será colocada no centro. Se possuir duas máquinas o chão de fábrica é dividido em duas partes e cada máquina ficará aproximadamente no centro de cada metade. A Figura 3.13 ilustra esse conceito mostrando as posições para uma, duas, três e quatro máquinas.

Adaptado de Montreuil et al. (1993, p.8)

Figura 3.13 - Ilustração do conceito *target*

O algoritmo *target* gera o arranjo distribuído em 2 fases. A primeira fase gera aleatoriamente uma posição para cada máquina de um mesmo tipo. Em seguida usa um procedimento heurístico para maximizar a distribuição das máquinas. Esse procedimento movimenta uma máquina de cada vez para posições adjacentes à posição atual (Norte, Sul, Leste e Oeste) e calcula o resultado de uma função objetivo a cada movimento em busca de uma posição que otimize a distribuição. Esse procedimento é realizado até que a função objetivo não obtenha nenhuma melhoria. Ao final dessa etapa cada máquina terá sua posição otimizada. Porém, como o procedimento é realizado para cada tipo de máquina separadamente, haverá posições com mais de uma máquina pré-alocada. A segunda fase do algoritmo é responsável por uma relação de compromisso para definir a posição final de cada máquina o mais próximo possível da posição ideal calculada na primeira fase. Essa relação de compromisso leva em consideração dados como taxa de utilização e tempos de processamento dos lotes.

O segundo algoritmo foi denominado de *randomizing* e distribui as estações de trabalho de forma puramente aleatória.

Os resultados mostram que quanto maior o número de estações de trabalho mais se destaca a vantagem da heurística *target* sobre a *randomizing* (MONTREUIL et al., 1993, p.14). O arranjo físico maximamente distribuído (*target*) também se mostra superior em relação ao arranjo físico funcional e a diferença também cresce com o número de estações de trabalho. As conclusões obtidas pelos autores podem ser resumidas em:

- É necessário maior estudo para atingir o real potencial do arranjo físico maximamente distribuído (holográfico);
- O arranjo físico maximamente distribuído permite obter melhores resultados do que o arranjo funcional;
- Um arranjo físico maximamente distribuído não é uma simples distribuição aleatória das estações de trabalho pelo chão de fábrica;
- As melhorias que podem ser obtidas com a adoção do arranjo físico holográfico dependem fortemente do sistema de planejamento e controle da produção. A proximidade de diferentes máquinas só será vantajosa se houver um sistema de controle em tempo-real para promover a melhor escolha na programação dos lotes.

É importante ressaltar que os procedimentos adotados não consideraram alternativas nos processos de fabricação das peças (flexibilidade de seqüência de processo). Na realidade as simulações foram todas baseadas em probabilidades e não em conjuntos de peças com suas respectivas demandas e seqüências de processo.

3.5 Arranjo físico distribuído para cada período

Benjaafar (1995) e Benjaafar e Sheikhzadeh (1996) propõe um procedimento para projetar arranjos físicos que produzem múltiplos tipos de produtos com demanda variável a cada período. A proposta permite avaliar diversos tipos de arranjos físicos distribuídos com diferentes graus de desagregação dos departamentos existentes. Além disso, se um arranjo físico particular for selecionado, o método permite determinar e otimizar de forma sistemática o fluxo de material para cada cenário de demanda.

Um exemplo do procedimento mostrou o uso de três níveis de demanda (baixa, média e alta) sendo que cada nível tem uma probabilidade de ocorrência pré-definida, como mostra a Tabela 3.4. Na Tabela 3.5 tem-se a probabilidade de ocorrência para diferentes combinações de demanda. Para cada peça é conhecida a sua quantidade de demanda em cada um dos três níveis, como mostra a Tabela 3.6. O autor definiu seqüências fixas de manufatura para as peças (Tabela 3.7) e assumiu que os departamentos do mesmo tipo têm capacidade similar (BENJAAFAR, 1995, p.424).

Tabela 3.4 - Probabilidade de ocorrência de cada nível de demanda

Demanda	Probabilidade de ocorrência
Baixa (B)	0.2
Média (M)	0.5
Alta (A)	0.3

Adaptado de Benjaafar (1995, p.424)

Tabela 3.5 - Probabilidade para diferentes combinações de demanda

Cenários	Probabilidade de ocorrência
BBBB	0.0016
MMMM	0.0625
AAAA	0.0081
BBBM	0.004
BBBA	0.0024
BBMA	0.006
BBMM	0.01
BBAA	0.0036
BMMM	0.025
BAAA	0.0054
...	...

Adaptado de Benjaafar (1995, p.424)

Tabela 3.6 - Quantidade de peças para cada nível de demanda

Peça	Baixa	Média	Alta
P1	50	100	150
P2	80	120	160
P3	150	200	250
P4	90	180	270

Adaptado de Benjaafar (1995, p.424)

Tabela 3.7 - Seqüências de manufatura das peças

Peça	Seqüência de manufatura
P1	A → B → D → E → F
P2	B → C → A → D → B → E
P3	B → A → C → F → E → D
P4	C → B → D → A → F

Adaptado de Benjaafar (1995, p.424)

Para cada combinação de demandas constrói-se uma matriz de fluxo com os dados da Tabela 3.6 e da Tabela 3.7, como mostra a Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Matriz de fluxo para a combinação de demanda AAAA

	A	B	C	D	E	F
A	0	150	250	160	0	420
B	250	0	160	420	0	160
C	160	270	0	0	0	250
D	270	160	0	0	150	0
E	0	0	0	250	0	150
F	0	0	0	0	250	0

Adaptado de Benjaafar (1995, p.424)

Um algoritmo contendo 8 passos é usado para gerar o arranjo mais flexível, como mostra o Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Algoritmo para gerar o arranjo mais flexível

- Passo 1: Ler a distribuição de demanda para cada produto.
- Passo 2: Ler a seqüência de processamento para cada produto.
- Passo 3: Obter todas as possíveis matrizes de fluxo $M(I)$ e calcular sua correspondente probabilidade de ocorrência $p(I)$, onde $I=1, 2, \dots, S_{max}$ (S_{max} é o número total de possíveis matrizes).
- Passo 4: $I=0$.
- Passo 5: $I=I+1$. Se $I > S_{max}$, vá para o passo 7.
- Passo 6: Gerar um arranjo ótimo para a matriz de fluxo atual $M(I)$. Vá para o passo 5.
- Passo 7: Avaliar todos os arranjos físicos gerados e escolher o mais flexível.
- Passo 8: Parar.

Adaptado de Benjaafar (1995, p.424)

O número de matrizes de fluxo pode ser muito grande se houver um elevado número de produtos e diversos níveis de demanda. Neste caso o autor

sugere a simulação de Monte Carlo como uma alternativa à completa enumeração das matrizes (BENJAAFAR, 1995, p.424).

Para obter o arranjo ótimo e a correspondente alocação de fluxo entre departamentos para cada possível matriz de fluxo, é necessário resolver o modelo apresentado pela eq.(3) no passo 6:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{n_i=1}^{N_i} \sum_{n_j=1}^{N_j} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K V_{n_i m_j} \cdot d_{kl} \cdot X_{n_j k} \cdot X_{m_j l} \quad (3)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k=1}^K X_{n_i k} = 1 \quad \text{para todo } n_i \text{ e } i \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{n_i=1}^{N_i} X_{n_i k} = 1 \quad \text{para to } k \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{n_i=1}^{N_i} V_{n_i m_j} \cdot T_{m_j} \leq C_{m_j} \quad \text{para todo } m_j \text{ e } j \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^N \sum_{m_j=1}^{N_j} V_{n_i m_j} \cdot T_{n_i} \leq C_{n_i} \quad \text{para todo } n_i \text{ e } i \quad (7)$$

$$\sum_{n_i=1}^{N_i} \sum_{m_j=1}^{N_j} V_{n_i m_j} = V_{ij} \quad \text{para todo } i \text{ e } j \quad (8)$$

$$X_{n_j k} = 0, 1 \quad \text{para todo } n_i \text{ e } k \quad (9)$$

Onde:

$$X_{n_i k} = \begin{cases} 1 & \text{se o enésimo departamento do tipo } i \text{ for atribuído à localização } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$V_{n_i m_j}$: volume de fluxo entre o enésimo departamento do tipo i e o enésimo departamento do tipo j

d_{kl} : distância entre a localização k e a localização l

V_{ij} : volume de fluxo entre os departamentos do tipo i e tipo j

T_{n_i} : tempo de processamento médio equivalente por unidade de carga transferida no departamento n_i

C_{n_j} : capacidade do departamento n_i (tempo disponível de operação)

N_i : número de máquinas do tipo i

N : número total de tipos de máquinas

K : número total de localizações

O modelo resolve simultaneamente a locação dos departamentos e o fluxo entre os departamentos individuais, minimizando o custo de manuseio de material. As restrições (4) e (5) garantem que cada departamento é atribuído a exatamente uma localização e que cada localização não receba mais de um departamento.

Quando o número de localizações excede o número de departamento são criados departamentos vazios (*dummy departments*) sem nenhum fluxo, sem perder a optimalidade. As restrições (6) e (7) garantem que o volume de fluxo original de (ou destinado à) um departamento não exceda sua capacidade. A restrição (8) iguala a quantidade de fluxo entre as múltiplas cópias dos departamentos i e j para a quantidade de fluxo entre o departamento tipo i e o departamento tipo j , como indicado pela matriz de fluxo.

O autor declara que o modelo pode ser visto como uma variação do Problema Quadrático Clássico de Atribuição (*Classical Quadratic Assignment Problem* - QAP) e, dessa forma, ambos são problemas polinomiais não determinísticos (NP-complete - *Non-deterministic Polynomial time*), significando que na prática será necessário um esforço computacional excessivo para obter uma solução ótima. Sendo assim um método heurístico é fornecido. O problema pode ser formulado como um programa linear e resolvido otimamente em um tempo razoável. Os passos estão listados no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Método heurístico

Passo 1: Faça $J=1$.   Passo 2: Gerar um arranjo físico inicial.   Passo 3: Resolver otimamente para alocação do volume de fluxo (programa linear).   Passo 4: Calcular $Z(I)$, o valor resultante da função objetivo do arranjo original.   Passo 5: Faça $J=J+1$. Se $J>J_{\max}$, vá para o passo 9.   Passo 6: Gerar o próximo arranjo físico.   Passo 7: Resolver otimamente para alocação do volume de fluxo (programa linear).   Passo 8: Calcular $Z(I)$, o valor resultante da função objetivo. Vá para o passo 5.   Passo 9: Implementar o arranjo físico de mínimo custo. Se o arranjo de mínimo custo é o mesmo que o anterior, então vá para o passo 9. Caso contrário, faça $J=1$ e vá para o passo 5.   Passo 10: Parar.

Adaptado de Benjaafar (1995, p.426)

Por definição um arranjo físico flexível é aquele que mantém um baixo custo de manuseio de material independente das mudanças nos níveis de demanda (BENJAAFAR, 1995, p.426). No Quadro 3.3 estão os passos sugeridos para identificar qual arranjo é mais flexível.

Quadro 3.3 - Procedimento para identificar o arranjo mais flexível

Passo 1: Faça $I=1$.
 Passo 2: Faça $J=1$.
 Passo 3: Calcule $Z(L(I), J)$, onde $X(L(I), J)$ é o custo de manuseio de material resultante do uso do arranjo físico gerado para o cenário de demanda I quando o cenário de demanda atual é J , resolvendo o programa linear associado.
 Passo 4: $J=J+1$.
 Passo 5: If $J < S_{max}$, volte para o passo 3.
 Passo 6: $I=I+1$.
 Passo 7: Se $I < S_{max}$, vá para o passo 2.
 Passo 8: Selecione o arranjo físico mais flexível (por exemplo, calculando o custo esperado para cada leiaute e selecionando aquele de menor custo esperado).
 Passo 9: Parar.

Adaptado de Benjaafar (1995, p.426)

O autor não apresenta nenhum resultado obtido, mas comenta que um arranjo físico cujo custo de movimentação de material é baixo pode sofrer flutuações significativas de desempenho que podem ser até inaceitáveis com a mudança de cenário.

3.6 Comparação de desempenho

Askin, Ciarallo e Lundgren (1999) avaliam empiricamente os arranjos físicos distribuído¹⁰ e fractal comparando-os com o arranjo físico funcional. Comentam também que a pesquisa sobre arranjos físicos distribuído e fractal, tanto relacionado com projeto quanto com desempenho, são bastante limitadas.

Os autores citam que o arranjo físico distribuído parece caótico, mas que providencia muitas alternativas para adaptação às mudanças de condição e

¹⁰ No artigo original os autores adotam o termo arranjo físico holônico para denominar o arranjo físico distribuído, mas, como comentado no texto, esse termo não deve mais ser adotado.

que os avanços na tecnologia da informação farão possível ter um sistema de controle em tempo real para definir uma tarefa à melhor máquina.

Dois algoritmos para geração de arranjos físicos distribuídos são apresentados. O primeiro algoritmo, denominado HR (*Holonic Random*), é apresentado no Quadro 3.4 e dispõe as máquinas de forma aleatória seguindo uma rota pelo chão de fábrica denominada *curva de preenchimento espacial*¹¹ (*Space Filling Curve*), como mostra a Figura 3.14.

Quadro 3.4 - Algoritmo *Holonic Random* (HR)

```

Inicializar a rota de preenchimento na primeira posição
Enquanto (há máquinas a serem distribuídas) faça
    Escolha uma máquina aleatoriamente
    Atribua a máquina na posição atual do arranjo físico
    Atualize as máquinas restantes
    Atualize a posição da rota de preenchimento para a próxima posição
Fim-Enquanto
  
```

Adaptado de Askin, Ciarallo e Lundgren (1999, p.964)

Adaptado de Askin, Ciarallo e Lundgren (1999, p.964)

Figura 3.14 - Curva de preenchimento para arranjo com 30 máquinas

O outro algoritmo, denominado HC (*Holonic Similarity Coefficient*), baseia-se na probabilidade de ocorrer uma transição entre os processos. Esta abordagem busca posicionar uma máquina próxima a outra se elas são usadas em sucessão. A curva de preenchimento espacial também é usada nesta

¹¹ Detalhes sobre as curvas de preenchimento espacial estão disponíveis no Apêndice B.

abordagem. Há apenas uma única diferença entre este algoritmo e o anterior. Ao invés de se escolher uma máquina aleatoriamente escolhe-se a máquina com a maior probabilidade de uso, levando em consideração as máquinas adjacentes à posição atual.

Os ensaios de simulação trabalharam com 7 fatores, sendo 6 deles com apenas dois níveis e um com quatro níveis, como mostra a Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Fatores de simulação

Fator	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
Tempo de processamento	Fixo	Exponencial		
Número de máquinas	30	60		
Número de processos	5	15		
Seqüência de seleção	Uniforme	Dependente		
Utilização	75%	85%		
Tempo entre tarefas	Constante	Exponencial		
Atraso por manuseio	0.5	1	5	10

Adaptado de Askin, Ciarallo e Lundgren (1999, p.968)

Por meio de uma análise ANOVA foram definidas 16 combinações com os fatores relevantes (Tabela 3.10).

Tabela 3.10 - Nível dos fatores dos casos observados

Caso	Tempo de Processo	Número de Máquinas	Número de Processos	Utilização
1	Fixo	30	5	75%
2	Fixo	30	5	85%
3	Fixo	30	15	75%
4	Fixo	30	15	85%
5	Fixo	60	5	75%
6	Fixo	60	5	85%
7	Fixo	60	15	75%
8	Fixo	60	15	85%
9	Exponencial	30	5	75%
10	Exponencial	30	5	85%
11	Exponencial	30	15	75%
12	Exponencial	30	15	85%
13	Exponencial	60	5	75%
14	Exponencial	60	5	85%
15	Exponencial	60	15	75%
16	Exponencial	60	15	85%

Adaptado de Askin, Ciarallo e Lundgren (1999, p.968)

Entre as conclusões desse trabalho definiu-se que o arranjo físico distribuído situa-se entre o funcional e o fractal. Essa posição pode ser melhorada se um sistema de informação em tempo real estiver disponível para guiar as decisões de roteamento. Não foi considerada nenhuma forma alternativa de execução dos processos (ASKIN, CIARALLO e LUNDGREN, 1999, p.977).

3.7 Arranjo físico parcialmente distribuído

O trabalho de Benjaafar e Sheikhzadeh (2000) complementa os artigos de 1995 e 1996, apresentando, além de toda a formulação matemática do modelo, a geração aleatória de dados, os resultados obtidos e as conclusões a que chegaram.

Foram considerados dois tamanhos de arranjo físico, denominados Caso 1 e Caso 2 (Tabela 3.11). O número de operações de cada produto é gerado aleatoriamente entre 2 e 5 para o Caso 1 e entre 2 e 8 para o Caso 2. Não foi levada em consideração nenhuma forma de flexibilidade no processo.

Tabela 3.11 - Dados dos experimentos de Benjaafar e Sheikhzadeh (2000)

Caso	Máquinas	Tipos de máquinas	Máquinas de cada tipo	Produtos
1	16	5	1 à 5	5
2	40	10	1 à 6	10

O tempo de processamento em cada estação de trabalho foi obtido por meio de uma distribuição uniforme com valor entre 10 e 100 minutos. As demandas também são provenientes de distribuições uniformes sendo a baixa (B) variando entre 10 e 100, a média (M) entre 100 e 200 e a alta (A) entre 200 e 300. Um exemplo de dados gerados para o caso 2 está apresentado na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Exemplo de distribuição de demanda para o Caso 2

Produto	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇	P₈	P₉	P₁₀
Tipo de Demanda	A	M	B	B	A	M	A	B	M	A
Demanda	275	146	51	17	210	193	266	78	113	234

Onde: $d_{nj,k}^*$: distância entre a n-ésima máquina do tipo j e a mais próxima máquina do tipo k.

n_j : a n-ésima máquina do tipo j.

N_j : o número de máquinas do tipo j.

N : número tipos de máquinas (departamentos).

Foi usado um programa matemático denominado CPLEX¹⁴ para gerar a solução da alocação do fluxo (programação linear). Observou-se que a inclusão de informações relacionadas à probabilidade de ocorrência de diferentes cenários teve pouco impacto nos resultados, com diferença de 2.5% para o Caso 1 e 4% para o Caso 2. Isso sugere que a precisão na avaliação das probabilidades não é crítica e que a grande redução no custo de manuseio de material vem da desagregação dos departamentos e na alocação ótima dos fluxos. Na prática pode-se evitar a determinação destas probabilidades quando as diferentes demandas são difíceis de serem estimadas (BENJAAFAR e SHEIKHZADEH, 2000, p.319).

Os resultados também mostram que o arranjo físico funcional tem o pior desempenho entre as quatro configurações analisadas enquanto o arranjo físico parcialmente distribuído teve o melhor. Os autores também avaliaram os efeitos do grau de desagregação dos departamentos. A Figura 3.16 mostra um exemplo com um arranjo funcional e três arranjos com diferentes graus de desagregação dos departamentos.

As análises mostraram que a primeira desagregação (duas cópias de cada departamento) exerce um grande impacto na redução do custo de manuseio de material (cerca de 37%). Passar de duas cópias para três reduz esse custo em cerca de 3% e passar de três para seis cópias reduz em pouco mais de 4%. Com base nesses dados os autores declaram que a desagregação parcial é, na prática, menos custosa, mais fácil de implementar e obtém praticamente os mesmos benefícios do que a desagregação total (BENJAAFAR e SHEIKHZADEH, 2000, p.320).

¹⁴ ANON. (1988). *CPLEX Version 6.0 User Manual*. ILOG CPLEX Division, Incline Village, NV 89451, USA.

Adaptado de Benjaafar e Sheikhzadeh (2000, p.320)

Figura 3.16 - Diferentes graus de desagregação dos departamentos

3.8 Arranjo físico distribuído para vários períodos

Esta proposta foi originalmente apresentada por Lahmar e Benjaafar (2001) e novamente publicada em Lahmar e Benjaafar (2002a), Lahmar e Benjaafar (2002b) e Lahmar e Benjaafar (2005). O foco é projetar um arranjo físico distribuído que atenda a múltiplos períodos, com a demanda e o conjunto de produtos variando de um período para outro. Considera-se também que pode haver alterações no arranjo físico ao final de cada período (*relayout*).

Os autores assumem que as informações de demanda para cada período estão disponíveis no estágio inicial do projeto e, dessa forma, o objetivo é identificar um arranjo físico para cada período que minimize tanto o custo de manuseio de material quanto o custo de alteração do arranjo físico atual para essa nova configuração. Além disso, o modelo matemático assume que os departamentos duplicados são do mesmo tamanho, apesar de na prática isso não ocorrer.

O objetivo é minimizar a soma do custo de fluxo de material e custo de rearranjo sobre um horizonte de planejamento consistindo em T períodos. Foi usada a seguinte notação.

$$x_{nikt} = \begin{cases} 1 & \text{se a cópia } n \text{ do departamento do tipo } i \text{ for atribuído localização } k \text{ no período } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

v_{nimjpt} : volume do fluxo do produto p entre a n ésima duplicata do departamento do tipo i e a m ésima duplicata do departamento do tipo j no período t .

v_{ijpt} : volume total do fluxo do produto p entre as duplicatas do departamento i e duplicatas do departamento j no período t .

d_{kl} : distância percorrida entre a localização k e a localização l .

t_{nip} : tempo de processamento por unidade de carga do produto p na duplicata n do departamento do tipo i .

c_{kl} : custo de movimentação de uma unidade de carga do departamento k para o departamento l .

C_{ni} : capacidade da duplicata n do departamento do tipo i (tempo de operação disponível).

r_{nikl} : custo de rearranjo da duplicata n do departamento do tipo i da localização k para a localização l .

T : número total de períodos.

N_i : número total de duplicatas do departamento do tipo i .

N : número total de tipos de departamentos.

M : número total de localizações.

P : número total de tipos de produtos.

O projeto do arranjo físico e o problema de alocação de fluxo são formulados como mostra a eq.(12).

$$\begin{aligned} \text{(P) Min } z = & \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^{N_i} \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^{N_j} \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M v_{nimjpt} x_{nikt} x_{mjlt} c_{kl} d_{kl} + \\ & \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^{N_i} \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M x_{nikt} x_{ni(l-t)} + I_{nikl} \end{aligned} \quad (12)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^{N_i} x_{nikt} = 1 \quad \forall k, t \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^M x_{nikt} = 1 \quad \forall i, n, t \quad (14)$$

$$\sum_{m=1}^{N_j} \sum_{n=1}^{N_i} v_{nimjpt} = v_{ijpt} \quad \forall i, j, p, t \quad (15)$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{n=1}^{N_i} v_{nimjpt} = \sum_{q=0}^N \sum_{r=1}^{N_q} v_{mjrqt} \quad \forall j, m, p, t \quad (16)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{i=0}^N \sum_{n=1}^{N_i} v_{nimjpt} t_{mjp} \leq C_{mj} \quad \forall j, m, t \quad (17)$$

$$x_{nikt} = 0, 1 \quad \forall i, n, k, t \quad (18)$$

$$v_{nimjpt} \geq 0 \quad \forall i, n, j, m, p, t \quad (19)$$

Esse modelo trata como variáveis de decisão tanto a localização dos departamentos (x_{mikt} 's) quanto a alocação do fluxo entre departamentos individuais em cada período (v_{nimjpt} 's). As restrições (13) e (14) garantem que cada departamento duplicado é atribuído a uma localização e que cada localização receba apenas um departamento. A restrição (15) iguala o volume do fluxo entre os departamentos do tipo i e j . A restrição (16) garante que a quantidade de fluxo de entrada e saída (por produto) para e de um departamento sejam iguais. A restrição (17) garante que a quantidade de fluxo atribuído a cada cópia de cada departamento não exceda sua capacidade. O volume do fluxo entre departamentos é obtido a partir da rota dos produtos e das suas demandas, como mostra a eq.(20).

$$v_{ijpt} = D_{pt} \sum_{k=1}^{S_p-1} \delta_{ipk} \delta_{jpk} + 1 \quad (20)$$

Onde:

$$\delta_{ipk} = \begin{cases} 1 & \text{se o produto } p \text{ é processado pelo departamento } i \text{ no estágio } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

D_{pt} : é a demanda para o produto p no período t .

S_{pk} : número de operações requeridas pelo produto p .

Os autores mostram que há dois casos limite para o problema de arranjo físico distribuído dinâmico. O primeiro ocorre quando o custo de rearranjo é insignificante. Neste caso pode-se resolver uma série de problemas de arranjo físico de único período de forma totalmente independente. O segundo caso ocorre quando o custo de rearranjo é altamente proibitivo. Neste caso, como não haverá rearranjo, pode-se combinar todo o fluxo de todos os períodos e resolver o problema como um arranjo físico de período simples (LAHMAR e BENJAAFAR, 2002b, p.10).

Este modelo também é polinomial não determinístico e, dessa forma, é proposta uma abordagem heurística para solucioná-lo. Essa abordagem divide o problema em dois: subproblema do arranjo físico da instalação e subproblema da alocação de fluxo. A solução é obtida pela resolução iterativa do problema do arranjo físico com fluxo fixo e pelo problema da alocação de fluxo com um arranjo físico fixo. O procedimento pode ser resumido da seguinte forma:

Passo 1: dado um arranjo físico para cada período, encontre a alocação de fluxo de mínimo custo entre os departamentos para cada um desses períodos.

Passo 2: dada uma alocação de fluxo entre os departamentos para cada período, encontre o arranjo físico ótimo para esses períodos.

Ocorre uma alternância entre os passos 1 e 2 até que não seja mais possível obter alguma melhora na solução.

Foram implementados dois algoritmos de busca, denominados de A1 e A2, sendo que o segundo usa mais intensivamente os recursos computacionais e leva a melhores resultados. Os autores acrescentam que a qualidade da solução é sensível à escolha do arranjo físico inicial para ambos algoritmos.

Todos os experimentos computacionais utilizaram dados gerados aleatoriamente. Pode-se citar o tamanho do arranjo físico (entre 16 e 48 máquinas), tipos de máquinas (entre 4 e 8), nível de duplicação dos departamentos, número de produtos, rotas dos produtos, distribuições de demandas e tamanho dos períodos. Com relação ao nível de duplicação dos departamentos é apresentado um exemplo de 48 máquinas de 6 tipos diferentes onde foram adotados 4 níveis como mostra a Tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Níveis de duplicação de departamentos

	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
Cópias do departamento	1	2	4	8
Máquinas por departamento	8	4	2	1

Baseado em Lahmar e Benjaafar (2002, p.16)

Entre as conclusões destaca-se que o arranjo físico parcialmente distribuído¹⁵ tem custo médio de manuseio de material 42% menor que o arranjo físico funcional e que o arranjo físico distribuído também é melhor que o arranjo físico aleatório (que exibem um alto grau de distribuição). Além disso, destaca-se que as diferenças entre arranjo físico parcialmente distribuído e arranjo físico maximamente distribuído são relativamente pequenas.

Os autores destacam também que, na prática, a desagregação e distribuição completa dos departamentos é raramente justificada e também concluem que arranjos físicos distribuídos são mais interessantes quando a variabilidade do fluxo é alta e a variedade dos produtos é baixa.

3.9 Elementos de recurso

Baykasoglu (2003) propõe uma nova abordagem para criar células virtuais de manufatura em arranjos físicos distribuídos. Nas palavras do autor “o arranjo físico distribuído é, provavelmente, a mais apropriada opção para implementação de células virtuais de manufatura”.

O autor declara que definir os requerimentos de processamento de uma peça em termos de tipo de máquina e projetar o arranjo físico baseado nessa consideração limita o desempenho e a flexibilidade da produção. Ao invés de simplesmente distribuir as máquinas pelo chão de fábrica sua sugestão é distribuir as capacidades de usinagem que essas máquinas possuem. Essas capacidades são denominadas Elementos de Recurso (*Resource Elements* - REs). Isso se deve ao fato de que algumas operações podem ser executadas em mais de uma máquina e algumas máquinas podem executar diferentes tipos de operações como, por exemplo, os centros de usinagem que combinam operações de torneamento e fresamento.

¹⁵ No artigo original o arranjo físico parcialmente distribuído é nomeado como arranjo físico distribuído, podendo levar a interpretação errônea.

Na abordagem por RE uma operação potencial é denominada Esquema de Geração de Forma (*Form Generating Schema* - FGS), que são padrões de capacidade independentes da máquina. Dessa forma um RE pode conter um ou mais FGS. A Figura 3.17 mostra três máquinas. A máquina 1 possui seu RE composto de três FGS's. A máquina 2 possui dois RE's, sendo um deles igual ao da máquina 1. Por sua vez a máquina 3 possui também dois RE's sendo um deles igual ao da máquina 2.

Fonte: Baykasoglu (2003, p.2602)

Figura 3.17 - Representação de instalação de usinagem com REs

As principais características dos REs são:

- REs são mutuamente exclusivos, em outras palavras, não há sobreposição entre REs.
- Um recurso que providencia um RE é capaz de executar todas as tarefas dentro desse RE.
- Um recurso pode providenciar muitos REs ou somente um RE.
- Um componente que requer um RE tem a chance de acessar todos os recursos providenciados pelo RE.
- São as únicas entidades de planejamento e programação.

O projeto do arranjo físico distribuído é baseado nas capacidades. O chão de fábrica é dividido em uma grade e em cada bloco será colocada uma máquina. Somente movimentos retilineares são considerados. Quando uma

máquina é designada a um bloco todas as suas capacidades ocuparão o bloco também. O problema passa a ser distribuir as capacidades no arranjo de forma que a soma das mínimas distâncias entre cada localização que não é ocupada por uma capacidade para a localização onde a capacidade está disponível seja minimizada (BAYKASOGLU, 2003, p.2605).

Para tornar mais claro esse conceito o autor apresenta um exemplo com 12 posições e 12 máquinas. Cada máquina tem um conjunto de capacidades definidas em termos de REs. Quatro diferentes capacidades estão disponíveis. Na solução alternativa 1, apresentada pela Figura 3.18 as máquinas foram distribuídas aleatoriamente. A matriz superior mostra a distribuição das máquinas. As demais matrizes são binárias e representam a existência ou não de determinado RE.

Adaptado de Baykasoglu (2003, p.2606)

Figura 3.18 - Cálculo da pontuação de um arranjo

O cálculo da pontuação total é a soma da pontuação obtida para cada uma das matrizes de distribuição de RE. Por sua vez a pontuação de cada matriz de distribuição de RE é a somatória das distâncias mínimas entre uma localização sem o RE e uma localização com RE, como mostram as setas da Figura 3.18. Nesta matriz há 8 localizações sem o RE-3 e cada localização está distante apenas uma posição de uma localização com RE-3. No caso da matriz

de RE-1 pode-se usar como exemplo a posição 12 que está a 3 unidades da posição 7, a 3 unidades da posição 5 e a 2 unidades da posição 6. A distância mínima entre a posição 12 (desocupada) e uma posição ocupada é de 2 unidades.

Na Figura 3.19 é apresentada a solução ótima obtida por um algoritmo de *Simulated Annealing*¹⁶ (SA). Nesta solução todas as posições não ocupadas estão a 1 unidade de distância de uma posição ocupada para todas as capacidades (exceto a posição 9 em RE-4 que está a 2 unidades).

Adaptado de Baykasoglu (2003, p.2606)

Figura 3.19 - Pontuação para o arranjo distribuído ótimo

O autor defende sua abordagem afirmando que o arranjo físico baseado na distribuição de capacidades deve ser preferido ao baseado na distribuição de máquinas, principalmente na ausência de dados de demanda. Além disso, as informações de fluxo não foram consideradas na determinação da pontuação já que em ambientes altamente voláteis não é fácil obter tais dados (BAYKASOGLU, 2003, p.2606).

¹⁶ Segundo Baykasoglu (2003, p.2608), *Simulated Annealing* é um método que busca por um mínimo num sistema qualquer. Faz uma analogia entre o modo como um metal se resfria e cristaliza em uma estrutura de energia mínima (o processo real de *annealing*). Alguns autores usam o termo *Têmpera Resfriamento Simulado* para evitar o uso do original em inglês.

O procedimento adotado nesse trabalho é uma adaptação do algoritmo de *Simulated Annealing* desenvolvido por Baykasoglu e Gindy¹⁷ (2001), que trata do problema de arranjo dinâmico. Após a descrição do algoritmo o autor apresenta um exemplo real com 24 máquinas e 32 RE's, cujos dados foram coletados de uma empresa que executa peças para fabricantes de máquinas ferramenta e fornecedores do exército. Os arranjos físicos inicial e final estão reproduzidos na Figura 3.20, sendo que o arranjo físico final foi obtido pelo algoritmo após 736 iterações. No Quadro 3.5 está a matriz de máquinas e seus respectivos RE's. Os resultados foram apresentados à companhia, mas esta não reconfigurou o arranjo.

Figura 3.20 - Arranjos funcional e distribuído

O autor também realizou uma análise de sensibilidade variando dois fatores, num total de 100 combinações. O primeiro fator, denominado Probabilidade de Aceitação (Pc) foi variado de 0.90 até 0.99 em passos de 0.01 enquanto o segundo fator, denominado Comprimento da Cadeia de Markov (LMC), foi variado de 50 até 140 em passos de 10. Segundo o autor esses diferentes valores nos parâmetros do algoritmo de *Simulated Annealing* não tiveram efeitos radicais sobre a qualidade das soluções obtidas.

¹⁷ Alguns resultados obtidos neste trabalho foram calculados erroneamente devido a definições impróprias no tamanho de matrizes em um programa escrito em Fortran 90. Os resultados corretos foram publicados em Baykasoglu e Gindy (2004).

Quadro 3.5 - Matriz Máquinas x RE's

RE	Máquinas																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1									1	1										1	1			
2									1	1										1	1			
3	1																			1	1			1
4									1	1										1	1			
5											1	1												
6									1	1										1	1			
7									1	1										1	1			
8						1	1	1																
9			1			1	1	1																
10			1																					
11						1	1	1																
12													1											
13						1	1	1																
14			1																					
15			1																					
16												1												
17													1											
18			1											1	1									
19			1											1	1									
20														1	1									
21																						1	1	
22			1											1	1									
23			1											1	1									
24				1	1													1	1					
25				1	1												1	1	1					
26				1	1												1	1	1					
27				1	1													1	1					
28				1	1												1	1	1					
29				1	1												1	1	1					
30				1	1												1	1	1					
31				1	1												1	1	1					
32																	1							

Adaptado de Baykasoglu (2003, p.2612)

Nas conclusões o autor reafirma que o arranjo físico distribuído é ótimo candidato para a implementação de células virtuais de manufatura. Pesquisas futuras sobre o arranjo físico distribuído baseado em elementos de recurso testarão o desempenho em diferentes cenários por meio de simulação. A questão a ser verificada é “um arranjo físico distribuído baseado em capacidade pode ser uma opção válida (ou a melhor opção) para ambientes de manufatura com alta variedade e demanda baixa ou estável?”.

3.10 Células virtuais em arranjo físico distribuído

Nomden e Slomp (2003) exploram, em um trabalho puramente teórico, as possibilidades de implantação de células virtuais de manufatura em vários tipos de arranjo físico e, entre eles, o arranjo físico distribuído.

Além dos quatro tipos clássicos de arranjo físico os autores descrevem o fractal e distribuído. Pela Tabela 3.14 os autores comparam algumas das características de quatro tipos de arranjos físicos.

Tabela 3.14 - Características de alguns tipos de arranjo

Tipo de arranjo	Foco	Simplicidade de Programação	Simplicidade de <i>Pooling</i>	Orientação à TG	Orientação à Equipe
Funcional	Processo	3	1	4	4
Distribuído	Sem foco	4	3	3	3
Fractal	Sem foco	2	2	2	2
Celular	Famílias de peças	1	4	1	1

(1, 2, 3 e 4 são uma classificação relativa sendo 1=Melhor e 4=Pior)

Adaptado de Nomden e Slomp (2003)

A simplicidade de programação está relacionada com a facilidade que uma tarefa tem de ser roteada por várias máquinas. No arranjo físico celular a programação tende ser muito simples enquanto que no fractal passa a ser um pouco mais difícil. O arranjo físico funcional é conhecido pela sua dificuldade de programação já que requer uma atenção contínua. O arranjo físico distribuído possibilita um bom desempenho logístico, mas necessita de um bom sistema de controle que aloque e programe as tarefas nas máquinas e, sendo assim, é considerado o mais difícil de se programar.

A simplicidade de *pooling* refere-se à facilidade de atribuir operações a recursos alternativos. Devido à orientação por processo o arranjo físico funcional é o melhor neste item enquanto o celular é o que tem menos facilidade. O arranjo físico fractal tem certa facilidade devido à similaridade entre as células fractais e, dessa forma, se algum recurso está sobrecarregado,

basta enviá-lo para outra célula. No arranjo físico distribuído não é tão simples, pois será necessário realizar uma reprogramação de diversas tarefas já alocadas.

A orientação à tecnologia de grupo refere-se à habilidade do arranjo físico usar as diferentes similaridades entre as peças. O arranjo físico celular é o que mais faz uso desta característica, seguido do arranjo físico fractal. No arranjo físico distribuído, apesar de ser mais difícil, é aceitável que certas famílias de peças usem sempre o mesmo conjunto de máquinas.

A orientação à equipes refere-se ao suporte que o arranjo físico fornece ao estabelecimento de equipes autônomas, que são responsáveis pela completa fabricação das peças. O arranjo físico celular implica automaticamente na formação de equipes, bem como o arranjo físico fractal, mas em menor grau. Os arranjos físicos distribuído e funcional não suportam a formação de equipes.

Nas conclusões afirmam que ainda é necessário elaborar novas pesquisas no campo de células virtuais e que os pesquisadores têm ignorado os arranjos físicos fractal e distribuído.

3.11 Comentários sobre a literatura (arranjo físico distribuído)

Apesar do conceito de arranjo físico distribuído existir desde 1991, pode-se afirmar que ainda permanece em fase de pesquisa. Em toda a literatura analisada apenas o trabalho de Baykasoglu (2003, p.2611) usou dados reais e, mesmo assim, sem que o arranjo físico fosse implementado para que resultados reais pudessem ser obtidos e analisados. Os demais trabalhos são baseados em dados gerados pelos autores (de forma aleatória ou não) como em Montreuil e Venkatadri (1991, p.297), Montreuil, Venkatadri e Lefrançois (1991, p.6), Montreuil et al. (1993, p.13), Benjaafar (1995, p.424), Benjaafar e Sheikhzadeh (1996, p.854), Askin, Ciarallo e Lundgren (1999, p.967), Benjaafar e Sheikhzadeh (2000, p.315), Lahmar e Benjaafar (2001, p.6), Lahmar e Benjaafar (2002, p.15) e Lahmar e Benjaafar (2005, p.310).

Benjaafar (1995, p.423) e Benjaafar e Sheikhzadeh (1996, p.854) basearam-se em probabilidades para definir possíveis cenários e níveis de demanda e Lahmar e Benjaafar (2001, p.2), Lahmar e Benjaafar (2002, p.4) e

Lahmar e Benjaafar (2005, p.305) assumem que as informações de demanda de cada período estão disponíveis no estágio inicial do projeto de rearranjo. Porém a obtenção de informações futuras e o uso de probabilidades em um ambiente altamente volátil parecem não se mostrar como abordagens adequadas. Baykasoglu (2003, p.2598) afirma que nesse ambiente as mudanças na demanda e no mix de produtos ocorrem de forma imprevisível. Um outro fato importante a ser destacado é que nenhum dos procedimentos desenvolvidos leva em consideração as alternativas nos processos de fabricação das peças. Essa flexibilidade, como afirmado por Benjaafar (1994, p.1401), pode ser um mecanismo efetivo para evitar as dificuldades de um ambiente dinâmico.

O objetivo do arranjo físico distribuído é garantir a proximidade de diferentes tipos de máquinas para que rotas mais eficientes possam ser criadas. Neste sentido, diversos autores citam a necessidade de um sistema de planejamento e controle em tempo real, podendo-se citar Montreuil e Venkatadri (1991, p.298), Montreuil, Venkatadri e Lefrançois (1991, p.20), Montreuil et al. (1993, p.2), Askin, Ciarallo e Lundgren (1999, p.977), Benjaafar, Heragu e Irani (2002, p.66) e Nomden e Slomp (2003, p.3). Esse planejamento é de grande importância principalmente sabendo que o arranjo físico distribuído é considerado aquele que tem maior dificuldade de programação quando comparado com os arranjos físicos funcional, celular e fractal (NOMDEN e SLOMP, 2003, p.3).

O desenvolvimento de uma abordagem que inclua flexibilidade de processo pode responder às seguintes questões:

- Lahmar e Benjaafar (2001, p.6), Lahmar e Benjaafar (2002, p.20) e Lahmar e Benjaafar (2005, p.315) sugerem que raramente são justificadas a desagregação e distribuição completa dos departamentos, ou seja, que o arranjo físico parcialmente distribuído é melhor que os arranjos físicos aleatório e maximamente distribuído. A flexibilidade de processo pode alterar esta afirmação?
- É possível projetar um arranjo físico distribuído? Como se trata de um ambiente altamente volátil é impossível ter em mãos informações suficientes para o projeto inicial e, dessa forma, ao invés de tentar

projetar um arranjo físico é melhor buscar uma maneira de melhor distribuir as tarefas.

3.12 Considerações finais

Este capítulo apresentou o conceito de arranjo físico e descreveu as principais características das novas abordagens: ágil, células virtuais de manufatura, holônico, modular, fractal e distribuído. Em seguida detalhou o desenvolvimento do arranjo físico distribuído, incluindo suas variações: parcialmente distribuído, aleatoriamente distribuído e maximamente distribuído (holográfico).

O arranjo físico fractal tem grande similaridade com o arranjo físico maximamente distribuído quando os processos possuem o mesmo número de máquinas. Mas essa similaridade é apenas física. Enquanto no arranjo físico fractal a atribuição de tarefas às estações de trabalho observa a divisão lógica das máquinas evitando que uma peça seja processada em mais de uma célula, no arranjo físico maximamente distribuído essa divisão lógica não existe.

O capítulo seguinte irá abordar o conceito de flexibilidade no processo de manufatura (roteamento) que é um dos pontos chave para o desenvolvimento desta pesquisa.

4 FLEXIBILIDADE DE SEQUENCIAMENTO

4.1 Considerações iniciais

O capítulo anterior discutiu o arranjo físico distribuído e mostrou que nenhum trabalho analisou seu desempenho levando em consideração a flexibilidade de processo, apesar de vários pesquisadores citarem este fator como sendo de grande importância. Zhao e Wu (2000, p.386) destacam que grande parte da literatura não considera os casos onde as peças possuem processos alternativos. Este capítulo apresenta conceitos gerais sobre flexibilidade e, em seguida, aborda a forma de representação de processos com flexibilidade de seqüenciamento que foi adotada para atingir os objetivos desta pesquisa.

4.2 Tipos de flexibilidade

A operação de um sistema de manufatura é uma seqüência de decisões que consistem na combinação das atuais necessidades de processamento com a atual capacidade disponível. Se a demanda mantém-se constante tanto em volume quanto em composição, a capacidade pode ser planejada de modo a atender essa necessidade e até mesmo algum excesso (BENJAAFAR, 1994, p.1397). Quando essa constância não existe atrasos ocorrerão levando ao aumento no tempo de produção e nas quantidades de peças em processamento (*work-in-process*). A existência de flexibilidade aumenta a probabilidade da capacidade disponível se adequar às necessidades de processamento do momento, diminuindo atrasos, níveis de inventário e ocorrência de gargalos.

Para Benjaafar (1994, p.1383) a flexibilidade é um mecanismo de adaptação que permite que as organizações possam competir de forma eficaz

apesar da volatilidade do ambiente onde está operando. Browne et al. (1984, p.114) definiram oito tipos de flexibilidade. Posteriormente Sethi e Sethi (1990, p.296) elevaram esta lista para onze tipos:

Flexibilidade de máquina: refere-se aos vários tipos de operação que a máquina pode executar sem necessitar de um esforço proibitivo em sua preparação ou operação.

Flexibilidade de manuseio de material: é a habilidade de mover pela instalação diferentes tipos de peças de forma eficiente.

Flexibilidade de operação: é a habilidade de produzir uma peça por diferentes meios.

Flexibilidade de processo: é quando o sistema de manufatura pode produzir diferentes tipos de peças sem grandes preparações.

Flexibilidade de produto: é a facilidade com que novas peças podem ser adicionadas (ou substituídas).

Flexibilidade de roteamento: é a habilidade que o sistema de manufatura possui de produzir peças por rotas alternativas.

Flexibilidade de volume: é a habilidade para operar lucrativamente com diferentes volumes de produção.

Flexibilidade de expansão: é a facilidade que o sistema de manufatura possui de aumentar sua capacidade e capacidade quando necessário.

Flexibilidade de programação: é a habilidade do sistema operar virtualmente sem atenção durante longos períodos.

Flexibilidade de produção: é o universo de tipos de peças que o sistema de manufatura pode produzir sem adicionar grandes investimentos em equipamentos.

Flexibilidade de mercado: é a facilidade com que o sistema de manufatura pode se adaptar às mudanças do mercado.

Browne et al. (1984, p.114) acrescentam que as flexibilidades de produto, processo e operação dependem da flexibilidade de máquina enquanto as flexibilidades de volume e expansão dependem da flexibilidade de roteamento. Para Chandra e Tombak (1992, p.157) a flexibilidade de produção é função das outras sete flexibilidades. Chen e Chung (1996, p.380) concluem que a flexibilidade de máquina e a flexibilidade de roteamento são as principais por serem requeridas pelos outros tipos de flexibilidade enquanto que essas duas flexibilidades formam o ponto de partida natural para a implantação de um sistema flexível, segundo Chandra e Tombak (1992, p.157). Sethi e Sethi (1990, p.297) relacionam as onze flexibilidades como mostra a Figura 4.1.

Adaptado de Sethi e Sethi (1990, 297)

Figura 4.1 - Relacionamento entre as flexibilidades

Posteriormente Benjaafar e Ramakrishnan (1996, p.1197) apresentaram uma nova hierarquia entre as diversas flexibilidades, como mostra a Figura 4.2.

Adaptado de Benjaafar e Ramakrishnan (1996, 1197)

Figura 4.2 - Hierarquia entre flexibilidades

Nesta forma de organização há três tipos de flexibilidade que estão associadas com a manufatura de uma peça (BENJAAFAR e RAMAKISHNAN, 1996, p. 1198, KOO e TANCHOCO, 1999, p.1026):

Flexibilidade de seqüenciamento: trata da possibilidade de mudar a seqüência de operações;

Flexibilidade de operação: possibilita a execução de operações em mais de uma máquina;

Flexibilidade de processamento: possibilidade de executar uma mesma usinagem com operações diferentes ou seqüências distintas.

A flexibilidade de seqüenciamento é definida por Hutchinson e Pflughoeft (1994, p. 708) como flexibilidade do plano de processo enquanto pesquisadores como Rohde e Borenstein (2004, p.252) denominam simplesmente como flexibilidade de seqüência.

4.3 Representação de processos com flexibilidade de seqüência

Uma forma de trabalhar com flexibilidade é elaborar processos alternativos. Adil, Rajamani e Strong (1996) adotaram planos de processo alternativos para as peças de modo a obter melhores resultados na diagonalização de matrizes peça x máquina. A Tabela 4.1 mostra um exemplo da forma como os dados de entrada são apresentados.

Tabela 4.1 - Matriz Peça x Máquina com flexibilidade

Peças	Processos	Máquinas			
		1	2	3	4
1	1			1	1
	2		1		1
	3	1	1		
2	1		1	1	
	2	1		1	
3	1	1			1
	2		1		1
4	1	1			1
	2	1		1	
5	1			1	1
	2	1			

Adaptado de Adil, Rajamani e Strong (1996, p.1365)

De forma similar Kochikar e Narendran (1992, 2878) definem máquinas alternativas e relações de precedência para representar a flexibilidade do sistema (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 - Peças com processos flexíveis

Peças	Operações	Precedentes	Máquinas possíveis
1	1	2 e 3	1 e 6
	2	-	3, 4 e 8
	3	-	1, 6 e 8
	4	1 e 3	2 e 7
	5	1 e 2	1 e 6
2	1	3	4, 5 e 8
	2	3	5
	3	-	2 e 8
3	1	2	1, 3, 5 e 8
	2	-	2
	3	1 e 2	1 e 3
	4	-	5

Adaptado de Kochikar e Narendran (1992, p.2878)

A decisão de quantas seqüências de fabricação cada peça terá bem como que máquinas executarão cada etapa depende do processista. Essa forma é funcional, porém muito rígida para permitir a elaboração de um procedimento automático que possa ser usado nas simulações desejadas nesta pesquisa. Outra alternativa para essa representação é o uso de grafos¹⁸.

Hutchinson e Pflughoeft (1994, p.707) adotam grafos direcionados na representação dos processos de fabricação. Os nós representam as operações e as linhas que conectam esses nós são as restrições. Na Figura 4.3 os nós representados pela letra I indicam o início da seqüência enquanto os representados pela letra F indicam o final. Os demais nós representam as operações a serem executadas. O grafo (a) representa um plano de processo tradicional (TPP - *Traditional Process Plan*), no qual cada operação tem apenas um único antecessor e também um único predecessor (HUTCHINSON e PFLUGHOEFT, 1994, p.707). Já, nos grafos (b) e (c), existe a flexibilidade de seqüência.

¹⁸ Maiores detalhes sobre grafos estão disponíveis no Apêndice D.

Adaptado de Hutchinson e Pflughoeft (1994, p.707)

Figura 4.3 - Representação de processos por grafos

A flexibilidade de seqüência requer que todas as operações precedentes sejam executadas antes da operação seguinte, independente de sua ordem. No processo (b) há duas seqüências: 1-2-3 e 2-1-3. Para o grafo (c) há 6 possibilidades (3!) de seqüenciamento e neste caso os autores usam a nomenclatura FFPP (*Fully Flexible Process Plan* - plano de processo totalmente flexível) ou *Open Shop*: 1-2-3, 1-3-2, 2-1-3, 2-3-1, 3-1-2 e 3-2-1.

Hutchinson e Pflughoeft (1994, p.709) também mostram que a flexibilidade de processo pode ser representada por grafos, como mostra a Figura 4.4. Após o nó 1 há dois caminhos alternativos e, sendo assim, há dois possíveis processos: 1-2-3-7 e 1-4-5-6-7.

Adaptado de Hutchinson e Pflughoeft (1994, p.707)

Figura 4.4 - Flexibilidade de processo

Pelos resultados obtidos em condições experimentais Hutchinson e Pflughoeft (1994, p.718) afirmam que a flexibilidade de seqüência tem influência sobre o sistema, melhorando o seu desempenho.

Diversos autores adotam a representação de processos por grafos, podendo-se citar Groover (1987, p.144), Borenstein (2000, p.82), Sarker e Li (2001, p.678), Rohde (2002, p.37) e Rohde e Borenstein (2004, p.253).

Além da forma gráfica pode-se representar um grafo usando a matriz de adjacência ou a matriz de incidência. Porém, os grafos dirigidos e sem circuitos podem ser representados simplesmente pelas suas relações de precedência, como mostram Gondran, Minoux e Vajda (1984, p.65). Como exemplo a Figura 4.5 mostra um grafo desse tipo.

Figura 4.5 - Grafo representando o processo de uma peça

A Tabela 4.3 mostra as relações de precedência correspondentes ao grafo mostrado pela Figura 4.5.

Tabela 4.3 - Relações de precedência

Operação	Precedente
A	-
B	A
C	A
D	A
E	B
F	B e C
G	D e F
H	G
I	D
J	H e I
K	E e J

Essa representação baseada em texto é de fácil manipulação computacional permitindo o cálculo do número de possíveis seqüências de execução. Isso pode ser realizado, por exemplo, pelo algoritmo proposto por Gondran, Minoux e Vajda (1984, p.55)¹⁹. No exemplo mostrado pela Figura 4.5 esse algoritmo divide o processo em 7 níveis, como mostra a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Divisão do processo em níveis

Nível	Operações
1	A
2	B, C e D
3	E, F e I
4	G
5	H
6	J
7	K

Considerando que as operações de cada nível podem ser executadas em qualquer ordem há 36 possíveis seqüências para esse processo (Quadro 4.1). São 6 possibilidades no nível 2 e 6 possibilidades no nível 3 enquanto nos demais níveis há apenas uma possibilidade.

Quadro 4.1 - Seqüências de processamento possíveis

1	ABCDEFGHIJK	13	ACBDEFIGHJK	25	ADBCEFIGHJK
2	ABCDEIFGHJK	14	ACBDEIFGHJK	26	ADBCEIFGHJK
3	ABCDFEIGHJK	15	ACBDFEIGHJK	27	ADBCFEIGHJK
4	ABCDFIEGHJK	16	ACBDFIEGHJK	28	ADBCFIEGHJK
5	ABCDIEFGHJK	17	ACBDIEFGHJK	29	ADBCIEFGHJK
6	ABCDIFEGHJK	18	ACBDIFEGHJK	30	ADBCIFEGHJK
7	ABDCEFIGHJK	19	ACDBEFIGHJK	31	ADCBEFIGHJK
8	ABDCEIFGHJK	20	ACDBEIFGHJK	32	ADCBEIFGHJK
9	ABDCFEIGHJK	21	ACDBFEIGHJK	33	ADCBFEIGHJK
10	ABDCFIEGHJK	22	ACDBFIEGHJK	34	ADCBFIEGHJK
11	ABDCIEFGHJK	23	ACDBIEFGHJK	35	ADCBIEFGHJK
12	ABDCIFEGHJK	24	ACDBIFEGHJK	36	ADCBIFEGHJK

Deve ficar claro que esse algoritmo não calcula todas as seqüências possíveis. Sua abordagem fixa algumas operações em determinados níveis

¹⁹ Esse algoritmo é detalhado no Apêndice D

apesar de terem liberdade de serem transferidas para outros. Por exemplo, a Figura 4.6 mostra o mesmo grafo da Figura 4.5, mas com a operação E posicionada em outro nível, sem que essa modificação altere as relações de precedência (os níveis estão representados nessa figura).

Figura 4.6 - Mudança de nível de uma operação

Nessa nova configuração há 24 possibilidades de seqüenciamento sendo que metade delas não consta daquelas listadas no Quadro 4.1. No Quadro 4.2 essas 12 novas seqüências estão destacadas em negrito enquanto as seqüências que repetiram tem, entre parênteses, o número da seqüência correspondente no Quadro 4.1.

Quadro 4.2 - Novas seqüências de processamento

1	ABCD FIEGHJK (4)	13	ACDB FIEGHJK (22)
2	ABCD FIEGHJK	14	ACDB FIEGHJK
3	ABCD IFEGHIJ (6)	15	ACDB IFEGHJK (24)
4	ABCD IFEGHIJ	16	ACDB IFEGHJK
5	ABDC FIEGHJK (10)	17	ADBC FIEGHJK (28)
6	ABDC FIEGHJK	18	ADBC FIEGHJK
7	ABDC IFEGHJK (12)	19	ADBC IFEGHJK (30)
8	ABDC IFEGHJK	20	ADBC IFEGHJK
9	ACBD FIEGHJK (16)	21	ADCB FIEGHJK (34)
10	ACBD FIEGHJK	22	ADCB FIEGHJK
11	ACBD IFEGHJK (18)	23	ADCB IFEGHJK (36)
12	ACBD IFEGHJK	24	ADCB IFEGHJK

Ainda há outras possibilidades de modificação no grafo que levarão a novas seqüências que respeitam as relações de precedência, mas que não são encontradas pelo algoritmo de Gondran, Minoux e Vajda (1984, p.55).

Alguns autores adotam suas representações com apenas um nó raiz e somente um nó folha e, muitas vezes, usam para isso nós bonecos (dummy nodes), como nas Figura 4.3 e Figura 4.4. Porém essa prática não é obrigatória como mostram, por exemplo, Groover (1987, p.147), Borenstein (2000, p.82) e Rohde e Borenstein (2004, p.253). A Figura 4.7 mostra um exemplo de diagrama de precedência com dois nós iniciais.

Adaptado de Groover (1987, p. 147)

Figura 4.7 - Exemplo de diagrama de precedência com duas raízes

4.4 Considerações finais

Este capítulo apresentou conceitos sobre flexibilidade e abordou formas de representação de processos de fabricação com flexibilidade. Ênfase foi dada na representação por grafos, mais especificamente os grafos dirigidos e sem circuitos que podem ser representados simplesmente pelas suas relações de precedência. Essa forma de representação permitirá ao sistema de simulação analisar diferentes rotas durante a programação das tarefas. Na literatura estão disponíveis diversas outras técnicas, inclusive usando redes de Petri, mas que foram descartadas devida a alta adequação do método escolhido. O próximo capítulo encerrará a revisão bibliográfica abordando a programação da produção.

5 PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

5.1 Considerações iniciais

O capítulo anterior discutiu os tipos de flexibilidades existentes no ambiente de manufatura, destacou a flexibilidade de seqüência e detalhou a representação por relações de precedência (grafos dirigidos). Este capítulo, que encerra a revisão bibliográfica, discorre sobre a programação da produção, o seqüenciamento de tarefas (*jobs*) e o roteamento de operações.

5.2 Programação da produção

A programação da produção, segundo Fandel, François e Gubitz²⁰ (1994, apud LANDMANN, 2005, p.50), compreende desde as atividades de longo prazo (planejamento-mestre de produção) até as de curto prazo (programa detalhado da produção). O planejamento-mestre especifica a quantidade e o momento em que a empresa deve produzir cada um dos itens finais e depende, entre outras variáveis, da previsão de demanda e de estoque. O programa detalhado determina as datas para emissão de ordens de compra, fabricação e montagem, além de planejar a alocação dos recursos de manufatura (máquinas, pessoas, material, energia, transporte, ferramental etc).

Nota-se que a operação de um sistema de manufatura é uma seqüência de decisões que tentam compatibilizar as necessidades de processamento com a capacidade disponível. Além disso, cita Pörtl²¹ (2001 apud LANDMANN 2005,

²⁰ FANDEL, G.; FTANÇOIS, P.; GUBITZ, K. M. (1994). *PPS - Systeme - Grundlagen, Methoden, Software, Marktanalyse*. Springer-Verlag. Berlin.

²¹ PÖRTL, A. (2001). *Scheduling durch Heuristische Suche - das ISIS System*. Disponível em: <<http://informatik.uni-ulm.de>>. Acesso em: 15 fev. 2004.

p.53) deve considerar as instabilidades próprias do sistema produtivo tais como cancelamentos, adiantamentos e acréscimo de pedidos, alterações nas especificações de itens, quebras de máquinas, falta de matéria-prima etc.

5.3 Planejamento do processo, roteamento e programação

Segundo Hancock (1989, p.247) o planejamento de processo (*process planning*) é a tarefa que estabelece a ordem tecnológica das atividades necessárias para completar uma tarefa e roteamento (*routing*) é a atribuição de uma série de máquinas para satisfazer essa ordem tecnológica. A programação das operações (*scheduling*) é a definição da ordem de entrada das tarefas em uma linha de produção (BAKER, 1974).

Devido à complexidade envolvida nesses processos Hancock (1989, p.247) afirma que “na prática esta seqüência é mais arte que ciência”. Cada máquina tem características bem definidas: a faixa de peças que pode manusear (tamanho, peso, composição etc), a eficiência com que pode operar (velocidade, custo, precisão etc) bem como as funções gerais de processamento que pode executar (corte, fresamento, torneamento etc). Cada etapa do processamento de uma peça requer um conjunto de características que se ajustam em várias máquinas e o problema aqui é a natureza dos critérios que fazem de uma máquina em particular a mais apropriada.

Hutchinson e Pflughoeft (1994, p.708) comentam que após uma peça ser projetada é desenvolvido seu processo de fabricação para, posteriormente, ser realizada sua programação. É exatamente essa abordagem tradicional que é criticada por Lee, Jeong e Moon (2002, p.352) pois, apesar de simples, ignora as relações entre o planejamento de processo e a programação que poderiam levar ao uso de máquinas alternativas.

5.4 Programação de tarefas

Nagano, Moccasin e Lorena (2004, p.1) e Silva (2005, p.14) apresentam a seguinte classificação dos problemas de programação de tarefas em sistemas de produção, conforme o fluxo das operações nas máquinas:

Job shop: cada tarefa tem sua própria seqüência de processamento nas máquinas e, acrescenta Pinedo (1995, p.118), essas seqüências são fixas;

Flow shop: quando todas as tarefas têm a mesma seqüência de processamento no mesmo conjunto de máquinas;

Open shop: não há uma seqüência específica ou preestabelecida para o processamento das tarefas nas máquinas;

Flow shop permutacional: é um *flow shop* no qual em cada máquina a seqüência das tarefas é a mesma;

Máquina única: quando existe uma única máquina disponível para o processamento das tarefas;

Máquinas paralelas: quando estão disponíveis diversas máquinas, geralmente idênticas, para as mesmas operações;

Job shop com máquinas múltiplas: é um *job shop* no qual existe um conjunto de máquinas paralelas em cada estágio da produção;

Flow shop com máquinas múltiplas: consiste em um *flow shop* no qual existe um conjunto de máquinas paralelas em cada estágio de produção.

Diversas técnicas são propostas para a solução da programação em cada tipo de fluxo. Em geral procura-se otimizar uma determinada medida de desempenho, geralmente associada ao fator tempo (BUZZO e MOCCELLIN, 2000, p.365). French (1982, p.9) chama atenção para o fato das medidas de desempenho serem numerosas e, muitas vezes, conflitantes.

Uma função-objetivo muito adotada é a duração total da programação (*makespan*), ou seja, o intervalo de tempo entre o início da execução da primeira tarefa na primeira máquina e o término da execução da última tarefa na última máquina. A minimização do *makespan* é, de certa forma, equivalente à maximização da utilização das máquinas (PINEDO, 1995, p.94).

Yang e Wang (2001, p. 955) citam que é muito difícil elaborar uma programação ótima, a não ser em casos que envolvem um pequeno número de máquinas. Grande parte dos procedimentos de alocação trabalha no seqüenciamento das tarefas, ou seja, na permutação da ordem de entrada das peças nas máquinas. Siqueira, Torihara e Pinho (2002, p.5) exemplificam a

complexidade do problema citando que um seqüenciamento de apenas 10 tarefas possui 3.628.800 combinações (10!).

Devido a essa natureza combinatorial esse problema é classificado como polinomial não determinístico (*NP-complete - Non-deterministic Polynomial time*), podendo ser resolvido eficientemente de maneira ótima somente em casos de pequeno porte (FRENCH, 1982, p.137, BUZZO e MOCCELLIN, 2000, p.365, BLAZEWICZ et al., 1996, p.16, YANG e WANG, 2001, p.955, GOMES, BARBOSA-PÓVOA e NOVAIS, 2005, p.2323).

Sendo assim, para obtenção de boas soluções, diversas técnicas têm sido exploradas. Blazewicz et al. (1996, p.32) lista os seguintes métodos para solução de problemas de programação:

- Métodos enumerativos (*Enumerative methods*)
 - Programação dinâmica (*Dynamic programming*);
 - Ramificação e poda (*Branch and Bound*);
- Algoritmos de aproximação (*Approximation algorithms*)
- Algoritmos heurísticos (*Heuristic algorithms*)
 - Resfriamento simulado (*Simulated annealing*);
 - Busca Tabu (*Tabu search*);
 - *Ejection chains*;
 - Algoritmos genéticos (*genetic algorithms*).

Gomes, Barbosa-Póvoa e Novais (2005, p.2324) lembram que busca Tabu, resfriamento simulado e algoritmos genéticos são também denominados de procedimentos metaheurísticos ou aproximativos. Além disso, acrescentam à listagem anterior outra técnica:

- Inteligência artificial (*Artificial intelligence*)
 - Programação de restrições (*constraint programming*);
 - Redes neurais (*neural network*).

Buzzo e Moccellin (2000, p.366) mostram que alguns pesquisadores dedicaram-se ao desenvolvimento de métodos metaheurísticos híbridos utilizando busca Tabu, resfriamento simulado e algoritmos genéticos. Segundo esses pesquisadores o objetivo é gerar um procedimento que seja mais eficaz do que qualquer uma das técnicas isoladamente.

Além disso, deve ficar claro que para alguns tipos de problemas foram desenvolvidos algoritmos específicos. Por exemplo, para o problema de máquina única Naus e Pinho (2002, p.2) citam os algoritmos de Jackson (1955), Smith (1956), Moore (1968), Hudson (1968) e Hack e Roberts (1972). French (1982, p.69) cita o algoritmo de ótimo de Johnson aplicável para casos até duas máquinas em *job shop* (esse algoritmo pode ser aplicado em casos de 3 máquinas quando algumas condições são satisfeitas).

Na abordagem de Benjaafar (1994, p.1390) as peças são roteadas para a primeira máquina disponível para a qual a peça possa ser atribuída, ou seja, as peças compartilham as mesmas máquinas aguardando em uma única fila tipo FIFO (*First In First Out – Primeiro que entra Primeiro que sai*). O termo “decisão dinâmica e oportunista” é usado quando as decisões de seleção e atribuição de máquinas e peças são feitas em tempo real e baseadas no conhecimento do estado atual do sistema (BENJAAFAR, 1994, p.1394).

5.5 Exemplo de algoritmo de programação *flow shop*

Para cada problema os pesquisadores adotam certas hipóteses. Para o problema *flow shop* Buzzo e Moccellini (2000, p.365) destacam as seguintes:

- Cada máquina está disponível continuamente, sem interrupções;
- Cada máquina pode processar apenas uma tarefa de cada vez;
- Cada tarefa pode ser processada por uma máquina de cada vez;
- Os tempos de processamento das tarefas nas diversas máquinas são conhecidos e fixos;
- As tarefas têm a mesma data de liberação, a partir da qual, qualquer uma pode ser programada e executada;
- Os tempos de preparação das operações nas diversas máquinas são incluídos nos tempos de processamento e independem da seqüência de operações em cada máquina;
- As operações nas diversas máquinas, uma vez iniciadas, não devem ser interrompidas.

Woo e Yim (1998, p.176) e Framinan, Leisten e Rajendran (2003, p.123) descrevem o algoritmo NEH proposto por Nawaz, Enscore e Ham (1983, p.92), que recebeu essa nomenclatura em função das iniciais dos nomes dos pesquisadores. Weng (2000, p.1360) afirma que esse algoritmo parece ser a melhor heurística para minimizar o *makespan* e o tempo médio de fluxo (*mean flowtime*).

O NEH baseia-se na priorização das tarefas que necessitam de maior tempo para serem processadas. Os seguintes passos são necessários para chegar a uma solução:

Passo 1: calcular, para cada tarefa, a soma dos tempos de processamento em todas as máquinas;

Passo 2: Ordenar as n tarefas de acordo com os valores decrescentes das somas dos tempos de processamento;

Passo 3: Selecionar as duas primeiras tarefas da ordenação e encontrar a seqüência que minimiza a duração total da programação;

Passo 4: Para k variando de 3 até n , fazer:

- Selecionar a tarefa que ocupa a k -ésima posição na ordenação obtida no Passo 2;
- Examinar as k possibilidades de acrescentar a tarefa na seqüência até então obtida, adotando aquela que leva a uma menor duração.

O número total de iterações desse algoritmo é apresentado pela eq.(21), onde n é o número de tarefas a serem processadas. Nota-se que é um número bem menor que as $n!$ iterações necessárias para avaliar todas as combinações.

$$\text{Número Total de Iterações} = \frac{n \cdot (n+1)}{2} - 1 \quad (21)$$

O exemplo apresentado por Sequeira, Torihara e Pinho (2002, p.6) envolve 3 tarefas e 4 máquinas. Os tempos de processamento das operações são mostrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Dados de tempos de processamento

		Máquinas			
		M1	M2	M3	M4
Tarefas	T1	9	4	5	8
	T2	9	3	10	1
	T3	5	9	8	10

Os somatórios do passo 1 obtém os seguintes valores: tarefa 1=26, tarefa 2=23 e tarefa 3=32. Dessa forma o passo 2 obtém a seguinte ordem: T3, T1 e T2.

No passo 3 é necessário testar duas seqüências: T3-T1 e T1-T3. A Tabela 5.2 mostra a primeira enquanto a Tabela 5.3 mostra a segunda. Nesses dois quadros os valores entre parênteses são os momentos de início e de término da tarefa (sempre considerando que a primeira tarefa começa no instante zero).

Tabela 5.2 - Cálculo do *makespan* para a seqüência T3-T1

		Máquinas			
		M1	M2	M3	M4
Tarefas	T3	5 (0, 5)	9 (5, 14)	8 (14, 22)	10 (22, 32)
	T1	9 (5, 14)	4 (14, 18)	5 (22, 27)	8 (32, 40)

Tabela 5.3 - Cálculo do *makespan* para a seqüência T1-T3

		Máquinas			
		M1	M2	M3	M4
Tarefas	T1	9 (0, 9)	4 (9, 13)	5 (13, 18)	8 (18, 26)
	T3	5 (9, 14)	9 (14, 23)	8 (23, 31)	10 (31, 41)

As programações são visualizadas de uma forma mais clara por meio do gráfico de Gantt (*Gantt chart*). Na Figura 5.1 está o gráfico para a seqüência T3-T1 e na Figura 5.2 o gráfico da seqüência T1-T3. A primeira seqüência é a melhor.

Figura 5.1 - Gráfico de Gantt para a sequência T3-T1 (Passo 3)

Figura 5.2 - Gráfico de Gantt para a sequência T1-T3 (Passo 3)

O passo 4 consiste em adicionar a próxima tarefa (T2) à melhor sequência obtida até o momento (T3-T1) em todas as posições possíveis. Sendo assim é necessário avaliar três sequências: T2-T3-T1 (Tabela 5.4), T3-T2-T1 (Tabela 5.5) e T3-T1-T2 (Tabela 5.6).

Tabela 5.4 - Cálculo do *makespan* para a sequência T2-T3-T1

		Máquinas			
		M1	M2	M3	M4
Tarefas	T2	9 (0, 9)	3 (9, 12)	10 (12, 22)	1 (22, 23)
	T3	5 (9, 14)	9 (14, 23)	8 (23, 31)	10 (31, 41)
	T1	9 (14, 23)	4 (23, 27)	5 (31, 36)	8 (41, 49)

Tabela 5.5 - Cálculo do *makespan* para a sequência T3-T2-T1

		Máquinas			
		M1	M2	M3	M4
Tarefas	T3	5 (0, 5)	9 (5, 14)	8 (14, 22)	10 (22, 32)
	T2	9 (5, 14)	3 (14, 17)	10 (22, 32)	1 (32, 33)
	T1	9 (14, 23)	4 (23, 27)	5 (32, 37)	8 (37, 45)

Tabela 5.6 - Cálculo do *makespan* para a seqüência T3-T1-T2

		Máquinas			
		M1	M2	M3	M4
Tarefas	T3	5 (0, 5)	9 (5, 14)	8 (14, 22)	10 (22, 32)
	T1	9 (5, 14)	4 (14, 18)	5 (22, 27)	8 (32, 40)
	T2	9 (14, 23)	3 (23, 26)	10 (27, 37)	1 (40, 41)

Conclui-se que a melhor seqüência é a T3-T1-T2 com *makespan* de 41 unidades de tempo.

Figura 5.3 - Gráficos de Gantt para o passo 4

5.6 Roteamento

O roteamento é a definição da seqüência das máquinas selecionadas para a execução de cada operação de uma peça, como mostrado por Sarker e Li (2001, p.674). Porém, quando o arranjo físico possui mais de uma máquina que possa executar as operações, apresentam-se várias rotas potenciais.

5.6.1 Busca pela melhor rota - roteando a primeira peça

As possíveis rotas para uma determinada seqüência de fabricação dependem do número de operações e do número de máquinas que podem executar cada operação. A combinação destes elementos, mostra Borenstein (2000, p.84), forma uma árvore de busca (Figura 5.4). No exemplo que será apresentado tem-se uma peça com 4 operações na seguinte ordem de processos: 1-2-3-4. Considerando que o processo 1 possui uma máquina (1.01), o processo 2 duas máquinas (2.01 e 2.02) e os processos 3 e 4 possuem três máquinas cada um (3.01, 3.02, 3.03, 4.01, 4.02 e 4.03) conclui-se que existem 18 rotas possíveis.

Figura 5.4 - Árvore de rotas

Partindo do princípio que ainda não há nenhuma peça roteada, ou seja, não há nenhuma máquina com tempo alocado, o critério de alocação se dá somente pela rota de menor caminho. Para isso é necessário ter a disposição das máquinas no arranjo físico (Figura 5.5).

Figura 5.5 - Arranjo físico

Ao invés de calcular a distância percorrida para cada rota potencial é melhor realizar uma busca heurística que reduza a quantidade de cálculos e, conseqüentemente, o tempo consumido. Essa heurística pode ser descrita

como: analisar cada par de operações e estender a busca apenas aos nós de menor distância (nós mais promissores).

Para o primeiro par de operações (1 e 2) há apenas uma origem (máquina 1.01) e dois destinos (máquinas 2.01 e 2.02), gerando duas possibilidades de movimentação: 1.01–2.01 e 1.01–2.02. Usando distâncias retilineares obtém-se respectivamente 2 e 1 unidades de distância para cada rota parcial, como mostra o Quadro 5.1. Sendo assim, de acordo com a heurística, estende-se a busca apenas no nó da máquina 2.02.

Quadro 5.1 - Análise do primeiro par de operações

Operação 1			Operação 2			Distância
Máquina	Linha	Coluna	Máquina	Linha	Coluna	
1.01	2	2	2.01	1	1	2
1.01	2	2	2.02	2	1	1

Para o par de operações (2 e 3) há uma origem e três destinos: 2.02–3.01, 2.02–3.02 e 2.02–3.03. Pela disposição das máquinas verifica-se que a menor distância está entre as máquinas 2.02 e 3.01, como mostra o Quadro 5.2. Nota-se nesse quadro que a máquina selecionada para a operação inicial está representada pela coluna denominada Rota. A coluna denominada Distância Anterior armazena a distância retilinear entre a máquina da operação 1 e a máquina da operação 2.

Quadro 5.2 - Análise do segundo par de operações

Rota	Operação 2			Operação 3			Distância	Distância Anterior
	Máquina	Linha	Coluna	Máquina	Linha	Coluna		
1.01	2.02	2	1	3.01	3	1	1	1
1.01	2.02	2	1	3.02	3	2	2	1
1.01	2.02	2	1	3.03	3	3	3	1

Finalmente, analisando as distâncias entre a máquina 3.01 e as máquinas do processo 4 verifica-se um empate entre 4.01 e 4.03, com 3 unidades de distância, como mostra o Quadro 5.3. Nota-se que a coluna distância anterior é, na realidade, o somatório das distâncias das máquinas que já fazem parte da Rota.

Quadro 5.3 - Análise do último par de operações

Rota	Operação 3			Operação 4			Distância	Distância Anterior
	Máquina	Linha	Coluna	Máquina	Linha	Coluna		
1.01–2.02	3.01	3	1	4.01	1	2	3	2
1.01–2.02	3.01	3	1	4.02	1	3	4	2
1.01–2.02	3.01	3	1	4.03	2	3	3	2

Assim chega-se a duas rotas com distância total de 5 unidades: 1.01–2.02–3.01–4.01 e 1.01–2.02–3.01–4.03. O procedimento irá selecionar a primeira seqüência. Esse procedimento está resumido no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 - Resumo da busca pela rota de menor distância percorrida

1. Receber a seqüência de operações da peça.
2. Obter o número de máquinas do processo usado pela primeira operação.
3. Obter a posição de cada uma dessas máquinas no arranjo físico.
4. Obter o número de máquinas do processo usado pela próxima operação.
5. Obter a posição de cada uma dessas máquinas no arranjo físico.
6. Calcular a distância entre as máquinas desses dois processos.
7. Armazenar a rota parcial de menor distância.
8. Se ainda há processos na seqüência, retorne ao item 4.
9. Encerrar

Chamando essa peça de P1 e definindo a duração de suas 4 operações em 10 unidades de tempo, tem-se o gráfico de Gantt da Figura 5.1.

Figura 5.6 - Gráfico de Gantt e matriz de alocação

Ao lado do gráfico de Gantt está uma matriz onde cada elemento é composto por dois valores que representam a alocação da peça na máquina: o primeiro valor indica o instante de início e o segundo valor o instante de término.

5.6.2 Programando outras peças

Montreuil, Venkatadri e Lefrançois (1991, p.11) mostram a possibilidade de encontrar as diversas rotas potenciais. Supondo que uma peça P2 deva ser programada percebe-se que a análise da rota terá que levar em consideração as informações de alocação da primeira peça. Para efeitos didáticos a peça P2 terá a mesma seqüência e os mesmos tempos da peça P1.

A primeira operação, que usa o processo 1, deverá ser alocada na máquina 1.01. Consultando a matriz de alocação verifica-se que essa máquina está ocupada do instante 0 ao 10. Portanto a peça P2 só poderá ser alocada com início em 10 e término em 20. Isso determina que a segunda operação pode ser iniciada a partir do instante 20. Nota-se que o procedimento apresentado pelo Quadro 5.4 só é válido para a primeira tarefa a ser alocada pois, para as demais, é necessário analisar a matriz de alocação e encontrar os intervalos de tempo disponíveis nas máquinas.

Analisando o primeiro par de operações têm-se duas opções: 1.01–2.01 e 1.01–20.2. Como ainda não há nenhuma alocação na máquina 2.01 a operação pode iniciar-se no instante 20. A máquina 2.02 já possui uma alocação e tem dois intervalos de tempo livre: de 0 até 10 e a partir de 20. Nota-se que apesar da segunda operação caber no intervalo de 0 até 10 ela não pode ser alocada pois a primeira operação encerra-se no instante 20. Sendo assim, nessa máquina a operação só pode iniciar-se no instante 20. Por esse critério há um empate já que nas duas máquinas o momento de encerramento da operação 2 será no instante 30, porém a distância percorrida é de apenas 1 unidade para a máquina 2.02 enquanto que para a máquina 2.01 é de 2 unidades. Sendo assim a alocação ocorre na máquina 2.02. Entre os processos 2 e 3 haverá um empate no critério tempo, mas a alocação será na máquina 3.01 devido a menor distância, bem como entre os processos 3 e 4, cuja alocação será na máquina 4.01.

Supondo a existência das peças P3 e P4 com os mesmos valores da P1 tem-se, ao final do processo de alocação, o gráfico de Gantt e a matriz de alocação mostradas pela Figura 5.7. No Apêndice H tem-se a listagem com detalhes do procedimento.

Figura 5.7 - Gráfico de Gantt e matriz de alocação com 4 peças

5.6.3 Buscando a melhor rota (com flexibilidade)

Com a adoção da flexibilidade na seqüência de operações o cenário observado anteriormente altera-se. Como exemplo extremo iremos supor que as 4 peças possuam seqüências completamente flexíveis, ou seja, suas 4 operações podem ser executadas em qualquer ordem, resultando em 24 possíveis seqüências (Quadro 5.5).

Para a peça P1 o tempo de execução será de 40 unidades de tempo, independente de qual seqüência seja adotada, pois todas as máquinas estão livres. Porém 6 das 24 seqüências fornecem uma distância percorrida de apenas 3 unidades.

Quadro 5.5 - 24 possíveis seqüências (completamente flexível)

Seqüência	Operações	Seqüência	Operações	Seqüência	Operações
1	1-2-3-4	9	2-3-1-4	17	3-4-1-2
2	1-2-4-3	10	2-3-4-1	18	3-4-2-1
3	1-3-2-4	11	2-4-1-3	19	4-1-2-3
4	1-3-4-2	12	2-4-3-1	20	4-1-3-2
5	1-4-2-3	13	3-1-2-4	21	4-2-1-3
6	1-4-3-2	14	3-1-4-2	22	4-2-3-1
7	2-1-3-4	15	3-2-1-4	23	4-3-1-2
8	2-1-4-3	16	3-2-4-1	24	4-3-2-1

Foi escolhida a seqüência 8 (2-1-4-3) com a rota 2.02–1.01–4.03–3.03. Essa alocação está representada na Figura 5.8.

Figura 5.8 - Gráfico de Gantt e matriz de alocação (P1 flexível)

A peça P2 terá as mesmas 24 possíveis seqüências, como o Quadro 5.6 mostra. Para cada seqüência buscou-se a rota de menor instante de término (T) e menor distância percorrida (D), já levando em consideração a peça P1 alocada. Ao final da análise 3 rotas empataram como melhor solução e a primeira foi selecionada (2.01–4.01–1.01–3.02).

Quadro 5.6 - Resultado da análise de alocação para a peça P2

Seq.	Rota	T	D	Seq.	Rota	T	D
1-2-3-4	1.01-2.02-3.01-4.01	40	5	3-1-2-4	3.02-1.01-2.02-4.01	50	4
1-2-4-3	1.01-2.02-4.01-3.02	40	5	3-1-4-2	3.02-1.01-4.01-2.01	50	3
1-3-2-4	1.01-3.02-2.02-4.01	40	5	3-2-1-4	3.01-2.02-1.01-4.01	40	3
1-3-4-2	1.01-3.02-4.01-2.01	40	4	3-2-4-1	3.01-2.02-4.01-1.01	40	4
1-4-2-3	1.01-4.01-2.01-3.01	40	4	3-4-1-2	3.03-4.03-1.01-2.02	40	3
1-4-3-2	1.01-4.03-3.03-2.02	40	5	3-4-2-1	3.03-4.03-2.02-1.01	40	4
2-1-3-4	2.02-1.01-3.02-4.01	50	4	4-1-2-3	4.01-1.01-2.02-3.01	50	3
2-1-4-3	2.02-1.01-4.03-3.03	50	3	4-1-3-2	4.01-1.01-3.02-2.02	50	4
2-3-1-4	2.01-3.01-1.01-4.01	40	5	4-2-1-3	4.01-2.01-1.01-3.02	40	4
2-3-4-1	2.01-3.01-4.01-1.01	40	6	4-2-3-1	4.01-2.01-3.01-1.01	40	5
2-4-1-3	2.01-4.01-1.01-3.02	40	3	4-3-1-2	4.03-3.03-1.01-2.02	40	4
2-4-3-1	2.01-4.01-3.02-1.01	40	4	4-3-2-1	4.03-3.03-2.02-1.01	40	5

O resultado dessa alocação pode ser melhor visualizado pelo gráfico da Figura 5.9, juntamente com a matriz de alocação.

Figura 5.9 - Gráfico de Gantt e matriz de alocação após alocar a peça P2

Repetindo o procedimento para as peças P3 e P4 chega-se ao resultado mostrado pela Figura 5.10. Todas as peças são completadas no instante 40, duas peças percorrem 3 unidades de distância (P1 e P2) enquanto as outras duas percorrem 4 unidades (totalizando 14 unidades para o conjunto). O detalhamento desse procedimento está listado no Apêndice H.

Figura 5.10 - Resultado da alocação das 4 peças com flexibilidade total

O gráfico de Gantt também permite observar que a máquina 1.01 é o gargalo já que está com 100% de ocupação contra 50% das máquinas 2.01, 2.02, 3.02, 3.03, 4.01 e 4.03 e 0% das máquinas 3.01 e 4.02. Outra forma de avaliar a carga alocada é pela ocupação dos processos: 100% do processo 1,

50% do processo 2 e 33% dos processos 3 e 4. Esse resultado era esperado pelo fato de todas as peças usarem todos os processos e o número de máquinas dos processos não serem iguais.

A comparação dos resultados de roteamento sem e com flexibilidade dessas 4 peças permite concluir que a flexibilidade teve um grande impacto no tempo de conclusão total do lote com uma redução de 30 unidades de tempo (42,86%). Porém, essa conclusão não pode ser generalizada. Supondo o roteamento de 20 peças iguais às descritas anteriormente tem-se que no roteamento sem flexibilidade o lote é concluído no instante 230 enquanto que no roteamento com flexibilidade o encerramento ocorre no instante 200. Essa pequena diferença de resultado deve-se ao fato do processo 1 possuir apenas uma máquina e ser usado por todas as peças (a redução no tempo de 30 unidades representa agora aproximadamente 13%).

Apesar desse resultado pouco expressivo com relação ao tempo de conclusão do lote é possível verificar que houve uma redução de 18% na distância percorrida pelo conjunto de peças (reduzindo a distância de 100 para 82 unidades).

5.7 Considerações finais

Este capítulo, que encerra a revisão bibliográfica, apresentou conceitos sobre a programação da produção, o seqüenciamento de tarefas e o roteamento de operações. Destacou a complexidade do problema e mostrou, por meio de um exemplo, a aplicação de um algoritmo para o caso de *flow shop*. Um exemplo com apenas 4 peças e 9 máquinas foi usado para mostrar os modos de roteamento rígido e flexível

O capítulo seguinte apresentará os procedimentos executados no desenvolvimento da pesquisa.

6 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

6.1 Considerações iniciais

Este capítulo apresenta a metodologia desenvolvida nesta pesquisa. Inicialmente é abordado o procedimento geral para obtenção dos dados experimentais e em seguida são detalhados três procedimentos específicos: geração de peças, geração de arranjos e roteamento das peças.

6.2 Procedimento geral

O fluxograma da Figura 6.1 mostra o procedimento de obtenção dos dados experimentais. Na etapa *seleção dos arranjos* era feita a escolha do grupo de arranjos físicos para serem simulados dentre os três tamanhos definidos (pequeno, médio e grande). Para cada tamanho de arranjo físico foram elaboradas 152 disposições divididas em:

- 50 arranjos físicos funcionais;
- 50 arranjos físicos parcialmente distribuídos;
- 50 arranjos físicos aleatoriamente distribuídos;
- 1 arranjo físico maximamente distribuído pelo algoritmo ALVO;
- 1 arranjo físico maximamente distribuído pelo AG.

Para cada um dos três tamanhos foram criados arranjos físicos equilibrados (departamentos com mesmo número de máquinas) e desequilibrados.

Após a seleção dos arranjos fez-se a seleção dos conjuntos de peças que foram simulados. Para cada tamanho de arranjo físico foram criados 30 conjuntos com 150 peças.

Figura 6.1 - Fluxograma do procedimento experimental

Segundo o Teorema do Limite Central uma variável aleatória possuirá distribuição gaussiana quando o número de amostra tende ao infinito. Como um elevado número de amostras leva a um esforço computacional muito grande definiu-se como 30 o número de conjuntos de peças e como 50 o número de cada tipo de arranjos físicos. Como os valores são maiores ou iguais a 30 tem-se que a distribuição das médias será aproximadamente normal.

Na etapa seguinte escolhe-se entre realizar o roteamento das peças com flexibilidade ou sem ela. Quando se seleciona *com* flexibilidade o procedimento de roteamento irá analisar todas as seqüências de processo possíveis e selecionar a que for mais rápida para a peça. Na opção *sem* flexibilidade o procedimento usará apenas a primeira seqüência de processo.

Após essas definições inicia-se a seqüência de eventos que resultará no roteamento de todas as peças do conjunto selecionado em todos os arranjos físicos escolhidos.

O principal dado coletado é o tempo total de execução do conjunto de peças em cada arranjo (*makespan*). Essa variável permite comparar o desempenho dos quatro tipos de arranjo físico nos três tamanhos definidos.

O fluxograma da Figura 6.1 deixa claro que há dois tipos de dados a serem fornecidos: peças e arranjos físicos. A metodologia elaborada para criar cada um desses dados é apresentada nos próximos itens.

6.3 Procedimento automático para geração de peças

Devido a indisponibilidade de dados reais e a dificuldade de criar manualmente centenas de peças com flexibilidade de processo adotou-se como solução elaborar uma metodologia para gerá-los de forma automática.

Inicialmente, no modelo que será apresentado, o usuário define o número de processos existentes no arranjo físico (NumProc). Em seguida determina-se o número mínimo e máximo de operações que cada peça gerada poderá ter (OpMin e OpMax) bem como a faixa de tempo dentro da qual o tempo de cada operação será escolhido (Tmin e Tmax). Os últimos dados que devem ser configurados são o número de peças a gerar (NumPec), o número

de conjuntos de peças (NumCj) e o nome base dos arquivos que conterão as peças (Nome).

Ao final do processo de geração de peças tem-se um arquivo para cada peça contendo suas relações de precedência e o tempo que cada operação consome. Esses arquivos têm o mesmo nome, com exceção de uma numeração seqüencial que os diferencia.

Para que fosse possível gerar peças com diversidade de relações de precedência, o procedimento baseou-se em relações pré-montadas e colocadas em arquivos denominados Modelos. Foi criado um arquivo modelo para cada número de operações variando de 3 até 15. Cada arquivo modelo contém algumas estruturas de precedência. O Quadro 6.1 apresenta, como exemplo, o conteúdo do arquivo '06.txt' que contém quatro estruturas de precedência para peças com 6 operações (do lado direito foram colocados comentários para facilitar o entendimento).

Quadro 6.1 - Conteúdo (comentado) do arquivo modelo para 6 operações

4	=> Número de modelos do arquivo
A, B, C, D, E, F	=> Identificadores das operações
0, A, A, A, BC, CD	=> Modelo de precedência 1
0, 0, 0, ABC, D, D	=> Modelo de precedência 2
0, A, A, A, A, BCDE	=> Modelo de precedência 3
0, 0, A, AB, B, CDE	=> Modelo de precedência 4

Pelo Quadro 6.1 percebe-se que se trata de um arquivo de texto sem formatação, normalmente denominado de ASCII puro. Nele cada informação é colocada em uma linha ou, se estiverem em uma mesma linha, separadas por vírgula. A primeira informação do arquivo é o número de modelos que ele contém. Em seguida estão os caracteres que representam as operações (poderiam ser letras minúscula, numerais ou combinações). Finalmente, na seqüência, tem-se em cada linha um modelo de precedência. O nó raiz (que não tem nenhum precedente) é sempre identificado nas relações de precedência pelo caractere zero (0).

A Figura 6.2 apresenta, de forma gráfica, os quatro modelos de precedência contidos no arquivo de modelo apresentado pelo Quadro 6.1, juntamente com o número total de possíveis seqüências, como discutido no capítulo 4.

Figura 6.2 - Quatro modelos de precedência para peças com 6 operações

A Figura 6.3 mostra o fluxograma de funcionamento do modelo proposto para gerar automaticamente as peças.

Figura 6.3 - Fluxograma de funcionamento do gerador automático de peças

Analizando o fluxograma da Figura 6.3 é possível notar que o uso de escolhas aleatórias leva a uma probabilidade muito pequena de gerar duas peças idênticas em cada conjunto. Mesmo que as peças tenham o mesmo número de operações as escolhas aleatórias devem levá-las a estruturas de precedência distintas. E no caso de duas peças terem a mesma estrutura irão ser compostas de operações diferentes.

Uma situação limite ocorre quando o número máximo e mínimo de operações da peça for igual ao número de processos do arranjo ($OpMax=OpMin=NumProc$). Como todas as operações participam das peças a aleatoriedade irá exercer sua influência apenas na ordem e no tempo das operações.

Se mesmo com toda essa aleatoriedade, forem criadas peças idênticas em um mesmo grupo, isso não representa nenhum problema. Nada impede que em um ambiente volátil ocorra a repetição de uma peça em um curto período de tempo.

6.4 Procedimentos para geração de arranjos físicos

Foi elaborado um procedimento de geração de arranjo físico para cada tipo de distribuição. Para os arranjos físicos funcional, parcialmente distribuído e aleatoriamente distribuído o procedimento é baseado na curva de preenchimento espacial de Peano²². Para o arranjo maximamente distribuído foi desenvolvido um algoritmo específico.

Nos três procedimentos que utilizam a curva de Peano foi utilizada uma rotina, denominada SFC. A cada chamada dessa rotina ocorre um avanço para a próxima posição do arranjo físico conforme sua regra de movimento (e o número escolhido de faixas). Dessa forma, a cada chamada, o procedimento principal recebe uma posição livre do arranjo físico, definida em termos de linha e coluna.

6.4.1 Gerando arranjo físico funcional

O arranjo físico funcional é definido pelo agrupamento das máquinas de um mesmo processo. O procedimento elaborado para gerar esse tipo de

²² Detalhes estão disponíveis no apêndice B.

distribuição está detalhado no fluxograma da Figura 6.4. Os dados do arranjo físico que devem ser fornecidos são: número de linhas (NL), número de colunas (NC), número de processos (NP) e número de máquinas de cada processo (NMP), sendo este último um vetor com índice variando de 1 até NP. O procedimento é simples: um processo é sorteado de forma aleatória e em seguida todas as suas máquinas são alocadas em seqüência, para ficarem juntas e formarem um departamento.

Figura 6.4 - Procedimento de geração de arranjo físico funcional

6.4.2 Gerando arranjo físico parcialmente distribuído

O fluxograma da Figura 6.5 mostra a seqüência de eventos que geram o arranjo físico parcialmente distribuído. A variável NMD recebe o número de máquinas que cada departamento deverá receber.

Figura 6.5 - Procedimento para gerar arranjo físico parcialmente distribuído

Um exemplo será usado para simplificar o entendimento das etapas desse procedimento. O arranjo físico para esse exemplo possui 3 linhas, 4 colunas e 4 processos (Tabela 6.1).

Tabela 6.1 - Máquinas do exemplo

Processo	Número de máquinas
A	6
B	3
C	2
D	1

Supondo 2 faixas para a curva de preenchimento espacial de Peano, o arranjo físico será percorrido da forma mostrada pela Figura 6.6, onde os números representam a ordem pela qual a rotina SFC irá apresentar cada posição. Cada processo será dividido em 2 departamentos.

Figura 6.6 - Curva de preenchimento para o exemplo

Com esses dados a primeira etapa do procedimento terá suas variáveis com os seguintes valores:

$$NL = 3$$

$$NC = 4$$

$$NP = 4$$

$$ND = 2$$

$$NMP(1) = 6$$

$$NMP(2) = 3$$

$$NMP(3) = 2$$

$$NMP(4) = 1$$

O passo seguinte irá declarar o vetor NMD com 4 elementos, um para cada processo. Esse vetor irá armazenar o número de máquinas de cada departamento, calculado pela divisão do número de máquinas de cada processo pelo número de departamentos, ou seja, $NMD(x) = NMP(x) / ND$. O valor calculado é arredondado para o inteiro mais próximo e caso obtenha-se zero ele é transformado em 1. Após esta etapa esse vetor terá os seguintes valores:

$$\text{NMD}(1) = 6 / 2 = 3$$

$$\text{NMD}(2) = 3 / 2 = 1.5 = 2$$

$$\text{NMD}(3) = 2 / 2 = 1$$

$$\text{NMD}(4) = 1 / 2 = 0.5 = 1$$

Na seqüência todos processos são marcados como disponíveis, permitindo que qualquer um possa ser selecionado.

A partir da etapa seguinte inicia-se um ciclo que só será encerrado quando todas as máquinas forem alocadas. Esse ciclo começa com a escolha aleatória de um processo disponível. Neste momento todos os processos estão disponíveis e iremos supor que $x=2$ (o processo B foi sorteado).

Na etapa seguinte a variável i recebe o número de máquinas para um departamento do processo B, ou seja, $i = \text{NMD}(2) = 2$.

A próxima etapa verifica se o número de máquinas do processo selecionado que ainda não foram alocadas é menor que o número de máquinas calculado para cada departamento (i). Neste caso o teste é negativo e o processamento segue para o próximo teste.

A rotina de alocação é igual à apresentada na Figura 6.4, mas aqui foi simplificada em apenas um bloco. Como neste caso $i=2$ serão alocadas duas máquinas do processo B (posições 1 e 2). Em seguida as máquinas alocadas são subtraídas do número de máquinas do processo. Tem-se $\text{NMP}(2) = 3 - i = 3 - 2 = 1$ que significa que falta alocar uma máquina do processo B.

A última etapa do ciclo verifica se ainda há máquinas do processo a serem alocadas. Como neste caso ainda resta uma máquina o teste é falso e o processamento segue diretamente para o passo seguinte.

Como ainda há processos disponíveis o ciclo retorna à escolha aleatória de processos. Tomemos $x=3$ (o processo C foi escolhido). Tem-se $i=1$. O teste da etapa seguinte também é falso neste caso. Na seqüência uma máquina C será alocada na posição 3. O número de máquinas do processo C será reduzido em uma ($\text{NMP}(3) = 2 - 1 = 1$). O primeiro teste que segue é falso e o segundo verdadeiro. O ciclo é reiniciado.

Supondo $x=1$ (processo A foi sorteado) tem-se $i=3$. O primeiro teste continua sendo falso e três máquinas do processo A serão alocadas (posições

4, 5 e 6). Em seguida faz-se $NMP(1) = 6 - i = 6 - 3 = 3$. Novamente o teste seguinte é falso e o último teste é verdadeiro, reiniciando o ciclo.

Façamos agora $x=2$ (processo B sorteado novamente), Tem-se $i=2$. O primeiro teste do ciclo, neste caso é verdadeiro, pois há apenas uma máquina do processo B a ser alocada enquanto o número de máquinas previsto para cada departamento é igual a 2. Sendo assim o processamento é desviado e faz $i=NMP(2)=1$, pois há somente uma máquina a ser alocada. Após a alocação na posição 7 faz-se $NMP(2) = 1 - 1 = 0$. O teste seguinte, também pela primeira vez, é verdadeiro e o processo B torna-se indisponível (todas as suas máquinas foram alocadas). Como há máquinas do processo A, C e D a alocar o ciclo reinicia.

Fazendo $x=4$ (processo D sorteado) tem-se $i=1$ e essa máquina é alocada na posição 8. Em seguida essa máquina é subtraída do número de máquinas do processo D ficando $NMP(4)=0$. No teste seguinte o processo D passa a ficar indisponível também.

No reinício do ciclo e supondo $x=3$ (processo C selecionado) ocorrerá sua alocação na posição 9. Como $NMP(3)$ será zerado o processo C será definido como indisponível e o ciclo reiniciará.

Como resta apenas o processo A ele será selecionado ($x=1$ e $i=3$). As três máquinas serão alocadas (posições 10, 11 e 12) e o processo A ficará indisponível. Como não há mais nenhum processo disponível o procedimento se encerra.

A Figura 6.7 mostra o arranjo físico final deste exemplo após todos os eventos apresentados. Nota-se que o processo D, que possui apenas uma máquina e, por consequência apenas um departamento, foi tratado de forma correta pelo procedimento.

A	A	B	A
A	C	D	A
B	B	C	A

Figura 6.7 - Arranjo físico parcialmente distribuído do exemplo

6.4.3 Gerando arranjo físico aleatoriamente distribuído

No procedimento de geração de arranjo físico aleatoriamente distribuído os processos são selecionados ao acaso e, a cada seleção, somente uma máquina é alocada (Figura 6.8). Quando todas as máquinas de um processo são alocadas o processo torna-se indisponível.

Figura 6.8 - Geração de arranjo físico aleatoriamente distribuído

Tanto neste procedimento quanto no anterior (arranjo físico parcialmente distribuído) há uma etapa após a seleção do processo (seleção de x) que não consta dos fluxogramas. Caso o processo selecionado seja igual ao do ciclo anterior um novo sorteio é realizado, evitando que processos iguais fiquem

juntos. Porém, como há a possibilidade de entrar em um ciclo infinito (quando a última máquina for igual à penúltima), essa verificação é realizada no máximo 10 vezes.

6.4.4 Gerando arranjo físico maximamente distribuído

A Figura 6.9 apresenta o fluxograma de funcionamento do algoritmo denominado ALVO. São usadas duas variáveis para contagem, sendo que a variável i conta os processos e a variável j conta as máquinas de cada processo.

Figura 6.9 - Fluxograma de funcionamento do algoritmo ALVO

O nome dado ao algoritmo refere-se ao modo como aloca as máquinas: calcula uma posição alvo *ideal* para cada máquina e depois as aloca o mais próximo possível dessa posição. Seu objetivo é criar o arranjo físico maximamente distribuído de forma mais simples e rápida do que as abordagens existentes na literatura. Os dados necessários são: número de linhas e colunas do arranjo físico e a quantidade de máquinas de cada processo.

As primeiras máquinas a serem analisadas garantem a alocação na posição ideal calculada, pois o arranjo físico ainda está vazio. Dessa forma a primeira etapa do algoritmo ordena os processos pelo número de máquinas em ordem crescente. Isso garante um bom posicionamento de processos com poucas máquinas.

Em seguida o algoritmo verifica quantas máquinas o processo possui e calcula a posição ideal para cada máquina. Esse procedimento será detalhado no próximo item.

Após o cálculo das posições ideais inicia-se o processo de alocação. Se a posição ideal está vaga a máquina é alocada e o procedimento segue para a máquina seguinte. Caso a posição já esteja ocupada inicia-se uma busca por uma posição livre próxima à posição ideal. Esse procedimento é dividido em quatro etapas. A primeira etapa verifica se uma das quatro posições adjacentes está livre, como mostra a Figura 6.10.

	3º opção	
2º opção	Posição ideal OCUPADA	1º opção
	4º opção	

Figura 6.10 - Busca por uma posição livre (etapa 1)

Se uma dessas posições estiver livre a máquina é alocada a apenas uma distância retilinear da posição ideal. Se essas quatro posições estiverem

ocupadas passa-se para a segunda etapa que testa oito posições que estão a duas distâncias retilineares da posição ideal, como mostra a Figura 6.11.

		8º opção		
	2º opção	Ocupada	4º opção	
6º opção	Ocupada	Posição ideal OCUPADA	Ocupada	5º opção
	3º opção	Ocupada	1º opção	
		7º opção		

Figura 6.11 - Busca por uma posição livre (etapa 2)

Se todas as posições verificadas na etapa 2 estiverem ocupadas iniciam-se os testes da etapa 3 que analisam 12 posições, sendo as 8 primeiras com 3 distâncias retilineares da posição e as restantes a 4 distâncias retilineares (Figura 6.12).

10º opção	2º opção	Ocupada	4º opção	11º opção
6º opção	Ocupada	Ocupada	Ocupada	8º opção
Ocupada	Ocupada	Posição ideal OCUPADA	Ocupada	Ocupada
7º opção	Ocupada	Ocupada	Ocupada	5º opção
12º opção	3º opção	Ocupada	1º opção	9º opção

Figura 6.12 - Busca por uma posição livre (etapa 3)

Caso todas essas posições estejam ocupadas passa-se para a quarta etapa que irá testar sistematicamente todas as posições em torno da posição

ideal, com exceção das 24 posições já testadas, até encontrar uma posição não ocupada, como mostra a Figura 6.13.

Figura 6.13 - Busca por uma posição livre (etapa 4)

6.4.4.1 Cálculo da posição ideal

O modelo proposto oferece posições específicas para cada máquina quando o processo possui até 10 máquinas. Acima dessa quantidade as posições são calculadas pela simples divisão da área pelo número de máquinas do processo. As posições são pré-definidas em termos percentuais em relação à dimensão horizontal (x) e vertical (y) do arranjo físico e, durante o cálculo, são convertidos em números inteiros relativos ao número de linhas e colunas.

6.4.4.2 Posição para 1 máquina

Para o caso do processo possuir apenas uma máquina a posição lógica é o centro do arranjo físico. Nessa localização minimiza-se a máxima distância a ser percorrida para atingir qualquer outra posição. Neste caso tem-se $x=0.5$ e $y=0.5$, como mostra a Figura 6.14. As posições percentuais são tomadas a partir do canto superior esquerdo do arranjo físico, tanto neste caso quanto nos casos subseqüentes.

Figura 6.14 - Posição ideal para 1 máquina

6.4.4.3 Posições para 2 máquinas

Para duas máquinas foram definidas quatro disposições distintas, permitindo que a alocação nas posições ideais ocorra com maior frequência. Cada vez que uma disposição é usada ela é marcada. Dessa forma, se for necessário definir novamente as posições para o mesmo número de máquinas a disposição seguinte é usada. Quando todas as disposições tiverem sido aplicadas inicia-se novamente a partir da primeira disposição. A Figura 6.15 mostra as quatro disposições para o caso do processo possuir 2 máquinas.

Figura 6.15 - Quatro disposições ideais para 2 máquinas

6.4.4.4 Posições para 3 até 10 máquinas

O Quadro 6.2 apresenta as disposições adotadas quando o processo tem entre 3 e 10 máquinas. Alguns possuem apenas uma disposição enquanto outros possuem mais. As dimensões adotadas estão no Apêndice G.

Quadro 6.2 - Disposições ideais para processos entre 3 e 10 máquinas

3 Máq.
4 Máq.
5 Máq.
6 Máq.
7 Máq.
8 Máq.
9 Máq.
10 Máq.

6.4.4.5 Posições para processos com mais de 10 máquinas

Adotou-se que acima de 10 máquinas as posições seriam calculadas de uma mesma forma. O procedimento baseia-se na raiz quadrada do número de máquinas, como detalha o Quadro 6.3.

Quadro 6.3 - Cálculo das posições para mais de 10 máquinas

```

N = Número de máquinas
 $R = \sqrt{N}$ 
Se R é um número inteiro então
    Divisão em X = 1 / (R + 1)
    Divisão em Y = 1 / (R + 1)
Senão
    Se parte fracionária de R é menor que 0.5 então
        R = inteiro de R
        Divisão em X = 1 / (R + 2)
        Divisão em Y = 1 / (R + 1)
    Senão
        R = inteiro de R
        Divisão em X = 1 / (R + 2)
        Divisão em Y = 1 / (R + 2)
Fim-se
Fim-se

```

Supondo 16 máquinas tem-se $R=4$ (número inteiro), ou seja, 4 máquinas na horizontal e 4 máquinas na vertical. Nesse caso o eixo X será dividido em 5 partes ($R+1$), bem como o eixo Y. A dimensão de cada divisão será $1/5 = 0.2$, ou seja, 20% da altura/largura do arranjo.

Com 17 máquinas, como mostra a Figura 6.16, tem-se $R=4.123$. Como a parte fracionária é menor que 0.5 o eixo X será dividido em 6 partes ($R+2$) e o eixo Y em 5 partes ($R+1$). Em termos percentuais cada divisão do eixo X tem 16.67% e cada divisão do eixo Y tem 20%.

Figura 6.16 - Posições calculadas para 17 máquinas

6.5 Algoritmo genético para maximização da distribuição

O objetivo deste algoritmo genético²³ é maximizar a distribuição das máquinas no arranjo físico de forma a minimizar a máxima distância entre diferentes tipos de máquinas.

6.5.1 Codificação

Foi mantida a forma matricial para representar os elementos da população. Cada elemento da matriz é um número real onde a parte inteira representa o processo e a parte fracionária o número da máquina²⁴. Optou-se por esta forma para manter as informações sobre cada máquina específica, mas o algoritmo só irá trabalhar com a parte inteira dos valores. A Figura 6.17 mostra um elemento da população com quatro processos (processo 1 com uma máquina, processo 2 com duas e os processos 3 e 4 com 3 máquinas cada).

1.01	2.01	2.02
3.01	3.02	3.03
4.01	4.02	4.03

Figura 6.17 - Exemplo de um elemento da população

6.5.2 População inicial

A população inicial é gerada em quatro etapas por modificações aleatórias sobre um arranjo físico oferecido (previamente gerado) que será denominado arranjo físico semente. O número de elementos da população é escolhido pelo usuário entre 10 e 100.

Etapa 1: Esta etapa consiste na obtenção de apenas 1 elemento que é o próprio arranjo físico semente, sem nenhuma alteração. Caso seja um arranjo com boa distribuição de máquinas isso auxiliará na busca de uma solução otimizada.

²³ Maiores detalhes sobre essa técnica estão no apêndice E.

²⁴ Para permitir que cada processo tenha até 99 máquinas foi adotado como padrão o uso de 2 algarismos para a representação da máquina, ou seja, dois algarismos na parte decimal.

Etapa 2: Nesta etapa gera-se metade dos elementos da população inicial.

Os novos elementos são gerados pela troca de posição entre duas máquinas do arranjo físico semente. Além disso, a cada novo elemento gerado ocorre uma troca a mais, ou seja, o primeiro elemento desta etapa é o arranjo físico semente com uma troca de posições, no segundo elemento ocorrem duas trocas, no terceiro três e assim por diante, gerando uma diversidade maior. É importante destacar que a troca só ocorre se as máquinas, escolhidas aleatoriamente, forem de tipos diferentes. Caso sejam escolhidas máquinas do mesmo tipo uma nova tentativa ocorre.

Etapa 3: Esta etapa gera 25% da população inicial e nela o arranjo físico semente sofre alterações mais drásticas. Aleatoriamente são escolhidas e trocadas de posição duas linhas do arranjo físico levando a pontos de busca mais distantes da solução inicial.

Etapa 4: Aqui são gerados os elementos restantes para completar a população inicial. O procedimento é similar ao da etapa anterior, mas ao invés de trocar linhas são trocadas duas colunas aleatoriamente selecionadas.

6.5.3 Função de aptidão (avaliação)

A função de aptidão adotada é o índice de distribuição proposto por Benjaafar e Sheikhzadeh (2000, p.317)²⁵, que por sua vez é similar ao índice de Montreuil et al. (1993). Esse cálculo indica o grau de distribuição do arranjo físico sendo que, quanto menor o índice, mais distribuídas as máquinas estão. Dessa forma tem-se que o processo de otimização consiste na minimização desse índice.

6.5.4 Condição de encerramento

A única condição de encerramento adotada é atingir o número de gerações selecionado que pode ser escolhido entre 50 e 10.000 gerações (em

²⁵ Trata-se das equações (10) e (11) apresentadas no item 3.7.

passos de 50). Após o encerramento do algoritmo o melhor indivíduo é selecionado como solução.

6.5.5 Nova população

Seguindo a regra do elitismo optou-se por enviar diretamente para a geração seguinte os 10% melhores indivíduos da população. Os demais componentes da população são submetidos ao processo de seleção pelo método da Roleta (*Roulette Wheel*) para em seguida passarem ou não pelas mutações.

A *mutação 1*, que ocorre com maior frequência, consiste na simples troca de posição de duas máquinas, desde que sejam de processos diferentes. A probabilidade de ocorrer essa mutação é selecionada pelo usuário em uma faixa de 75 a 100%.

A operação de cruzamento consiste em determinar um ponto de corte e trocar as partes de dois cromossomos. Essa alteração costuma ocorrer com baixa probabilidade e sua função é gerar indivíduos mais diversificados para aumentar a exploração do universo de soluções. Porém a codificação adotada impede o uso do cruzamento que, se fosse realizado, não garantiria que o número de máquinas de cada tipo fosse mantido. Para substituir o cruzamento duas diferentes mutações que alteram de forma mais radical o indivíduo foram adotadas. A *mutação 2* realiza a troca de duas linhas selecionadas aleatoriamente e a *mutação 3* realiza a troca de duas colunas. A probabilidade de ocorrência dessas duas mutações é selecionada pelo usuário de forma independente e podem variar de 0 a 20%.

6.5.6 Seleção pelo Método da Roleta

O Método da Roleta trata cada indivíduo como se ele possuísse uma fatia de uma circunferência que é proporcional ao seu índice de aptidão. Isso faz com que os indivíduos mais adaptados tenham maior probabilidade de seleção e não impede que um indivíduo com menor grau de adaptação possa vir a ser selecionado.

Neste trabalho o objetivo é minimizar o valor de uma função e, sendo assim, é necessário manipular os valores de modo a tornar maior a probabilidade dos indivíduos cuja função de avaliação tenha valores menores.

Foi adotada a relação que cada valor tem com o maior valor entre todos os elementos.

A título de exemplo tomemos um conjunto de 5 elementos com os seguintes valores de função de avaliação: 10, 4, 2, 9 e 5. A Tabela 6.2 mostra na coluna da esquerda os índices ordenados de forma crescente. Na coluna central está o resultado da divisão de cada índice pelo índice de maior valor, bem como o somatório dessas relações. Na coluna da direita tem-se a relação percentual resultante.

Tabela 6.2 - Cálculo da relação percentual entre os índices

Índice	Relação com o maior	Relação Percentual
2	$10 / 2 = 5.0$	$5.0 / 11.61 = 0.4306$
4	$10 / 4 = 2.5$	$2.5 / 11.61 = 0.2153$
5	$10 / 5 = 2.0$	$2.0 / 11.61 = 0.1721$
9	$10 / 9 = 1.1$	$1.1 / 11.61 = 0.0956$
10	$10 / 10 = 1.0$	$1.0 / 11.61 = 0.0861$
$\Sigma = 11.61$		

Nota-se, por exemplo, que o primeiro índice é cinco vezes menor que o último. Essa relação é mantida percentualmente já que 43,06% é cinco vezes maior que 8,61%. Em outras palavras, o menor índice tem 5 vezes mais probabilidade de ser selecionado do que o maior índice. A Figura 6.18 mostra a Roleta após o processo apresentado.

Figura 6.18 - Roleta após manipulação dos índices

A Figura 6.19 apresenta um fluxograma com as etapas citadas do algoritmo genético implementado.

Figura 6.19 - Fluxograma detalhado do algoritmo genético implementado

6.6 Roteamento das peças nos arranjos físicos

O procedimento geral para o roteamento das peças em um arranjo físico está representado pelo fluxograma da Figura 6.20, que recebe as informações iniciais para, então, executar um ciclo no qual busca pela melhor rota para cada peça e, após encontrá-la, armazena esse percurso. Como mostra o fluxograma o processo de busca pela melhor rota faz uso dos dados das peças já roteadas.

Figura 6.20 - Roteamento de um conjunto de peças em um arranjo físico

As definições relacionadas com os dados do arranjo físico são:

- L número de linhas do arranjo físico.
- C número de colunas do arranjo físico.
- NPR número de processos existentes no arranjo.
- NM(x) número de máquinas do processo x, onde $x = 1, 2, 3, \dots$, NPR.
- Arranjo(l, c) arranjo físico, onde $l = 1, 2, 3, \dots, L$ e $c = 1, 2, 3, \dots, C$.

As seguintes definições, relacionadas com os dados das peças, são necessárias para o completo entendimento do procedimento:

NP	número de peças a rotear.
p	peça a ser roteada, onde $p = 1, 2, 3, \dots, NP$.
NO(p)	número de operações da peça p
op	operação da peça p, onde $op = 1, 2, 3, \dots, NO(p)$.
PRp(op)	processo usado pela operação op da peça p.
DOp(op)	duração da operação op da peça p.

A etapa denominada *Busca pela melhor rota no arranjo físico* analisa a seqüência de operações da peça e o posicionamento das máquinas no arranjo físico. Suas etapas estão detalhadas pelo fluxograma da Figura 6.21.

Figura 6.21 - Procedimento de busca pela melhor rota no arranjo físico

A varredura do arranjo físico, que ocorre tanto fora quanto dentro do ciclo do fluxograma da Figura 6.21 está detalhado pelo pseudocódigo do Quadro 6.4. É dentro dessa varredura que o procedimento analisa a matriz de alocação para buscar o primeiro instante de tempo disponível para alocar cada operação (rotina denominada Busca_primeiro_instante).

Quadro 6.4 - Pseudocódigo da varredura do arranjo físico

```

Procedimento: Varredura_do_arranjo_físico
Recebe: número de linhas do arranjo físico (L)
        número de colunas do arranjo físico (C)
        matriz do arranjo físico (Arranjo(L, C))
        peça (p)
        operação da peça (op)
        vetor com o processo de cada operação da peça p (PRp())
Usa:    l      linha do arranjo físico. l = 1, 2, 3, ..., L
        c      coluna do arranjo físico. c = 1, 2, 3, ..., C.

Para l de 1 até L
    Para c de 1 até C
        Se Inteiro(Arranjo(l, c)) = PRp(op) então
            Armazena l
            Armazena c
            Busca_primeiro_instante
        Fim-se
    Fim-para
Fim-procedimento

```

Será adotado o termo *instante preferencial de início de uma operação* o momento previsto para iniciar uma operação antes da peça ser roteada. Para a primeira operação o instante preferencial de início é zero. Para as demais operações o instante preferencial de início é igual ao instante de finalização da operação anterior. A busca pelo primeiro instante disponível para alocação analisa todas as alocações já existentes em uma máquina para encontrar um intervalo de tempo livre que atenda a três restrições:

- A duração do intervalo livre deve ser maior ou igual à duração da operação;
- O início do intervalo livre deve ser no mesmo instante ou posterior ao instante preferencial de início da operação;
- O final do intervalo livre deve ser igual ou posterior ao instante de início da operação somado à sua duração.

O fluxograma da Figura 6.22 mostra as atividades executadas na busca pelo instante de início mais próximo do início preferencial da operação. O procedimento usa os seguintes dados: a peça que está sendo programada (p), a máquina que está sendo analisada ($M = \text{Arranjo}(l, c)$), o instante de início preferencial da operação (IP) e a duração da operação (DO).

Resumidamente o que essa rotina de busca faz é verificar se o instante preferencial de início da operação (IO) pode ser utilizado e, caso não possa, encontra um novo instante que leve ao menor atraso possível.

Figura 6.22 - Busca pelo primeiro instante disponível para alocação

A rotina inicia-se verificando se a peça que está sendo programada é a primeira ($p=1$). Caso seja então todas as máquinas estão sem nenhuma alocação, significando que o instante de início preferencial pode ser utilizado, independente de qual operação esteja sendo alocada. Dessa forma o fluxo lógico é desviado para o final do fluxograma.

Não sendo a primeira peça significa que já há máquinas com tempos alocados e, dessa forma, a tarefa seguinte é contar o número de alocações na máquina em análise (NA). Para isso será necessário analisar os dados da matriz de alocação, mais precisamente a linha da matriz correspondente à máquina M (essa análise é detalhada nos itens 6.6.1).

Após a análise das alocações na máquina M realiza-se um novo teste. Se a máquina analisada não possui nenhuma alocação ($NA=0$) então o instante preferencial de início pode ser usado e o fluxo lógico é desviado para o final da busca. Caso a máquina em análise possua alocações será necessário avaliar os intervalos de tempo livres. Essa tarefa é simplificada copiando os dados de alocação da máquina para um vetor auxiliar e ordenando-o.

Após a ordenação verifica-se se há um intervalo de tempo livre no início que possa receber a operação. Para isso duas condições devem ser satisfeitas (ver item 6.6.2). Se estas duas condições forem satisfeitas o fluxo lógico é desviado para o final do procedimento, pois a operação pode ser alocada no início preferencial. Caso contrário é necessário avaliar os intervalos entre as alocações já realizadas (item 6.2.3). Caso não seja possível alocar a operação entre as alocações existentes só restará a opção de alocá-la após o encerramento da última operação já alocada na máquina (detalhes no item 6.6.4).

6.6.1 Contagem do número de alocações

Durante a contagem do número de alocações da máquina M aproveita-se para copiar os dados para vetores auxiliares que serão usados posteriormente. O Quadro 6.5 mostra o pseudocódigo dessa tarefa. As seguintes convenções foram usadas para simplificar a compreensão:

- Quando a matriz de alocação é inicializada todas as suas células são preenchidas com o valor -1 que indica a inexistência de alocação.
- A matriz de alocação foi dividida em duas matrizes sendo que uma conterá o instante de início da operação (MAII – Matriz de Alocação Instante de Início) e a outra o instante de finalização (MAIF – Matriz de Alocação Instante de Finalização).
- O vetor auxiliar foi dividido em dois vetores sendo que um conterá os instantes de início (II) e o outro os instantes de finalização (IF).

Quadro 6.5 - Pseudocódigo da contagem de NA

```

Procedimento: Contagem de NA
Recebe: a máquina em análise (M)
Onde: x é uma variável de contagem

NA=0
Para x=1 até p-1
    Se MAII(M, x) ≠ -1 então
        NA=NA+1
        II(NA)=MAII(M, x)
        IF(NA)=MAIF(M, x)
    Fim-se
Fim-para

```

O Quadro 6.5 mostra que a matriz de alocação é analisada somente até a peça anteriormente programada (p-1) pois, a partir desse ponto, ainda não há informações. Isso permite concluir que a cada peça alocada essa tarefa tende a consumir um tempo de processamento maior.

6.6.2 Intervalo inicial

Há um intervalo de tempo livre no início que possa receber uma operação quando:

- A primeira operação não iniciar no instante 0, ou seja, $II(1) \neq 0$;
- O instante preferencial de início da operação (IO) somado com sua duração (DO) não se sobrepor à operação já alocada, ou seja, $IO + DO \leq II(1)$.

6.6.3 Avaliando intervalos de tempo livres

A avaliação dos intervalos entre alocações é realizada pelas etapas mostradas no fluxograma da Figura 6.23, que faz uso de uma variável de contagem (x) e de uma variável lógica (Alocou). Essa variável lógica é iniciada com o valor Falso (F) e, caso o procedimento não encontre um intervalo que possa receber a operação, continuará nesse estado.

Nota-se que o procedimento executa um ciclo comparando o final de uma alocação com o início da próxima. Três variáveis foram criadas no fluxograma com o objetivo de tornar mais fácil a compreensão dos testes lógicos. A variável FA (Final Anterior) recebe o instante de tempo referente ao final da alocação anterior e a variável IP (Início Próxima) recebe o instante de início da próxima operação. A variável DI é a duração do intervalo, ou seja a diferença de tempo entre o final de uma alocação e o início da próxima.

Figura 6.23 - Avaliação dos intervalos entre alocações existentes

O primeiro teste avalia três condições. Se uma dessas condições for satisfeita o intervalo não poderá ser usado para alocação. São elas:

- A duração da operação é maior que a duração do intervalo.
- O início preferencial da operação é posterior ao início da próxima operação já alocada.
- O encerramento da operação ($IO+DO$) é posterior ao início da próxima operação já alocada.

A Figura 6.24 mostra graficamente um exemplo para cada uma das condições citadas supondo a existência de um intervalo de tempo entre operações das peças P1 e P2. A operação da peça P6 satisfaz a primeira condição por sua duração ser maior do que a duração do intervalo. A duração da operação da peça P10 é menor que a duração do intervalo, mas seu instante preferencial de início é posterior ao início da operação de P2 já alocada (segunda condição). A terceira condição é exemplificada pela operação da peça P14 cuja duração é menor que a duração do intervalo e que possui início preferencial dentro do intervalo. Porém o seu instante de término ($IO+DO$) sobrepõe-se à operação já alocada.

Figura 6.24 - Exemplos de satisfação de três condições de avaliação

Se nenhuma dessas condições ocorrerem então a operação pode ser alocada, mas existe um detalhe a ser verificado. Se o início preferencial da operação em análise for anterior ao instante de encerramento da alocação anterior ($IO < FA$) então será necessário atrasar o início da operação, ou seja, fazer com que seu início ocorra após o encerramento da operação anterior ($IO = FA$). A Figura 6.25 mostra dois exemplos onde é necessário atrasar o início da operação e dois exemplos onde esse atraso não ocorre, bem como seria o

resultado da alocação em cada situação. Nota-se que em dois casos (P15 e P25) o instante de encerramento é igual à IP.

Figura 6.25 - Situações onde a alocação é possível

Tanto a operação de P15 quanto a de P18 tem início preferencial anterior à FA e devido a isso é necessário impor um atraso. Nos casos das operações de P21 e P25 a alocação seria realizada sem alterar o início preferencial.

6.6.4 Alocando no final

O instante de finalização da última operação já alocada é dado pelo último elemento do vetor auxiliar que contém os instantes de finalização, ou seja, $IF(NA)$. Sendo assim, se o início preferencial for posterior à $IF(NA)$ então a operação é alocada como veio, caso contrário é necessário atrasá-la fazendo $IO=IF(NA)$.

6.7 Considerações finais

Este capítulo apresentou a metodologia desenvolvida na pesquisa abordando desde o procedimento geral para obtenção dos dados experimentais até o detalhamento dos procedimentos específicos:

- Geração de peças;
- Geração de arranjo físico funcional;
- Geração de arranjo físico parcialmente distribuído;
- Geração de arranjo físico aleatoriamente distribuído;
- Geração de arranjo físico maximamente distribuído;

- Algoritmo genético para maximização da distribuição;
- Roteamento das peças nos arranjos físicos.

Dentre as propostas apresentadas o algoritmo genético pode ser questionado por não fazer uso da operação de cruzamento, considerado por alguns autores como sendo a mais importante operação para gerar novos pontos no espaço de otimização. Como citada anteriormente essa decisão foi tomada devido à forma de codificação adotada para representar os indivíduos.

Pode-se tentar afirmar que o algoritmo elaborado não mereça ser classificado como genético já que deixaria de ser similar à forma de evolução biológica. Porém é necessário lembrar que a reprodução sexuada (por cruzamento) não é a única forma existente, como descreve Simom (2000, p. 201):

A clonagem é o modo natural de um grande número de peixes, anfíbios e répteis reproduzirem um bebê peixe, anfíbio ou réptil. A reprodução por clonagem é generalizada no reino animal, provavelmente porque fêmeas excepcionalmente adequadas possam gerar continuamente, sem diluir seu genoma com um macho mais fraco. E também, não sendo preciso dois para “dançar o tango”, não se desperdiça tempo nem energia produzindo machos, cortejando ou acasalando-se, o que permite que as fêmeas percorram longas distâncias procurando um lugar bom para criar seus bebês geneticamente idênticos. E mais: é pequena a chance de que um excelente genoma se perca devido a morte de um animal antes que ele possa se reproduzir – um número incontável de irmãs fica ainda por perto para passar adiante a família de genes. Na verdade, parece haver tantas vantagens na reprodução por clonagem que livros inteiros têm sido escritos para responder à pergunta: por que mais organismos não se reproduzem exclusivamente por clonagem?

Parte da resposta a essa pergunta é que a clonagem permite pequena diversidade genética. Não há mistura de material genético de macho e fêmea para produzir rebentos com novos genomas exclusivos. As espécies que se reproduzem por clonagem, portanto, tendem a ser muito similares geneticamente. Os clones são provavelmente todos relacionados a uma única fêmea que sofreu uma mutação original permitindo que se produzam óvulos que não requerem espermatozoides para iniciar o desenvolvimento. Sem a constante mistura genética, que é o carimbo oficial da reprodução sexual, somente uma mutação ocasional no DNA de um óvulo permitirá posteriores evoluções da espécie. A uniformidade genética de uma espécie clonada será desastrosa se uma doença atingir a população e nenhum de seus membros tiver genes que permitam que a espécie sobreviva.

Como citado, a desvantagem da reprodução por clonagem é a baixa diversidade genética onde apenas mutações ocasionais levam até novas evoluções. Porém, no algoritmo genético, as mutações ocorrem com frequência elevada levando à otimização do problema.

O capítulo seguinte irá apresentar rapidamente as implementações computacionais referentes aos procedimentos apresentados neste capítulo e que foram usados na obtenção dos dados.

7 IMPLEMENTAÇÃO DAS FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

7.1 Considerações iniciais

Este capítulo apresenta as ferramentas computacionais desenvolvidas em Visual Basic 6 e que foram usadas na obtenção dos dados de entrada (peças e arranjos físicos) e resultados (roteamento).

Devido às variações entre as configurações do Windows® nas versões em português e inglês todos os programas realizam um teste quando iniciam sua execução. Esse teste verifica qual caractere está definido com símbolo decimal. Caso o caractere 'ponto decimal' esteja definido a execução segue normalmente, caso contrário uma mensagem de erro é apresentada solicitando que a configuração seja alterada por meio das *Opções regionais e de idioma* do *Painel de controle* (Figura 7.1).

Figura 7.1 - Configuração do símbolo decimal

7.2 Gerador de peças

Na Figura 7.2 está a janela principal do programa gerador de peças configurado para criar 30 conjuntos de 150 peças para arranjos com 15 tipos de processos. Cada peça terá entre 3 e 10 operações e cada operação terá duração entre 10 e 100 minutos. Do lado direito escolhe-se o diretório onde os dados serão gravados, os nomes das peças e dos diretórios.

Figura 7.2 - Janela inicial do programa

Do lado inferior esquerdo há três opções de seleção de processo que serão discutidas posteriormente. No caso da Figura 7.2 as características do arranjo físico foram escolhidas a partir dos dados de um arquivo DPA (Dados Para Arranjo) que será detalhado no item 7.3 (Gerador de Arranjos Físicos).

Usando o botão *Gerar* inicia-se o processamento. O programa cria um diretório para cada conjunto de peças acrescentando dois algarismos (iniciando em 01) ao nome base que foi fornecido pelo usuário. Dentro de cada diretório são gravados os arquivos das peças usando o nome base escolhido acrescido de algarismos seqüenciais.

O nome padrão sugerido para os arquivos das peças é P, podendo ser escolhido qualquer outro. Apesar do programa também permitir que o usuário escolha qualquer outro nome para os diretórios é importante manter o padrão

sugerido (Pecas_) de modo a manter compatibilidade com o programa de roteamento.

Ao final do processamento uma janela de informação é apresentada (Figura 7.3). O exemplo descrito gerou as 4.500 peças (30x150) consumindo dois minutos e meio de processamento em um Athlon XP 2600+ de 2.08 GHz e 1 Gb de RAM.

Figura 7.3 - Informação ao término do processo

Acionar o botão OK da janela de informação faz com que ela seja removida e, na janela principal, todos os botões voltam a ficar disponíveis.

A Figura 7.4 permite observar alguns arquivos do primeiro conjunto de peças gerado (diretório Pecas_01). Além dos arquivos de peças (P001.PEC até P150.PEC) nota-se outros 5 arquivos: Grafico 1.BMP, Grafico 2.BMP, Grafico 3.BMP, Graficos.GCP e Dados.RTF. Esses arquivos trazem informações detalhadas sobre as peças geradas para o conjunto e serão descritos em seguida.

Figura 7.4 - Alguns arquivos de um conjunto de peças

O botão *Gráficos* da tela principal mostra uma janela que permite visualizar três gráficos com informações de cada conjunto de peças (Figura 7.5). Na parte superior do lado direito seleciona-se o diretório base e ao centro o conjunto de peças. Na parte inferior direita seleciona-se um dos três tipos de gráfico de barras.

Figura 7.5 - Número de operações de cada peça

Abaixo do gráfico são mostradas as informações selecionadas pelo usuário no momento de gerar o conjunto de peças (número de processos do arranjo físico, número mínimo e máximo de operações das peças, tempo mínimo e máximo das operações, número de peças geradas e se foi baseado em um arquivo DPA). O primeiro gráfico apresenta o número de operações de cada peça do conjunto selecionado. As linhas vermelhas indicam os números mínimo e máximo de operações selecionadas pelo usuário.

O segundo gráfico (Figura 7.6) permite avaliar a distribuição das peças com relação ao número de operações, ou seja, mostra quantas peças foram criadas para cada quantidade de operações entre o mínimo e o máximo.

Figura 7.6 - Número de peças geradas para cada número de operações

O terceiro gráfico (Figura 7.7) mostra quantas vezes cada processo disponível no arranjo físico foi usado para compor as peças.

Figura 7.7 - Número de vezes que cada processo foi atribuído

Esses três gráficos estão armazenados no arquivo Gráficos.GCP, que é um arquivo de texto puro (ASCII). Os gráficos também são gravados em formato BMP para oferecer a possibilidade de visualização rápida com os próprios recursos do sistema operacional.

O botão *Dados* apresenta uma tela onde é possível observar informações sobre as peças geradas em qualquer dos conjuntos de peças (Figura 7.8).

Figura 7.8 - Dados das peças do conjunto gerado

A primeira peça gerada tem 7 operações (como pode ser comprovado pelo gráfico da Figura 7.5). O modelo de estrutura (*template*) selecionado foi o quinto. Em seguida é apresentada uma tabela com as relações de precedência do modelo e, ao seu lado, a conversão selecionada aleatoriamente pelo algoritmo. Neste caso tem-se que para a operação A foi selecionado o processo 11, para a B o processo 15 e assim por diante. O processo final com o tempo de cada operação é mostrado em outra tabela logo em seguida.

Esses dados estão gravados no arquivo Dados.RTF (*Rich Text File*), compatível com o editor de texto Word® e similares. O uso de um arquivo RTF deve-se ao fato de serem necessárias duas fontes tipográficas para mostrar corretamente os dados (Arial e MS LineDraw). Sendo assim o uso de arquivo de texto puro (ASCII) não foi possível.

O botão *Visualizar* leva até a janela mostrada pela Figura 7.9. Aqui é possível conferir graficamente o resultado obtido para cada peça, juntamente com o tempo de cada operação. Os controles da parte inferior direita permitem alterar a visualização (tamanho e posição).

Figura 7.9 - Visualização gráfica da peça P001

O Quadro 7.1 mostra o conteúdo do arquivo 'P001.PEC' que está sendo visualizado graficamente na Figura 7.9. A linha 1 traz a data e hora em que o arquivo foi criado enquanto a linha 2 informa qual modelo de estrutura de precedência foi escolhido (template). A linha 4, como informa a linha anterior, traz o número de operações da peça. Da linha 6 até o final tem-se as operações, seus predecessores e seus tempos.

As linhas 1, 2, 3 e 5 auxiliam a interpretação dos valores quando lidas em um editor de textos e são descartadas no processo de simulação.

Quadro 7.1 - Exemplo de um arquivo de peça

```
=> Gerado automaticamente em 31/07/2006 às 08:34:07.
=> Baseado no modelo 5
=> Número de operações da peça
7
=> Operação - predecessores - duração
11, 0-, 48
15, 11-, 42
4, 11-, 50
6, 11-, 17
17, 15-4-, 14
14, 4-6-, 89
1, 17-14-, 87
Fim dos dados
```

7.2.1 Métodos de seleção de processo

O primeiro método de seleção é completamente aleatório e os resultados obtidos dessa forma mostram-se adequados às situações onde o número de máquinas de cada processo é igual. Como mostra a Figura 7.10 a atribuição de cada processo oscila em torno de uma média.

Figura 7.10 - Número de atribuições de cada processo

Porém, em arranjos físicos com diferentes números de máquinas para cada processo, espera-se que os processos com menor número de máquinas sejam menos utilizados pelas peças do que os processos com maior quantidade de máquinas. Isso levou ao desenvolvimento de duas outras formas de seleção de processos, como se vê na parte inferior esquerda da Figura 7.2 (Seleção de processo baseada em arranjo 1 e 2).

Estas opções lêem um arquivo que contém as informações do arranjo, como mostra a Figura 7.11. Os dados desse arranjo foram obtidos do trabalho de Montreuil e Vankatadri (1991). Como mostra a figura há 15 tipos de processos sendo que alguns possuem apenas 1 máquina enquanto outros possuem até 7 máquinas.

O procedimento usado para selecionar os processos com diferentes probabilidades foi baseado no *Método da Roleta*, usado em algoritmos

genéticos. Esse método faz com que os indivíduos mais adaptados tenham maior probabilidade de serem selecionados enquanto os menos adaptados tenham menor probabilidade. É como se cada indivíduo possuísse uma fatia de uma circunferência que é proporcional ao seu índice de aptidão. Na adaptação realizada os processos com maior número de máquinas têm maior probabilidade de serem selecionados do que os processos com menos máquinas.

The screenshot shows a window titled "Informações do arquivo" with the following fields and data:

- Nome do arquivo:** Montreuil e Venkatadri (1991) (5x8) 1.dpa
- Identificação dos dados:** Montreuil e Vankatadri (1991) - p.297
- Número de linhas:** 5
- Número de colunas:** 8
- Número de máquinas:** 40
- Número de processos:** 15
- Detalhes:**

Processo	1 =>	1 máquina
Processo	2 =>	1 máquina
Processo	3 =>	1 máquina
Processo	4 =>	1 máquina
Processo	5 =>	1 máquina
Processo	6 =>	2 máquinas
Processo	7 =>	2 máquinas
Processo	8 =>	2 máquinas
Processo	9 =>	2 máquinas
Processo	10 =>	2 máquinas
Processo	11 =>	3 máquinas
Processo	12 =>	4 máquinas
Processo	13 =>	5 máquinas
Processo	14 =>	6 máquinas
Processo	15 =>	7 máquinas

Figura 7.11 - Informações de um arranjo físico

A Figura 7.12 mostra o gráfico referente a um conjunto de 100 peças gerado com as mesmas configurações do primeiro exemplo, ou seja: 15 tipos de processo, peças entre 3 e 10 operações, tempo entre 10 e 100 minutos. Nota-se que, diferente do que ocorreu no caso da Figura 7.10, o número de operações que fazem uso de processos com menos máquinas é bem menor que os processos com maior número de máquinas.

Essa forma de gerar os dados fez com que o conjunto de peças obtido fosse mais próximo da realidade de uma instalação de manufatura, ou seja, os processos pouco usuais participam menos das etapas de fabricação das peças. Porém, os sorteios baseados na roleta ainda usavam os processos com poucas máquinas em muitas peças. Esse fato levou ao desenvolvimento da *seleção de processo baseada em arranjo 2*.

Figura 7.12 - Número de vezes que cada processo foi atribuído

Essa nova forma de geração dos conjuntos de peças leva em consideração a proporção entre o número de máquinas de cada processo, analisando o resultado após a roleta. Caso o processo sorteado já esteja maior ou igual à proporção de máquinas um novo sorteio ocorre.

Na Figura 7.13 as barras indicam quantas vezes cada processo foi usado em um conjunto de 150 peças enquanto a linha mostra a exata proporção entre o número de máquinas de cada processo. Nota-se que devido à aleatoriedade do procedimento de escolha dos processos a proporção não é exatamente atingida, mas fica muito mais próxima da meta desejada.

Figura 7.13 - Número de vezes que cada processo foi atribuído (método 2)

7.2.2 Comentários sobre o gerador de peças

A adoção de arquivos de texto puro para armazenar os modelos de estruturas de precedência fez com que fosse possível alterar facilmente as relações de precedência previamente definidas. A remoção de estruturas existentes ou a inclusão de novas também ocorre de maneira igualmente simples.

Foram criadas estruturas de precedência para peças que tenham de 3 até 15 operações²⁶. Para aumentar essa faixa é necessário apenas criar novos arquivos com relações de precedência. É importante não deixar faltar nenhum arquivo entre o mínimo e máximo, pois caso isso ocorra o programa informará que esse arquivo não foi encontrado e o procedimento será encerrado prematuramente.

A seleção de processo baseada na quantidade de máquinas disponíveis no arranjo físico, inspirado no método da roleta usado em algoritmos genéticos, permite obter uma solução mais próxima da realidade quando o número de máquinas dos departamentos é desigual, ou seja, as peças geradas fazem menos uso dos processos com menor número de máquinas. A seleção de processo 2, que realiza uma análise após a roleta, é mais fiel à proporção das máquinas.

Não há nenhum impedimento no uso da seleção de processo 2 para a geração de peças quando os departamentos têm o mesmo número de máquinas, porém perde-se a aleatoriedade que é um componente que torna o procedimento mais próximo da realidade.

Também é importante destacar que a seleção de processo 2 não consegue manter a proporção correta quando o número mínimo e máximo de operações se aproxima do número de processos do arranjo físico. Pode-se, como exemplo, imaginar uma situação extrema para o caso mostrado pela Figura 7.11. Se o número mínimo de operações for configurado em 15 então todas as peças terão operações em todos os processos tornando impossível obedecer à proporção.

²⁶ As estruturas de precedência criadas são apresentadas em detalhes no Apêndice F.

7.3 Gerador de arranjos físicos

O programa gerador de arranjos físicos foi desenvolvido para gerar automaticamente os quatro tipos de leiautes discutidos: funcional, parcialmente distribuído, aleatoriamente distribuído e maximamente distribuído. Foi implementada também a opção de construção manual do arranjo físico. A geração automática pode ocorrer para apenas um arranjo físico ou para múltiplos, com exceção do arranjo físico maximamente distribuído, cujo algoritmo sempre gera a mesma disposição para cada conjunto de dados (não há influência de elementos aleatórios).

7.3.1 Dados de entrada

Os dados de entrada são divididos em dois tipos: dados para criação de arranjo físico e arranjo físico já criado. No caso dos dados para criar arranjos físicos há dois modos de entrada: digitando os dados ou escolhendo um arquivo previamente salvo (como na Figura 7.11).

Para digitar os dados o usuário usa a tela mostrada na Figura 7.14. Na parte superior são informados os dados gerais do arranjo físico e na parte inferior são digitados os dados de cada processo. Ao final do procedimento os dados são salvos em um arquivo DPA (Dados Para Arranjo).

Figura 7.14 - Entrada de dados

O arquivo de arranjo físico tem extensão ARR e além das informações do arquivo DPA tem também a disposição das máquinas

7.3.2 Gerando arranjos físicos

A Figura 7.15 mostra o menu com as opções de geração de arranjos físicos. Nota-se que enquanto um arranjo físico não é gerado várias opções do menu principal ficam desabilitadas.

Figura 7.15 - Menu com opções de arranjo físico

Na geração manual o arranjo físico é mostrado inicialmente como uma matriz de elementos com fundo em preto. Clicando na posição desejada com o botão esquerdo no mouse surge uma pequena janela onde é possível escolher a máquina desejada para aquela posição, como mostra a Figura 7.16.

Figura 7.16 - Criação manual de arranjo físico

Um arranjo físico criado pode ser salvo em arquivo em disco usando a opção *Salvar arranjo* do menu principal. O arquivo terá extensão ARR.

Para a criação de arranjo físico funcional o usuário é questionado sobre o número de faixas a ser usado na curva de preenchimento espacial de Peano (Figura 7.17). É possível mostrar a rota definida pela curva de preenchimento selecionando a opção *Traçar rota* da janela.

Figura 7.17 - Seleção do número de faixas

Na Figura 7.18 há um exemplo de arranjo físico funcional gerado com duas faixas e com a rota traçada.

Figura 7.18 - Exemplo de arranjo físico funcional gerado

Após o arranjo físico ser gerado uma janela informativa apresenta o tempo consumido na criação da distribuição, o tempo consumido no cálculo do grau de distribuição e o valor do grau de distribuição obtido (Figura 7.19).

Figura 7.19 - Informações sobre a geração do arranjo

Para criar o arranjo físico parcialmente distribuído, além do número de faixas, é necessário informar o número de departamentos que cada processo terá (Figura 7.20).

Figura 7.20 - Informando o divisor de departamentos

A Figura 7.21 mostra um exemplo de arranjo físico parcialmente distribuído gerado com duas faixas e dividindo os processos em dois departamentos (esse arranjo físico foi utilizado como exemplo no item 6.4.2).

Figura 7.21 - Exemplo de arranjo físico parcialmente distribuído

A criação de arranjo físico aleatoriamente distribuído também usa a curva de preenchimento espacial e, devido a isso, o usuário é questionado sobre o número de faixas. Ao final do processo é apresentada uma janela com informações sobre o tempo gasto na geração do arranjo e no cálculo do grau de distribuição, bem como o valor do grau de distribuição obtido.

A Figura 7.22 mostra um exemplo de arranjo físico aleatoriamente distribuído obtido.

Figura 7.22 - Exemplo de arranjo físico aleatoriamente distribuído

O procedimento que gera arranjos físicos maximamente distribuídos não usa a curva de preenchimento espacial (não requer o número de faixas). A Figura 7.23 mostra um arranjo físico maximamente distribuído formado com os dados da Figura 7.11 (15 processos com o número de máquinas por processo variando entre 1 e 7).

Figura 7.23 - Exemplo de arranjo físico maximamente distribuído

A geração de múltiplos arranjos físicos é similar para os três tipos disponíveis. Apresenta-se uma janela para configurar o número de faixas e, no caso do arranjo parcialmente distribuído, o número de divisões (Figura 7.24). Também se define o nome base dos arquivos que serão gerados (que serão diferenciados por uma numeração seqüencial), o diretório onde deverão ser salvos os arquivos e o número de arranjos físicos a serem criados.

Figura 7.24 - Janela de criação de múltiplos arranjos físicos

Usando o botão OK inicia-se o processo de criação dos arranjos físicos. Uma janela surge após todos os arranjos físicos serem gerados e usando o botão OK dessa janela o sistema apresenta um gráfico de barras com o grau de distribuição de cada arranjo físico gerado (Figura 7.25).

Figura 7.25 - Grau de distribuição na geração de múltiplos arranjos

7.3.3 Analisando arranjos físicos gerados

Para auxiliar a análise dos arranjos físicos foi implementado um modo de visualização com destaque. Esse modo destaca um tipo de processo por vez, como mostram as imagens da Figura 7.26 que fazem referencia ao arranjo físico maximamente distribuído da Figura 7.23.

Figura 7.26 - Posição das máquinas de acordo com o processo

7.3.4 Maximizando a distribuição de arranjos físicos

Para maximizar a distribuição das máquinas de um arranjo físico pré-definido foi implementado um algoritmo genético que está acessível no menu principal na opção *Maximizar Distribuição*. A Figura 7.27 mostra sua janela.

Figura 7.27 - Evolução do grau de distribuição

É possível configurar o número de elementos da população (de 10 à 100), a probabilidade de mutação 1 (de 0.75 à 1.00), probabilidade de mutação 2 (de 0 à 0.20), probabilidade de mutação 3 (de 0 à 0.20) e o número de gerações (de 50 até 10.000).

O gráfico que mostra a evolução do grau de distribuição é atualizado constantemente durante a execução do algoritmo genético, bem como as informações no lado superior direito da janela (tempo decorrido, tempo previsto, geração atual, grau de distribuição atingido e melhoria percentual obtida). O gráfico pode ser configurado mesmo durante a execução do programa. As configurações disponíveis são mostradas pela Figura 7.28.

Figura 7.28 - Configurações do gráfico do algoritmo genético

Nem sempre a execução do algoritmo genético leva a um resultado ótimo. Normalmente é necessário executar o processo seguidamente até que o melhor resultado seja obtido algumas vezes. Não é recomendado usar o resultado de uma maximização como semente do processo seguinte pois, caso seja um mínimo local, será muito difícil melhorar o resultado. Quando não houver melhoria considera-se que o máximo foi atingido.

Dependendo da dimensão do arranjo físico, do número de elementos da população e do número de gerações o processo estende-se por muitas horas. Foi implementada uma rotina que salva os dados cada vez que uma melhoria é obtida para impedir que algum problema, como falta de energia, levasse à perda de todo o processamento. São gravados dois arquivos no diretório em que o programa está sendo executado: AG_Temp.ARR e AG_Temp.GAG. O primeiro arquivo contém o arranjo físico obtido até aquele momento e o segundo traz dados para que o gráfico do algoritmo genético possa ser apresentado em menu Arquivo – Visualizar Gráfico AG (Figura 7.29).

Figura 7.29 - Visualização do gráfico de algoritmo genético

O arquivo GAG é um arquivo de texto puro como mostra o exemplo do Quadro 7.2. A primeira linha identifica o tipo de arquivo e as linhas que iniciam com “=>” são comentários. A última linha, que deve ser obrigatoriamente “Fim dos dados.”, é comparada no final do procedimento de leitura. Se essa expressão for realmente a última linha do arquivo significa que todos os dados foram lidos com sucesso, caso contrário é apresentada uma mensagem de erro. A primeira parte do arquivo traz a configuração do algoritmo genético, em seguida vêm os dados do gráfico e a parte final é referente à configuração visual do gráfico.

Quadro 7.2 - Arquivo GAG (Gráfico de Algoritmo Genético)

```
Arquivo GAR - Gráfico do Algoritmo Genético
=> Descrição
Gerado em 07/08/2006 às 09:19:58
=> Elementos da população
100
=> Probabilidade de Mutação 1
1
=> Probabilidade de Mutação 2
0.2
=> Probabilidade de Mutação 3
0.2
=> Número de gerações
2000
=> Grau de distribuição
6.944444
=> Melhoria percentual
8.020603
=> Tempo de processamento
00h 10m 54.79s
=> Dados
7.55
7.55
.
.
.
6.944444
6.944444
=> Configurações do gráfico
=> Y inicia no Zero
0
=> Grid horizontal principal
1
=> Grid vertical
1
=> Grid horizontal secundário
1
=> Espessura da linha
30
=> Cor da linha
1
=> Valor mínimo
6.9
=> Valor máximo
7.6
Fim dos dados.
```

7.3.5 Comentários sobre o gerador de arranjos

Os procedimentos implementados para a geração dos arranjos físicos mostraram-se adequados às necessidades da pesquisa. Todos os arranjos físicos são criados rapidamente da forma esperada.

O maior problema encontrado é o tempo gasto no cálculo do grau de distribuição. Para arranjos físicos pequenos e médios o tempo de processamento não chega a ser problema, mas em arranjos físicos grandes passa a ser um gargalo, chegando até a impossibilitar seu uso no algoritmo genético.

Tomando como exemplo o arranjo físico apresentado por Montreuil et al. (1993) contendo 1296 máquinas (36 linhas por 36 colunas) a geração do arranjo maximamente distribuído ocorreu em apenas 0.16 segundos enquanto o cálculo do grau de distribuição levou 1 minuto e 59 segundos (Figura 7.30).

Figura 7.30 - Dados para arranjo com 1296 máquinas

Para esse arranjo físico o algoritmo genético levaria cerca de 84 dias para ser concluído com as configurações da Figura 7.31. Esse fato torna a relação custo/benefício do algoritmo ALVO ainda mais interessante, pois obtém uma boa solução com um custo computacional desprezível.

Figura 7.31 - Tempo estimado para maximizar arranjo com 1296 máquinas

Os arquivos manipulados pelo programa são em texto puro (DPA e ARR). Um exemplo de arquivo de dados para arranjo (DPA) é mostrado pelo Quadro 7.3.

Quadro 7.3 - Arquivo DPA (Dados Para Arranjo)

```
Arquivo DPA - Dados para Arranjo
=> A linha seguinte descreve o arquivo
Lahmar e Benjaafar (2002b - p.16) (6x6)
=> Número de linhas do arranjo
6
=> Número de colunas do arranjo
6
=> Número de processos (tipos de máquinas)
8
=> Identificador e quantidade de máquinas
1, 5
2, 5
3, 4
4, 7
5, 3
6, 4
7, 4
8, 4
Fim dos dados
```

A primeira linha identifica o tipo de arquivo. Seu conteúdo é comparado durante a leitura e se for diferente do que mostra o Quadro 7.3 a operação é interrompida. Todas as linhas que iniciam com “=>” são ignoradas, pois são apenas comentários. Após cada comentário há um conteúdo que será usado. O primeiro conteúdo é uma cadeia de caracteres que serve de identificação dos dados. Todas as demais informações são numéricas.

A última linha deve ser obrigatoriamente “Fim dos dados” pois essa expressão é comparada no final do procedimento de leitura. Se essa expressão for realmente a última linha do arquivo significa que todos os dados foram lidos com sucesso, caso contrário é apresentada uma mensagem de erro.

O arquivo que contém o arranjo físico pronto (ARR) possui uma forma similar e também faz uso de várias linhas com comentários (iniciadas por “=>”), como mostra o Quadro 7.4. A primeira linha também é um identificador que serve para confirmar o tipo de arquivo que está sendo aberto. Em uma linha há a informação do tipo de arranjo físico e como foi gerado (neste caso trata-se de um arranjo físico funcional criado com duas faixas). O valor do grau de distribuição também faz parte do arquivo.

Quadro 7.4 - Arquivo ARR (ARRanjo)

```

Arquivo ARR - Arranjo
=> A linha seguinte contém informação sobre os dados
Lahmar e Benjaafar (2002b - p.16) (6x6)
=> Número de linhas do arranjo
6
=> Número de colunas do arranjo
6
=> Número de processos (tipos de máquinas)
8
=> A linha seguinte descreve a forma de geração do arranjo
Funcional - 2 faixas
=> A linha contém o grau de distribuição
20.44405
=> Máquinas
4.05
4.04
8.03
8.02
2.02
2.01
4.06
4.03
8.04
8.01
2.03
1.05
4.07
4.02
4.01
2.05
2.04
1.04
7.01
5.02
5.03
3.01
3.02
1.03
7.02
5.01
6.01
6.04
3.03
1.02
7.03
7.04
6.02
6.03
3.04
1.01
Fim dos dados

```

Os dados das máquinas são lidos seqüencialmente e preenchem o arranjo físico da linha superior para a inferior e da esquerda para direita. O arranjo físico desse arquivo está na Figura 7.32.

Figura 7.32 - Arranjo físico dos dados do Quadro 7.4

Observando a Figura 7.32 nota-se que a descrição do arquivo (terceira linha) é colocada na barra de título da janela. O grau de distribuição, o tipo de arranjo físico e a forma como foi criado ficam na barra posicionada na aresta inferior da janela.

7.4 Roteamento

Este programa executa o roteamento de diversos conjuntos de peças em grupos de arranjos físicos, tanto no modo rígido (apenas uma seqüência de fabricação para cada peça) quanto no modo flexível (analisando todas as seqüências permitidas pelas relações de precedência).

Sua utilização resume-se em selecionar o diretório contendo os arranjos físicos e as peças e, em seguida, definir se o roteamento será com ou sem flexibilidade. Ao final do processo são apresentados os valores estatísticos obtidos. Além disso, junto aos arquivos de dados de entrada, são gravados uma série de arquivos com informações relativas ao roteamento de cada conjunto de peças em cada arranjo físico.

No menu principal há apenas 3 opções ativas quando o programa é acionado: selecionar diretório de arranjos, visualizar e fim. Somente após a seleção do diretório que contém os arranjos físicos (e as peças) é que a opção executar é disponibilizada. Todas essas quatro opções serão detalhadas nos próximos itens.

7.4.1 Selecionando os arranjos físicos

Acionando a opção Selecionar diretório de arranjos no menu faz com que a tela mostrada pela Figura 7.33 seja apresentada. No lado direito superior seleciona-se a unidade (ou partição) e, logo abaixo, escolhe-se o diretório. Caso o diretório possua arquivos de arranjos físicos (extensão ARR) estes são listados no lado inferior direito.

Figura 7.33 - Seleção de arranjos físicos

O primeiro arquivo é automaticamente aberto para visualização e seus dados são apresentados na parte inferior da tela. Basta escolher um novo arquivo e a visualização é imediatamente atualizada.

Na parte superior esquerda da janela há três botões. Os dois primeiros permitem maximizar a visualização gráfica (+) e retornar ao modo normal (-). O terceiro botão (■) aciona o modo de visualização com destaque, como mostra a Figura 7.34. Para desativar esse modo basta usar o mesmo terceiro botão que não mais estará mostrando o símbolo ■.

Mesmo durante a visualização com destaque é possível selecionar outro arranjo físico ou outro diretório. Além disso, esse modo de visualização também pode ser maximizado.

Figura 7.34 - Modo de visualização com destaque

No lado inferior direito há três botões. O primeiro, denominado *Salva o Gráfico* armazena a imagem do arranjo físico em um arquivo BMP com o mesmo nome do arquivo ARR e no mesmo diretório. O botão *Fecha*, como o próprio nome diz, fecha a janela sem selecionar o diretório. O botão *OK* seleciona o diretório em visualização e executa algumas verificações.

A primeira verificação analisa todos os arquivos de arranjos físicos do diretório para certificar que possuam as mesmas características básicas: número de linhas, número de colunas, número de processos e número de

máquinas por processo. Em outras palavras, apenas a disposição das máquinas é que diferencia os arranjos físicos de um grupo. Uma mensagem informará se alguma dessas características for diferente em algum arranjo físico e solicitará que o usuário corrija o problema, como mostra o exemplo da Figura 7.35.

Figura 7.35 - Exemplo de falha em um arranjo físico

Caso todos os arranjos físicos do diretório possuam as mesmas características básicas o programa irá verificar a existência de diretórios contendo os conjuntos de peças. Cada conjunto de peças deve estar em um diretório dentro do diretório de arranjos físicos e ser nomeado como "Pecas_XX", onde XX indica o número do conjunto e inicia-se com o valor 01. Caso não exista nenhum conjunto de peças no diretório de arranjos físicos selecionados surgirá a janela mostrada pela Figura 7.36.

Figura 7.36 - Falta de conjunto de peças

Caso haja diretórios com nomes padronizados corretamente o programa apresenta a janela da Figura 7.37, onde é informado o número de diretórios de peças encontrados e permite iniciar sua verificação.

Figura 7.37 - Preparação para verificar peças

Duas condições podem ocorrer em um ou mais diretórios e impedir a continuação do processo:

- Diretório não contém arquivos de peças (extensão PEC).
- Diretórios possuem diferentes números de peças.

Em seguida cada arquivo de peça é analisado para determinar qual o maior processo em uso e, caso seja maior que o número de processos dos arranjos físicos uma mensagem é apresentada (Figura 7.38).

Figura 7.38 - Peça incompatível com o arranjo

Caso o conjunto de peças não use todos os processos dos arranjos físicos o programa apresenta uma mensagem informativa sugerindo que os dados sejam revistos. Essa mensagem não impede que as peças sejam roteadas nos arranjos físicos.

Após a verificação ser concluída sem problemas uma mensagem informa que todos os diretórios foram verificados com sucesso. A opção *Executar* ficam disponível no menu principal.

7.4.2 Iniciando a simulação

A opção *Executar* do menu principal apresenta duas possibilidades: rígido e flexível. Independente do modo escolhido o programa irá apresentar uma tela que permite selecionar três tipos de arquivos de dados que podem ser gerados durante a simulação, como mostra a Figura 7.39. Esses arquivos foram definidos como opcionais pois são úteis apenas em pequenos casos com poucas máquinas e peças, permitindo acompanhar as tomadas de decisão do programa e avaliar sua funcionalidade. A quantidade de dados gerada é extremamente grande quando a simulação ocorre em arranjos físicos com

muitas máquinas e as peças possuem diversas operações com várias seqüências de produção. Isto faz com que, na prática, sua análise seja quase impossível.

Figura 7.39 - Seleção de arquivos de dados

Supondo que todos os arquivos de dados sejam selecionados o programa irá gerar 4 arquivos para cada conjunto de peças roteado em cada arranjo físico em cada modo de roteamento. Por exemplo, supondo que F01.ARR seja o nome de um arquivo de arranjo físico funcional, os seguintes arquivos seriam criados no modo de roteamento rígido para o primeiro conjunto de peças:

F01_R (Cj 01).SCH

F01_R_Resumo (Cj 01).TXT

F01_R_Alocacao (Cj 01).TXT

F01_R_Detalhado (Cj 01).TXT

O nome do arquivo de arranjo físico é usado para identificar cada um dos quatro arquivos a ele relacionados. A letra R é adicionada para informar que o modo de roteamento rígido foi utilizado enquanto que no modo flexível é usada a letra F. Entre parênteses, na parte final do nome de cada arquivo, há a indicação de qual conjunto de peças foi usado na obtenção dos dados.

O arquivo SCH não aparece na tela de seleção de arquivos de dados pois sempre é gerado. Contém os dados do roteamento de cada peça em cada máquina, permitindo a construção do gráfico de Gantt. Apesar de sua extensão trata-se também de um arquivo de texto puro. Devido à maior complexidade deste arquivo sua estrutura está detalhada no Apêndice K.

O Quadro 7.5 mostra as informações contidas no arquivo de resumo denominado F01_R_Resumo (Cj 10).txt.

Quadro 7.5 - Estrutura do arquivo Resumo

```
Gerado em 22/06/2006 às 09:15:53

Arranjo: 1 de 50
         F01.ARR
         Montreuil et al. (1991) - p.297
         Funcional - 2 faixas - Automático.
         GdD= 54.06063

Roteamento sem flexibilidade de seqüência.

Número de peças roteadas: 150

Diretório das peças: D:\1- Funcional\Pecas_01

Makespan Total= 2144

Distância total percorrida: 3243

Tempo de processamento do arranjo= 00h 00m 01.03s
Tempo de processamento geral= 00h 08m 34.06s
```

O Quadro 7.6 mostra parte do arquivo F05_F_Alocacao (Cj 01).txt com informações de apenas 2 das 150 peças (a primeira e a última). O arquivo traz em seu início duas informações básicas: data e hora no qual foi gerado. Em seguida apresenta dados sobre o arquivo de arranjo físico usado e o modo de roteamento (com ou sem flexibilidade). O número de peças roteadas e o diretório onde se encontram estão descritos na seqüência. Após estes dados o arquivo descreve como cada operação de cada peça foi alocada nas máquinas do arranjo físico.

Para cada peça tem-se: nome, seqüência de fabricação selecionada, número total de seqüências, distância total percorrida e o detalhamento das operações (máquina, instante de início, duração da operação e instante de término). O makespan de cada peça é indicado pelo instante de encerramento da última operação.

No final do arquivo informa-se o tempo total consumido pelo conjunto de peças (makespan) bem como a distância total percorrida.

No exemplo do Quadro 7.6 é possível notar que a última peça a ser roteada não é necessariamente aquela que será executada por último pelas máquinas. A peça 150 é encerrada no instante 1599 (final de sua operação 5) enquanto que todo o conjunto é encerrado no instante 2437 (makespan total).

Quadro 7.6 - Estrutura do arquivo Alocação

```

Gerado em 22/06/2006 às 09:46:52

Arranjo: 5 de 50
F05.ARR
Montreuil et al. (1991) - p.297
Funcional - 2 faixas - Automático.
GdD= 49.20064

Roteamento com flexibilidade de seqüência.
Número de peças roteadas: 150
Diretório das peças: D:\Desequilibrado\Médio\Funcional\Pecas_01

=====
Peça: P001.PEC
  Melhor seqüência= 1/12
  Distância percorrida= 13
    Op1 na máquina 11.01 (Início= 0 Duraçã0= 62 Final= 62)
    Op2 na máquina 8.01 (Início= 62 Duraçã0= 92 Final= 154)
    Op3 na máquina 9.01 (Início= 154 Duraçã0= 27 Final= 181)
    Op4 na máquina 14.03 (Início= 181 Duraçã0= 36 Final= 217)
    Op5 na máquina 13.05 (Início= 217 Duraçã0= 14 Final= 231)
    Op6 na máquina 6.01 (Início= 231 Duraçã0= 27 Final= 258)

=====
.
.
.

=====
Peça: P150.PEC
  Melhor seqüência= 11/24
  Distância percorrida= 14
    Op1 na máquina 15.07 (Início= 77 Duraçã0= 16 Final= 93)
    Op2 na máquina 12.03 (Início= 905 Duraçã0= 77 Final= 982)
    Op3 na máquina 3.01 (Início= 998 Duraçã0= 20 Final= 1018)
    Op4 na máquina 11.01 (Início= 1331 Duraçã0= 81 Final= 1412)
    Op5 na máquina 14.05 (Início= 1530 Duraçã0= 69 Final= 1599)

=====

=====
== Makespan Total= 2437 ==
== Distância total percorrida= 2854 ==
== Tempo de processamento= 00h 00m 17.88s ==
=====

```

O arquivo detalhado, como o próprio nome informa, traz informações detalhadas sobre o processo de roteamento de cada peça, além das informações do arquivo Resumo. No caso do roteamento rígido há a análise apenas da primeira seqüência enquanto que no roteamento flexível são mostradas todas as seqüências até chegar àquela com melhores resultados. O Quadro 7.7 mostra parte do arquivo F05_R_Detalhado (Cj 01).txt (apenas dados da primeira peça). Nota-se que as informações finais são diferentes do Quadro 7.6 pois neste caso o modo de roteamento foi rígido.

Quadro 7.7 - Estrutura do arquivo Detalhado

```

Gerado em 22/06/2006 às 18:09:46

Arranjo: 5 de 50
F05.ARR
Montreuil et al. (1991) - p.297
Funcional - 2 faixas - Automático.
GdD= 49.20064

Roteamento sem flexibilidade de seqüência.

Número de peças roteadas: 150

Diretório das peças: D:\Desequilibrado\Médio\Funcional\Pecas_01

=====
Peça: P001.PEC
Número de Operações: 6
Seq 1=> 11-8-9-14-13-6-
  Etapa 1
    Rota 1=> 11.01 8.01 -> (Término= 154 Distância= 1)
    Rota 2=> 11.01 8.02 -> (Término= 154 Distância= 2)
    Rota 3=> 11.02 8.01 -> (Término= 154 Distância= 2)
    Rota 4=> 11.02 8.02 -> (Término= 154 Distância= 3)
    Rota 5=> 11.03 8.01 -> (Término= 154 Distância= 3)
    Rota 6=> 11.03 8.02 -> (Término= 154 Distância= 4)
  Etapa 2
    Rota 1=> 8.01 9.01 -> (Término= 181 Distância= 6)
    Rota 2=> 8.01 9.02 -> (Término= 181 Distância= 7)
  Etapa 3
    Rota 1=> 9.01 14.01 -> (Término= 217 Distância= 9)
    Rota 2=> 9.01 14.02 -> (Término= 217 Distância= 8)
    Rota 3=> 9.01 14.03 -> (Término= 217 Distância= 7)
    Rota 4=> 9.01 14.04 -> (Término= 217 Distância= 8)
    Rota 5=> 9.01 14.05 -> (Término= 217 Distância= 9)
    Rota 6=> 9.01 14.06 -> (Término= 217 Distância= 10)
  Etapa 4
    Rota 1=> 14.03 13.01 -> (Término= 231 Distância= 11)
    Rota 2=> 14.03 13.02 -> (Término= 231 Distância= 12)
    Rota 3=> 14.03 13.03 -> (Término= 231 Distância= 11)
    Rota 4=> 14.03 13.04 -> (Término= 231 Distância= 10)
    Rota 5=> 14.03 13.05 -> (Término= 231 Distância= 9)
  Etapa 5
    Rota 1=> 13.05 6.01 -> (Término= 258 Distância= 13)
    Rota 2=> 13.05 6.02 -> (Término= 258 Distância= 14)
Melhor Seqüência= 1 (11-8-9-14-13-6-)
Término = 258
Distância percorrida= 13
Processo: 11.01-> 8.01-> 9.01-> 14.03-> 13.05-> 6.01
Alocação
  Op1 na máquina 11.01 (Início= 0 Duração= 62 Final= 62)
  Op2 na máquina 8.01 (Início= 62 Duração= 92 Final= 154)
  Op3 na máquina 9.01 (Início= 154 Duração= 27 Final= 181)
  Op4 na máquina 14.03 (Início= 181 Duração= 36 Final= 217)
  Op5 na máquina 13.05 (Início= 217 Duração= 14 Final= 231)
  Op6 na máquina 6.01 (Início= 231 Duração= 27 Final= 258)

.
.
.
=====
== MakeSpan Total= 2550 ==
== Distância total percorrida= 3377 ==
== Tempo de processamento= 00h 00m 00.86s ==
=====

```

Além desses quatro arquivos que são gerados para cada arranjo físico, dos quais três são opcionais, é criado um arquivo relacionado a cada conjunto de peças. Esse arquivo é denominado R_Graficos_xx.GRA ou F_Graficos_xx.GRA dependendo do modo de roteamento escolhido. O xx indica o número do conjunto de peças usado. O Quadro 7.8 mostra parte do arquivo R_Graficos_01.GRA. Para cada grupo de dados (makespan, distância total e grau de distribuição) a um valor proveniente de cada arranjo físico.

Quadro 7.8 - Estrutura do arquivo de Gráficos

```
-- Dados para Gráficos --
=> Descrição
Gerado em 24/06/2006 às 09:08:52
=> Tipo de roteamento
Roteamento sem flexibilidade de sequência.
=> Número de arranjos físicos
50
=> Diretório dos arranjos físicos
D:\1- Funcional
=> Número de peças
150
=> Diretório das peças
F:\1- Funcional\Pecas_30
=> Tempo de processamento
00h 00m 53.84s
=> MakeSpans
2530
.
.
.
2578
=> Mínimo
2474
=> Arranjo com o mínimo
36
=> Máximo
2649
=> Arranjo com o máximo
15
=> Amplitude
175
=> Média
2554.7
=> Desvio Padrão
42.9562
=> Distâncias
3374
.
.
.
3457
=> Graus de Distribuição
54.06063
.
.
.
Fim dos Dados.
```

Como mostrou o Quadro 7.8 esse arquivo, que também é de texto puro, armazena dados que permitem construir dois gráficos de barras relacionados com o conjunto de peças: makespan e distância total percorrida pelas peças do conjunto em cada arranjo físico. Também são armazenados os graus de distribuição dos leiautes. Para cada grupo de dados são armazenados os seguintes valores: mínimo, máximo, amplitude, média e desvio padrão.

Quando a simulação é completada grava-se o último arquivo de dados que contém os valores médios de makespan e a distância total percorrida por cada conjunto de peças com relação a todos os arranjos físicos analisados. Este novo arquivo é denominado R_Gráficos_Gerais.GRA (no caso do modo de roteamento flexível a letra R é substituída pela F). Como mostra o Quadro 7.9 sua estrutura é similar ao arquivo Gráficos, bem como sua finalidade.

Quadro 7.9 - Estrutura do arquivo Gráficos_Gerais

```
-- Dados para Gráficos Gerais --
=> Descrição
Gerado em 24/06/2006 às 09:15:58
=> Tipo de roteamento
Roteamento sem flexibilidade de seqüência.
=> Numero de arranjos físicos
    50
=> Diretório dos arranjos físicos
D:\1- Funcional
=> Número de peças
    150
=> Número de diretórios de peças
    30
=> Tempo de processamento
00h 08m 00.20s
=> MakeSpans
    2554.7
    2376.2
    2553.64
    2307.46
    2741.26
.
.
.
=> Distâncias
    3586.96
.
.
.
=> Graus de Distribuição
    54.06063
.
.
.
Fim dos Dados.
```

O número total de arquivos que podem ser gerados durante o procedimento pode ser calculado pela eq.(7.1).

$$NAG = (NAF * NCP * 4) + NCP + 1 \quad (7.1)$$

Onde: NAG: Número de Arquivos Gerados

NAF: Número de Arranjos Físicos

NCP: Número de Conjuntos de Peças

Como esse número pode ser elevado é importante garantir que haja espaço livre suficiente no disco rígido. Por exemplo, o roteamento de 10 conjuntos de peças em 50 arranjos físicos gerou os arquivos apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Espaço ocupado pelos arquivos

Modo	Arquivo	Tamanho	Ocupa	Quantidade	Total
Rígido	SCH	50.7 KB	64 KB	500	31.2 MB
	Resumo	493 bytes	32 KB	500	15.6 MB
	Alocação	86.7 KB	96 KB	500	46.8 MB
	Detalhado	579 KB	608 KB	500	282 MB
	Gráficos	2.3 KB	32 KB	10	320 KB
	Gráficos_Gerais	1.74 KB	32 KB	1	32 KB
Flexível	SCH	51.4 KB	64 KB	500	31.2 MB
	Resumo	493 bytes	32 KB	500	15.6 MB
	Alocação	86.8 KB	96 KB	500	46.8 MB
	Detalhado	13.9 MB	13.9 MB	500	6.64 GB
	Gráficos	2.3 KB	32 KB	10	320 KB
	Gráficos_Gerais	1.74 KB	32 KB	1	32 KB
				4022	7.1 GB

A coluna *Tamanho* apresenta o valor médio real dos arquivos enquanto a coluna *Ocupa* mostra o espaço ocupado. Essa diferença entre os valores deve-se à dimensão do cluster²⁷ definido durante a formatação do disco rígido. No caso da Tabela 7.1 cada cluster tem 32 KB pois trata-se de uma unidade de 120 GB formatada em FAT32.

²⁷ Cluster é a menor unidade de alocação de arquivos de uma unidade de disco. Cada cluster só pode conter um arquivo e, dessa forma, um arquivo de 1 byte ocupa todo um cluster. Quando um arquivo ocupa vários clusters apenas o último poderá apresentar esse desperdício.

7.4.3 Simulando

Após a seleção do modo de roteamento inicia-se o processo de simulação e é exibida uma tela que mostra a evolução de cada componente do processo de roteamento. Também é mostrada uma estimativa do tempo total que será consumido no processo, o tempo de processamento e o tempo restante. A Figura 7.40 mostra essa tela para o roteamento flexível de 30 conjuntos de 150 peças em 50 arranjos físicos funcionais.

Figura 7.40 - Evolução do processamento

A primeira barra de progresso mostra graficamente a evolução dos conjuntos de peças, a segunda indica o arranjo físico em uso, a terceira relaciona-se com as peças do conjunto que está sendo roteado e a quarta mostra a seqüência de fabricação que está sendo analisada. Todas essas indicações são mostradas em detalhes em forma textual.

No caso do roteamento rígido a quarta barra de progresso não é apresentada pois somente a primeira seqüência de cada peça é analisada.

O botão *Cancela* permite interromper o processamento. Não é possível continuar um processamento interrompido, ou seja, é necessário recomençar desde o início.

Ao final da simulação o programa apresenta um gráfico de barras com os valores médios de makespan obtido por cada conjunto de peças nos arranjos físicos (Figura 7.41).

Figura 7.41 - Gráfico de barras do makespan médio

Do lado direito do gráfico de barras estão os seguintes valores: média em relação a todos os conjuntos de peças, mínimo, máximo, amplitude, desvio padrão, conjunto que obteve o mínimo e conjunto que obteve o máximo.

Na parte inferior da tela pode-se escolher o gráfico a ser mostrado e há também a opção *Destaca diferenças* que muda a origem do gráfico para um valor próximo do mínimo, como mostra a Figura 7.42.

Figura 7.42 - Gráfico com as diferenças destacadas

7.4.4 Visualizando os dados da simulação

No menu principal do programa está a opção *Visualizar* que apresenta 9 possibilidades: Diretórios de Peças, Dados de Peças, Gráficos de Conjuntos de Peças, Gráficos de Graus de Distribuição, Arranjos Físicos, Gráficos de Algoritmo Genético, Gráficos e Estatísticas, Gráficos de Gantt e Comparar Roteamentos.

As três primeiras opções usam janelas iguais às do gerador de peças (Figura 7.9, Figura 7.8 e Figura 7.5 respectivamente). Os gráficos de graus de distribuição são exibidos pela tela apresentada pela Figura 7.43, onde observa-se que também são apresentadas algumas estatísticas referentes ao conjunto de dados.

Figura 7.43 - Visualizando graus de distribuição (arquivos GDD)

Na parte inferior direita da tela há comandos para salvar o gráfico como um arquivo BMP, copiar o gráfico para a área de transferência e fechar a tela e retornar para a janela principal. Também há a opção de apresentar o gráfico destacando as diferenças. O gráfico copiado para a área de transferência fica disponível em dois formatos. Usando a opção *colar* tem-se os valores (útil para

transferir os dados para uma planilha) e usando a opção *colar especial* há a alternativa *Figura* que traz o gráfico propriamente dito.

A visualização de Arranjos Físicos abre uma janela igual à usada na seleção de diretório de arranjos físicos (Figura 7.33) enquanto os Gráficos de Algoritmo Genético são visualizados pela janela apresentada pela Figura 7.29.

A tela de visualização de Gráficos e Estatísticas é similar aquela apresentada ao final da simulação, mas permite escolher qual arquivo GRA mostrar usando as opções do lado direito da tela (Figura 7.44). É possível visualizar os gráficos com os valores obtidos por cada conjunto de peça em cada arranjo físico ou o gráfico com a média dos conjuntos de peças (Gráficos_Gerais).

Figura 7.44 - Visualizando arquivos GRA (gráfico de barras)

Além da seleção do gráfico a ser mostrado e da opção *Destaca diferenças* o usuário pode salvar o gráfico em um arquivo BMP ou copiá-lo para a área de transferência.

A opção *Dados* na barra inferior da tela mostra os dados na forma de texto ao invés de gráfico, inclusive com as estatísticas (Figura 7.45).

Figura 7.45 - Visualizando arquivos GRA (dados)

A Figura 7.46 mostra a forma de visualização dos Gráficos de Gantt. Do lado direito escolhe-se o arquivo que será visualizado. Algumas informações sobre as operações são mostradas acima do gráfico quando o ponteiro do mouse percorre a tela: nome da peça, máquina na qual a operação está roteada, instante de início, instante de término e duração.

Abaixo do gráfico há um conjunto de comandos que permitem configurar a forma de exibição. Seleciona-se a opção e move-se a barra deslizante do lado direito para alterar seu valor. Na Figura 7.47 é mostrado um detalhe do gráfico obtido com o uso do Zoom.

A seguir há uma breve descrição da função de cada opção de configuração do gráfico:

Zoom: altera a escala de todos os elementos simultaneamente.

Tempo: altera a escala de tempo (eixo X).

Espaço: altera o espaçamento entre as barras horizontais.

Altura: altera a altura das barras horizontais.

Tempos: altera o tamanho da fonte que mostra o tempo.

Figura 7.46 - Visualização de arquivos SCH (Gráfico de Gantt)

Figura 7.47 - Detalhe do Gráfico de Gantt

Nomes: altera o tamanho da fonte dos nomes das máquinas.

Tarefas: altera o tamanho da fonte dos nomes das tarefas.

A opção *Linhas* mostra ou não as linhas verticais que ligam os inícios e finais das operações ao eixo horizontal. A opção *Dados* apresenta informações sobre o gráfico: data e hora de geração, nome do arquivo de arranjo físico, modo de roteamento, número de peças roteadas, diretório dos arquivos de peças, makespan, distância total percorrida e tempo de processamento.

O botão *Zoom All* ajusta todos os parâmetros de modo que todo o gráfico seja visualizado e o botão *Salva gráfico* cria um arquivo BMP com o gráfico no diretório onde o arquivo está localizado.

No centro dos comandos de configuração há uma janela de seleção com os nomes de todas as peças roteadas. Selecionando as peças o gráfico destaca suas operações e apresenta apenas os tempos relacionados a elas, como mostra a Figura 7.48.

Figura 7.48 - Visualização destacada da peça P001

A opção *Comparar Roteamentos* (último item do menu Visualizar) permite escolher dois arquivos SCH de um mesmo diretório simultaneamente. Como mostra a Figura 7.49 há quatro gráficos que podem ser escolhidos do

lado direito da tela. O arquivo que for selecionado pelo quadro Arquivo 1 será representado em azul enquanto o Arquivo 2 será representado em vermelho.

Figura 7.49 - Comparando arquivos SCH

O gráfico da Figura 7.49 compara os roteamentos rígido (vermelho) e flexível (azul) do conjunto de peças 1 no arranjo físico F01. Este gráfico mostra a distância acumulada, ou seja, para cada peça (eixo horizontal) tem-se a soma da distância percorrida pela peça com as distâncias percorridas pelas peças anteriores. Na parte inferior da tela há os valores finais e o cálculo da diferença percentual entre eles.

O segundo gráfico (Figura 7.50) plota a distância individual percorrida por cada peça. Nota-se, neste exemplo, que a grande maioria das peças em vermelho (roteamento rígido) percorre distâncias maiores que das peças em azul. São essas pequenas diferenças em cada peça, obtidas pelo roteamento flexível, que permitem atingir a diferença final mostrada pela Figura 7.49.

Figura 7.50 - Distâncias individuais

A Figura 7.51 mostra a comparação do instante de finalização de cada peça (makespan individual).

Figura 7.51 - Makespan individual

O último gráfico apresenta a diferença entre os gráficos da Figura 7.51, ou seja, a diferença de tempo de conclusão de cada peça nos dois arquivos.

Figura 7.52 - Diferença entre tempos

7.4.5 Comentários sobre o roteador

Os procedimentos executados durante o roteamento envolvem diversos cálculos e decisões, tornando esse o mais complexo programa desenvolvido durante a elaboração deste trabalho.

Todos os erros de programação foram resolvidos usando exemplos simples e analisando os arquivos com o detalhamento do roteamento (arquivos SCH, alocação e detalhado). Cada arquivo de teste foi elaborado de maneira a forçar determinadas condições para verificar se as decisões tomadas seriam condizentes. Essa forma de trabalho foi realizada até que todas as decisões, isoladamente e em conjunto, levassem a resultados corretos e o programa fosse considerado funcional e confiável.

A adoção de arquivos de texto puro mostrou-se plenamente satisfatória para os propósitos do trabalho pois são de manipulação simples e podem ser analisados em qualquer editor de texto. A opção por colocar muitos comentários nos arquivos se deve ao fato de simplificar sua análise apesar de consumir um pouco mais de espaço.

7.5 Considerações finais

Este capítulo apresentou as três ferramentas computacionais que foram desenvolvidas para a realização desta pesquisa: gerador de peças, gerador de arranjos físicos e roteador. Os dois primeiros são responsáveis pela geração dos dados de entrada da simulação enquanto o último foi o responsável pela simulação propriamente dita. Nota-se que a modelagem do problema considerou várias simplificações: não se discute a complexidade das peças, o tempo de setup está incluído no tempo das operações, não se define o volume de produção de cada peça etc. Futuros refinamentos do modelo podem incluir gradativamente essas variáveis para torná-lo mais próximo da realidade.

Outro ponto de destaque é a validação do modelo de simulação. Diversos testes, com níveis de complexidade crescente e com resultados previamente conhecidos, foram executados durante a fase de desenvolvimento do programa. Sempre que algum problema era detectado e corrigido toda a bateria de testes era reiniciada.

Na implementação do programa de simulação foram colocados alguns testes que detectariam condições absurdas e inconsistentes. Caso alguma condição desse tipo fosse encontrada o procedimento de simulação seria interrompido e uma mensagem de erro apresentaria a situação encontrada, ajudando a rastrear a origem da falha.

Somente após todos os testes terem sido executados com sucesso o programa foi considerado apto a manipular os dados referentes ao trabalho.

O capítulo seguinte apresenta os resultados obtidos nas simulações.

8 RESULTADOS OBTIDOS

8.1 Considerações iniciais

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com três tamanhos de arranjos físicos (20, 40 e 80 máquinas) em duas configurações (desequilibrado e equilibrado) e em dois roteamentos (rígido e flexível). Também mostra a influência da divisão dos departamentos em leiautes com 36 máquinas.

Para cada caso foram elaborados 30 conjuntos de 150 peças (onde a duração de cada operação foi aleatoriamente escolhida entre 10 e 100 unidades de tempo) e 152 arranjos físicos sendo: 50 funcionais, 50 parcialmente distribuídos (2 departamentos para cada processo), 50 aleatoriamente distribuídos e 2 maximamente distribuídos (um pelo algoritmo ALVO e outro pelo algoritmo genético). Cada conjunto de peças foi roteado em cada arranjo físico nos dois modos: rígido e flexível.

O microcomputador usado em todas as simulações possuía processador Athlon XP 2600+ operando em 2.08 GHz e com 1 Gb de memória RAM em plataforma Windows XP Professional.

A apresentação dos dados segue o seguinte padrão: número de máquinas de cada processo, graus de distribuição obtidos, representação dos arranjos físicos maximamente distribuídos, informações sobre os conjuntos de peças e quatro quadros com os resultados das simulações (os dois primeiros para o roteamento rígido e os dois últimos para o flexível).

Cada quadro mostra os valores médios obtidos pelo roteamento de cada conjunto de peça nos conjuntos de 50 arranjos físicos (com exceção dos arranjos físicos maximamente distribuídos, que são representados por apenas um elemento). No cabeçalho de cada quadro, junto ao tipo do arranjo físico, está o tempo consumido na simulação (no formato hh:mm:ss).

8.2 Arranjos físicos desequilibrados pequenos

Estes arranjos físicos possuem 4 linhas e 5 colunas e suas 20 máquinas estão divididas em 6 processos, como detalha a Tabela 8.1.

Tabela 8.1 - Número de máquinas por processo (AFDP)

Processo	1	2	3	4	5	6
Nº. de máquinas	2	2	3	3	5	5

A Tabela 8.2 mostra os valores médios para o grau de distribuição e a Figura 8.1 apresenta os dois arranjos físicos maximamente distribuídos.

Tabela 8.2 - Grau de distribuição dos AFDP

	Arranjo Físico				
	Funcional	Parcialmente Distribuído	Aleatoriamente Distribuído	Maximamente Distribuído (ALVO)	Maximamente Distribuído (AG)
Média	12.1032	10.1378	9.3770	7.7333	6.9444
Mínimo	10.9222	8.7389	8.3222	-	-
Máximo	13.4889	11.8889	11.0889	-	-
Amplitude	2.5667	3.1500	2.7667	-	-
Desvio Padrão	0.6406	0.6465	0.6130	-	-

5.02	6.01	2.01	3.01	5.04
6.02	1.01	4.03	1.02	4.02
6.04	3.03	5.01	3.02	6.05
5.03	6.03	2.02	4.01	5.05

Algoritmo ALVO

5.03	4.01	6.03	6.05	5.05
3.03	2.01	5.02	1.01	3.02
6.04	1.02	3.01	2.02	4.02
5.01	4.03	6.02	5.04	6.01

Algoritmo genético

Figura 8.1 - AFDP maximamente distribuídos

8.2.1 Peças

As peças possuem de 3 a 6 operações cujos processos foram selecionados aleatoriamente entre os 6 disponíveis no arranjo físico.

Como mostram os gráficos da Figura 8.2 levou-se em consideração a proporção do número de máquinas dos processos. A proporção não foi exatamente atingida em função do número máximo de operações das peças ser igual ao número de operações do arranjo físico. Os demais conjuntos de peças apresentaram comportamentos similares.

Figura 8.2 - Ocorrência de cada processo (conjuntos de peça 1 e 20)

8.2.2 Resultados

Para o roteamento rígido os dados estão no Quadro 8.1 (makespan), e no Quadro 8.2 (distâncias percorridas) e para o roteamento flexível os dados estão no Quadro 8.3 (makespan) e Quadro 8.4 (distâncias).

Quadro 8.1 - Tempos no roteamento rígido (AFDP)

		Funcional (00:11:31.03)	Parcialmente (00:13:53.13)	Aleatoriamente (00:15:08.40)	ALVO (00:00:15.10)	AG (00:00:14.88)
Conjuntos de peças	1	2719.28	2725.34	2718.20	2730	2683
	2	2680.94	2680.26	2681.46	2674	2706
	3	2651.06	2663.58	2659.70	2657	2644
	4	2933.16	2926.80	2930.78	2949	2851
	5	2764.20	2764.32	2763.74	2768	2755
	6	2739.50	2741.62	2743.10	2741	2751
	7	2420.60	2411.76	2414.36	2429	2381
	8	2622.98	2621.94	2622.64	2641	2679
	9	2807.24	2806.26	2803.44	2803	2811
	10	3005.90	3006.06	3008.56	3021	2996
	11	2735.92	2730.74	2730.90	2728	2732
	12	2440.86	2447.38	2437.82	2408	2426
	13	2894.92	2898.98	2889.24	2995	2887
	14	2771.92	2794.78	2789.88	2698	2876
	15	2619.06	2616.20	2616.72	2599	2631
	16	2433.24	2442.96	2435.70	2477	2433
	17	2699.26	2699.42	2700.34	2713	2716
	18	2770.36	2770.84	2770.74	2756	2768
	19	2752.74	2756.42	2768.36	2773	2772
	20	2649.04	2647.14	2647.14	2653	2658
	21	3055.36	3049.40	3039.72	3076	3071
	22	2396.26	2388.36	2393.76	2349	2372
	23	2834.44	2844.58	2842.02	2870	2832
	24	2760.72	2762.86	2768.86	2739	2754
	25	2508.90	2506.06	2502.38	2527	2509
	26	2728.68	2728.02	2728.76	2730	2725
	27	2732.88	2731.60	2733.02	2706	2748
	28	2521.36	2514.34	2517.52	2533	2507
	29	2718.60	2706.36	2705.50	2712	2707
	30	2797.42	2796.52	2797.08	2814	2800
Méd		2705.56	2706.03	2705.38	2708.97	2706.03
Min		2396.26	2388.36	2393.76	2349	2372
Max		3055.36	3049.40	3039.72	3076	3071
Amp		659.10	661.04	645.96	727	699
DP		163.10	163.73	163.45	173.27	167.65

Quadro 8.2 - Distâncias no roteamento rígido (AFDP)

		Funcional (00:11:31.03)	Parcialmente (00:13:53.13)	Aleatoriamente (00:15:08.40)	ALVO (00:00:15.10)	AG (00:00:14.88)
Conjuntos de peças	1	1526.94	1369.16	1263.50	1149	1078
	2	1516.62	1350.02	1245.86	1137	1016
	3	1545.18	1385.12	1291.60	1162	1071
	4	1472.22	1315.44	1211.72	1050	972
	5	1490.72	1336.34	1235.30	1156	1077
	6	1504.18	1339.38	1231.56	1120	1015
	7	1415.70	1271.94	1177.38	1132	1013
	8	1487.28	1335.34	1234.60	1117	1040
	9	1517.90	1357.20	1252.06	1140	1039
	10	1527.84	1371.90	1265.08	1188	1085
	11	1506.94	1348.12	1251.38	1144	1050
	12	1500.42	1343.64	1250.64	1152	1059
	13	1498.52	1340.72	1235.26	1144	1009
	14	1523.02	1349.96	1251.18	1129	1003
	15	1497.64	1335.94	1241.80	1137	1030
	16	1453.08	1306.20	1206.66	1124	989
	17	1507.80	1346.74	1250.38	1088	1034
	18	1506.80	1340.80	1239.92	1149	1035
	19	1506.02	1340.26	1242.34	1115	1006
	20	1468.94	1306.46	1203.38	1074	981
	21	1544.10	1387.66	1282.26	1165	1094
	22	1461.52	1297.78	1206.12	1078	986
	23	1437.98	1286.42	1183.48	1104	1008
	24	1452.76	1302.00	1193.16	1097	971
	25	1445.28	1288.80	1195.02	1078	987
	26	1509.24	1344.32	1241.18	1094	1041
	27	1484.38	1324.26	1232.90	1147	997
	28	1442.46	1293.24	1194.52	1090	1005
	29	1504.14	1349.52	1253.14	1160	1027
	30	1495.26	1332.38	1233.06	1098	987
	Méd	1491.70	1333.24	1233.22	1123.93	1023.50
	Min	1415.70	1271.94	1177.38	1050	971
	Max	1545.18	1387.66	1291.60	1188	1094
	Amp	129.48	115.72	114.22	138	123
	DP	32.32	28.95	28.23	32.75	34.67

Quadro 8.3 - Tempos no roteamento flexível (AFDP)

		Funcional (01:49:29.93)	Parcialmente (01:50:51.22)	Aleatoriamente (01:14:38.22)	ALVO (00:02:15.71)	AG (00:02:00.92)
Conjuntos de peças	1	2626.34	2628.38	2634.52	2642	2624
	2	2639.70	2633.64	2638.36	2612	2581
	3	2589.96	2593.16	2567.06	2590	2541
	4	2835.04	2840.14	2830.16	2848	2848
	5	2697.48	2701.40	2699.40	2735	2679
	6	2586.94	2588.64	2585.24	2568	2584
	7	2294.34	2299.88	2300.42	2297	2300
	8	2541.28	2543.72	2536.94	2537	2543
	9	2690.20	2694.18	2694.80	2711	2688
	10	2792.22	2794.66	2791.68	2808	2771
	11	2555.54	2548.76	2553.42	2553	2536
	12	2366.04	2365.32	2368.40	2406	2379
	13	2744.84	2739.74	2746.80	2773	2776
	14	2699.60	2697.56	2698.02	2709	2690
	15	2519.04	2517.66	2517.68	2450	2508
	16	2300.62	2298.54	2300.82	2275	2269
	17	2662.28	2665.68	2663.34	2667	2671
	18	2705.28	2707.84	2708.46	2699	2716
	19	2580.38	2579.70	2588.08	2567	2599
	20	2516.20	2514.50	2515.02	2508	2520
	21	2802.90	2783.98	2782.74	2747	2751
	22	2299.48	2299.56	2303.72	2335	2271
	23	2746.82	2732.96	2741.86	2717	2772
	24	2585.88	2589.52	2587.16	2600	2565
	25	2370.80	2370.36	2375.72	2354	2422
	26	2643.90	2644.26	2645.14	2639	2644
	27	2558.40	2561.20	2561.34	2572	2542
	28	2433.40	2428.78	2435.94	2435	2430
	29	2646.70	2648.12	2644.44	2630	2663
	30	2706.12	2711.84	2707.78	2715	2712
	Méd	2591.26	2590.79	2590.82	2589.97	2586.50
	Min	2294.34	2298.54	2300.42	2275	2269
	Max	2835.04	2840.14	2830.16	2848	2848
	Amp	540.70	541.60	529.74	573	579
	DP	151.29	150.61	149.24	152.50	152.72

Quadro 8.4 - Distâncias no roteamento flexível (AFDP)

		Funcional (01:49:29.93)	Parcialmente (01:50:51.22)	Aleatoriamente (01:14:38.22)	ALVO (00:02:15.71)	AG (00:02:00.92)
Conjuntos de peças	1	1405.86	1288.08	1177.48	1060	961
	2	1401.64	1273.26	1175.56	1061	974
	3	1438.24	1317.14	1218.70	1077	1035
	4	1339.00	1218.54	1123.36	970	919
	5	1333.52	1207.00	1104.20	1010	910
	6	1349.66	1228.56	1123.06	1014	945
	7	1313.80	1191.82	1100.34	961	911
	8	1354.74	1230.98	1136.68	1010	932
	9	1372.04	1251.24	1145.60	995	912
	10	1353.92	1225.78	1126.86	962	933
	11	1394.62	1275.98	1171.86	1080	975
	12	1375.84	1253.06	1155.60	1023	942
	13	1359.30	1242.56	1134.32	1006	962
	14	1386.22	1265.38	1162.70	1021	939
	15	1343.24	1217.94	1125.54	981	954
	16	1351.08	1232.24	1129.02	1013	942
	17	1379.02	1263.22	1160.18	1051	1006
	18	1326.20	1202.16	1102.82	977	912
	19	1366.92	1247.24	1140.46	1040	941
	20	1327.92	1210.48	1111.50	1000	896
	21	1373.10	1244.66	1137.60	1014	936
	22	1307.48	1188.68	1090.82	981	918
	23	1316.38	1205.36	1094.44	1031	903
	24	1321.00	1204.40	1103.06	967	947
	25	1349.66	1231.50	1134.32	1036	908
	26	1348.32	1222.54	1123.78	980	913
	27	1350.84	1232.48	1133.44	1033	939
	28	1319.96	1201.14	1099.00	1009	906
	29	1371.44	1242.90	1145.10	1008	958
	30	1344.32	1226.84	1130.80	1005	972
	Méd	1355.84	1234.77	1133.94	1012.53	940.03
	Min	1307.48	1188.68	1090.82	961	896
	Max	1438.24	1317.14	1218.70	1080	1035
	Amp	130.76	128.46	127.88	119	139
	DP	30.38	29.81	28.84	32.72	31.56

8.3 Arranjos físicos desequilibrados médios

Estes arranjos físicos possuem a forma apresentada por Montreuil e Venkatadri (1991, p.296), com 40 máquinas (5x8) divididas em 15 processos. A Tabela 8.3 detalha o número de máquinas por processo.

Tabela 8.3 - Número de máquinas por processo (AFDM)

Processo	1 a 5	6 a 10	11	12	13	14	15
Nº. de máquinas	1	2	3	4	5	6	7

A Tabela 8.4 mostra os valores médios para o grau de distribuição e a Figura 8.3 apresenta os dois arranjos físicos maximamente distribuídos.

Tabela 8.4 - Grau de distribuição dos AFDM

	Arranjo Físico				
	Funcional	Parcialmente Distribuído	Aleatoriamente Distribuído	Maximamente Distribuído (ALVO)	Maximamente Distribuído (AG)
Média	53.6678	47.4310	44.5915	33.4414	31.4306
Mínimo	45.9932	41.8868	40.0992	-	-
Máximo	60.4933	53.4194	49.8878	-	-
Amplitude	14.5002	11.5325	9.7886	-	-
Desvio Padrão	3.2322	2.7359	2.2203	-	-

14.01	13.02	15.03	11.01	14.03	15.07	13.04	14.05
15.01	9.01	12.01	4.01	7.01	15.05	8.02	12.03
10.01	6.01	3.01	1.01	2.01	13.01	6.02	10.02
12.02	8.01	11.03	5.01	7.02	12.04	9.02	11.02
14.02	13.03	15.02	14.04	15.04	15.06	13.05	14.06

Algoritmo ALVO

15.01	15.03	12.01	14.01	13.02	15.05	14.04	15.07
14.06	9.01	10.01	11.01	7.01	8.02	12.03	14.05
13.04	6.01	5.01	1.01	2.01	9.02	10.02	13.01
12.02	7.02	8.01	3.01	4.01	6.02	11.02	15.04
14.03	11.03	15.02	13.03	12.04	14.02	13.05	15.06

Algoritmo genético

Figura 8.3 - AFDM maximamente distribuídos

8.3.1 Peças

As peças têm entre 3 e 10 operações cujos processos foram selecionados aleatoriamente entre os 15 disponíveis no arranjo físico. A proporção do número de máquinas de cada processo de dois dos conjuntos estão na Figura 8.4.

Figura 8.4 - Ocorrência de cada processo (conjuntos de peças 1 e 5)

8.3.2 Resultados

Para o roteamento rígido os dados estão no Quadro 8.5 (makespan) e no Quadro 8.6 (distâncias percorridas) e para o roteamento flexível os dados estão no Quadro 8.7 (makespan) e Quadro 8.8 (distâncias).

Quadro 8.5 - Tempos no roteamento rígido (AFDM)

		Funcional (00:19:33.00)	Parcialmente (00:19:16.32)	Aleatoriamente (00:18:45.39)	ALVO (00:00:23.02)	AG (00:00:22.72)
Conjuntos de peças	1	2554.70	2549.40	2542.62	2557	2578
	2	2376.20	2373.04	2363.38	2495	2349
	3	2553.64	2575.26	2564.84	2464	2503
	4	2307.46	2307.34	2318.12	2279	2351
	5	2741.26	2742.96	2742.56	2795	2685
	6	2750.62	2748.66	2741.86	2711	2684
	7	2616.10	2619.90	2617.66	2643	2572
	8	2277.42	2267.12	2276.76	2307	2330
	9	2391.66	2391.04	2388.30	2406	2406
	10	2169.66	2168.58	2179.22	2143	2204
	11	2355.48	2352.88	2356.54	2273	2310
	12	2408.74	2410.76	2407.18	2348	2405
	13	2356.90	2343.62	2359.58	2320	2316
	14	2423.96	2433.12	2420.28	2507	2472
	15	2351.80	2346.74	2342.36	2308	2364
	16	2759.58	2759.86	2754.36	2739	2767
	17	2272.12	2278.32	2279.88	2270	2304
	18	2229.92	2223.62	2209.92	2196	2231
	19	2581.58	2575.72	2574.94	2566	2618
	20	2167.96	2172.68	2163.20	2158	2227
	21	2481.30	2485.12	2481.48	2510	2496
	22	2337.46	2345.18	2343.92	2348	2296
	23	2329.34	2289.94	2311.72	2164	2338
	24	2624.72	2626.92	2623.56	2612	2646
	25	2507.20	2480.30	2495.02	2379	2628
	26	2363.46	2359.62	2345.34	2214	2417
	27	2428.94	2443.08	2427.74	2597	2307
	28	2316.82	2331.86	2306.62	2293	2436
	29	2388.90	2397.52	2396.96	2403	2268
	30	2418.80	2391.42	2412.98	2473	2255
Méd		2428.12	2426.39	2424.96	2415.93	2425.43
Min		2167.96	2168.58	2163.20	2143	2204
Max		2759.58	2759.86	2754.36	2795	2767
Amp		591.62	591.28	591.16	652	563
DP		160.01	161.48	159.94	180.24	157.50

Quadro 8.6 - Distancias no roteamento rígido (AFDM)

		Funcional (00:19:33.00)	Parcialmente (00:19:16.32)	Aleatoriamente (00:18:45.39)	ALVO (00:00:23.02)	AG (00:00:22.72)
Conjuntos de peças	1	3586.96	3270.04	3023.82	2602	2538
	2	3497.66	3214.58	2965.98	2572	2541
	3	3637.18	3340.16	3080.28	2637	2574
	4	3381.94	3094.96	2852.16	2507	2394
	5	3547.06	3271.56	3017.44	2602	2583
	6	3589.32	3294.58	3058.14	2803	2597
	7	3571.72	3256.46	3015.12	2544	2509
	8	3388.54	3105.32	2861.00	2516	2485
	9	3530.88	3246.74	2999.46	2515	2490
	10	3392.76	3102.18	2870.48	2546	2444
	11	3460.26	3164.94	2921.74	2527	2475
	12	3403.88	3132.58	2884.16	2442	2433
	13	3319.80	3060.08	2825.20	2582	2456
	14	3544.22	3256.40	2987.20	2576	2510
	15	3534.94	3236.26	2989.62	2512	2511
	16	3436.22	3152.82	2922.62	2530	2558
	17	3281.02	3013.88	2773.20	2424	2324
	18	3380.38	3071.26	2841.08	2443	2426
	19	3492.06	3210.14	2960.94	2597	2512
	20	3427.20	3125.26	2911.64	2513	2499
	21	3526.38	3228.00	2983.12	2600	2503
	22	3322.36	3060.68	2809.96	2444	2381
	23	3298.12	3016.96	2795.10	2361	2357
	24	3623.94	3311.18	3069.70	2634	2577
	25	3505.14	3184.90	2957.46	2509	2451
	26	3281.68	3005.72	2769.16	2391	2406
	27	3631.40	3335.48	3075.40	2640	2607
	28	3267.80	3004.50	2759.04	2385	2423
	29	3374.68	3089.04	2877.80	2564	2540
	30	3424.80	3147.70	2904.92	2604	2464
	Méd	3455.34	3166.81	2925.43	2537.40	2485.60
	Min	3267.80	3004.50	2759.04	2361	2324
	Max	3637.18	3340.16	3080.28	2803	2607
	Amp	369.38	335.66	321.24	442	283
	DP	112.57	102.61	96.79	92.03	72.58

Quadro 8.7 - Tempos no roteamento flexível (AFDM)

		Funcional (04:43:04.71)	Parcialmente (06:34:17.39)	Aleatoriamente (05:32:39.99)	ALVO (00:07:00.02)	AG (00:06:36.16)
Conjuntos de peças	1	2403.22	2421.08	2418.36	2436	2369
	2	2246.42	2233.62	2254.58	2284	2201
	3	2304.76	2325.98	2326.52	2296	2175
	4	2207.16	2208.24	2208.32	2234	2214
	5	2543.20	2540.48	2545.36	2562	2527
	6	2586.14	2584.80	2590.82	2533	2600
	7	2541.06	2534.30	2535.16	2536	2693
	8	2199.40	2195.26	2200.82	2203	2232
	9	2211.16	2213.58	2220.70	2254	2212
	10	2060.84	2057.50	2057.02	2072	2077
	11	2220.46	2232.08	2226.32	2202	2253
	12	2261.80	2270.14	2261.94	2214	2273
	13	2194.64	2199.98	2189.04	2244	2238
	14	2243.34	2236.92	2246.58	2296	2226
	15	2238.72	2243.48	2239.26	2190	2212
	16	2653.90	2666.92	2662.44	2655	2638
	17	2095.32	2086.46	2099.74	2089	2074
	18	2052.02	2055.46	2064.88	2018	2085
	19	2535.64	2525.34	2532.02	2546	2509
	20	2030.52	2018.92	2022.74	2031	1994
	21	2361.56	2355.52	2365.40	2352	2370
	22	2210.66	2222.50	2221.66	2203	2216
	23	2070.16	2055.48	2069.64	2042	1890
	24	2572.02	2567.96	2554.94	2530	2610
	25	2370.46	2383.16	2375.82	2339	2218
	26	2280.02	2250.26	2280.40	2311	2293
	27	2286.36	2269.98	2272.48	2363	2280
	28	2131.28	2128.00	2130.60	2103	2071
	29	2173.44	2166.36	2161.84	2171	2146
	30	2249.96	2261.22	2259.18	2237	2250
	Méd	2284.52	2283.70	2286.49	2284.87	2271.53
	Min	2030.52	2018.92	2022.74	2018	1890
	Max	2653.90	2666.92	2662.44	2655	2693
	Amp	623.38	648.00	639.70	637	803
	DP	172.52	174.56	172.50	173.22	194.95

Quadro 8.8 - Distâncias no roteamento flexível (AFDM)

		Funcional (04:43:04.71)	Parcialmente (06:34:17.39)	Aleatoriamente (05:32:39.99)	ALVO (00:07:00.02)	AG (00:06:36.16)
Conjuntos de peças	1	3141.04	2851.66	2660.68	2302	2121
	2	3053.12	2790.04	2560.22	2222	2087
	3	3210.46	2935.44	2716.76	2379	2321
	4	2962.36	2694.60	2483.90	2095	2138
	5	3072.54	2813.08	2595.76	2235	2169
	6	3103.70	2828.28	2617.74	2251	2218
	7	3091.72	2826.92	2606.82	2205	2214
	8	2962.96	2712.44	2511.96	2157	2078
	9	3058.34	2777.18	2575.58	2182	2090
	10	2955.28	2690.24	2507.76	2158	2108
	11	3025.32	2751.06	2553.80	2181	2111
	12	2973.78	2702.88	2498.24	2069	2033
	13	2916.40	2680.00	2474.86	2093	2112
	14	3085.72	2845.46	2601.66	2297	2233
	15	3080.52	2802.06	2601.16	2262	2107
	16	3019.12	2737.02	2542.04	2153	2142
	17	2866.88	2623.58	2426.64	2090	2001
	18	2939.06	2689.16	2491.46	2167	2115
	19	2995.42	2739.38	2530.54	2081	2111
	20	2986.38	2729.52	2530.16	2168	2152
	21	3046.98	2781.82	2567.04	2206	2137
	22	2926.16	2667.80	2466.60	2137	2187
	23	2899.24	2662.96	2451.78	2121	2099
	24	3136.52	2837.42	2611.10	2180	2136
	25	3075.92	2792.14	2596.94	2188	2164
	26	2874.82	2623.26	2421.08	2084	2153
	27	3151.90	2896.38	2672.18	2293	2301
	28	2867.02	2651.08	2432.70	2117	2095
	29	2951.50	2697.76	2507.44	2218	2127
	30	2996.24	2749.90	2544.04	2239	2163
	Méd	3014.21	2752.68	2545.29	2184.33	2140.77
	Min	2866.88	2623.26	2421.08	2069	2001
	Max	3210.46	2935.44	2716.76	2379	2321
	Amp	343.58	312.18	295.68	310	320
	DP	90.73	79.87	74.45	76.30	67.65

8.4 Arranjos físicos desequilibrados grandes

Estes arranjos físicos possuem 10 linhas e 8 colunas e suas 80 máquinas estão divididas em 20 processos como a Tabela 8.5 detalha.

Tabela 8.5 - Número de máquinas por processo (AFDG)

Processo	1 a 4	5 a 8	9 a 12	13 a 16	17 a 20
Nº. de máquinas	2	3	4	5	6

A Tabela 8.6 mostra os valores médios para o grau de distribuição e a Figura 8.5 apresenta os dois arranjos físicos maximamente distribuídos.

Tabela 8.6 - Grau de distribuição dos AFDG

	Arranjo Físico				
	Funcional	Parcialmente Distribuído	Aleatoriamente Distribuído	Maximamente Distribuído (ALVO)	Maximamente Distribuído (AG)
Média	93.7223	78.6605	65.6047	50.7775	46.8500
Mínimo	87.6992	72.7892	60.5342	-	-
Máximo	99.2158	84.7267	69.4908	-	-
Amplitude	11.5167	11.9375	8.9567	-	-
Desvio Padrão	2.8700	3.1549	2.0293	-	-

17.01	18.01	16.04	14.02	17.03	19.05	18.05	17.05
13.02	11.01	12.02	5.01	10.02	16.05	11.03	13.04
9.01	4.01	8.02	2.01	15.01	7.02	3.02	9.03
19.01	6.03	15.02	18.03	19.03	20.03	6.02	15.03
14.04	12.01	20.06	20.01	20.02	20.05	12.03	14.05
10.01	1.01	7.01	13.01	14.01	10.03	1.02	8.01
19.02	5.03	16.02	18.04	19.04	20.04	5.02	16.03
9.02	3.01	8.03	2.02	17.04	7.03	4.02	9.04
13.03	11.02	12.04	6.01	10.04	15.05	11.04	13.05
17.02	18.02	15.04	14.03	16.01	19.06	18.06	17.06

Algoritmo ALVO

18.05	19.01	20.06	15.01	16.05	17.03	18.01	19.05
13.02	14.02	11.04	12.02	7.02	10.02	13.04	20.01
17.01	9.01	3.02	2.01	5.01	6.03	9.03	14.05
16.04	10.01	8.02	1.02	4.01	19.03	15.03	17.05
20.05	6.02	15.02	18.03	14.01	12.01	11.01	16.03
19.02	12.03	7.01	13.01	20.02	10.03	8.01	18.02
11.03	5.02	16.02	17.04	3.01	9.04	7.03	19.06
14.04	9.02	4.02	2.02	1.01	6.01	5.03	13.03
18.06	15.04	8.03	10.04	12.04	11.02	15.05	20.04
17.02	20.03	13.05	19.04	18.04	16.01	14.03	17.06

Algoritmo genético

Figura 8.5 - AFDG maximamente distribuídos

8.4.1 Peças

As peças têm entre 3 e 10 operações cujos processos foram selecionados aleatoriamente entre os 20 disponíveis no arranjo físico. A proporção do número de máquinas de cada processo de dois dos conjuntos estão representados na Figura 8.6.

Figura 8.6 - Ocorrência de cada processo (conjuntos de peças 1 e 7)

8.4.2 Resultados

Para o roteamento rígido os dados estão no Quadro 8.9 (makespan) e no Quadro 8.10 (distâncias) enquanto que para o roteamento flexível, os dados estão no Quadro 8.11 (makespan) e Quadro 8.12 (distâncias).

Quadro 8.9 - Tempos no roteamento rígido (AFDG)

		Funcional (00:25:38.76)	Parcialmente (00:24:43.49)	Aleatoriamente (00:33:41.36)	ALVO (00:00:25.07)	AG (00:00:25.81)
Conjuntos de peças	1	1398.74	1399.42	1401.94	1467	1345
	2	1327.90	1326.20	1312.18	1341	1302
	3	1420.92	1415.04	1436.54	1370	1520
	4	1291.42	1297.26	1305.64	1263	1313
	5	1499.56	1473.64	1478.86	1463	1490
	6	1296.90	1309.96	1316.30	1349	1268
	7	1390.20	1395.94	1390.98	1393	1448
	8	1344.60	1362.64	1341.00	1367	1377
	9	1394.00	1388.04	1393.96	1396	1404
	10	1497.24	1492.72	1495.76	1402	1469
	11	1307.30	1323.00	1289.60	1269	1378
	12	1441.80	1444.18	1448.46	1395	1381
	13	1311.98	1305.56	1306.36	1299	1324
	14	1293.42	1314.92	1298.82	1306	1298
	15	1273.00	1284.38	1294.14	1269	1218
	16	1274.04	1269.90	1287.54	1272	1212
	17	1332.02	1333.40	1337.52	1301	1348
	18	1509.56	1502.40	1499.90	1529	1531
	19	1345.20	1339.14	1348.20	1327	1323
	20	1248.68	1252.08	1248.28	1218	1206
	21	1335.76	1342.12	1329.12	1300	1299
	22	1248.38	1246.44	1256.02	1266	1232
	23	1262.34	1263.00	1275.42	1313	1435
	24	1351.86	1355.36	1352.62	1300	1376
	25	1375.80	1368.44	1371.40	1384	1386
	26	1228.80	1238.32	1237.54	1295	1226
	27	1289.58	1292.98	1290.18	1333	1335
	28	1330.86	1338.90	1323.58	1404	1257
	29	1268.38	1267.66	1264.40	1411	1260
	30	1317.28	1321.58	1308.36	1337	1323
	Méd	1340.25	1342.15	1341.35	1344.63	1342.80
	Min	1228.80	1238.32	1237.54	1218	1206
	Max	1509.56	1502.40	1499.90	1529	1531
	Amp	280.76	264.08	262.36	311	325
	DP	75.87	71.45	72.67	70.34	90.86

Quadro 8.10 - Distancias no roteamento rígido (AFDG)

		Funcional (00:25:38.76)	Parcialmente (00:24:43.49)	Aleatoriamente (00:33:41.36)	ALVO (00:00:25.07)	AG (00:00:25.81)
Conjuntos de peças	1	4687.42	4217.76	3818.78	3323	3330
	2	4379.44	3932.78	3521.56	3217	2946
	3	4838.52	4350.24	3915.54	3638	3461
	4	4619.82	4142.78	3734.38	3376	3336
	5	4445.86	3966.26	3570.04	3190	3042
	6	4636.90	4150.26	3770.62	3397	3329
	7	4563.04	4091.02	3703.66	3361	3096
	8	4613.02	4144.94	3728.54	3250	3293
	9	4396.14	3943.68	3545.00	3188	3138
	10	4663.64	4185.26	3775.74	3452	3239
	11	4566.56	4119.22	3689.92	3334	3149
	12	4796.24	4318.66	3890.60	3639	3414
	13	4800.78	4330.90	3930.84	3421	3426
	14	4636.60	4170.80	3742.90	3277	3344
	15	4362.10	3908.10	3519.34	3148	2970
	16	4156.52	3743.50	3362.86	2955	2956
	17	4467.94	4018.50	3599.48	3295	3189
	18	5099.40	4627.92	4161.90	3701	3659
	19	4390.06	3947.12	3558.38	3248	3077
	20	4475.56	4055.12	3650.16	3322	3238
	21	4330.44	3903.68	3510.74	3151	3052
	22	4679.58	4219.72	3794.50	3358	3285
	23	4644.74	4184.08	3765.44	3381	3326
	24	4634.62	4142.00	3718.32	3317	3360
	25	4572.72	4102.98	3709.22	3259	3221
	26	4682.94	4224.20	3783.96	3513	3291
	27	4551.24	4110.86	3714.68	3319	3280
	28	4543.14	4088.12	3663.86	3263	3125
	29	4366.92	3922.30	3517.10	3247	3085
	30	4532.34	4070.24	3644.26	3290	3256
	Méd	4571.14	4111.10	3700.41	3327.67	3230.43
	Min	4156.52	3743.50	3362.86	2955	2946
	Max	5099.40	4627.92	4161.90	3701	3659
	Amp	942.88	884.42	799.04	746	713
	DP	183.47	170.98	158.06	154.18	163.41

Quadro 8.11 - Tempos no roteamento flexível (AFDG)

		Funcional (06:52:45.87)	Parcialmente (06:42:04.17)	Aleatoriamente (06:25:12.29)	ALVO (00:07:11.06)	AG (00:07:54.83)
Conjuntos de peças	1	1280.52	1262.66	1262.42	1215	1380
	2	1240.66	1238.30	1224.08	1213	1247
	3	1410.78	1403.50	1416.18	1457	1459
	4	1202.36	1198.84	1193.74	1143	1202
	5	1276.66	1285.70	1294.56	1149	1347
	6	1303.50	1301.12	1299.20	1324	1274
	7	1283.36	1283.04	1294.36	1238	1255
	8	1266.94	1252.98	1267.66	1281	1187
	9	1260.26	1258.44	1258.74	1294	1240
	10	1437.92	1434.22	1429.08	1394	1403
	11	1231.80	1231.72	1223.78	1221	1211
	12	1298.12	1303.80	1306.36	1286	1299
	13	1241.72	1246.36	1252.14	1249	1317
	14	1231.42	1237.98	1234.30	1275	1184
	15	1359.24	1366.82	1351.78	1358	1433
	16	1174.92	1178.12	1180.62	1160	1176
	17	1284.48	1288.24	1279.38	1222	1259
	18	1479.56	1474.56	1479.44	1454	1485
	19	1292.90	1292.28	1309.06	1308	1322
	20	1216.44	1214.98	1216.44	1233	1241
	21	1264.90	1273.72	1261.94	1295	1283
	22	1209.64	1209.54	1206.84	1219	1188
	23	1186.00	1193.14	1190.80	1215	1170
	24	1263.16	1273.74	1268.98	1223	1244
	25	1259.08	1237.36	1256.44	1211	1238
	26	1175.62	1174.24	1172.34	1124	1176
	27	1178.48	1187.14	1187.48	1191	1213
	28	1255.90	1252.54	1257.58	1223	1292
	29	1191.58	1216.74	1197.96	1292	1193
	30	1261.56	1246.94	1248.82	1169	1177
Méd		1267.32	1267.29	1267.42	1254.53	1269.83
Min		1174.92	1174.24	1172.34	1124	1170
Max		1479.56	1474.56	1479.44	1457	1485
Amp		304.64	300.32	307.10	333	315
DP		73.918	72.06	73.66	82.88	88.98

Quadro 8.12 - Distâncias no roteamento flexível (AFDG)

		Funcional (06:52:45.87)	Parcialmente (06:42:04.17)	Aleatoriamente (06:25:12.29)	ALVO (00:07:11.06)	AG (00:07:54.83)
Conjuntos de peças	1	4081.56	3669.02	3297.32	2943	2858
	2	3826.14	3454.34	3102.36	2864	2616
	3	4250.68	3822.02	3441.40	3006	2880
	4	4077.24	3648.44	3289.08	2846	2873
	5	3878.78	3485.06	3110.90	2761	2570
	6	4039.72	3625.82	3264.46	2862	2811
	7	3984.96	3571.30	3209.18	2975	2733
	8	4000.38	3588.28	3225.96	2826	2736
	9	3856.88	3463.36	3101.20	2737	2627
	10	4094.84	3680.04	3296.78	2954	2663
	11	3981.78	3567.96	3211.86	2952	2762
	12	4138.74	3715.14	3360.12	2980	2819
	13	4186.66	3765.98	3402.68	3015	2991
	14	4047.06	3630.16	3254.22	2910	2703
	15	3774.28	3389.24	3044.42	2643	2651
	16	3629.54	3260.30	2924.06	2683	2481
	17	3911.34	3503.06	3130.96	2860	2589
	18	4443.70	4015.36	3592.82	3249	3205
	19	3819.06	3439.40	3073.10	2751	2678
	20	3907.46	3515.80	3159.82	2824	2697
	21	3813.98	3432.04	3078.28	2675	2656
	22	4076.76	3702.68	3296.52	2823	2877
	23	4070.72	3671.20	3276.88	2919	2844
	24	4049.64	3622.86	3246.42	2943	2743
	25	4015.84	3612.52	3242.82	2995	2843
	26	4081.66	3696.02	3282.38	3022	2833
	27	3981.72	3583.12	3239.78	2880	2688
	28	3946.96	3563.60	3204.58	2845	2802
	29	3786.96	3402.54	3056.90	2809	2670
	30	3940.64	3538.18	3145.76	2831	2672
	Méd	3989.86	3587.83	3218.77	2879.43	2752.37
	Min	3629.54	3260.30	2924.06	2643	2481
	Max	4443.70	4015.36	3592.82	3249	3205
	Amp	814.16	755.06	668.76	606	724
	DP	160.43	147.23	133.83	124.85	141.12

8.5 Arranjos físicos equilibrados pequenos

Estes arranjos físicos possuem 20 máquinas (4x5) divididas em 5 processos com 4 máquinas cada um.

A Tabela 8.7 mostra os valores médios para o grau de distribuição de cada tipo de arranjo físico gerado e a Figura 8.7 apresenta os dois arranjos físicos maximamente distribuídos. Nota-se que todos os arranjos físicos funcionais obtiveram o mesmo valor devido ao fato dos departamentos terem a mesma quantidade de máquinas.

Tabela 8.7 - Grau de distribuição dos AFEP

	Arranjo Físico				
	Funcional	Parcialmente Distribuído	Aleatoriamente Distribuído	Maximamente Distribuído (ALVO)	Maximamente Distribuído (AG)
Média	9.000	7.4480	6.5610	5.9000	4.9000
Mínimo	9.000	6.5000	5.8000	-	-
Máximo	9.000	8.7000	7.2500	-	-
Amplitude	0	2.2000	1.4500	-	-
Desvio Padrão	0	0.4755	0.3543	-	-

3.01	1.01	2.02	1.03	3.03
2.01	4.01	4.02	4.03	2.03
5.02	5.01	4.04	5.03	5.04
3.02	1.02	2.04	1.04	3.04

Algoritmo ALVO

2.03	1.04	5.04	4.01	3.01
4.02	3.03	2.01	1.01	5.03
1.02	5.02	4.03	3.04	2.02
3.02	2.04	1.03	5.01	4.04

Algoritmo genético

Figura 8.7 - AFEP maximamente distribuídos

8.5.1 Peças

As peças têm de 3 a 5 operações cujos processos foram selecionados aleatoriamente entre os 5 disponíveis no arranjo físico. Os gráficos da Figura 8.8 mostram o número de ocorrência de cada processo para três dos conjuntos de peças.

Figura 8.8 - Ocorrência de cada processo (conjunto de peças 1, 10 e 20)

8.5.2 Resultados

Para o roteamento rígido os dados estão no Quadro 8.13 (makespan) e no Quadro 8.14 (distâncias percorridas) enquanto que para o roteamento flexível os dados estão no Quadro 8.15 (makespan) e Quadro 8.16 (distâncias).

Quadro 8.13 - Tempos no roteamento rígido (AFEP)

		Funcional (00:12:37.82)	Parcialmente (00:15:03.03)	Aleatoriamente (00:11:15.13)	ALVO (00:00:15.23)	AG (00:00:15.09)
Conjuntos de peças	1	2059.56	2063.48	2060.00	2073	2067
	2	2020.76	2025.16	2029.30	2024	2012
	3	2061.70	2069.44	2067.38	2067	2058
	4	1945.88	1946.26	1946.56	1973	1980
	5	2047.58	2067.50	2062.98	2045	2084
	6	2126.66	2124.28	2126.98	2182	2104
	7	2222.32	2219.30	2223.04	2288	2292
	8	2087.54	2090.62	2089.88	2083	2097
	9	2234.94	2233.00	2242.32	2242	2160
	10	2235.72	2230.04	2229.10	2234	2211
	11	2070.90	2068.62	2068.58	2074	2080
	12	2256.88	2242.90	2250.82	2295	2298
	13	2099.50	2103.52	2088.94	2025	2141
	14	2003.34	1999.50	1999.62	2005	2015
	15	2149.48	2149.68	2146.22	2168	2179
	16	2158.62	2150.30	2145.60	2153	2117
	17	2100.04	2095.14	2099.20	2104	2120
	18	2072.76	2077.80	2072.26	2136	2080
	19	2292.00	2290.62	2287.10	2288	2282
	20	1935.82	1931.94	1936.30	1912	1921
	21	2041.94	2045.90	2051.38	2050	2050
	22	2187.56	2183.74	2185.98	2161	2236
	23	2043.10	2043.94	2048.50	2064	1985
	24	1887.48	1887.92	1885.42	1927	1895
	25	2347.78	2330.42	2319.92	2424	2423
	26	2065.12	2085.78	2084.62	2240	2198
	27	2110.02	2109.22	2111.40	2119	2120
	28	2067.40	2069.16	2071.86	2069	2068
	29	2041.00	2041.26	2042.70	2034	2042
	30	1913.26	1915.98	1920.48	1925	1938
	Méd	2096.22	2096.41	2096.48	2112.80	2108.43
	Min	1887.48	1887.92	1885.42	1912	1895
	Max	2347.78	2330.42	2319.92	2424	2423
	Amp	460.30	442.50	434.50	512	528
	DP	110.60	107.16	106.56	122.25	120.08

Quadro 8.14 - Distâncias no roteamento rígido (AFEP)

		Funcional (00:12:37.82)	Parcialmente (00:15:03.03)	Aleatoriamente (00:11:15.13)	ALVO (00:00:15.23)	AG (00:00:15.09)
Conjuntos de peças	1	1360.46	1197.00	1113.46	1058	972
	2	1260.14	1102.94	1017.12	973	896
	3	1392.96	1240.26	1146.36	1080	1062
	4	1286.56	1135.86	1060.26	973	946
	5	1368.62	1211.52	1123.84	1031	1018
	6	1326.60	1160.72	1065.70	993	932
	7	1299.68	1155.18	1066.80	1005	976
	8	1381.12	1225.08	1133.78	1053	1019
	9	1365.26	1197.04	1101.88	1061	970
	10	1378.20	1204.58	1107.50	1038	944
	11	1322.54	1160.18	1073.60	939	904
	12	1356.64	1195.40	1111.20	1039	951
	13	1290.40	1145.70	1065.20	976	909
	14	1316.98	1159.30	1069.86	1003	979
	15	1334.76	1174.26	1086.14	1022	922
	16	1355.20	1195.92	1103.86	1060	942
	17	1298.60	1154.16	1060.64	971	961
	18	1330.38	1182.92	1093.48	977	947
	19	1375.92	1219.76	1132.72	1064	970
	20	1311.48	1160.40	1086.72	1054	975
	21	1333.66	1170.80	1077.68	1007	915
	22	1337.94	1174.72	1083.44	999	965
	23	1334.58	1176.14	1092.38	1041	914
	24	1314.78	1168.16	1076.48	1037	944
	25	1386.38	1223.64	1131.90	1066	1022
	26	1311.92	1162.10	1080.76	1000	933
	27	1322.54	1153.04	1063.82	973	939
	28	1434.48	1276.48	1184.96	1078	1042
	29	1329.58	1179.14	1096.70	1035	977
	30	1302.32	1133.94	1054.74	989	953
	Méd	1337.36	1179.88	1092.10	1019.83	959.97
	Min	1260.14	1102.94	1017.12	939	896
	Max	1434.48	1276.48	1184.96	1080	1062
	Amp	174.34	173.54	167.84	141	166
	DP	37.51	35.49	33.37	38.21	40.69

Quadro 8.15 - Tempos no roteamento flexível (AFEP)

		Funcional (01:23:23.31)	Parcialmente (01:28:39.29)	Aleatoriamente (01:27:11.14)	ALVO (00:01:58.45)	AG (00:01:48.18)
Conjuntos de peças	1	2047.02	2047.14	2044.18	2047	2056
	2	1940.08	1937.62	1939.98	1933	1935
	3	2123.16	2116.96	2126.32	2109	2140
	4	1840.72	1842.86	1842.66	1875	1870
	5	1992.26	1987.46	1989.66	1974	1960
	6	1942.82	1941.76	1949.52	1962	1915
	7	2214.60	2212.02	2212.84	2223	2221
	8	2170.30	2166.46	2168.42	2178	2170
	9	2085.54	2089.50	2091.50	2109	2136
	10	2076.86	2068.74	2078.80	2042	2107
	11	1981.80	1980.96	1978.08	1979	1953
	12	2187.16	2192.90	2193.04	2186	2201
	13	2030.98	2032.76	2031.68	2025	2022
	14	1997.22	1998.94	1992.46	2040	1980
	15	2090.34	2080.38	2087.64	2114	2103
	16	2068.06	2062.62	2056.94	2012	2050
	17	2015.12	2016.10	2013.44	2008	2015
	18	2027.16	2025.68	2024.46	2026	2004
	19	2186.92	2183.84	2180.72	2174	2217
	20	1809.40	1812.30	1810.36	1827	1801
	21	1969.44	1964.20	1970.78	1939	1969
	22	2114.64	2112.88	2113.32	2106	2107
	23	1967.60	1967.18	1964.18	1964	1926
	24	1901.14	1902.14	1905.90	1931	1880
	25	2249.44	2254.04	2249.58	2241	2262
	26	2065.82	2036.64	2037.40	2006	1969
	27	2117.42	2119.28	2120.98	2122	2112
	28	2081.24	2074.42	2075.18	2082	2040
	29	2034.20	2029.44	2033.76	2066	2063
	30	1847.30	1838.50	1850.52	1828	1829
Méd		2039.19	2036.52	2036.52	2037.60	2033.77
Min		1809.40	1812.30	1812.30	1827	1801
Max		2249.44	2254.04	2254.04	2241	2262
Amp		440.04	441.74	441.74	414	461
DP		109.79	109.81	109.81	107.48	120.19

Quadro 8.16 - Distâncias no roteamento flexível (AFEP)

		Funcional (01:23:23.31)	Parcialmente (01:28:39.29)	Aleatoriamente (01:27:11.14)	ALVO (00:01:58.45)	AG (00:01:48.18)
Conjuntos de peças	1	1152.96	1022.80	933.90	886	826
	2	1124.98	988.20	904.98	878	781
	3	1228.30	1083.96	1000.52	921	925
	4	1162.00	1020.66	947.66	909	800
	5	1214.86	1068.26	983.68	908	921
	6	1153.12	1026.80	937.68	892	802
	7	1154.96	1023.76	933.16	932	778
	8	1203.94	1064.80	982.26	887	819
	9	1231.26	1088.74	998.38	921	895
	10	1215.10	1074.70	987.96	915	899
	11	1182.00	1053.78	960.16	882	841
	12	1179.32	1049.80	959.74	884	856
	13	1146.88	1009.84	922.10	864	813
	14	1194.36	1064.92	981.54	926	849
	15	1194.24	1056.30	972.80	897	850
	16	1204.38	1062.98	973.70	919	815
	17	1164.08	1027.88	945.02	908	834
	18	1172.74	1035.12	950.92	882	817
	19	1230.78	1086.96	995.64	946	907
	20	1168.38	1035.02	956.46	890	847
	21	1169.28	1033.70	942.44	904	850
	22	1190.62	1061.72	975.38	912	865
	23	1184.60	1043.08	959.74	894	854
	24	1164.04	1024.76	945.42	869	825
	25	1228.62	1075.76	992.04	955	863
	26	1160.04	1023.44	935.86	835	809
	27	1165.28	1038.98	947.38	896	825
	28	1256.98	1110.38	1025.20	963	945
	29	1189.98	1052.26	963.16	917	863
	30	1146.04	1010.62	931.54	927	830
	Méd	1184.47	1047.33	961.55	903.97	846.80
	Min	1124.98	988.20	904.98	835	778
	Max	1256.98	1110.38	1025.20	963	945
	Amp	132.00	122.18	120.22	128	167
	DP	31.40	27.79	27.16	27.32	42.07

8.6 Arranjos físicos equilibrados médios

Estes arranjos físicos possuem 40 máquinas (5x8) divididas em 5 processos com 8 máquinas cada um. A Tabela 8.8 mostra os valores médios para o grau de distribuição e a Figura 8.9 apresenta os dois arranjos físicos maximamente distribuídos.

Tabela 8.8 - Grau de distribuição dos AFEM

	Arranjo Físico				
	Funcional	Parcialmente Distribuído	Aleatoriamente Distribuído	Maximamente Distribuído (ALVO)	Maximamente Distribuído (AG)
Média	12.1000	9.5110	6.6600	5.8500	4.7000
Mínimo	12.1000	8.3250	5.9500	-	-
Máximo	12.1000	11.1500	8.1250	-	-
Amplitude	0	2.8250	2.1750	-	-
Desvio Padrão	0	0.6876	0.4280	-	-

Figura 8.9 - AFEM maximamente distribuídos

8.6.1 Peças

As peças têm entre 3 e 5 operações cujos processos foram selecionados aleatoriamente entre os 5 disponíveis no arranjo físico. A Figura 8.10 mostra quantas vezes cada processo foi usado em três dos conjuntos peças.

Figura 8.10 - Ocorrência de cada processo (conjunto de peças 1, 10 e 20)

8.6.2 Resultados

Para o roteamento rígido os dados estão no Quadro 8.17 (makespan) e no Quadro 8.18 (distâncias percorridas) enquanto que para o roteamento flexível os dados estão no Quadro 8.19 (makespan) e Quadro 8.20 (distâncias).

Quadro 8.17 - Tempos no roteamento rígido (AFEM)

		Funcional (00:30:04.33)	Parcialmente (00:23:40.55)	Aleatoriamente (00:22:35.24)	ALVO (00:00:28.26)	AG (00:00:28.00)
Conjuntos de peças	1	1101.96	1095.64	1111.22	1072	1092
	2	1181.18	1175.14	1181.84	1190	1195
	3	1232.66	1233.74	1240.56	1218	1209
	4	1128.44	1126.18	1125.88	1116	1116
	5	1244.18	1249.64	1245.10	1215	1205
	6	1110.66	1107.98	1108.90	1119	1114
	7	1130.80	1136.30	1140.52	1132	1148
	8	1103.96	1106.72	1095.68	1077	1121
	9	1138.32	1141.24	1140.64	1155	1142
	10	1154.34	1161.58	1158.94	1149	1155
	11	1213.10	1217.08	1223.38	1279	1274
	12	1235.48	1270.80	1293.40	1232	1380
	13	1209.58	1215.16	1216.26	1210	1230
	14	1259.30	1254.34	1264.10	1388	1381
	15	1245.82	1249.90	1250.64	1252	1255
	16	1159.16	1158.50	1166.30	1178	1176
	17	1152.18	1159.34	1166.16	1251	1164
	18	1206.52	1207.36	1209.40	1215	1211
	19	1153.92	1155.76	1155.82	1156	1164
	20	1056.46	1055.20	1057.28	1073	1056
	21	1198.38	1203.80	1225.86	1200	1209
	22	1229.68	1232.54	1236.34	1241	1239
	23	1155.72	1162.42	1167.60	1125	1204
	24	1178.70	1179.68	1182.54	1166	1172
	25	1139.48	1145.76	1149.96	1145	1158
	26	1169.00	1175.44	1177.48	1188	1174
	27	1169.32	1169.44	1171.14	1162	1171
	28	1325.34	1325.72	1327.02	1314	1345
	29	1163.88	1172.08	1155.64	1145	1206
	30	1203.66	1206.72	1207.44	1206	1211
	Méd	1178.37	1181.71	1185.10	1185.63	1195.90
	Min	1056.46	1055.20	1057.28	1072	1056
	Max	1325.34	1325.72	1327.02	1388	1381
	Amp	268.88	270.52	269.74	316	325
	DP	56.24	58.14	60.14	70.65	75.55

Quadro 8.18 - Distancias no roteamento rígido (AFEM)

		Funcional (00:30:04.33)	Parcialmente (00:23:40.55)	Aleatoriamente (00:22:35.24)	ALVO (00:00:28.26)	AG (00:00:28.00)
Conjuntos de peças	1	1883.88	1549.68	1260.24	1153	1130
	2	1933.54	1608.78	1320.08	1193	1070
	3	1991.08	1676.48	1375.44	1195	1130
	4	1989.66	1644.86	1341.16	1231	1103
	5	1972.98	1650.48	1361.44	1224	1163
	6	1849.98	1555.72	1279.80	1226	1089
	7	1951.72	1629.54	1339.82	1260	1045
	8	1903.24	1611.36	1324.98	1255	1125
	9	1924.36	1602.72	1321.00	1196	1126
	10	1987.82	1639.58	1336.00	1262	1135
	11	1856.42	1539.22	1237.26	1187	1054
	12	1917.64	1571.22	1273.02	1192	984
	13	1980.00	1661.48	1349.36	1263	1152
	14	1937.60	1619.96	1343.48	1280	1203
	15	1925.66	1586.72	1286.96	1155	1045
	16	1877.50	1577.04	1288.90	1123	1053
	17	1883.34	1589.06	1317.72	1279	1120
	18	1840.68	1524.02	1249.22	1167	1022
	19	1923.12	1621.52	1320.40	1212	1138
	20	1803.42	1502.96	1233.24	1096	981
	21	1821.90	1521.00	1238.50	1124	1075
	22	1922.14	1606.54	1330.84	1205	1147
	23	1838.74	1524.36	1232.06	1128	1041
	24	1935.62	1596.22	1300.78	1229	1103
	25	1896.50	1594.42	1319.28	1213	1129
	26	1921.54	1606.16	1311.42	1133	1120
	27	1945.56	1630.00	1331.92	1273	998
	28	1960.06	1636.56	1332.00	1202	1121
	29	1918.94	1611.44	1324.20	1276	1095
	30	1922.32	1629.54	1337.96	1255	1194
	Méd	1913.90	1597.29	1307.28	1206.23	1096.37
	Min	1803.42	1502.96	1232.06	1096	981
	Max	1991.08	1676.48	1375.44	1280	1203
	Amp	187.66	173.52	143.3799	184	222
	DP	50.59	44.66	40.21	52.94	57.37

Quadro 8.19 - Tempos no roteamento flexível (AFEM)

		Funcional (03:52:57.66)	Parcialmente (03:27:11.58)	Aleatoriamente (03:34:53.34)	ALVO (00:05:24.47)	AG (00:04:03.15)
Conjuntos de peças	1	1047.64	1048.68	1052.50	1045	1047
	2	1153.56	1145.38	1144.86	1128	1141
	3	1222.88	1220.70	1225.02	1232	1223
	4	1166.06	1165.46	1168.50	1152	1164
	5	1191.60	1188.58	1188.78	1192	1217
	6	1057.46	1055.10	1060.90	1053	1027
	7	1065.08	1065.12	1067.44	1065	1075
	8	1058.40	1056.74	1061.96	1067	1047
	9	1111.44	1110.64	1109.86	1092	1109
	10	1185.36	1190.54	1184.92	1209	1215
	11	1166.88	1166.02	1166.10	1162	1169
	12	1165.26	1167.38	1167.08	1126	1165
	13	1174.30	1174.14	1177.10	1189	1128
	14	1213.96	1205.80	1216.76	1156	1169
	15	1178.12	1180.82	1176.16	1176	1177
	16	1089.28	1086.80	1087.88	1092	1071
	17	1141.82	1141.34	1143.36	1201	1172
	18	1187.84	1185.54	1192.00	1171	1205
	19	1130.60	1137.04	1134.56	1089	1119
	20	997.52	1001.56	1000.46	993	997
	21	1181.40	1174.58	1175.64	1196	1186
	22	1205.46	1204.24	1212.70	1162	1218
	23	1181.54	1191.96	1181.22	1237	1138
	24	1133.84	1130.88	1137.26	1116	1138
	25	1174.38	1181.96	1183.42	1170	1172
	26	1102.76	1118.78	1107.70	1112	1110
	27	1185.30	1184.98	1183.14	1214	1177
	28	1292.86	1298.40	1294.06	1291	1315
	29	1116.44	1109.98	1113.76	1115	1079
	30	1112.54	1113.66	1117.26	1094	1122
Méd		1146.39	1146.76	1147.75	1143.23	1143.07
Min		997.52	1001.56	1000.46	993	997
Max		1292.86	1298.4	1294.06	1291	1315
Amp		295.34	296.84	293.60	298	318
DP		61.99	61.97	61.52	66.41	68.20

Quadro 8.20 - Distâncias no roteamento flexível (AFEM)

		Funcional (03:52:57.66)	Parcialmente (03:27:11.58)	Aleatoriamente (03:34:53.34)	ALVO (00:05:24.47)	AG (00:04:03.15)
Conjuntos de peças	1	1635.06	1395.24	1140.34	1026	963
	2	1645.58	1390.76	1147.02	1078	922
	3	1698.30	1454.52	1195.02	1022	984
	4	1710.72	1455.74	1195.78	1152	995
	5	1711.72	1450.02	1196.02	1086	988
	6	1614.30	1371.48	1120.44	1068	944
	7	1674.10	1437.58	1195.60	1132	997
	8	1666.38	1418.24	1165.66	1105	1003
	9	1697.38	1440.72	1181.90	1089	889
	10	1716.94	1461.70	1195.46	1091	994
	11	1647.16	1386.66	1154.12	1059	956
	12	1682.28	1429.70	1173.46	1123	999
	13	1698.08	1435.98	1179.24	1013	979
	14	1669.96	1410.64	1152.42	1072	968
	15	1685.48	1444.82	1183.84	1084	982
	16	1637.56	1380.00	1136.52	1042	901
	17	1612.86	1364.34	1117.70	1042	978
	18	1582.80	1355.90	1112.00	939	949
	19	1666.38	1418.84	1156.52	1093	1011
	20	1584.24	1353.40	1117.86	1024	1000
	21	1584.46	1344.28	1099.74	967	945
	22	1691.14	1440.68	1192.14	1166	1012
	23	1624.94	1379.34	1140.00	1042	953
	24	1686.70	1427.12	1179.06	1084	990
	25	1629.76	1369.50	1129.84	1064	903
	26	1644.82	1400.40	1151.10	1062	980
	27	1662.62	1421.46	1173.74	1095	987
	28	1678.78	1441.44	1186.48	1107	983
	29	1645.96	1404.34	1161.42	1075	1048
	30	1677.60	1430.40	1171.20	1073	976
	Méd	1658.80	1410.51	1160.06	1069.17	972.63
	Min	1582.80	1344.28	1099.74	939	889
	Max	1716.94	1461.70	1196.02	1166	1048
	Amp	134.14	117.42	96.28	227	159
	DP	38.25	34.24	28.79	48.36	35.37

8.7 Arranjos físicos equilibrados grandes

Estes arranjos físicos possuem 10 linhas e 8 colunas e suas 80 máquinas estão divididas em 8 processos com 10 máquinas cada um. A Tabela 8.9 mostra os valores médios para o grau de distribuição e a Figura 8.11 apresenta os dois arranjos físicos maximamente distribuídos.

Tabela 8.9 - Grau de distribuição dos AFEG

	Arranjo Físico				
	Funcional	Parcialmente Distribuído	Aleatoriamente Distribuído	Maximamente Distribuído (ALVO)	Maximamente Distribuído (AG)
Média	29.0000	21.8163	14.6025	12.3125	10.6500
Mínimo	29.0000	18.5500	12.8500	-	-
Máximo	29.0000	25.5000	16.5625	-	-
Amplitude	0	6.9500	3.7125	-	-
Desvio Padrão	0	1.1875	0.7624	-	-

Figura 8.11 - AFEG maximamente distribuídos

8.7.1 Peças

As peças têm entre 3 e 8 operações cujos processos foram selecionados aleatoriamente entre os 8 disponíveis no arranjo físico. A Figura 8.12 mostra o número de ocorrência de cada processo para dois dos conjuntos.

Figura 8.12 - Ocorrência de cada processo (conjunto de peças 1 e 15)

8.7.2 Resultados

Para o roteamento rígido os dados estão no Quadro 8.21 (makespan) e no Quadro 8.22 (distâncias) e para o roteamento flexível, os dados estão no Quadro 8.23 (makespan) e Quadro 8.24 (distâncias).

Quadro 8.21 - Tempos no roteamento rígido (AFEG)

		Funcional (00:45:58.36)	Parcialmente (01:03:58.88)	Aleatoriamente (01:02:03.27)	ALVO (00:05:21.32)	AG (00:00:59.25)
Conjuntos de peças	1	969.56	984.90	977.08	1021	1015
	2	1023.34	1029.26	1034.08	1048	1023
	3	1079.46	1078.72	1085.96	1066	1097
	4	1064.84	1063.06	1061.92	1056	1048
	5	1039.72	1044.66	1048.94	1046	1059
	6	1066.34	1069.46	1068.62	1091	1038
	7	1108.30	1110.04	1112.74	1087	1096
	8	1017.60	1021.44	1027.06	1014	1019
	9	935.90	937.76	937.78	939	942
	10	1055.46	1049.28	1055.78	1081	1023
	11	998.46	1003.72	1002.38	1027	983
	12	1079.84	1087.12	1089.12	1078	1058
	13	1044.60	1052.36	1050.34	1073	1066
	14	1001.58	1003.52	1008.08	1035	1008
	15	975.22	977.40	978.08	997	994
	16	1156.92	1161.24	1160.08	1167	1174
	17	1019.58	1016.12	1019.04	1046	1026
	18	1087.62	1084.18	1088.18	1057	1071
	19	1116.56	1123.28	1125.82	1131	1137
	20	1033.84	1044.36	1050.98	1069	1059
	21	1009.76	1015.54	1011.68	970	1018
	22	1007.34	1011.32	1014.60	1042	998
	23	1136.58	1140.40	1152.54	1127	1187
	24	1150.82	1150.82	1154.84	1132	1156
	25	1069.50	1065.50	1067.86	1079	1069
	26	1159.92	1164.84	1167.86	1172	1168
	27	1004.32	1014.06	1014.38	1103	979
	28	1012.20	1013.38	1017.58	961	1045
	29	1044.88	1055.70	1058.86	1050	1080
	30	1112.16	1135.90	1134.14	1151	1170
	Méd	1052.74	1056.98	1059.21	1063.87	1060.20
	Min	935.90	937.76	937.78	939	942
	Max	1159.92	1164.84	1167.86	1172	1187
	Amp	224.02	227.08	230.08	233	245
	DP	57.79	57.89	58.96	57.03	64.025

Quadro 8.22 - Distancias no roteamento rígido (AFEG)

		Funcional (00:45:58.36)	Parcialmente (01:03:58.88)	Aleatoriamente (01:02:03.27)	ALVO (00:05:21.32)	AG (00:00:59.25)
Conjuntos de peças	1	3654.28	3027.10	2425.06	2105	2135
	2	3629.20	2974.50	2361.40	2115	1961
	3	3704.26	3055.84	2413.06	2119	2066
	4	3541.74	2928.08	2317.38	2076	2036
	5	3485.00	2877.48	2304.58	2132	1848
	6	3635.08	2984.10	2370.28	2218	1980
	7	3622.84	2965.90	2363.62	2076	2022
	8	3693.82	3039.24	2403.84	2128	1990
	9	3613.14	2964.54	2361.34	2119	1894
	10	3666.46	3015.22	2387.42	2115	1955
	11	3672.00	3068.58	2469.84	2302	2105
	12	3962.40	3294.00	2646.70	2361	2255
	13	3633.18	3014.00	2373.40	2210	1921
	14	3646.54	2986.68	2383.96	2113	2001
	15	3509.94	2912.78	2352.44	2143	2027
	16	3774.90	3138.76	2495.66	2190	2106
	17	3642.36	3017.28	2409.22	2169	2074
	18	3655.32	3021.94	2417.00	2176	2063
	19	3692.08	3055.26	2450.06	2230	2087
	20	3643.86	3034.78	2441.52	2169	2117
	21	3549.90	2929.50	2345.42	2061	1944
	22	3839.44	3171.36	2533.30	2256	2084
	23	3513.76	2912.86	2315.28	2106	1967
	24	3687.16	3055.60	2447.88	2167	2153
	25	3556.02	2940.64	2336.08	2124	1982
	26	3733.16	3092.60	2467.10	2175	2131
	27	3500.24	2873.64	2293.64	1987	1901
	28	3514.08	2858.12	2278.60	1989	1866
	29	3933.62	3247.04	2576.96	2383	2234
	30	3604.56	2939.90	2331.94	2037	1963
	Méd	3650.35	3013.24	2402.47	2151.70	2028.93
	Min	3485.00	2858.12	2278.60	1987	1848
	Max	3962.40	3294.00	2646.70	2383	2255
	Amp	477.40	435.88	368.10	396	407
	DP	115.57	102.58	84.17	92.28	101.48

Quadro 8.23 - Tempos no roteamento flexível (AFEG)

		Funcional (13:05:11.63)	Parcialmente (15:21:26.33)	Aleatoriamente (13:43:11.53)	ALVO (00:25:47.07)	AG (00:45:26.39)
Conjuntos de peças	1	915.76	924.00	923.44	932	913
	2	1020.92	1028.02	1022.92	1008	1037
	3	1028.52	1034.98	1034.20	1034	997
	4	1027.52	1033.66	1032.58	1036	1032
	5	1031.14	1027.96	1024.50	1060	1040
	6	998.00	997.92	1003.10	1009	1012
	7	1064.76	1068.14	1065.72	1059	1088
	8	982.28	976.66	983.38	1004	971
	9	956.32	944.92	944.74	985	904
	10	941.20	948.94	953.24	916	994
	11	975.50	977.56	977.36	982	999
	12	1063.70	1057.48	1062.04	1089	1098
	13	982.14	989.10	980.78	994	1076
	14	988.22	981.50	982.76	1043	989
	15	962.30	966.88	967.02	953	978
	16	1135.42	1137.2	1144.76	1162	1130
	17	969.66	974.12	973.68	954	986
	18	1048.66	1053.22	1052.06	1070	1084
	19	1091.46	1088.08	1090.66	1099	1109
	20	1027.12	1032.12	1039.66	1099	1035
	21	923.42	937.84	927.90	955	922
	22	968.76	965.94	966.14	962	976
	23	1059.48	1068.08	1071.06	1058	1082
	24	1092.26	1091.02	1085.5	1123	1104
	25	1012.94	1015.28	1018.86	1020	1008
	26	1150.22	1158.26	1155.62	1164	1141
	27	925.42	926.56	932.74	925	1042
	28	978.24	977.12	976.00	993	960
	29	1047.28	1049.68	1045.06	1025	1048
	30	1074.10	1080.26	1080.30	1094	1113
	Méd	1014.76	1017.08	1017.26	1026.90	1028.93
	Min	915.76	924.00	923.44	916	904
	Max	1150.22	1158.26	1155.62	1164	1141
	Amp	234.46	234.26	232.18	248	237
	DP	60.48	60.55	60.81	66.82	64.40

Quadro 8.24 - Distâncias no roteamento flexível (AFEG)

		Funcional (13:05:11.63)	Parcialmente (15:21:26.33)	Aleatoriamente (13:43:11.53)	ALVO (00:25:47.07)	AG (00:45:26.39)
Conjuntos de peças	1	3100.52	2582.08	2071.48	1871	1743
	2	3071.78	2543.74	2040.14	1839	1664
	3	3115.80	2568.56	2073.18	1925	1693
	4	2998.52	2491.68	2002.28	1748	1678
	5	2962.84	2466.34	1993.52	1800	1669
	6	3089.10	2583.36	2058.80	1882	1712
	7	3056.26	2535.70	2022.96	1766	1718
	8	3123.10	2566.64	2034.28	1787	1746
	9	3086.98	2573.22	2065.50	1897	1773
	10	3114.98	2592.44	2085.26	1877	1662
	11	3099.48	2587.84	2071.18	1907	1814
	12	3360.56	2799.06	2244.38	2035	1891
	13	3190.42	2667.04	2134.14	1966	1750
	14	3118.30	2585.72	2064.64	1919	1688
	15	2984.46	2486.44	2005.82	1812	1705
	16	3204.00	2660.28	2109.00	1891	1782
	17	3090.20	2596.98	2075.96	1960	1733
	18	3095.80	2571.18	2043.14	1822	1688
	19	3123.26	2592.12	2080.86	1868	1771
	20	3102.78	2581.12	2091.32	1875	1797
	21	3078.82	2563.14	2070.78	1907	1847
	22	3265.08	2709.92	2176.56	1964	1814
	23	2951.10	2444.98	1960.82	1812	1647
	24	3156.30	2621.12	2107.58	1844	1769
	25	3014.60	2494.94	1984.68	1806	1649
	26	3218.16	2687.84	2167.42	1985	1756
	27	2996.18	2498.74	2027.14	1800	1669
	28	2995.86	2489.86	2016.32	1845	1631
	29	3327.92	2780.94	2229.00	2049	1898
	30	3070.02	2545.70	2042.08	1795	1775
	Méd	3105.44	2582.29	2071.67	1875.13	1737.73
	Min	2951.10	2444.98	1960.82	1748	1631
	Max	3360.56	2799.06	2244.38	2049	1898
	Amp	409.46	354.0801	283.5599	301	267
	DP	98.65	84.68	66.66	76.75	70.54

8.8 Influência da divisão dos departamentos

Este estudo permitiu avaliar a influência do grau de desagregação dos departamentos usando arranjos físicos com processos que possuem o mesmo número de máquinas, de forma similar à executada por Benjaafar e Sheikhzadeh (2000, p. 320) e Lahmar e Benjaafar (2001, 2002a, 2002b e 2005). Os arranjos físicos adotados possuíam 36 máquinas (6x6) divididas em 6 processos.

Os arranjos físicos parcialmente distribuídos foram criados dividindo cada departamento por 1, 2, 3 e 6. Na divisão por 1 tem-se o arranjo físico funcional (1 departamento com 6 máquinas para cada processo) e na divisão por 6 tem-se uma distribuição aleatória (6 departamentos com 1 máquina para cada processo).

A Tabela 8.10 mostra os valores médios para o grau de distribuição de cada tipo de arranjo físico gerado.

Tabela 8.10 - Grau de distribuição dos arranjos físicos

	Arranjo Físico					
	Parcialmente Distribuído (÷1) (Funcional)	Parcialmente Distribuído (÷2)	Parcialmente Distribuído (÷3)	Parcialmente Distribuído (÷6)	Maximamente distribuído (ALVO)	Maximamente distribuído (AG)
Média	14.6667	11.2872	10.6194	9.0611	8.1112	6.6667
Mínimo	14.6667	9.9444	8.9722	7.8611	-	-
Máximo	14.6667	12.6667	12.1389	10.2222	-	-
Amplitude	0	2.7223	3.1667	2.3611	-	-
Desvio Padrão	0	0.6730	0.7494	0.5299	-	-

A Figura 8.13 apresenta os dois arranjos físicos maximamente distribuídos além de um exemplo de cada uma das outras quatro distribuições (o primeiro arranjo físico de cada tipo).

2.04	2.03	3.04	3.03	4.04	4.03
2.05	2.02	3.05	3.02	4.05	4.02
2.06	2.01	3.06	3.01	4.06	4.01
1.01	1.06	5.01	5.06	6.01	6.06
1.02	1.05	5.02	5.05	6.02	6.05
1.03	1.04	5.03	5.04	6.03	6.04

Div 1 (Funcional)

2.04	5.06	3.04	5.03	2.01	4.06
2.05	5.05	3.05	5.02	2.02	4.05
2.06	5.04	3.06	5.01	2.03	4.04
4.01	3.03	1.01	6.03	1.04	6.06
4.02	3.02	1.02	6.02	1.05	6.05
4.03	3.01	1.03	6.01	1.06	6.04

Div 2

3.04	3.03	4.06	4.05	1.06	1.05
3.05	5.06	5.03	3.02	6.05	6.04
3.06	5.05	5.04	3.01	6.06	6.03
2.01	2.04	1.01	2.06	4.03	5.02
2.02	2.03	1.02	2.05	4.04	5.01
6.01	6.02	4.01	4.02	1.03	1.04

Div 3

4.06	2.05	2.03	4.04	1.04	3.06
5.06	4.05	6.06	5.05	5.04	6.05
2.06	1.06	2.04	1.05	4.03	2.02
6.01	6.03	3.02	1.02	5.02	3.05
3.01	5.01	4.01	2.01	1.03	5.03
1.01	6.02	6.04	3.03	4.02	3.04

Div 6 (Aleatório)

1.01	2.01	3.03	1.03	2.03	1.05
3.01	4.01	5.03	4.03	3.05	2.05
5.01	6.01	6.05	6.03	5.05	4.05
5.02	6.02	6.06	6.04	5.06	4.06
3.02	4.02	5.04	4.04	3.06	2.06
1.02	2.02	3.04	1.04	2.04	1.06

Algoritmo ALVO

3.01	4.01	2.01	5.02	3.02	1.02
1.01	5.01	6.01	4.02	2.02	6.02
6.03	2.03	1.03	3.04	5.04	4.04
4.03	3.03	5.03	2.04	6.04	1.04
1.05	6.05	4.05	1.06	3.06	5.06
2.05	5.05	3.05	6.06	4.06	2.06

Algoritmo genético

Figura 8.13 - Exemplos de arranjos físicos

Os arranjos físicos parcialmente distribuídos com 2, 3 e 6 departamentos exibidos pela Figura 8.13 mostram que o processo aleatório de seleção acaba definindo em posições adjacentes departamentos de um mesmo tipo, formando grupos maiores que o desejado, mesmo com a inclusão de algumas rotinas que objetivavam minimizar essa situação. O algoritmo ALVO mostrou que, pelo menos neste caso, é menos eficiente na distribuição das máquinas, acabando por gerar um grande departamento no centro.

8.8.1 Peças

As peças têm entre 3 e 6 operações cujos processos foram selecionados aleatoriamente entre os 6 disponíveis no arranjo físico. Foi adotado o procedimento de seleção aleatório de processo (Figura 8.14).

Figura 8.14 - Ocorrência de cada processo (conjuntos de peças 1 e 15)

8.8.2 Resultados

Para o roteamento rígido os dados estão no Quadro 8.25 (makespan) e no Quadro 8.26 (distâncias). Para o roteamento flexível, os dados estão no Quadro 8.27 (makespan) e Quadro 8.28 (distâncias).

Quadro 8.25 - Tempos no roteamento rígido

		Parcialmente (÷1) (00:16:58.48)	Parcialmente (÷2) (00:18:13.68)	Parcialmente (÷3) (00:17:02.29)	Parcialmente (÷6) (00:17:20.32)	ALVO (00:00:21.11)	AG (00:00:22.49)
Conjuntos de peças	1	1624.00	1626.72	1627.24	1626.56	1632	1618
	2	1467.26	1469.38	1469.66	1468.50	1455	1477
	3	1556.26	1558.98	1560.88	1561.74	1547	1574
	4	1415.80	1414.12	1414.60	1414.58	1441	1413
	5	1545.76	1548.34	1547.42	1550.60	1563	1549
	6	1465.32	1464.14	1469.10	1474.44	1484	1472
	7	1451.36	1451.38	1445.08	1443.32	1459	1450
	8	1440.76	1440.46	1442.78	1446.76	1477	1445
	9	1440.28	1441.72	1441.94	1442.94	1458	1456
	10	1443.86	1456.46	1448.68	1444.56	1504	1461
	11	1464.74	1462.08	1464.62	1470.68	1498	1459
	12	1415.90	1414.86	1414.50	1419.60	1399	1424
	13	1431.12	1430.86	1429.06	1430.58	1441	1455
	14	1491.22	1493.9	1503.32	1494.48	1502	1506
	15	1398.12	1399.72	1399.50	1401.98	1395	1394
	16	1385.56	1393.38	1390.98	1398.48	1520	1380
	17	1428.36	1436.32	1429.98	1429.40	1441	1441
	18	1439.14	1462.34	1457.50	1455.38	1412	1472
	19	1510.20	1510.04	1510.08	1513.18	1541	1527
	20	1471.42	1472.82	1471.54	1470.92	1497	1470
	21	1435.72	1457.04	1443.74	1454.78	1476	1422
	22	1467.10	1475.02	1487.58	1472.64	1494	1490
	23	1563.66	1576.28	1578.34	1577.18	1612	1585
	24	1468.24	1464.56	1463.16	1459.84	1446	1499
	25	1406.84	1416.7	1436.52	1424.06	1390	1394
	26	1437.56	1436.28	1439.84	1443.22	1457	1463
	27	1482.88	1482.04	1481.42	1475.38	1502	1446
	28	1474.62	1474.88	1499.34	1486.36	1607	1439
	29	1389.48	1397.14	1385.02	1376.68	1329	1384
	30	1436.02	1441.06	1442.44	1444.92	1441	1456
Méd		1461.62	1465.63	1466.53	1465.79	1480.67	1467.37
Min		1385.56	1393.38	1385.02	1376.68	1329	1380
Max		1624.00	1626.72	1627.24	1626.56	1632	1618
Amp		238.44	233.34	242.22	249.88	303	238
DP		54.10	53.83	55.26	54.79	68.07	57.78

Quadro 8.26 - Distancias no roteamento rígido

		Parcialmente (+1) (00:16:58.48)	Parcialmente (+2) (00:18:13.68)	Parcialmente (+3) (00:17:02.29)	Parcialmente (+6) (00:17:20.32)	ALVO (00:00:21.11)	AG (00:00:22.49)
Conjuntos de peças	1	2067.28	1759.04	1677.22	1555.60	1355	1348
	2	2086.98	1785.38	1692.56	1566.88	1421	1358
	3	1974.78	1677.98	1581.96	1471.24	1295	1307
	4	1928.76	1650.68	1559.46	1456.64	1260	1278
	5	1967.26	1684.20	1587.74	1458.98	1346	1257
	6	1996.76	1719.68	1620.86	1510.50	1374	1373
	7	2056.60	1761.96	1685.86	1550.58	1373	1335
	8	2042.00	1752.58	1670.18	1548.00	1322	1343
	9	1961.58	1664.06	1581.54	1461.64	1370	1270
	10	2002.66	1700.20	1625.66	1499.12	1363	1296
	11	2110.70	1807.54	1716.78	1603.54	1473	1374
	12	1959.16	1662.60	1586.82	1456.64	1261	1258
	13	1942.20	1657.10	1582.36	1456.98	1354	1214
	14	2050.02	1741.62	1654.54	1517.60	1357	1323
	15	1876.96	1612.28	1527.92	1420.68	1330	1235
	16	2018.62	1725.40	1637.60	1518.22	1310	1334
	17	2136.90	1826.84	1743.56	1615.72	1509	1451
	18	2067.06	1751.68	1661.60	1539.94	1430	1257
	19	1998.30	1716.72	1624.44	1514.32	1378	1341
	20	2111.94	1795.26	1697.76	1568.68	1395	1372
	21	2031.76	1725.12	1644.24	1519.48	1350	1306
	22	1992.44	1686.02	1595.52	1484.30	1297	1266
	23	2109.54	1779.48	1685.14	1560.48	1410	1369
	24	2048.94	1741.88	1648.26	1529.58	1347	1201
	25	1951.28	1670.98	1581.94	1463.68	1264	1229
	26	1959.66	1654.56	1564.42	1445.60	1315	1205
	27	2046.74	1756.14	1658.20	1542.72	1370	1352
	28	2087.14	1780.66	1686.82	1570.12	1390	1364
	29	1971.96	1698.78	1614.02	1513.94	1348	1334
	30	2048.30	1740.02	1650.16	1517.72	1353	1325
Méd		2020.14	1722.88	1634.84	1514.64	1357.33	1309.17
Min		1876.96	1612.28	1527.92	1420.68	1260	1201
Max		2136.90	1826.84	1743.56	1615.72	1509	1451
Amp		259.94	214.56	215.64	195.04	249	250
DP		63.39	53.36	52.20	49.11	56.84	60.26

Quadro 8.27 - Tempos no roteamento flexível

		Parcialmente (÷1) (02:54:55.40)	Parcialmente (÷2) (02:26:01.30)	Parcialmente (÷3) (02:16:09.70)	Parcialmente (÷6) (02:32:01.85)	ALVO (00:03:01.68)	AG (00:03:49.98)
Conjuntos de peças	1	1612.42	1612.80	1613.70	1613.46	1616	1595
	2	1422.76	1426.22	1425.46	1424.86	1444	1444
	3	1444.58	1441.70	1444.38	1442.46	1474	1442
	4	1399.82	1400.04	1401.32	1400.20	1396	1378
	5	1500.28	1501.96	1495.92	1497.86	1533	1496
	6	1408.90	1413.72	1413.04	1417.32	1478	1389
	7	1412.24	1409.90	1413.88	1413.70	1416	1433
	8	1390.16	1386.96	1393.82	1388.74	1400	1374
	9	1350.08	1351.24	1351.28	1351.94	1353	1349
	10	1381.80	1381.50	1381.72	1377.44	1379	1360
	11	1524.24	1532.86	1530.20	1530.84	1561	1561
	12	1349.42	1343.46	1342.14	1347.34	1362	1332
	13	1370.72	1371.88	1373.14	1369.28	1397	1427
	14	1449.64	1450.04	1444.72	1439.44	1438	1442
	15	1343.06	1340.52	1340.08	1343.68	1372	1345
	16	1373.80	1372.14	1366.74	1366.76	1376	1369
	17	1461.24	1458.52	1449.84	1466.62	1430	1484
	18	1433.24	1439.40	1443.76	1442.54	1461	1464
	19	1451.88	1452.20	1453.34	1452.38	1463	1435
	20	1494.86	1493.34	1494.06	1492.10	1484	1480
	21	1383.84	1386.74	1385.06	1382.06	1380	1405
	22	1376.74	1384.48	1379.54	1380.50	1378	1360
	23	1508.12	1518.68	1514.92	1516.08	1496	1442
	24	1413.28	1412.04	1416.04	1420.50	1399	1391
	25	1384.22	1388.38	1386.38	1381.34	1365	1392
	26	1349.26	1355.22	1343.04	1352.66	1358	1331
	27	1506.58	1499.20	1492.54	1504.72	1535	1531
	28	1445.00	1442.72	1444.58	1442.54	1442	1440
	29	1473.20	1480.58	1482.34	1472.62	1465	1504
	30	1366.72	1373.70	1374.86	1370.62	1341	1378
Méd		1426.07	1427.41	1426.40	1426.75	1433.07	1425.77
Min		1343.06	340.52	1340.08	1343.68	1341	1331
Max		1612.42	1612.80	1613.70	1613.46	1616	1595
Amp		269.36	272.28	273.62	269.78	275	264
DP		63.67	64.13	64.06	64.26	68.12	67.40

Quadro 8.28 - Distâncias no roteamento flexível

		Parcialmente (+1) (02:54:55.40)	Parcialmente (+2) (02:26:01.30)	Parcialmente (+3) (02:16:09.70)	Parcialmente (+6) (02:32:01.85)	ALVO (00:03:01.68)	AG (00:03:49.98)
Conjuntos de peças	1	1790.56	1538.10	1474.96	1351.56	1274	1197
	2	1850.34	1573.16	1513.96	1389.26	1248	1195
	3	1765.18	1490.36	1426.92	1314.88	1198	1084
	4	1708.10	1446.62	1392.56	1287.10	1282	1117
	5	1765.34	1515.56	1442.94	1335.68	1233	1144
	6	1750.92	1495.52	1438.12	1322.64	1203	1165
	7	1789.24	1532.20	1469.80	1346.44	1276	1173
	8	1800.94	1535.98	1470.10	1353.50	1234	1193
	9	1715.18	1476.44	1410.36	1301.44	1249	1091
	10	1790.38	1520.18	1460.44	1344.56	1297	1167
	11	1847.48	1572.06	1505.36	1384.62	1311	1157
	12	1720.98	1470.16	1402.16	1290.20	1192	1117
	13	1719.64	1459.02	1384.82	1283.76	1175	1140
	14	1818.88	1550.30	1473.12	1373.14	1258	1165
	15	1647.76	1389.22	1327.12	1218.14	1147	992
	16	1774.58	1506.82	1448.70	1334.88	1248	1140
	17	1857.24	1580.72	1522.00	1397.74	1297	1191
	18	1822.20	1554.60	1482.92	1364.90	1233	1181
	19	1749.90	1491.14	1421.38	1316.22	1286	1113
	20	1828.02	1568.12	1497.86	1374.64	1232	1104
	21	1795.62	1521.26	1452.32	1336.52	1245	1129
	22	1785.38	1524.88	1457.16	1349.96	1290	1171
	23	1859.78	1580.46	1511.54	1387.14	1269	1206
	24	1807.84	1549.46	1481.66	1356.24	1292	1191
	25	1698.32	1442.32	1374.18	1265.88	1146	1068
	26	1721.06	1461.70	1393.52	1280.42	1195	1116
	27	1776.36	1514.82	1443.12	1338.52	1284	1120
	28	1844.92	1568.46	1508.40	1385.58	1321	1220
	29	1742.44	1489.60	1432.36	1318.28	1195	1120
	30	1794.32	1545.36	1467.12	1354.12	1240	1192
Méd		1777.96	1515.49	1449.57	1335.27	1245.00	1145.30
Min		1647.76	1389.22	1327.12	1218.14	1146	992
Max		1859.78	1580.72	1522.00	1397.74	1321	1220
Amp		212.02	191.50	194.88	179.60	175	228
DP		52.94	47.27	46.86	41.97	46.84	49.17

8.9 Formação espontânea de células fractais

Analisando os resultados obtidos pelo algoritmo genético nos arranjos físicos equilibrados observou-se a formação espontânea de células fractais (cada célula possui uma máquina de cada processo). A Figura 8.15 mostra o arranjo físico pequeno e duas formas de divisão fractal enquanto a Figura 8.16 mostra o arranjo físico médio com três formas de divisão celular. Para o caso do arranjo físico grande (Figura 8.17) apenas uma forma de divisão celular foi encontrada. Nesses três casos nota-se a existência de alguma forma de simetria (na forma geral das células e em suas posições no arranjo físico).

Figura 8.15 - AFEP maximamente distribuído (AG)

Figura 8.16 - AFEM maximamente distribuído (AG)

6.01	5.01	4.01	3.01	1.02	4.02	2.02	7.02	6.01	5.01	4.01	3.01	1.02	4.02	2.02	7.02
1.01	7.01	2.01	8.01	6.02	5.02	8.02	3.02	1.01	7.01	2.01	8.01	6.02	5.02	8.02	3.02
3.03	8.03	5.03	1.03	7.04	2.04	4.04	6.04	3.03	8.03	5.03	1.03	7.04	2.04	4.04	6.04
4.03	6.03	7.03	2.03	5.04	3.04	1.04	8.04	4.03	6.03	7.03	2.03	5.04	3.04	1.04	8.04
2.05	1.05	3.05	4.05	6.06	8.06	7.06	5.06	2.05	1.05	3.05	4.05	6.06	8.06	7.06	5.06
5.05	7.05	6.05	8.05	1.06	4.06	3.06	2.06	5.05	7.05	6.05	8.05	1.06	4.06	3.06	2.06
8.07	3.07	1.07	2.07	7.08	6.08	5.08	4.08	8.07	3.07	1.07	2.07	7.08	6.08	5.08	4.08
6.07	4.07	7.07	5.07	3.08	2.08	8.08	1.08	6.07	4.07	7.07	5.07	3.08	2.08	8.08	1.08
2.09	5.09	6.09	4.09	1.10	5.10	3.10	7.10	2.09	5.09	6.09	4.09	1.10	5.10	3.10	7.10
1.09	3.09	8.09	7.09	2.10	8.10	4.10	6.10	1.09	3.09	8.09	7.09	2.10	8.10	4.10	6.10

Figura 8.17 - AFEG maximamente distribuído (AG)

A Figura 8.18 mostra o arranjo físico maximamente distribuído usado na avaliação da influência da divisão dos departamentos. O mesmo efeito de formação de células fractais simétricas foi verificado em mais de uma forma.

3.01	4.01	2.01	5.02	3.02	1.02	3.01	4.01	2.01	5.02	3.02	1.02
1.01	5.01	6.01	4.02	2.02	6.02	1.01	5.01	6.01	4.02	2.02	6.02
6.03	2.03	1.03	3.04	5.04	4.04	6.03	2.03	1.03	3.04	5.04	4.04
4.03	3.03	5.03	2.04	6.04	1.04	4.03	3.03	5.03	2.04	6.04	1.04
1.05	6.05	4.05	1.06	3.06	5.06	1.05	6.05	4.05	1.06	3.06	5.06
2.05	5.05	3.05	6.06	4.06	2.06	2.05	5.05	3.05	6.06	4.06	2.06

3.01	4.01	2.01	5.02	3.02	1.02	3.01	4.01	2.01	5.02	3.02	1.02
1.01	5.01	6.01	4.02	2.02	6.02	1.01	5.01	6.01	4.02	2.02	6.02
6.03	2.03	1.03	3.04	5.04	4.04	6.03	2.03	1.03	3.04	5.04	4.04
4.03	3.03	5.03	2.04	6.04	1.04	4.03	3.03	5.03	2.04	6.04	1.04
1.05	6.05	4.05	1.06	3.06	5.06	1.05	6.05	4.05	1.06	3.06	5.06
2.05	5.05	3.05	6.06	4.06	2.06	2.05	5.05	3.05	6.06	4.06	2.06

Figura 8.18 - Arranjo físico maximamente distribuído

Como a formação de células fractais simétricas não era esperada foram elaborados outros 12 arranjos físicos equilibrados para observar se foi apenas

coincidência ou se esse comportamento é realmente característico do procedimento de maximização da distribuição.

8.9.1 Arranjos físicos 4x4

A Figura 8.19 mostra um arranjo físico equilibrado maximamente distribuído formado por 2 processos com 8 máquinas. Arranjos físicos formados por apenas 2 processos dispensam o uso do algoritmo genético pois a melhor configuração sempre será a do tipo “tabuleiro de xadrez”. Essa distribuição leva a um grau de distribuição igual a 1 e apresenta duas formas de divisão celular simétricas: uma horizontal e outra vertical. Na Figura 8.20 bem como na Figura 8.21 há também células fractais com mais de uma forma simétrica.

1.01	2.01	1.02	2.02
2.03	1.03	2.04	1.04
1.05	2.05	1.06	2.06
2.07	1.07	2.08	1.08

1.01	2.01	1.02	2.02
2.03	1.03	2.04	1.04
1.05	2.05	1.06	2.06
2.07	1.07	2.08	1.08

1.01	2.01	1.02	2.02
2.03	1.03	2.04	1.04
1.05	2.05	1.06	2.06
2.07	1.07	2.08	1.08

Figura 8.19 - 2 processos com 8 máquinas (GDD= 1)

1.01	4.01	2.02	3.02
2.01	3.01	1.02	4.02
4.03	1.03	3.04	2.04
3.03	2.03	4.04	1.04

1.01	4.01	2.02	3.02
2.01	3.01	1.02	4.02
4.03	1.03	3.04	2.04
3.03	2.03	4.04	1.04

1.01	4.01	2.02	3.02
2.01	3.01	1.02	4.02
4.03	1.03	3.04	2.04
3.03	2.03	4.04	1.04

1.01	4.01	2.02	3.02
2.01	3.01	1.02	4.02
4.03	1.03	3.04	2.04
3.03	2.03	4.04	1.04

Figura 8.20 - 4 processos com 4 máquinas (GDD= 3.25)

6.01	8.01	3.02	5.01	6.01	8.01	3.02	5.01	6.01	8.01	3.02	5.01
7.01	4.02	2.01	1.02	7.01	4.02	2.01	1.02	7.01	4.02	2.01	1.02
2.02	1.01	7.02	4.01	2.02	1.01	7.02	4.01	2.02	1.01	7.02	4.01
3.01	5.02	6.02	8.02	3.01	5.02	6.02	8.02	3.01	5.02	6.02	8.02

Figura 8.21 - 8 processos com 2 máquinas (GDD= 11.75)

8.9.2 Arranjos físicos 6x6

Quatro arranjos físicos 6x6 (Figura 8.22, Figura 8.23, Figura 8.24 e Figura 8.25) também mostram células fractais com formas simétricas.

1.01	2.01	1.02	2.02	1.03	2.03	1.01	2.01	1.02	2.02	1.03	2.03	1.01	2.01	1.02	2.02	1.03	2.03
2.04	1.04	2.05	1.05	2.06	1.06	2.04	1.04	2.05	1.05	2.06	1.06	2.04	1.04	2.05	1.05	2.06	1.06
1.07	2.07	1.08	2.08	1.09	2.09	1.07	2.07	1.08	2.08	1.09	2.09	1.07	2.07	1.08	2.08	1.09	2.09
2.10	1.10	2.11	1.11	2.12	1.12	2.10	1.10	2.11	1.11	2.12	1.12	2.10	1.10	2.11	1.11	2.12	1.12
1.13	2.13	1.14	2.14	1.14	2.15	1.13	2.13	1.14	2.14	1.14	2.15	1.13	2.13	1.14	2.14	1.14	2.15
2.16	1.16	2.17	1.17	2.18	1.18	2.16	1.16	2.17	1.17	2.18	1.18	2.16	1.16	2.17	1.17	2.18	1.18

Figura 8.22 - 2 processos com 18 máquinas (GDD= 1)

1.02	2.01	3.02	2.02	1.03	4.03	1.02	2.01	3.02	2.02	1.03	4.03	1.02	2.01	3.02	2.02	1.03	4.03
3.01	4.01	1.01	4.02	3.03	2.03	3.01	4.01	1.01	4.02	3.03	2.03	3.01	4.01	1.01	4.02	3.03	2.03
2.04	1.04	2.05	3.05	4.06	1.06	2.04	1.04	2.05	3.05	4.06	1.06	2.04	1.04	2.05	3.05	4.06	1.06
4.04	3.04	4.05	1.05	2.06	3.06	4.04	3.04	4.05	1.05	2.06	3.06	4.04	3.04	4.05	1.05	2.06	3.06
1.07	2.07	3.08	2.08	1.09	4.09	1.07	2.07	3.08	2.08	1.09	4.09	1.07	2.07	3.08	2.08	1.09	4.09
3.07	4.07	1.08	4.08	3.09	2.09	3.07	4.07	1.08	4.08	3.09	2.09	3.07	4.07	1.08	4.08	3.09	2.09

1.02	2.01	3.02	2.02	1.03	4.03	1.02	2.01	3.02	2.02	1.03	4.03	1.02	2.01	3.02	2.02	1.03	4.03
3.01	4.01	1.01	4.02	3.03	2.03	3.01	4.01	1.01	4.02	3.03	2.03	3.01	4.01	1.01	4.02	3.03	2.03
2.04	1.04	2.05	3.05	4.06	1.06	2.04	1.04	2.05	3.05	4.06	1.06	2.04	1.04	2.05	3.05	4.06	1.06
4.04	3.04	4.05	1.05	2.06	3.06	4.04	3.04	4.05	1.05	2.06	3.06	4.04	3.04	4.05	1.05	2.06	3.06
1.07	2.07	3.08	2.08	1.09	4.09	1.07	2.07	3.08	2.08	1.09	4.09	1.07	2.07	3.08	2.08	1.09	4.09
3.07	4.07	1.08	4.08	3.09	2.09	3.07	4.07	1.08	4.08	3.09	2.09	3.07	4.07	1.08	4.08	3.09	2.09

Figura 8.23 - 4 processos com 9 máquinas (GDD= 3.166667)

Figura 8.24 - 9 processos com 4 máquinas (GDD= 13.4444)

Figura 8.25 - 18 processos com 2 máquinas (GDD= 42.38889)

8.9.3 Arranjos físicos 6x8

Os últimos cinco arranjos físicos foram elaborados na dimensão 6x8 e estão apresentados na Figura 8.26, Figura 8.27, Figura 8.28, Figura 8.29 e Figura 8.30. Em todos os casos foi possível identificar células fractais simétricas (ou parcialmente simétricas).

1.01	2.01	1.02	2.01	1.03	2.03	1.04	2.04
2.05	1.05	2.06	1.06	2.07	1.07	2.08	1.08
1.09	2.09	1.10	2.10	1.11	2.11	1.12	2.12
2.13	1.13	2.14	1.14	2.15	1.15	2.16	1.16
1.17	2.17	1.18	2.18	1.19	2.19	1.20	2.20
2.21	1.21	2.22	1.22	2.23	1.23	2.24	1.24

1.01	2.01	1.02	2.01	1.03	2.03	1.04	2.04
2.05	1.05	2.06	1.06	2.07	1.07	2.08	1.08
1.09	2.09	1.10	2.10	1.11	2.11	1.12	2.12
2.13	1.13	2.14	1.14	2.15	1.15	2.16	1.16
1.17	2.17	1.18	2.18	1.19	2.19	1.20	2.20
2.21	1.21	2.22	1.22	2.23	1.23	2.24	1.24

1.01	2.01	1.02	2.01	1.03	2.03	1.04	2.04
2.05	1.05	2.06	1.06	2.07	1.07	2.08	1.08
1.09	2.09	1.10	2.10	1.11	2.11	1.12	2.12
2.13	1.13	2.14	1.14	2.15	1.15	2.16	1.16
1.17	2.17	1.18	2.18	1.19	2.19	1.20	2.20
2.21	1.21	2.22	1.22	2.23	1.23	2.24	1.24

Figura 8.26 - 2 processos com 24 máquinas (GDD= 1)

Figura 8.27 - 4 processos com 12 máquinas (GDD= 3.08333)

Figura 8.28 - 6 processos com 8 máquinas (GDD= 6.583333)

Figura 8.29 - 12 processos com 4 máquinas (GDD= 20.97917)

Figura 8.30 - 24 processos com 2 máquinas (GDD= 66.16667)

8.9.4 Formação de células em arranjos físicos desequilibrados

A maximização da distribuição dos arranjos físicos desequilibrados também leva à formação de células, porém diferentes entre si devido ao fato de alguns processos possuírem número ímpar de máquinas. Normalmente um arranjo físico nesta condição pode ser dividido em dois, como é o caso dos três arranjos físicos desequilibrados adotados.

A Figura 8.31 mostra as duas células formadas no arranjo físico pequeno. Dos 6 processos apenas 2 possuíam número de máquinas par (1 e 2) que foram divididos em duas partes.

5.03	4.01	6.03	6.05	5.05
3.03	2.01	5.02	1.01	3.02
6.04	1.02	3.01	2.02	4.02
5.01	4.03	6.02	5.04	6.01

5.03	4.01	6.03	6.05	5.05
3.03	2.01	5.02	1.01	3.02
6.04	1.02	3.01	2.02	4.02
5.01	4.03	6.02	5.04	6.01

Figura 8.31 - AFDP maximamente distribuído (AG)

O arranjo físico médio (Figura 8.32) tem 5 processos com apenas uma máquina. Neste caso as duas células são mais distintas uma da outra. Todos os processos com máquinas pares foram divididos em duas partes.

15.01	15.03	12.01	14.01	13.02	15.05	14.04	15.07
14.06	9.01	10.01	11.01	7.01	8.02	12.03	14.05
13.04	6.01	5.01	1.01	2.01	9.02	10.02	13.01
12.02	7.02	8.01	3.01	4.01	6.02	11.02	15.04
14.03	11.03	15.02	13.03	12.04	14.02	13.05	15.06

15.01	15.03	12.01	14.01	13.02	15.05	14.04	15.07
14.06	9.01	10.01	11.01	7.01	8.02	12.03	14.05
13.04	6.01	5.01	1.01	2.01	9.02	10.02	13.01
12.02	7.02	8.01	3.01	4.01	6.02	11.02	15.04
14.03	11.03	15.02	13.03	12.04	14.02	13.05	15.06

Figura 8.32 - AFDM maximamente distribuído (AG)

A Figura 8.33 mostra as duas células do arranjo físico grande.

18.05	19.01	20.06	15.01	16.05	17.03	18.01	19.05
13.02	14.02	11.04	12.02	7.02	10.02	13.04	20.01
17.01	9.01	3.02	2.01	5.01	6.03	9.03	14.05
16.04	10.01	8.02	1.02	4.01	19.03	15.03	17.05
20.05	6.02	15.02	18.03	14.01	12.01	11.01	16.03
19.02	12.03	7.01	13.01	20.02	10.03	8.01	18.02
11.03	5.02	16.02	17.04	3.01	9.04	7.03	19.06
14.04	9.02	4.02	2.02	1.01	6.01	5.03	13.03
18.06	15.04	8.03	10.04	12.04	11.02	15.05	20.04
17.02	20.03	13.05	19.04	18.04	16.01	14.03	17.06

18.05	19.01	20.06	15.01	16.05	17.03	18.01	19.05
13.02	14.02	11.04	12.02	7.02	10.02	13.04	20.01
17.01	9.01	3.02	2.01	5.01	6.03	9.03	14.05
16.04	10.01	8.02	1.02	4.01	19.03	15.03	17.05
20.05	6.02	15.02	18.03	14.01	12.01	11.01	16.03
19.02	12.03	7.01	13.01	20.02	10.03	8.01	18.02
11.03	5.02	16.02	17.04	3.01	9.04	7.03	19.06
14.04	9.02	4.02	2.02	1.01	6.01	5.03	13.03
18.06	15.04	8.03	10.04	12.04	11.02	15.05	20.04
17.02	20.03	13.05	19.04	18.04	16.01	14.03	17.06

Figura 8.33 - AFDG maximamente distribuído (AG)

Caso todos os processos possuam número de máquinas par a similaridade existirá e o número de células será igual ao número de máquinas do menor departamento. O arranjo físico da Figura 8.34 possui 2 processos com 2 máquinas, 2 processos com 4 máquinas e 2 processos com 6 máquinas. A maximização gerou duas células que podem ser observadas dividindo o leiaute nos sentidos horizontal ou vertical.

6.01	4.03	5.05	6.03	3.01	5.03
3.03	1.01	6.05	5.01	2.01	4.01
5.04	2.02	3.02	4.02	1.02	6.02
6.06	4.04	5.06	6.04	3.04	5.02

6.01	4.03	5.05	6.03	3.01	5.03
3.03	1.01	6.05	5.01	2.01	4.01
5.04	2.02	3.02	4.02	1.02	6.02
6.06	4.04	5.06	6.04	3.04	5.02

6.01	4.03	5.05	6.03	3.01	5.03
3.03	1.01	6.05	5.01	2.01	4.01
5.04	2.02	3.02	4.02	1.02	6.02
6.06	4.04	5.06	6.04	3.04	5.02

Figura 8.34 - Arranjo físico 4x6 (GDD= 6.972221)

O arranjo físico da Figura 8.35 possui 7 processos sendo 3 deles com 4 máquinas, 3 com 8 máquinas e 1 com 12 máquinas. Foi possível identificar 4 células em cinco configurações, além da divisão horizontal e vertical.

7.01	5.01	4.01	7.02	7.06	6.06	5.06	7.05
4.05	6.01	2.01	1.01	4.06	3.02	2.02	4.02
7.03	3.01	5.05	6.05	5.02	7.04	1.02	6.02
6.03	2.03	4.07	7.07	6.08	4.04	3.04	7.10
5.03	1.03	3.03	5.07	2.04	1.04	6.04	5.08
7.09	4.03	7.08	6.07	7.11	5.04	4.08	7.12

7.01	5.01	4.01	7.02	7.06	6.06	5.06	7.05
4.05	6.01	2.01	1.01	4.06	3.02	2.02	4.02
7.03	3.01	5.05	6.05	5.02	7.04	1.02	6.02
6.03	2.03	4.07	7.07	6.08	4.04	3.04	7.10
5.03	1.03	3.03	5.07	2.04	1.04	6.04	5.08
7.09	4.03	7.08	6.07	7.11	5.04	4.08	7.12

7.01	5.01	4.01	7.02	7.06	6.06	5.06	7.05
4.05	6.01	2.01	1.01	4.06	3.02	2.02	4.02
7.03	3.01	5.05	6.05	5.02	7.04	1.02	6.02
6.03	2.03	4.07	7.07	6.08	4.04	3.04	7.10
5.03	1.03	3.03	5.07	2.04	1.04	6.04	5.08
7.09	4.03	7.08	6.07	7.11	5.04	4.08	7.12

7.01	5.01	4.01	7.02	7.06	6.06	5.06	7.05
4.05	6.01	2.01	1.01	4.06	3.02	2.02	4.02
7.03	3.01	5.05	6.05	5.02	7.04	1.02	6.02
6.03	2.03	4.07	7.07	6.08	4.04	3.04	7.10
5.03	1.03	3.03	5.07	2.04	1.04	6.04	5.08
7.09	4.03	7.08	6.07	7.11	5.04	4.08	7.12

Figura 8.35 - Arranjo físico 6x8 (GDD= 9.916666)

7.01	5.01	4.01	7.02	7.06	6.06	5.06	7.05	7.01	5.01	4.01	7.02	7.06	6.06	5.06	7.05
4.05	6.01	2.01	1.01	4.06	3.02	2.02	4.02	4.05	6.01	2.01	1.01	4.06	3.02	2.02	4.02
7.03	3.01	5.05	6.05	5.02	7.04	1.02	6.02	7.03	3.01	5.05	6.05	5.02	7.04	1.02	6.02
6.03	2.03	4.07	7.07	6.08	4.04	3.04	7.10	6.03	2.03	4.07	7.07	6.08	4.04	3.04	7.10
5.03	1.03	3.03	5.07	2.04	1.04	6.04	5.08	5.03	1.03	3.03	5.07	2.04	1.04	6.04	5.08
7.09	4.03	7.08	6.07	7.11	5.04	4.08	7.12	7.09	4.03	7.08	6.07	7.11	5.04	4.08	7.12

7.01	5.01	4.01	7.02	7.06	6.06	5.06	7.05	7.01	5.01	4.01	7.02	7.06	6.06	5.06	7.05
4.05	6.01	2.01	1.01	4.06	3.02	2.02	4.02	4.05	6.01	2.01	1.01	4.06	3.02	2.02	4.02
7.03	3.01	5.05	6.05	5.02	7.04	1.02	6.02	7.03	3.01	5.05	6.05	5.02	7.04	1.02	6.02
6.03	2.03	4.07	7.07	6.08	4.04	3.04	7.10	6.03	2.03	4.07	7.07	6.08	4.04	3.04	7.10
5.03	1.03	3.03	5.07	2.04	1.04	6.04	5.08	5.03	1.03	3.03	5.07	2.04	1.04	6.04	5.08
7.09	4.03	7.08	6.07	7.11	5.04	4.08	7.12	7.09	4.03	7.08	6.07	7.11	5.04	4.08	7.12

7.01	5.01	4.01	7.02	7.06	6.06	5.06	7.05	7.01	5.01	4.01	7.02	7.06	6.06	5.06	7.05
4.05	6.01	2.01	1.01	4.06	3.02	2.02	4.02	4.05	6.01	2.01	1.01	4.06	3.02	2.02	4.02
7.03	3.01	5.05	6.05	5.02	7.04	1.02	6.02	7.03	3.01	5.05	6.05	5.02	7.04	1.02	6.02
6.03	2.03	4.07	7.07	6.08	4.04	3.04	7.10	6.03	2.03	4.07	7.07	6.08	4.04	3.04	7.10
5.03	1.03	3.03	5.07	2.04	1.04	6.04	5.08	5.03	1.03	3.03	5.07	2.04	1.04	6.04	5.08
7.09	4.03	7.08	6.07	7.11	5.04	4.08	7.12	7.09	4.03	7.08	6.07	7.11	5.04	4.08	7.12

Figura 8.36 - Arranjo físico 6x8 (GDD= 9.916666)

8.10 Considerações finais

Este capítulo apresentou os resultados obtidos nas simulações com arranjos físicos pequenos (4x5), médios (5x8) e grandes (10x8) tanto equilibrados quanto desequilibrados. Para cada situação foram apresentados os principais dados de entrada (arranjos físicos e peças) e os dados de saída (makespan e distância total percorrida). Também foram simulados cenários com departamentos que possuem o mesmo número de máquinas (6x6) para analisar a influência de sua divisão.

Além disso foram elaborados 12 novos arranjos físicos equilibrados em três diferentes tamanhos para observar a formação espontânea de células fractais simétricas bem como outros dois leiautes desequilibrados.

Não há garantia de que todos os arranjos físicos maximamente distribuídos apresentados estejam realmente maximizados. É possível que a execução do algoritmo genético por mais algumas dezenas de horas possa obter alguma melhoria em algum caso.

O capítulo seguinte irá analisar os resultados obtidos neste capítulo.

9 ANÁLISE DOS RESULTADOS

9.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são analisados os resultados obtidos nas simulações. Para cada caso são discutidas três variáveis: o grau de distribuição dos arranjos físicos, o tempo total consumido e a distância total percorrida.

Para a comparação do grau de distribuição foi usado um gráfico de linha e um quadro. O gráfico de linha permite observar rapidamente a diferença entre os valores médios obtidos em cada tipo de arranjo físico enquanto o quadro traz as diferenças percentuais entre todos os valores (redução percentual).

Como era de se esperar o tempo total consumido apresentou diferenças desprezíveis em relação aos diferentes tipos de arranjo físico. Sendo assim apenas são comparados os valores médios obtidos nos dois modos de roteamento.

Para as distâncias percorridas são apresentados três quadros e um gráfico. O primeiro quadro compara as diferenças percentuais no modo de roteamento rígido e o segundo no modo de roteamento flexível. O terceiro quadro mostra a melhoria percentual obtida pelo modo de roteamento flexível sobre o rígido em cada tipo de arranjo físico e seus valores são plotados em um gráfico de linha para permitir uma comparação visual rápida.

Para as três variáveis citadas a redução dos valores absolutos indica melhora nos resultados enquanto que nos quadros com comparações percentuais quanto maior o valor maior é a superioridade da configuração ou do modo de roteamento. As três variáveis são plotadas em um gráfico de linha, com valores percentuais relativos ao arranjo físico funcional.

O final do capítulo analisa os arranjos físicos equilibrados e a formação espontânea de células fractais simétricas.

9.2 Arranjos físicos desequilibrados pequenos

9.2.1 Grau de distribuição

O gráfico da Figura 9.1 mostra os valores médios do grau de distribuição obtidos pelos diferentes tipos de arranjos físicos, conforme os dados apresentados pela Tabela 8.2.

Figura 9.1 - Grau de distribuição médio (AFDP)

A Tabela 9.1 mostra as diferenças percentuais do grau de distribuição entre os diferentes tipos de arranjos físicos.

Tabela 9.1 - Redução percentual entre os graus de distribuição (AFDP)

		Para o arranjo físico			
		Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	16.239	22.525	36.105	42.623
	Parcialmente	-	7.504	23.718	31.499
	Aleatoriamente	-	-	17.529	25.942
	ALVO	-	-	-	10.201

9.2.2 Tempo total consumido

O roteamento rígido obteve valor médio de 2706.39 (Quadro 8.1) enquanto o flexível obteve 2589.87 (Quadro 8.3), representando uma redução de 4.31% no tempo total de execução das peças. Para verificar se essa

diferença é ou não significativa será usado o Teste de Hipóteses. A população 1 é composta pelos 150 valores do Quadro 8.1 e a população 2 os dados do Quadro 8.3 como População 2. O Quadro 9.1 resume os dados.

Quadro 9.1 - Dados para o teste de hipóteses

População 1		População 2	
Número de elementos	150	Número de elementos:	150
Valor mínimo	2349	Valor mínimo	2269
Valor máximo	3076	Valor máximo	2848
Amplitude	727	Amplitude	579
Valor médio	2706.394	Valor médio	2589.866
Desvio padrão	164.0439	Desvio padrão	149.2431

O teste de hipótese irá verificar se as médias podem ser consideradas iguais (hipótese nula) ou se a média da população 1 é maior que a da população 2. Tem-se:

Hipótese nula $H_0: \mu_1 = \mu_2$

Hipótese alternativa $H_a: \mu_1 > \mu_2$

Adotando o nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$) tem-se como valor crítico $Z_{\alpha} = 1,645$. Isso leva a uma estatística de teste $Z = 6,435266$ que faz com que a hipótese nula deva ser rejeitada, como mostra a Figura 9.2. Essa figura mostra que a adoção dos níveis de significância de 1% ou 10% não influenciaria o resultado, ou seja, a diferença é estatisticamente significativa.

Figura 9.2 - Gráfico referente ao teste de hipótese

9.2.3 Distância total percorrida

As diferenças percentuais do roteamento rígido são apresentadas pela Tabela 9.2 e a do flexível pela Tabela 9.3, conforme os valores do Quadro 8.2 e Quadro 8.4. Observa-se que nas duas tabelas os valores têm a mesma ordem de grandeza apesar dos valores absolutos serem distintos.

Tabela 9.2 - Diferença percentual entre distâncias (AFDP - RR)

		Para o arranjo físico			
		Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	10.623	17.328	24.654	31.387
	Parcialmente	-	7.502	15.699	23.232
	Aleatoriamente	-	-	8.862	17.006
	ALVO	-	-	-	8.936

Tabela 9.3 - Diferença percentual entre distâncias (AFDP - RF)

		Para o arranjo físico			
		Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	8.930	16.366	25.321	30.668
	Parcialmente	-	8.166	17.998	23.870
	Aleatoriamente	-	-	10.707	17.101
	ALVO	-	-	-	7.160

A Tabela 9.4 apresenta os valores médios absolutos da distância total percorrida pelas peças nos cinco tipos de arranjos físicos bem como a diferença percentual entre esses valores (testes de hipótese mostraram que os valores são estatisticamente relevantes).

Tabela 9.4 - Redução percentual da RF sobre a RR (AFDP)

		Tipo de arranjo físico				
		Funcional	Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Média rígida		1491.70	1333.24	1233.22	1123.93	1023.50
Média flexível		1355.84	1234.77	1133.94	1012.53	940.03
Redução percentual		9.11%	7.39%	8.05%	9.91%	8.16%

Os valores percentuais da Tabela 9.4 mostram que, em média, o roteamento flexível reduz cerca de 8.52% da distância total percorrida pelas peças, independente do tipo de arranjo físico.

A Figura 9.3 mostra graficamente que a melhoria obtida pelo roteamento flexível é aproximadamente constante.

Figura 9.3 - Comparação das distâncias percorridas (AFDP)

9.2.4 Comparação das variáveis

No gráfico da Figura 9.4 tem-se o grau de distribuição e as distâncias percorridas nos dois modos de roteamento em termos percentuais em relação ao arranjo físico funcional. Nota-se que a melhoria relativa obtida pelas diferentes configurações quase não sofrem influência do modo de roteamento.

Figura 9.4 - Comparação percentual (AFDP)

9.3 Arranjos físicos desequilibrados médios

9.3.1 Grau de distribuição

O gráfico da Figura 9.5 mostra os valores médios do grau de distribuição obtidos pelos diferentes tipos de arranjos físicos, conforme os dados apresentados pela Tabela 8.4.

Figura 9.5 - Grau de distribuição médio (AFDM)

A Tabela 9.5 mostra as diferenças percentuais do grau de distribuição entre os diferentes tipos de arranjos físicos.

Tabela 9.5 - Redução percentual entre os graus de distribuição (AFDM)

		Para o arranjo físico			
		Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	11.621	16.912	37.688	41.435
	Parcialmente	-	5.987	29.495	33.734
	Aleatoriamente	-	-	25.005	29.514
	ALVO	-	-	-	6.013

9.3.2 Tempo total consumido

O roteamento rígido obteve valor médio de 2424.17 enquanto o flexível obteve 2282.22, representando uma redução de 5.86% no tempo total de execução das peças (teste de hipótese no apêndice L).

9.3.3 Distância total percorrida

As diferenças percentuais do roteamento rígido estão na Tabela 9.6 e do flexível na Tabela 9.7, conforme os valores do Quadro 8.6 e Quadro 8.8. Observa-se que, novamente, as duas tabelas mostram valores com mesma ordem de grandeza apesar dos valores absolutos serem distintos.

Tabela 9.6 - Diferença percentual entre distâncias (AFDM - RR)

		Para o arranjo físico			
		Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	8.350	15.336	26.566	28.065
	Parcialmente	-	7.622	19.875	21.511
	Aleatoriamente	-	-	13.264	15.035
	ALVO	-	-	-	2.041

Tabela 9.7 - Diferença percentual entre distâncias (AFDM - RF)

		Para o arranjo físico			
		Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	8.677	15.557	27.532	28.977
	Parcialmente	-	7.534	20.647	22.230
	Aleatoriamente	-	-	14.181	15.893
	ALVO	-	-	-	1.994

A Tabela 9.8 apresenta os valores médios absolutos da distância total percorrida pelas peças nos cinco tipos de arranjos físicos bem como a diferença percentual entre esses valores.

Tabela 9.8 - Redução percentual da RF sobre a RR (AFDM)

Tipo de arranjo físico					
	Funcional	Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Média rígida	3455.34	3166.81	2925.43	2537.40	2485.60
Média flexível	3014.21	2752.68	2545.29	2184.33	2140.77
Redução percentual	12.77%	13.08%	12.99%	13.92%	13.87%

Os valores percentuais da Tabela 9.8 mostram que, em média, o roteamento flexível reduz cerca de 13.33% da distância total percorrida pelas peças, independente do tipo de arranjo físico.

A Figura 9.6 mostra graficamente que a melhoria obtida pelo roteamento flexível é aproximadamente constante.

Figura 9.6 - Comparação das distâncias percorridas (AFDM)

9.3.4 Comparação das variáveis

No gráfico da Figura 9.7 tem-se o grau de distribuição e as distâncias percorridas nos dois modos de roteamento em termos percentuais em relação ao arranjo físico funcional. Nota-se que a melhoria relativa obtida pelas diferentes configurações quase não sofrem influência do modo de roteamento.

Figura 9.7 - Comparação percentual (AFDM)

9.4 Arranjos físicos desequilibrados grandes

9.4.1 Grau de distribuição

O gráfico da Figura 9.8 mostra os valores médios do grau de distribuição obtidos pelos diferentes tipos de arranjos físicos, conforme os dados apresentados pela Tabela 8.6.

Figura 9.8 - Grau de distribuição médio (AFDG)

A Tabela 9.9 mostra as diferenças percentuais do grau de distribuição entre os diferentes tipos de arranjos físicos.

Tabela 9.9 - Redução percentual entre os graus de distribuição (AFDG)

		Para o arranjo físico			
		Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	16.071	30.001	45.821	50.012
	Parcialmente	-	16.598	35.447	40.440
	Aleatoriamente	-	-	22.601	28.587
	ALVO	-	-	-	7.735

9.4.2 Tempo total consumido

O roteamento rígido obteve valor médio de 1342.24 enquanto o flexível obteve 1265.28, representando uma redução de 5.73% no tempo total de execução das peças (teste de hipótese no apêndice L).

9.4.3 Distância total percorrida

As diferenças percentuais do roteamento rígido estão na Tabela 9.10 e do flexível na Tabela 9.11, conforme os valores do Quadro 8.10 e Quadro 8.12. Esses quadros também mostram valores com a mesma ordem de grandeza apesar dos valores absolutos serem diferentes.

Tabela 9.10 - Diferença percentual entre distâncias (AFDG - RR)

		Para o arranjo físico			
		Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	10.064	19.048	27.203	29.330
	Parcialmente	-	9.990	19.056	21.422
	Aleatoriamente	-	-	10.073	12.701
	ALVO	-	-	-	2.922

Tabela 9.11 - Diferença percentual entre distâncias (AFDG - RF)

		Para o arranjo físico			
		Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	10.076	19.326	27.831	31.016
	Parcialmente	-	10.286	19.745	23.286
	Aleatoriamente	-	-	10.543	14.490
	ALVO	-	-	-	4.413

A Tabela 9.12 apresenta os valores médios absolutos da distância total percorrida pelas peças nos cinco tipos de arranjos físicos bem como a diferença percentual entre esses valores.

Tabela 9.12 - Redução percentual da RF sobre a RR (AFDG)

Tipo de arranjo físico					
	Funcional	Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Média rígida	4571.14	4111.10	3700.41	3327.67	3230.43
Média flexível	3989.86	3587.83	3218.77	2879.43	2752.37
Redução percentual	12.72%	12.73%	13.02%	13.47%	14.80%

Os valores percentuais da Tabela 9.12 mostram que, em média, o roteamento flexível reduz cerca de 13.35% da distância total percorrida pelas peças, independente do tipo de arranjo físico.

A Figura 9.9 mostra graficamente que a melhoria obtida pelo roteamento flexível é aproximadamente constante.

Figura 9.9 - Comparação das distâncias percorridas (AFDG)

9.4.4 Comparação das variáveis

No gráfico da Figura 9.7 tem-se o grau de distribuição e as distâncias percorridas nos dois modos de roteamento em termos percentuais em relação ao arranjo físico funcional. Nota-se que a melhoria relativa obtida pelas diferentes configurações quase não sofrem influência do modo de roteamento.

Figura 9.10 - Comparação percentual (AFDG)

9.5 Arranjos físicos equilibrados pequenos

9.5.1 Grau de distribuição

O gráfico da Figura 9.11 mostra os valores médios do grau de distribuição obtidos pelos diferentes tipos de arranjos físicos, conforme os dados apresentados pela Tabela 8.7.

Figura 9.11 - Grau de distribuição médio (AFEP)

A Tabela 9.13 mostra as diferenças percentuais do grau de distribuição entre os diferentes tipos de arranjos físicos.

Tabela 9.13 - Redução percentual entre os graus de distribuição (AFEP)

		Para o arranjo físico			
		Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	17.244	27.100	34.444	45.556
	Parcialmente	-	11.909	20.784	34.211
	Aleatoriamente	-	-	10.075	25.316
	ALVO	-	-	-	16.949

9.5.2 Tempo total consumido

O roteamento rígido obteve valor médio de 2102.07 enquanto o flexível obteve 2036.72, representando uma redução de 3.11% no tempo total de execução das peças (teste de hipótese no apêndice L).

9.5.3 Distância total percorrida

As diferenças percentuais do roteamento rígido estão na Tabela 9.14 e a do flexível na Tabela 9.15, conforme os valores do Quadro 8.14 e Quadro 8.16. Observa-se que nas duas tabelas os valores têm a mesma ordem de grandeza apesar dos valores absolutos serem distintos.

Tabela 9.14 - Diferença percentual entre distâncias (AFEP - RR)

		Para o arranjo físico			
		Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	11.775	18.339	23.743	28.219
	Parcialmente	-	7.440	13.565	18.638
	Aleatoriamente	-	-	6.617	12.099
	ALVO	-	-	-	5.870

Tabela 9.15 - Diferença percentual entre distâncias (AFEP - RF)

		Para o arranjo físico			
		Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	11.578	18.821	23.682	28.508
	Parcialmente	-	8.191	13.689	19.147
	Aleatoriamente	-	-	5.988	11.934
	ALVO	-	-	-	6.324

A Tabela 9.16 apresenta os valores médios absolutos da distância total percorrida pelas peças nos cinco tipos de arranjos físicos bem como a diferença percentual entre esses valores.

Tabela 9.16 - Redução percentual da RF sobre a RR (AFEP)

Tipo de arranjo físico					
	Funcional	Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Média rígida	1337.36	1179.88	1092.10	1019.83	959.97
Média flexível	1184.47	1047.33	961.55	903.97	846.80
Redução percentual	11.43%	11.23%	11.95%	11.36%	11.79%

Os valores percentuais da Tabela 9.16 mostram que, em média, o roteamento flexível reduz cerca de 11.55% da distância total percorrida pelas peças, independente do tipo de arranjo físico.

A Figura 9.12 mostra graficamente que a melhoria obtida pelo roteamento flexível é aproximadamente constante.

Figura 9.12 - Comparação das distâncias percorridas (AFEP)

9.5.4 Comparação das variáveis

No gráfico da Figura 9.13 tem-se o grau de distribuição e as distâncias percorridas nos dois modos de roteamento em termos percentuais em relação ao arranjo físico funcional. Nota-se que a melhoria relativa obtida pelas diferentes configurações quase não sofrem influência do modo de roteamento.

Figura 9.13 - Comparação percentual (AFEP)

9.6 Arranjos físicos equilibrados médios

9.6.1 Grau de distribuição

O gráfico da Figura 9.14 mostra os valores médios do grau de distribuição obtidos pelos diferentes tipos de arranjos físicos, conforme os dados apresentados pela Tabela 8.8.

Figura 9.14 - Grau de distribuição médio (AFEM)

A Tabela 9.17 mostra as diferenças percentuais do grau de distribuição entre os diferentes tipos de arranjos físicos.

Tabela 9.17 - Redução percentual entre os graus de distribuição (AFEM)

		Para o arranjo físico			
		Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	21.397	44.959	51.653	61.157
	Parcialmente	-	29.976	38.492	50.584
	Aleatoriamente	-	-	12.162	29.429
	ALVO	-	-	-	19.658

9.6.2 Tempo total consumido

O roteamento rígido obteve valor médio de 1185.34 enquanto o flexível obteve 1145.44, representando uma redução de 3.37% no tempo total de execução das peças (teste de hipótese no apêndice L).

9.6.3 Distância total percorrida

As diferenças percentuais do roteamento rígido estão na Tabela 9.18 e do flexível na Tabela 9.19, conforme os valores do Quadro 8.18 e Quadro 8.20. Observa-se que, novamente, as duas tabelas mostram valores com mesma ordem de grandeza apesar dos valores absolutos serem distintos.

Tabela 9.18 - Diferença percentual entre distâncias (AFEM - RR)

		Para o arranjo físico			
		Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	16.543	31.695	36.975	42.716
	Parcialmente	-	18.156	24.482	31.361
	Aleatoriamente	-	-	7.730	16.134
	ALVO	-	-	-	9.108

Tabela 9.19 - Diferença percentual entre distâncias (ADEM - RF)

		Para o arranjo físico			
		Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	14.968	30.067	35.546	41.365
	Parcialmente	-	17.756	24.200	31.044
	Aleatoriamente	-	-	7.835	16.156
	ALVO	-	-	-	9.029

A Tabela 9.20 apresenta os valores médios absolutos da distância total percorrida pelas peças nos cinco tipos de arranjos físicos bem como a diferença percentual entre esses valores.

Tabela 9.20 - Redução percentual da RF sobre a RR (AFEM)

Tipo de arranjo físico					
	Funcional	Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Média rígida	1913.90	1597.29	1307.28	1206.23	1096.37
Média flexível	1658.80	1410.51	1160.055	1069.17	972.63
Redução percentual	13.33%	11.69%	11.26%	11.36%	11.29%

Os valores percentuais da Tabela 9.20 mostram que, em média, o roteamento flexível reduz cerca de 11.79% da distância total percorrida pelas peças, independente do tipo de arranjo físico.

A Figura 9.15 mostra graficamente que a melhoria obtida pelo roteamento flexível é aproximadamente constante.

Figura 9.15 - Comparação das distâncias percorridas (AFEM)

9.6.4 Comparação das variáveis

No gráfico da Figura 9.16 tem-se o grau de distribuição e as distâncias percorridas nos dois modos de roteamento em termos percentuais em relação ao arranjo físico funcional. Nota-se que a melhoria relativa obtida pelas diferentes configurações quase não sofrem influência do modo de roteamento.

Figura 9.16 - Comparação percentual (AFEM)

9.7 Arranjos físicos equilibrados grandes

9.7.1 Grau de distribuição

O gráfico da Figura 9.17 mostra os valores médios do grau de distribuição obtidos pelos diferentes tipos de arranjos físicos, conforme os dados apresentados pela Tabela 8.9.

Figura 9.17 - Grau de distribuição médio (AFEG)

A Tabela 9.21 mostra as diferenças percentuais do grau de distribuição entre os diferentes tipos de arranjos físicos.

Tabela 9.21 - Redução percentual entre os graus de distribuição (AFEG)

		Para o arranjo físico			
		Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	24.771	49.647	57.543	63.276
	Parcialmente	-	33.066	43.563	51.183
	Aleatoriamente	-	-	15.682	27.067
	ALVO	-	-	-	13.503

9.7.2 Tempo total consumido

O roteamento rígido obteve valor médio de 1058.60 enquanto o flexível obteve 1020.99, representando uma redução de 3.55% no tempo total de execução das peças (teste de hipótese no apêndice L).

9.7.3 Distância total percorrida

As diferenças percentuais do roteamento rígido estão na Tabela 9.22 e do flexível na Tabela 9.23, conforme os valores do Quadro 8.22 e Quadro 8.24. Esses quadros também mostram valores com a mesma ordem de grandeza apesar dos valores absolutos serem diferentes.

Tabela 9.22 - Diferença percentual entre distâncias (AFEG - RR)

		Para o arranjo físico			
		Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	17.453	34.185	41.055	44.418
	Parcialmente	-	20.270	28.592	32.666
	Aleatoriamente	-	-	10.438	15.548
	ALVO	-	-	-	5.706

Tabela 9.23 - Diferença percentual entre distâncias (AFEG - RF)

		Para o arranjo físico			
		Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	16.846	33.289	39.618	44.042
	Parcialmente	-	19.774	27.385	32.706
	Aleatoriamente	-	-	9.487	16.120
	ALVO	-	-	-	7.328

A Tabela 9.24 apresenta os valores médios absolutos da distância total percorrida pelas peças nos cinco tipos de arranjos físicos bem como a diferença percentual entre esses valores.

Tabela 9.24 - Redução percentual da RF sobre a RR (AFEG)

Tipo de arranjo físico					
	Funcional	Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Média rígida	3650.35	3013.24	2402.47	2151.70	2028.93
Média flexível	3105.44	2582.29	2071.67	1875.13	1737.73
Redução percentual	14.93%	14.30%	13.77%	12.85%	14.35%

Os valores percentuais da Tabela 9.24 mostram que, em média, o roteamento flexível reduz a distância total percorrida pelas peças em cerca de 14.04%, independente do tipo de arranjo físico.

A Figura 9.18 mostra graficamente que a melhoria obtida pelo roteamento flexível é aproximadamente constante.

Figura 9.18 - Comparação das distâncias percorridas (AFEG)

9.7.4 Comparação das variáveis

No gráfico da Figura 9.19 tem-se o grau de distribuição e as distâncias percorridas nos dois modos de roteamento em termos percentuais em relação ao arranjo físico funcional. Nota-se que a melhoria relativa obtida pelas diferentes configurações quase não sofrem influência do modo de roteamento.

Figura 9.19 - Comparação percentual (AFEG)

9.8 Influência da divisão dos departamentos

9.8.1 Grau de distribuição

O gráfico da Figura 9.20 mostra os valores médios do grau de distribuição obtidos pelos diferentes tipos de arranjos físicos, conforme os dados apresentados pela Tabela 8.10 (Div representa os arranjos físicos usados na avaliação da divisão dos departamentos).

Figura 9.20 - Grau de distribuição médio (Div)

A Tabela 9.25 mostra as diferenças percentuais do grau de distribuição entre os diferentes tipos de arranjos físicos.

Tabela 9.25 - Redução percentual entre os graus de distribuição (Div)

		Para o arranjo físico				
		Parcial (÷2)	Parcial (÷3)	Parcial (÷6)	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	23.042	27.595	38.220	44.697	54.546
	Parcial (÷2)	-	5.916	19.722	28.139	40.937
	Parcial (÷3)	-	-	14.674	23.620	37.222
	Parcial (÷6)	-	-	-	10.484	26.426
	ALVO	-	-	-	-	17.809

9.8.2 Tempo total consumido

O roteamento rígido obteve valor médio de 1467.94 enquanto o flexível obteve 1427.58, representando uma redução de 2.75% no tempo total de execução das peças (teste de hipótese no apêndice L).

9.8.3 Distância total percorrida

As diferenças percentuais do roteamento rígido estão na Tabela 9.26 e do flexível na Tabela 9.27, conforme os valores do Quadro 8.26 e Quadro 8.28. Esses quadros também mostram valores com a mesma ordem de grandeza apesar dos valores absolutos serem diferentes.

Tabela 9.26 - Diferença percentual entre distâncias (Div - RR)

		Para o arranjo físico				
		Parcial (÷2)	Parcial (÷3)	Parcial (÷6)	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	14.715	19.073	25.023	32.810	35.194
	Parcial (÷2)	-	5.110	12.087	21.217	24.013
	Parcial (÷3)	-	-	7.352	16.975	19.921
	Parcial (÷6)	-	-	-	10.386	13.566
	ALVO	-	-	-	-	3.548

Tabela 9.27 - Diferença percentual entre distâncias (Div - RF)

		Para o arranjo físico				
		Parcial (÷2)	Parcial (÷3)	Parcial (÷6)	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	14.762	18.470	24.899	29.976	35.583
	Parcial (÷2)	-	4.350	11.892	17.848	24.427
	Parcial (÷3)	-	-	7.885	14.112	20.990
	Parcial (÷6)	-	-	-	6.760	14.227
	ALVO	-	-	-	-	8.008

A Tabela 9.28 apresenta os valores médios absolutos da distância total percorrida pelas peças nos seis tipos de arranjos físicos bem como a diferença percentual entre esses valores.

Tabela 9.28 - Redução percentual da RF sobre a RR (Div)

	Tipo de arranjo físico					
	Funcional	Parcial (÷2)	Parcial (÷3)	Parcial (÷6)	ALVO	AG
Média rígida	2020.14	1722.88	1634.84	1514.64	1357.33	1309.17
Média flexível	1777.96	1515.49	1449.57	1335.27	1245.00	1145.30
Redução percentual	11.99%	12.04%	11.33%	11.84%	8.28%	12.52%

Os valores percentuais da Tabela 9.28 mostram que, em média, o roteamento flexível reduz cerca de 11.33% da distância total percorrida pelas peças, independente do tipo de arranjo físico.

A Figura 9.21 mostra graficamente que a melhoria obtida pelo roteamento flexível é aproximadamente constante.

Figura 9.21 - Comparação das distâncias percorridas (Div)

9.8.4 Comparação das variáveis

No gráfico da Figura 9.22 tem-se o grau de distribuição e as distâncias percorridas nos dois modos de roteamento em termos percentuais em relação ao arranjo físico funcional. Nota-se que a melhoria relativa obtida pelas diferentes configurações quase não sofrem influência do modo de roteamento.

Figura 9.22 - Comparação percentual (Div)

9.9 Comparação dos tempos

A Figura 9.23 mostra os valores de melhoria percentual do makespan obtida com o modo de roteamento flexível em relação ao rígido. Para os arranjos físicos desequilibrados o valor médio é de 5.3% enquanto que para os equilibrados é de 3.34%. Com relação aos arranjos físicos para a análise do efeito da divisão dos departamentos a melhoria foi de 2.75% (não foi plotado no gráfico).

Figura 9.23 - Melhoria percentual do makespan

Considerando todos os sete resultados poder-se-ia afirmar que, em média, o roteamento flexível reduz o makespan em 4.1%, porém, devido às diferenças encontradas, é mais prudente diferenciar a vantagem obtida quando os arranjos físicos são classificados como desequilibrados e equilibrados.

9.10 Comparação das distâncias percorridas

O gráfico da Figura 9.24 mostra os valores de melhoria percentual da distância percorrida obtida com o modo de roteamento flexível em relação ao rígido. Os valores mostram que cada tipo de arranjo físico possui um valor médio: AFDP= 8.52%, AFDM= 13.33%, AFDG= 13.35%, AFEP= 11.55%, AFEM= 11.79%, AFEG= 14.04% e Div= 11.33%. Considerando os arranjos físicos desequilibrados tem-se 11.73% como média e para os equilibrados 12.18% (junto com Div). Em função dos dados usados a média geral é 11.987%

Figura 9.24 - Melhoria percentual da distância percorrida

Dos 35 valores plotados apenas 3 se destacam de seus respectivos grupos: AG dos AFDG, Funcional dos AFEM e ALVO dos Div. Não foi possível descobrir a causa desses desvios.

A Figura 9.25 traz todas as curvas de variação percentual da distância total percorrida para os arranjos físicos desequilibrados (onde RR significa roteamento rígido e RF roteamento flexível). Nota-se que a variação é muito próxima para cada tipo de arranjo físico, independente do modo de roteamento adotado.

Figura 9.25 - Variação percentual das distâncias (AFD)

Frente a esse comportamento pode-se calcular a redução percentual média para cada tipo de arranjo físico com relação ao arranjo físico funcional, como mostra a Tabela 9.29.

Tabela 9.29 - Média das melhorias percentuais (AFD)

		Tipo de arranjo físico			
		Parcialmente	Aleatoriamente	ALVO	AG
Caso	AFDP RR	10.623	17.328	24.654	31.387
	AFDP RF	8.930	16.366	25.321	30.668
	AFDM RR	8.350	15.336	26.566	28.065
	AFDM RF	8.677	15.557	27.532	28.977
	AFDG RR	10.064	19.048	27.203	29.330
	AFDG RF	10.076	19.326	27.831	31.016
	Média	9.453	17.160	26.518	29.970

A Figura 9.26 traz todas as curvas de variação percentual da distância total percorrida para os arranjos físicos equilibrados (para os arranjos físicos usados na avaliação da desagregação dos departamentos adotou-se $\div 2$ como parcialmente e $\div 6$ como aleatoriamente). Como neste caso houve uma variação maior para cada tipo de arranjo físico não foi possível determinar um valor percentual médio de melhoria.

Figura 9.26 - Variação percentual das distâncias (AFE)

9.11 Arranjo físico equilibrado maximamente distribuído

9.11.1 Algoritmo Alvo

O objetivo do algoritmo ALVO foi gerar arranjos físicos maximamente distribuídos de forma rápida, sem a necessidade de auxílio de soluções externas de programação linear. Tratando-se de um procedimento heurístico não havia garantia de solução ótima, mas os resultados mostraram-se bastante satisfatório nos arranjos físicos com departamentos desequilibrados. Com departamentos equilibrados seu desempenho foi um pouco menor, tendendo a formar departamentos, principalmente no centro do leiaute. A Figura 9.27 permite comparar a melhoria percentual obtida pelo algoritmo genético sobre o algoritmo ALVO onde nota-se a diferença quando os departamento são equilibrados.

Porém, mais do que o valor do grau de distribuição, é importante comparar a diferença obtida na distância total percorrida pelas peças. O gráfico da Figura 9.28 mostra a diferença percentual obtida pelo algoritmo genético comparado ao ALVO nos casos estudados.

Figura 9.27 - Diferença percentual do GDD obtido pelo AG sobre o ALVO.

Nota-se que a vantagem máxima obtida pelo algoritmo genético foi de pouco mais de 9% para a distância enquanto que para o grau de distribuição foi de quase 18%.

Figura 9.28 - Diferença percentual da distância percorrida (AG sobre ALVO).

Apesar das desvantagens do algoritmo ALVO com relação a essas variáveis é importante ressaltar que sua principal característica é o reduzido tempo de obtenção de uma boa solução. Para o arranjo físico apresentado por Montreuil et al. (1993, p.25) contendo 1296 máquinas (36x36) consumiram-se apenas 0.29 segundos para obter o leiaute.

9.11.2 Algoritmo Genético

O algoritmo genético foi criado para gerar arranjos físicos maximamente distribuídos de modo a servirem de base de comparação para os resultados obtidos pelo algoritmo ALVO. O desempenho apresentado foi satisfatório, com exceção do tempo consumido pelo procedimento, tornando-o pouco viável para arranjos físicos grandes.

O grande consumo de tempo está relacionado ao cálculo do grau de distribuição. Para o exemplo do item anterior, que possui 1296 máquinas, o cálculo do GDD consumiu 1 minuto e 59 segundos. Supondo uma população de apenas 30 elementos pode-se calcular que seria consumido em torno de 1 hora de processamento por geração. Tomando por base apenas 1000 gerações chega-se então a aproximadamente 1000 horas (quase 42 dias). Além disso, sabe-se que é necessário executar um algoritmo genético várias vezes até se obter a solução desejada. Esse fato torna a relação custo/benefício do algoritmo ALVO interessante pois obtém uma boa solução com um custo computacional desprezível.

9.11.3 Formação de células fractais simétricas

A dificuldade na maximização da distribuição aumenta com as dimensões do arranjo físico. Enquanto que para arranjos físicos pequenos o valor mínimo para o grau de distribuição foi obtido com poucas execuções do algoritmo genético o mesmo não ocorreu com os arranjos físico grandes que necessitaram de dezenas de horas de processamento.

A princípio a formação de células fractais com alguma forma de simetria só foi observada nos arranjos físicos pequenos, médios e, eventualmente, em algumas configurações grandes. Nesse momento duas hipóteses foram levantadas para explicar esse comportamento:

- A formação de células fractais simétricas não é consequência da maximização da distribuição de arranjos físico equilibrados e acaba por ocorrer ocasionalmente;
- A formação de células fractais simétricas sempre ocorre quando um arranjo físico equilibrado é maximamente distribuído e não ocorreu por deficiência no algoritmo genético.

Para tentar verificar essas hipóteses foram realizadas algumas alterações no algoritmo genético desenvolvido inicialmente: a população máxima foi aumentada de 50 para 100 elementos e o número máximo de gerações passou de 2.000 para 10.000. Além disso foi acrescida uma opção para trabalhar especificamente com células fractais.

Essa opção recebe um arranjo físico semente específico e informações sobre a dimensão das células (número de linhas e colunas para calcular o número de células fractais do arranjo físico). Durante o processamento do algoritmo genético as mutações ocorrem somente dentro de uma célula fractal, selecionada aleatoriamente, em cada elemento da população.

A Figura 9.29 mostra três diferentes sementes fractais que podem ser fornecidas ao algoritmo genético para um arranjo físico 4x4 com 4 processos e 4 máquinas. Para a semente da esquerda as células possuem 2 linhas e 2 colunas. Para a semente do centro tem-se 4 linhas e 1 coluna e para a semente da direita 1 linha e 4 colunas.

Figura 9.29 - Três diferentes sementes fractais

Somente após essas alterações no algoritmo genético foi possível maximizar os arranjos físicos maiores e observar que estes também formavam células fractais. O sucesso nestas operações deveu-se principalmente ao aumento da população e do número de gerações apesar de, em alguns casos, o algoritmo genético fractal obter melhores resultados.

De uma maneira geral o algoritmo genético fractal aproxima-se mais rapidamente do valor mínimo do grau de distribuição, mas esse fato não impede que seja atingido um mínimo local. Sempre é necessário executar várias vezes o programa para tentar atingir o mínimo global.

Na Figura 9.30 estão dois gráficos de evolução do grau de distribuição. A linha em azul refere-se ao algoritmo genético fractal e a linha vermelha ao algoritmo genético normal. Nesta comparação o melhor resultado foi obtido pelo algoritmo genético normal apesar do algoritmo genético fractal aproximar-se do valor mais rapidamente no início do processamento.

Figura 9.30 - Comparação entre algoritmos genéticos

A Figura 9.31 mostra outra comparação entre os algoritmos genéticos e, neste caso, os dois atingiram o mesmo valor final. Novamente o algoritmo genético fractal mostra que pode evoluir mais rapidamente para o valor mínimo (o algoritmo trabalhou com 10.000 gerações nos dois casos mas a figura traz apenas as 2.500 gerações iniciais).

Figura 9.31 - Comparação entre algoritmos genéticos

As dificuldades de obtenção de uma solução ótima são oriundas do próprio processo de evolução. Como cita Simon (2000, p.125), a grande maioria das mutações é prejudicial aos indivíduos: “Esse é o paradoxo da evolução. A mutações são exigidas para levar à evolução de um organismo, mas ainda assim quase todas as mutações são inconseqüentes ou prejudiciais.”

9.11.4 Diferentes configurações para o mesmo grau de distribuição

Durante a elaboração dos arranjos físicos maximamente distribuídos usando o algoritmo genético foi possível perceber um efeito importante: apesar de atingir um mesmo valor para o grau de distribuição há leiautes que são melhores que outros. A Figura 9.32 mostra duas diferentes configurações com o mesmo valor para o grau de distribuição (GDD= 3.25). Enquanto a

distribuição da esquerda está completamente espalhada a distribuição da direita possui dois departamentos no centro do leiaute com duas máquinas cada um.

1.01	4.01	2.02	3.02
2.01	3.01	1.02	4.02
4.03	1.03	3.04	2.04
3.03	2.03	4.04	1.04

1.01	4.01	2.02	3.02
2.01	3.01	1.02	4.02
4.03	3.03	1.04	2.04
1.03	2.03	4.04	3.04

Figura 9.32 - Arranjos físicos com GDD= 3.25

Esse efeito ocorre pois o cálculo do grau de distribuição leva em conta a distância entre as máquinas de um processo e as máquinas dos demais processos, ignorando a distância entre máquinas de um mesmo processo. Isso fica ainda mais evidente quando o algoritmo genético trabalha em um arranjo físico com apenas dois tipos de máquinas. Ao invés de atingir a forma “tabuleiro de xadrez” outras configurações com GDD= 1 são atingidas (Figura 9.33).

2.02	1.01	2.03	1.06
2.06	2.05	2.04	1.05
1.02	1.04	2.07	1.08
2.01	1.03	2.08	1.07

1.05	2.06	2.07	1.02
2.08	2.05	2.04	2.01
2.02	1.03	1.06	1.07
1.01	1.04	2.03	1.08

2.07	1.08	2.03	1.02
1.05	2.05	2.04	1.01
2.01	1.04	2.08	2.06
2.02	1.03	1.06	1.07

Figura 9.33 - Arranjos físicos com GDD= 1

9.12 Considerações finais

Neste capítulo foram analisados os dados obtidos nas simulações. Todos os arranjos físicos exibiram comportamentos similares mostrando que a maximização da distribuição das máquinas é altamente vantajosa. Além disso observou-se um comportamento ainda não relatado na literatura: a formação espontânea de células fractais nos arranjos físicos maximamente distribuídos.

Os resultados comprovam a afirmação de Montreuil et al. (1993, p.20) que declararam que o sucesso do arranjo físico distribuído depende fortemente

do sistema de planejamento e controle da produção, bem como de Askin, Ciarallo e Lundgren (1999, p.977) que afirmaram que os avanços na tecnologia da informação fariam possível ter um sistema de controle em tempo real para definir uma tarefa à melhor máquina.

As modificações realizadas no algoritmo genético implementado inicialmente fizeram com que esta nova versão fosse denominada como algoritmo genético fractal. Sua implementação, juntamente com o aumento do número de elementos e de gerações, foram de grande importância para a obtenção das células fractais.

Apenas os testes de hipótese relacionados ao tempo total foram apresentados (apêndice L). Os testes de hipótese para as médias das distâncias percorridas não foram apresentados devido à grande diferença dos valores (todas as diferenças são estatisticamente relevantes e a apresentação dos resultados não traria nenhuma contribuição).

O capítulo seguinte apresenta as conclusões obtidas e as sugestões para futuros trabalhos.

10 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

10.1 Considerações iniciais

Este capítulo apresenta comentários sobre a pesquisa realizada juntamente com as conclusões que puderam ser obtidas a partir das simulações executadas. Também apresenta sugestões para futuros trabalhos.

10.2 Tempo total de execução

A redução do tempo total de execução de um conjunto de peças é o objetivo das técnicas de programação (scheduling) e, devido a isso, as melhorias obtidas foram pequenas e independentes da dimensão do arranjo físico. De uma maneira geral o roteamento flexível obteve uma redução média do makespan de 5.3% para os arranjos físicos desequilibrados e de 3.34% para os arranjos físicos equilibrados.

A melhoria conseguida pelo roteamento flexível se deve ao fato do procedimento analisar todas as possíveis seqüências de cada peça permitindo encontrar alocações que aproveitem melhor os tempos livres entre as operações já alocadas.

10.3 Distância total percorrida – modo de roteamento

O roteamento flexível mostrou-se vantajoso conseguindo, em média, reduzir a distância total percorrida em quase 12% com pequenas variações que dependem do tamanho do arranjo físico e de sua configuração (equilibrado e desequilibrado).

10.4 Distância total percorrida – tipo de arranjo físico

Com relação aos arranjos físicos desequilibrados foi possível determinar um valor médio de melhoria em relação ao arranjo físico funcional: o arranjo físico parcialmente distribuído reduz em 9.45% enquanto o aleatoriamente distribuído obtém 17.16%. Os leiautes maximamente distribuídos pelo algoritmo ALVO obtiveram média de 26.5% e os obtidos pelo algoritmo genético 30%.

Os arranjos físicos equilibrados apresentaram um comportamento diferente, impedindo o cálculo de um valor médio. A Tabela 10.1 mostra os valores mínimo e máximo que cada tipo de arranjo físico obteve de melhoria em relação ao arranjo físico funcional, bem como o caso onde o valor foi registrado.

Tabela 10.1 - Valores de melhoria para arranjos físicos equilibrados

Tipo de arranjo físico	Mínimo	Máximo
Parcialmente	11.58% (AFEP - RF)	17.45% (AFEG – RR)
Aleatoriamente	18.34% (AFEP – RR)	34.19% (AFEG – RR)
ALVO	23.68% (AFEP – RF)	41.06% (AFEG – RR)
AG	28.22% (AFEG – RR)	44.42% (AFEG – RR)

Mas, independente do arranjo físico ser classificado como equilibrado ou desequilibrado ou mesmo com relação à sua dimensão, em termos de desempenho os arranjos físicos têm a seguinte ordem (do pior para o melhor): funcional, parcialmente distribuído, aleatoriamente distribuído, maximamente distribuído (ALVO) e maximamente distribuído (AG).

Todos os dados mostram que o arranjo físico maximamente distribuído tem um desempenho sensivelmente superior ao demais mostrando que a desagregação completa dos departamentos é altamente vantajosa e independente do modo de roteamento, da dimensão e da configuração do arranjo físico. Essa constatação vai de encontro²⁸ com as conclusões apresentadas por Benjaafar e Sheikhzadeh (2000, p. 320) e Lahmar e

²⁸ Durante minha apresentação deixei claro que os meus resultados são contrários aos dos outros pesquisadores. Na fase de arguição um dos membros da banca examinadora criticou esta frase pois entendeu que, da forma como está escrito, os resultados seriam concordantes. O examinador se enganou devido a essa pegadinha gramatical: *de encontro a* traz idéia de oposição, colisão, contrariedade enquanto que *ao encontro de* traz idéia de concordância.

Benjaafar (2001, 2002a, 2002b e 2005) que indicam que a desagregação completa não se justifica pois a maior parte dos benefícios são obtidos quando os departamentos são divididos em dois.

Essa disparidade de resultados deve-se à forma de modelagem do problema e ao próprio objetivo a ser atingido. Nesses trabalhos citados o objetivo foi projetar um arranjo físico distribuído que atendesse a vários períodos permitindo, inclusive, uma reconfiguração do arranjo físico ao final de cada período. Além disso, a modelagem baseou-se em probabilidades para definir possíveis cenários e níveis de demanda. Os autores também assumiram que as informações de demanda de cada período estavam disponíveis no estágio inicial do projeto. Porém, segundo Baykasoglu (2003, p.2598), a obtenção de informações futuras e o uso de probabilidades em um ambiente altamente volátil ainda não se mostram como abordagens adequadas.

10.5 Algoritmo ALVO x Algoritmo Genético

O algoritmo ALVO mostrou-se altamente vantajoso para trabalhar com grandes arranjos físicos, obtendo rapidamente uma boa distribuição. O uso do algoritmo genético fica restrito a arranjos físicos pequenos e, mesmo assim, quando a disponibilidade de processamento for relativamente grande.

10.6 Formação espontânea de células

A formação espontânea de células pela maximização da distribuição foi uma ocorrência inesperada pois não há nenhuma referência a esse fato na literatura. Provavelmente essa característica poderá ser explorada para aperfeiçoar os procedimentos de maximização existentes ou gerar novas técnicas, seja para configurações equilibradas ou não.

Como visto anteriormente algumas das configurações apresentaram múltiplos modos de formações das células. Algumas configurações poderiam ser imaginadas fora do plano. Por exemplo, a Figura 10.1 apresenta mais duas configuração para o arranjo físico mostrado pela Figura 8.27 (que já apresentou outras sete configurações). A forma de divisão das células do arranjo físico da

esquerda forma um cilindro horizontal se a aresta superior for unida à aresta inferior. De forma similar, à direita, forma-se um cilindro vertical quando as arestas são sobrepostas.

4.01 1.01	2.02 3.02	4.03 1.03	2.04 3.04	4.01 1.01	2.02 3.02	4.03 1.03	2.04 3.04
2.01 3.01	4.02 1.02	2.03 3.03	4.04 1.04	2.01 3.01	4.02 1.02	2.03 3.03	4.04 1.04
1.05 4.05	3.06 2.06	1.07 4.07	3.08 2.08	1.05 4.05	3.06 2.06	1.07 4.07	3.08 2.08
3.05 2.05	1.06 4.06	3.07 2.07	1.08 4.08	3.05 2.05	1.06 4.06	3.07 2.07	1.08 4.08
4.09 1.09	2.10 3.10	4.11 1.11	2.12 3.12	4.09 1.09	2.10 3.10	4.11 1.11	2.12 3.12
2.09 3.09	4.10 1.10	2.11 3.11	4.12 1.12	2.09 3.09	4.10 1.10	2.11 3.11	4.12 1.12

Figura 10.1 - 4 processos com 12 máquinas (GDD= 3.08333)

10.7 Sugestões para desenvolvimentos futuros

Durante o desenvolvimento do trabalho algumas possibilidades se apresentaram e decisões foram tomadas de modo a manter o foco nos objetivos traçados. Principalmente próximo à conclusão da pesquisa algumas dessas possibilidades mostram-se como opções interessantes a serem estudadas:

- O algoritmo apresentado por Gondran, Minoux e Vajda (1984, p.55) para determinação de níveis em grafos sem laços, denominado Algoritmo 8 e apresentado em detalhes no Apêndice D, é o responsável pela determinação das seqüências possíveis na estrutura de precedência. Porém, como discutido no item 4.3, dependendo da estrutura, o algoritmo não calcula todas as seqüências possíveis. A alteração do algoritmo ou desenvolvimento de um outro que possa determinar realmente *todas* as seqüências é uma direção de pesquisa.
- Melhorar o desempenho computacional do cálculo do grau de distribuição. O código executável gerado pela linguagem C++ é reconhecidamente mais rápido do que o código executável gerado pelo Visual Basic (que foi utilizado na implementação dos algoritmos

desta pesquisa). Uma primeira possibilidade é a criação de uma DLL (*Dynamic Link Library* ou Biblioteca de Ligação Dinâmica) em C++ que realize o cálculo e retorne o resultado ao Visual Basic, porém, um desempenho superior seria obtido se todo o programa fosse reescrito em C++. Isto permite reduzir consideravelmente o tempo de execução do algoritmo genético.

- O item 9.11.2 mostrou que a forma de cálculo do GDD não leva em consideração o distanciamento de máquinas de mesmo tipo, permitindo que um arranjo físico não tão espalhado tenha o mesmo valor do grau de distribuição de outro completamente espalhado. A modificação do cálculo para levar em consideração esse fato permitirá que o GDD represente melhor os leiautes e, dessa forma, o algoritmo genético obterá melhores resultados.
- Criar uma nova forma de representação para os elementos de modo que o algoritmo genético possa ter a operação de cruzamento.
- Implementar alterações no algoritmo genético para que possa maximizar a distribuição de arranjos físicos levando em consideração células com formas previamente definidas. Apenas células retangulares e quadradas foram implementadas.
- Uma das dificuldades enfrentadas pelo algoritmo genético é deixar um mínimo local. Quando se atinge um determinado valor que se aproxima do ótimo global torna-se muito difícil escapar dele pois qualquer pequena alteração eleva o GDD. Na maioria das vezes é necessária uma mudança muito grande no arranjo físico para obter um GDD pouco menor. Mudanças radicais de sucesso ocorrem eventualmente pela ação das mutações. Essa característica impede que o resultado obtido pela execução do AG seja a semente de uma nova execução. Uma direção de pesquisa que pode auxiliar nesse ponto é permitir que várias sementes sejam fornecidas ao programa de modo a poder iniciar o processamento com uma boa diversidade genética.
- No algoritmo genético, após certo número de gerações, observa-se que os elementos que passam automaticamente para a geração

seguinte (elitismo) acabam tendo o mesmo valor do GDD e, possivelmente, tendo exatamente a mesma configuração, não contribuindo para a diversidade genética. A inclusão de uma rotina que compare os elementos sujeitos à regra de elitismo e evite duplicatas pode auxiliar na melhoria do desempenho do algoritmo genético.

- Para o roteamento das tarefas esta pesquisa considerou apenas a ordem de chegada das mesmas, de modo a não se envolver com a atividade de programação (scheduling). Podem-se pesquisar diferentes regras de prioridade das peças, ordenando-as segundo o número de operações ou a duração da soma do tempo das operações, por exemplo.
- Uma alteração que pode aproximar ainda mais a simulação da realidade é, durante a geração do conjunto de peças, sortear uma quantidade entre um mínimo e um máximo, bem como o tempo de preparação para cada operação. Assim, considerando que todas as peças iguais seriam roteadas em conjunto, seria incluído o tempo de preparação apenas nas operações da primeira peça de cada tipo em cada máquina.
- A formação espontânea de células que foi observada pode levar a novas técnicas de maximização. A proximidade entre os arranjos físicos maximamente distribuído e fractal também pode levar a novas frentes de pesquisa.
- É necessário implementar melhorias no algoritmo ALVO para melhorar seu desempenho quando os arranjos físicos são equilibrados.
- É difícil determinar qual a duração apropriada de uma rodada de simulação e o método mais simples consiste na realização de uma longa simulação que assegure que as condições iniciais de instabilidade não afetem os resultados. Sendo assim é interessante repetir os experimentos com grupos de peças maiores (1000 peças, por exemplo). Porém, para isso, é necessário contar com maior poder de processamento e garantias que eventuais quedas de

energia não interrompam o processamento que, em alguns casos poderão consumir algumas dezenas de horas.

10.8 Considerações finais

Todo projeto começa com o levantamento das necessidades e com a análise das condições existentes. No caso do projeto de arranjos físicos analisam-se os processos necessários, a periodicidade dos pedidos, o tamanho dos lotes, a similaridade das peças, os tempos de preparação, os tempos de processamento etc. É exatamente nesse primeiro passo que um ambiente volátil apresenta sua influência: não há dados que representem uma tendência que pode ser seguida.

Isso mostra que qualquer esforço no sentido de projetar um arranjo físico que se adapte às condições observadas por certo período pode ser desperdiçado, pois é altamente provável que o resultado mostrar-se-á inadequado posteriormente. Esses esforços devem ser aplicados no aproveitamento das características do arranjo físico maximamente distribuído.

Deve ficar claro que não basta simplesmente adotar essa distribuição de máquinas no chão de fábrica. Para que um empreendimento possa operar satisfatoriamente, quando imerso no ambiente turbulento, outros cuidados deverão ser tomados: uso de equipamentos com flexibilidade de operações, adoção de dispositivos de sujeição flexíveis, mão de obra qualificada, sistemas de programação, roteamento e controle adequados etc.

Na literatura ainda não há relatos da aplicação prática dos arranjos físicos distribuídos, em especial o maximamente distribuído, mesmo mostrando-se como uma opção altamente viável para atuar no tipo de ambiente para o qual foi proposto. Quem será o primeiro a adotá-lo e experimentá-lo?

REFERÊNCIAS

ADIL, G. K.; RAJAMANI, D.; STRONG, D. (1996). *Cell formation considering alternate routings*. International Journal of Production Research, v.34, n.5, p.1361-1380.

ALENCAR, H.; SANTOS, W. (2003). *Geometria diferencial das curvas planas*. Pós-Graduação do Instituto de Matemática da UFRJ.
Disponível em: <<http://www.pg.im.ufrj.br/Preprints/curso.pdf>>.
Acessado em: 08 Jun. 2005.

ASKIN, R. G.; CIARALLO, F. W.; LUNDGREN, N. H. (1999). *An empirical evaluation of holonic and fractal layouts*. International Journal of Production Research, v. 37, n. 5, p. 961-978.

BAKER, K. R. (1974). *Introduction to sequencing and scheduling*. John Wileys & Sons, Inc. New York.

BARRON, D. W. (1970). *Recursive techniques in programming*. Fourth impression. American Elsevier Publishing Company, Inc., New York.

BAYKASOGLU, A. (2003). *Capability-based distributed layout approach for virtual manufacturing cells*. International Journal of production Research, v. 41, n. 11, p. 2597-2618.

BAYKASOGLU, A; GINDY, N. N. Z. (2001). *A simulated annealing algorithm for dynamic layout problem*. Computers & Operations Research, v.28, p. 1403-1426.

_____. (2004). *Erratum to "A Simulated annealing algorithm for dynamic layout problem (2001)"* [Computers & Operations Research, v.28, p. 1367-1460]. Computers & Operations Research, v.31, p. 313-315.

BENJAAFAR, S. (1994). *Models for performance evaluation of flexibility in manufacturing systems*. International Journal of Production Research, v.32, n.6, p.1383-1402.

BENJAAFAR, S. (1995). *Design of flexible layouts for manufacturing systems*. IEEE - Engineering Management Conference, p.421-427.

BENJAAFAR, S.; HERAGU, S. S.; IRANI, S. A. (2002). *Next generation factory layouts: research challenges and recent progress*. Interfaces, v. 32, n. 6, p. 58-76, Nov-Dec.

BENJAAFAR, S.; RAMAKRISHNAN, R. (1996). *Modeling, measurement and evaluation of sequencing flexibility in manufacturing systems*. International Journal of Production Research, v.34, n.5, p. 1195-1220.

BENJAAFAR, S.; SHEIKHZADEH, M. (1996). *Design of flexible layouts for manufacturing systems*. Proceedings of the IEEE – International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, Apr.

BENJAAFAR, S., SHEIKHZADEH, M. (2000). *Design of flexible plant layouts*. IEE Transactions, n.32, p.309-322.

BLACK, J. T. (1991). *O projeto da fábrica com futuro*. Ed. Artes Médicas Sul Ltda., Porto Alegre, RS.

BLAZEWICZ, J.; ECKER, K. H.; PESCH, E.; SCHMIDT, G.; WEGLARZ, J. (1996). *Scheduling computer and manufacturing processes*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.

BORENSTEIN, D. (2000). *A direct acyclic graph representation of routing manufacturing flexibility*. European Journal of Operational Research, n.127, p.78-93.

BROWNE, J.; DUBOIS, D.; RATHMILL, K.; SETHI, S.; STECKE, K. E. (1984). *Classification of flexible manufacturing systems*. The FMS Magazine, p.114-117, Apr.

BUSSMANN, S.; MCFARLANE, D. C. (1999). *Rationales for holonic manufacturing control*. Second International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Leuven, Belgium, Sep. 22-24.

BUZZO, W. R.; MOCCELLIN, J. V. (2000). *Programação da produção em sistemas flow shop utilizando um método heurístico híbrido algoritmo genético-simulated annealing*. Revista Gestão & Produção, v.7, n.3, p.364-377, dez.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A. (1983). *Metodologia científica*. 3. ed., McGraw-Hill do Brasil, São Paulo.

CHANDRA, P.; TOMBAK, M. M. (1992). *Models for the evaluation of routing and machine flexibility*. European Journal of Operational Research, v.60, p.156-165.

CHEN, I. J.; CHUNG, C. H. (1996). *An examination of flexibility measurement and performance of flexible manufacturing systems*. International Journal of Production Research, v.34, n.2, p.379-394.

CHENG, F.; CHANG, C.; WU, S. (2004). *Development of holonic manufacturing execution systems*. Journal of Intelligent Manufacturing, n. 15, p. 253-267.

CHIZZOTTI, A. (1991). *Pesquisa em ciências humanas e sociais*. Cortez Editora (Biblioteca da educação. Série 1. Escola, v. 16). São Paulo.

COUTO, J. F. (1961). *Manual de desenho de letras*. Grupo Ediouro – Grupo Coquetel, Ed. Tecnoprint S/A, Distribuidora Record de Serviços de Imprensa S/A, Rio de Janeiro.

FERREIRA, A. B. H. (1988). *Dicionário Aurélio básico da Língua Portuguesa*. Folha de São Paulo, Ed. Nova Fronteira S/A, Rio de Janeiro, RJ.

FISCHER, D. (2000). *Transformação de um sistema de manufatura linear em celular segundo os aspectos micro e macro da ergonomia*. Dissertação (Mestrado), programa de pós-graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FOÀ, N. (1978). *Henry Ford em 100 Eventos que abalaram o mundo*. V. II, Raul de Polillo (tradutor). Edições Melhoramentos, São Paulo.

FRAMINAN, J. M.; LEISTEN, R.; RAJENDRAN, C. (2003). *Different initial sequences for the heuristic of Nawaz, Enscore and Ham to minimize makespan, idletime or flowtime in the static permutation flowshop sequencing problem*. International Journal of Production Research, v.41, n.1, p.121-148.

FRANCIS, R. L.; WHITE, J. A. (1974). *Facility layout and location an analytical approach*. Prentice-Hall International Series in Industrial and Systems Engineering, Englewood Cliffs, New Jersey.

FRENCH, S. (1982). *Sequencing and scheduling: an introduction to the mathematics of the job-shop*. John Wiley & Sons, New York.

GEWANDSZNAJDER, F. (1989). *O que é o método científico*. Livraria Pioneira Editora, São Paulo.

GIL, A. C. (1987). *Como elaborar projetos de pesquisa*. Editora Atlas S.A. São Paulo.

GOLDBERG, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc, New York.

GONDRAN, M.; MINOUX, M.; VAJDA, S. (1984). *Graphs and algorithms*. John Wiley & Sons Ltd., New York.

GOMES, M. C.; BARBOSA-PÓVOA, A. P.; NOVAIS, A. Q. (2005). *Optimal scheduling for flexible job shop operation*. International Journal of Production Research, v.43, n.11, p.2323-2353, Jun.

GRAVEL, M.; NSAKANDA, A. L.; PRICE, W. (1998). *Efficient solutions to the cell-formation problem with multiple routings via a double-loop genetic algorithm*. European Journal of Operational Research, n.109, p.286-298.

GROOVER, M. P.; ZIMMERS, E. W. JR. (1984). *CAD/CAM: computer-aided design and manufacturing*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

GROOVER, M. P. (1987). *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing*. Ed. Prentice-Hall do Brasil Ltda., Rio de Janeiro.

HAM, I.; HITOMI, K.; YOSHIDA, T. (1985). *Group technology – Applications to production management*. International Series in Management Science/Operations Research, The Pennsylvania State University, U.S.A.

HANCOCK, T. M. (1989). *Effects of alternate routings under variable lot-size conditions*. International Journal of Production Research, v.27, n.2, p.247-259.

HERGERT, D. (1989). *Introdução ao Turbo Basic*. Tradução de Ana Beatriz G. Rodrigues Silva. Editora Campus Ltda, Rio de Janeiro - RJ.

HUBERMAN, L. (1985). *História da riqueza do homem*. Zahar Editores S.A., 20ª ed., Rio de Janeiro, Monthly Review Press, New York, EUA.

HUTCHINSON, G. K.; PFLUGHOEFT, K. A. (1994). *Flexible process plans: their value in flexible automation systems*. International Journal of Production Research, v.32, n.3, p.707-719.

IRANI, S. A.; CAVALIER, T. M.; COHEN, P. H. (1993). *Virtual manufacturing cells: exploiting layout design and intercell flows for the machine sharing problem*. International Journal of Production Research, v. 31, n. 4, p. 791-810.

IRANI, S. A.; HUANG, H. (2000). *Custom design of facility layouts for multiproduct facilities using layout modules*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, v. 16, n. 3, June.

IRANI, S. A.; SUBRAMANIAN, S.; ALLAN, Y. S. (1999). *Introduction to cellular manufacturing systems*. Handbook of Cellular Manufacturing Systems, Shahruckh A. Irani (Ed.), John Wiley & Sons, Inc.

KNUTH, D. E. (1972). *The art of computer programming*. Addisom-Wesley Publishing Company, v.1 – Fundamental Algorithms.

KRIZ, D. (1995). *Holonic Manufacturing Systems: Case Study of an IMS Consortium*. Georgetown University.

Disponível em: <http://hms.ifw.uni-hannover.de/public/Feasibil/fr_study.htm>.

Acesso em: 31 mar. 2005.

KO, K. C.; EGBELU, P. J. (2003). *Virtual cell formation*. International Journal of Production Research, v. 41, n. 11, p. 2365-2389.

KOO, P. H.; TANCHOCO, J. M. A. (1999). *Real-time operation and tool selection in single stage multimachine systems*. International Journal of Production Research, v.37, n.5, p.1023-1039.

KOCHIKAR, V. P.; NARENDHAN, T. T. (1992). *A framework for assessing the flexibility of manufacturing systems*. International Journal of Production Research, v.30, n.12, p.2873-2895.

LACERDA, E. G. M.; CARVALHO, A. C. P. L. F. (1999). *Introdução aos algoritmos genéticos*. Em Sistemas Inteligentes – Aplicações a recursos Hídricos e Ciências Ambientais, Coleção ABRH (Associação Brasileira de Recursos Hídricos) de Recursos Hídricos, v.7, Editora da Universidade, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LAHMAR, M.; BENJAAFAR, S. (2001). *Design of dynamic distributed layouts*. INFORMS Fall Meeting, Session TC17 (Advances in Factory Layouts), Miami, Florida, Nov.

LAHMAR, M.; BENJAAFAR, S. (2002a). *Design of dynamic distributed layouts*. Proceedings of the 11th Annual Industrial Engineering Research Conference (IERC), May 19-21, Orlando, FL.

LAHMAR, M.; BENJAAFAR, S. (2002b). *Design of dynamic distributed layouts*. Working Paper, Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, MN.

Disponível em: <<http://www.me.umn.edu/labs/ngfl/distlayout.pdf>>.

Acesso em: 06 abr. 2005.

LAHMAR, M., BENJAAFAR, S. (2005). *Design of distributed layouts*. IEE Transactions, v.37, p.303-318.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. (1991). *Fundamentos de metodologia científica*. 3. ed., Editora Atlas S.A., São Paulo.

LANDMANN, R. (2005). *Um modelo heurístico para a programação da produção em fundições com utilização da lógica fuzzy*. Tese (Doutorado), programa de pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Jun.

LEE, Y. H.; JEONG, C. S.; MOON, C. (2002). *Advanced planning and scheduling with outsourcing in manufacturing supply chain*. Computers & Industrial Engineering, n. 43, p. 351-374.

LIU, Y.; SNOEYINK, J. (2003). *Computing the Delaunay triangulation for PDB data*. ITR PI Meeting and NFS Site Visit, Duke University, Nov. 17-18. Disponível em:
<http://biogeometry.cs.duke.edu/meetings/ITR/03_nov/presentations/liu.03nov.ppt>.

Acesso em: 14 Jun. 2005.

LUCERO, A. G. R. (2001). *Um método de otimização para a programação da manufatura em pequenos lotes*. Dissertação (Mestrado), programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, fev.

MARTINS, C. B. (2004). *Apostila da disciplina análise de algoritmos*. Departamento de Informática da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Mandaguari (Fundação FAFIMAN), Mandaguari, PR.

MARTINS, V. C.; COELHO, L. S.; CÂNDIDO, M. A. B; PACHECO, R. F. (2003). *Otimização de layouts industriais com base em busca tabu*. Revista Gestão & Produção, v. 10, n. 1, p. 69-88, abr.

MCFARLANE, D. (1995). *Holonic manufacturing systems in continuous processing: concepts and control requirements*. Proceedings of Advanced Summer Institute (ASI) on Life Cycle Approaches to Production Systems, Lisbon, Portugal, Jun.

MCLEAN, C. R.; BLOOM, H. M.; HOPP, T. H. (1982). *The virtual manufacturing cell*. Proceedings of the 4th IFAC/IFIP – Conference on Information Control Problems in Manufacturing Technology, Gaithersburg, MD, p. 207-215, Oct..

MELLO, L. F. O. (2002). *Curvas planares, da intuição à perplexidade*. Semana da Matemática da UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá). Disponível em: <http://www.ici.efei.br/luisfernando/publicacoes/minicurso_curvas.htm>. Acesso em: 08 Jun. 2005.

MONTREUIL, B.; LEFRANÇOIS, P.; MARCOTTE, S.; VENKATADRI, U. (1993). *Layout for chaos – Holographic layout of manufacturing systems operating in highly volatile environments*. Document de Travail 93-53, Groupe de Recherche en Gestion de La Logistique, Faculté des Sciences de L'Administration, Université Laval, Québec, Canada.

MONTREUIL, B.; VENKATADRI, U. (1991). *Scattered layout of intelligent job shops operating in a volatile environment*. Proceedings of the International Conference on Computer Integrated Manufacturing, ICCIM, Singapore.

²⁹MONTREUIL, B.; VENKATADRI, U.; LEFRANÇOIS, P. (1991). *Holographic layout of manufacturing systems*. Document de travail (Technical Report) 91-76, Faculty of Management, Université Laval, Montreal, Québec, Canada, Oct.

MONTREUIL, B.; VENKATADRI, U.; RARDIN, R. (1999). *Fractal layout organization for job shop environments*. International Journal of Production Research, v.37, n.3, p.501-521.

NAGANO, M. S.; MOCCELLIN, J. V.; LORENA, L. A. N. (2004). *Programação da produção flow shop permutacional com minimização do tempo médio de*

²⁹ Na literatura este mesmo artigo também é referenciado como: MONTREUIL, B.; VENKATADRI, U.; LEFRANÇOIS, P. (1991). *Holographic layout of manufacturing systems*. 19th IIE Systems Integration Conference, Orlando, Florida, USA, Oct., p.1-13.

fluxo. XXXVI SBPO (Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional). São João Del Rei, MG, 23-26, nov.

NAÚS, R. A. S.; PINHO, A. F. (2002). *Seqüenciamento da produção em sistemas de apenas uma máquina*. Trabalho de formatura. Instituto de Engenharia de produção e Gestão da Universidade Federal de Itajubá.

NAWAS, M.; ENSCORE, E.; HAM, I. (1983). *A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow shop sequencing problem*. OMEGA – The International Journal of Management Systems, v.11, p.91-95.

NOMDEN, G. SLOMP, J. (2003). *The operation of virtual manufacturing cells in various physical layout situations*. Group Technology/Cellular Manufacturing World Symposium, Columbus, Ohio, July 28-30.

OLIVERIO, J. L. (1985). *Projeto de fábrica. Produtos, processos e instalações industriais*. Apostila, IBLC - Instituto Brasileiro do Livro Científico Ltda., São Paulo.

OZCELIK, F.; ISLIER, A. A. (2003). *Novel approach to multi-channel manufacturing system design*. International Journal of Production Research, v. 41, n. 12, p. 2711-2726.

PINEDO, M. (1995). *Scheduling: theory, algorithms, and systems*. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey.

PORTO, A. J. V.; SOUZA, M. C. F.; RAVELLI, C. A.; BATOCCHIO, A. (2002). *Manufatura virtual: conceituação e desafios*. Revista Gestão & Produção, v. 9, n. 3, p. 297-312, dez.

QUARESMA, I. M. M.; OLIVEIRA, J. M. D. M.; FARIA, P. C. R. P. (2000). *O mundo dos fractais*. Disponível em:

<<http://www.educ.fc.ul.pt/icm/icm99/icm14/index.htm>>.

Acesso em: 04 abr. 2005

RHEAULT, M.; DROLET, J. R.; ABDULNOUR, G. (1995). *Physically reconfigurable virtual cells: a dynamic model for a highly dynamic environment*. Computers Industrial Engineering, v. 29, n. 1-4, p. 221-225.

ROHDE, L. R. (2002). *Representação na forma normal disjuntiva para flexibilidade de seqüência na manufatura*. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ROHDE, L. R.; BORENSTEIN, D. (2004). *Representação em espaço de estados para a flexibilidade de roteamento*. Revista Gestão & Produção, v.11, n.2, p.251-261.

RIBEIRO, J. F. F.; MEGUELATI, S. (2002). *Organização de um sistema de produção em células de fabricação*. Revista Gestão & Produção, v. 9, n. 1, p. 62-77, abr.

RODRIGUES, G. S.; BRANCO, R. M.; ROSA, L. C. (2003). *Tecnologia de grupo: algoritmos genéticos na solução de problemas de agrupamentos celulares de máquinas e peças*. XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), Ouro Preto-MG, out. 21-24.

SAAD, S. M.; LASSILA, A. M. (2004). *Layout design in fractal organizations*. International Journal of Production Research, v. 42, n. 17, p. 3529-3550.

SAGAN, H. (1991). *Space-filling curves*. Universitext, Springer-Verlag, New York.

SALOMON, D. V. (1973). *Como fazer uma monografia*. 3. ed., Interlivros, Belo Horizonte, MG.

SALVADOR, O. (2005). *Introdução a algoritmos genéticos*. Curso de Ciência da Computação da Universidade de Pelotas, Pelotas-RS. Disponível em: <http://www.freedom.ind.br/otavio/trab/introducao_algoritmos_geneticos.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2005.

SARKER, B. R.; LI, Z. (2001). *Job routing and operations scheduling: a network-based virtual cell formation approach*. Journal of the Operational Research Society, n. 52, p. 673-681.

SETHI, A. K.; SETHI, S. P. (1990). *Flexibility in manufacturing: a survey*. The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, v.2, p.289-328.

SILVA, P. P. (2005). *Métodos heurísticos construtivos para o problema de programação de operações flow shop híbrido com estágio de produção dominante*. Dissertação (Mestrado), programa de pós-graduação em Engenharia de Produção da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC).

SIMON, A. (2000). *A verdadeira ciência por trás do Arquivo X*. Tradução de Judit Gizella Pely. Editora Unicórnio Azul. São Paulo.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C.; HARRISON, A.; JOHNSTON, R. (1996). *Administração da produção*, Ed. Atlas S.A., São Paulo.

TAVARES, J. A. R. (2000). *Geração de configurações de sistemas industriais com o recurso à tecnologia das restrições e computação evolucionária*. Tese (Doutorado), Universidade do Minho, Portugal, Dez.

TOMPKINS, J. A.; WHITE, J. A.; BOZER, Y. A.; FRAZELLE, E. H.; TANCHOCO, J. M. A.; TREVINO, J. (1996). *Facilities planning*. 2. ed., John While & Sons, Inc.

SIQUEIRA, L.; TORIHARA, R. T.; PINHO, A. F. (2002). *Otimização de seqüenciamento de tarefas*. Trabalho de formatura, Instituto de Engenharia de Produção e Gestão da Universidade Federal de Itajubá.

TORRES, I. (2001). *Integração de Ferramentas Computacionais Aplicadas ao Projeto e Desenvolvimento de Arranjo Físico de Instalações Industriais*. Dissertação (Mestrado), programa de pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, dez.

UFMG (2004). *Curso de linguagem C*. Apostila do curso de ensino a distância mantido pelo Núcleo de Ensino à Distância da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Disponível em: <http://www.ead.eee.ufmg.br/cursos/C/>

VALCKENARES, P.; BRUSSEL, H. V.; WYNS, J.; BONGAERTS, L.; PEETERS, P. (1998). *Designing holonic manufacturing systems*. *Robotic and Computer-Integrated Manufacturing*, n. 14, Issues 5-6, p. 455-464.

³⁰ VENKATADRI, U.; RARDIN, R. L.; MONTREUIL, B. (1997). *A design methodology for fractal layout organization*. *IEE Transactions*, n. 29, p. 911-924.

WANG, L. (2001). *Integrated design-to-control approach for holonic manufacturing systems*. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, n. 17, Issues 1-2, p. 159-167.

³⁰ Na literatura este mesmo artigo também é referenciado como: VENKATADRI, U.; RARDIN, R. L.; MONTREUIL, B. (1995). *A design methodology for the fractal layout organization*. Technical Report, Department of Industrial Engineering, Purdue University.

WEIGEL, R. A. (2005). *Desenhando placas de circuito impresso com Eagle – Parte 4*. Revista Mecatrônica Fácil, n. 21, p. 56-63, mar./abr.

WENG, M. X. (2000). *Scheduling flow-shops with limited buffer spaces*. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference, J. A. Joines, R. R. Barton, K. Kang, and P. A. Fishwick, eds.

WOO, H. S.; YIM, D. S. (1998). *A heuristic algorithm for mean flowtime objective in flowshop scheduling*. Computers & Operations Research, v.25, n.3, p.175-182.

WULLINK, G.; GIEBELS, M. M. T.; KALS, H. J. J. (2002). *A system architecture for holonic manufacturing planning and control (EtoPlan)*. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, n. 18, Issues 3-4, p. 313-318.

YANG, S.; WANG, D. (2001). *A new adaptive neural network and heuristics hybrid approach for job-shop scheduling*. Computers & Operations Research, n.28, p.955-971.

ZATTAR, I. C. (2004). *Análise da aplicação dos sistemas baseados no conceito de capacidade finita nos diversos níveis da administração da manufatura através de estudos de caso*. Dissertação (Mestrado), programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, ago.

ZHAO, C.; WU, Z. (2000). *A genetic algorithm for manufacturing cell formation with multiple routes and multiple objectives*. International Journal of Production Research, v. 38, n. 2, p. 385-395.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ANGSTER, S.; JAYARAM, S. (1996). *VEDAM: virtual environments for design and manufacturing*. Symposium on Virtual Reality in Manufacturing Research and Education, Chicago, Oct 7-8.

BANERJEE, A.; BANERJEE, P.; MEHROTRA, S. (1996). *An enabling environment for inputting qualitative information in manufacturing systems layout design*. Proceedings of Symposium on Virtual Reality in Manufacturing Research and Education, University of Illinois at Chicago, Oct. 7-8, p.62-69.

BORENSTEIN, D. (1998). *Combinando simulação e sistemas baseados em conhecimento para o projeto de sistemas avançados de manufatura*. Gestão & Produção, v.5, n.2, p.89-103, Ago.

CHAN, D. S. K. (2003). *Simulation modeling in virtual manufacturing analysis for integrated product and process design*. Assembly Automation, v.23, n.1, p.69-74.

CO, H. C.; ARAAR, A. (1998). *Configuring cellular manufacturing systems*. International Journal of Production Research, v.26, n.9, p.1511-1522.

COLIN, E. C.; QUINTINO, R. C.; SHIMIZU, T. (1997). *Manufatura ágil: um novo conceito na produção industrial*. 5ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Pesquisadores Nikkeis.

DAITA, S. T. S.; IRANI, S. A.; KOTAMRAJU, S. (1999). *Algorithms for production flow analysis*. International Journal of Production Research, v.37, n.11, p.2609-2638.

DUFFY, V. G.; WU, F. F.; NG, P. P. W. (2002). *Development of an internet virtual layout system for improving workplace safety*. Computers in Industry, n.50, p.207-230.

DURAN, O.; BATOCCHIO, A. (2001). *Na direção da manufatura enxuta através da J4000 e o LEM*. Proceedings do IV Congreso Chileno de Investigación Operativa, Talca, Chile, Out. 10-12.

EREL, E.; GHOSH, J. B.; SIMON, J. T. (2003). *New heuristic for the dynamic layout problem*. Journal of the Operational Research Society, n.54, p.1275-1282.

FERREIRA, J. C. E.; ANDRIOLLI, G. F. (2001). *Programas para a Internet visando a determinação do tamanho de lote ótimo e o balanceamento de linha*. ENEGEP, 17 a 19 de Out, Salvador-BA³¹.

FERREIRA, J. C. E.; ANDRIOLLI, G. F. (2001). *Uma metodologia para a fabricação de peças à distância*. COBEM, Uberlândia, 26-30 Nov.

FERREIRA, J. C. E.; ANDRIOLLI, G. F. (2002). *Planos de processos contendo alternativas: uma implementação voltada para a internet*. ENEGEP, Curitiba-PR, 23-25 Out.

³¹ Esse mesmo artigo é reverenciado na literatura como: FERREIRA, J. C. E.; ANDRIOLLI, G. F. (2003). *Programas para a Internet visando a determinação do tamanho de lote ótimo e o balanceamento de linha*. Revista O Mundo da Usinagem, Sandivik Coromant do Brasil, 2ª Ed, p. 27-31.

FILHO, G. R. (2000). *Melhoramentos no algoritmo genético construtivo e novas aplicações em problemas de agrupamento*. Tese (Doutorado), programa de pós-graduação em Computação Avançada do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, Dez.

GINFY, N. N. Z.; RATCHEV, T. M.; CASE, K. (1996). *Component grouping for cell formation using resource elements*. International Journal of Production Research, v.34, n.3, p.727-752.

GOPALAKRISHNAN, B.; WENG, L.; GUPTA, D. P. (2003). *Facilities design using a split departmental layout configuration*. Facilities, v.21, n.3/4, p.66-73.

GOPALAKRISHNAN, B.; TURUVEKERE, R.; GUPTA, D. P. (2004). *Computer integrated facilities planning and design*. Facilities, v.22, n.7/8, p.199-209.

HALEVI, G. (1993). *The magic matrix as a smart scheduler*. Computers in Industry, n.21, p.245-253.

HALEVI, G. (1997). *The magic matrix as a smart machine evaluator: machine performance measurement, level of competitiveness*. Production Planning & Control, v.8, n.4, p.343-355.

IQBAL, M.; HASHMI, M. S. J. (2001). *Design and analysis of a virtual factory layout*. Journal of Materials Processing Technology, n.118, p.403-410.

JOINES, J. A.; KING, R. E.; CULBRETH C. T. (2000). *Moving beyond the parts incidence matrix: alternative routings and operations for the cell formation problem*. Engineering Valuation and Cost Analysis, v.2, p.327-348.

KANNAN, V. R.; GHOSH, S. (1996). *Cellular manufacturing using virtual cells*. International Journal of Operations & Production Management, v.16, n.5, p.99-112.

KORVES, B.; LOFTUS, M. (1999). *The application of immersive virtual reality for layout planning of manufacturing cells*. Journal of Engineering Manufacture, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B. v. 213, p. 87-91.

KORVES, B.; LOFTUS, M. (2000). *Designing an immersive virtual reality interface for layout planning*, Journal of Materials Processing Technology, v.107, p. 425-430.

LIMA, P. C.; LOBO, C. E. (2002). *Novos requisitos para a organização e projeto das células de usinagem*. Revista Máquinas e Metais, Dez., p. 150-163.

LU, W. (1996). *Graphical Simulation for Process Planning in Virtual Manufacturing*. Proceedings of Symposium on Virtual Reality in Manufacturing Research and Education, University of Illinois at Chicago, 7-8 Oct, p.153-162.

LUCERO, A. G. R. (2001). *Um método de otimização para a programação da manufatura em pequenos lotes*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Fev.

LUCERO, A. G. R.; QUEIROZ, A. A. (2001). *Uma aplicação da matriz de Halevi para otimizar a programação da manufatura*. 1º COBEF – Congresso Brasileiro de Fabricação, Curitiba-PR, 02-04 Abr.

LUCERO, A. G. R.; QUEIROZ, A. A. (2001). *Um método para otimizar a programação dos sistemas de manufatura que produzem em pequenos lotes*. ISA Show Brasil, 23-26 Out.

LUCERO, A. G. R.; QUEIROZ, A. A. (2002). *A method to optimize scheduling in small batch manufacturing*. 5th IFIP, Cancun-Mexico, p.485-492, 25-27 Set.

MONTREUIL, B.; LAFORGE, A. (1992). *Dynamic layout design given a scenario tree of probable futures*. European Journal of Operational Research, v.63, p.271-286.

MOREIRA, M. P.; FERNANDES, F. C. F. (2001). *Análise da produção enxuta pelo fluxo de valor*. Revista Máquinas e Metais, Ago, p.116-129.

NETTO, A. V.; TAHARA, C. S.; FILHO, E. V. G. (1998). *Realidade virtual e suas aplicações na área de manufatura, treinamento, simulação e desenvolvimento de produto*. Gestão e Produção, v.5, n.2, p.104-116, Ago.

NOMURA, J.; SAWADA, K. (1999). *Virtual reality technology and its industrial applications*. Control Engineering Practice, v.7, p.1381-1394.

PENG, Q.; HALL, F. R.; LISTER, P. M. (2000). *Application and evaluation of VR-based CAPP system*. Journal of Materials Processing Technology, v. 107, p. 153-159.

PRINCE, J.; KAY, J. M. (2003). *Combining lean and agile characteristics: creation of virtual groups by enhanced production flow analysis*. International Journal of Production Economics, n.85, p.305-318.

RAMUDHIN, A.; LEFRANÇOIS, P.; D'AMOURS, S.; MONTREUIL, B. A *decision support system for operations scheduling in a distributed environment*. Revue des Systèmes de Décision, v.5, n.1-2, p.51-71.

SAAD, S. M. ; BAYKASOGLU, A. ; GINDY, N. N. Z. (2002). *An integrated framework for reconfiguration of cellular manufacturing systems using virtual cells*. Production Planning & Control, v.13, n.4, p.381-393.

TAM, C. M.; LEUNG, A. W. T. (2002). *Genetic algorithm modeling aided with 3D visualization in optimizing construction site facility layout*. International

Council for Research and Innovation in Building and Construction, Aarhus School of Architecture, Jun. 12-14.

UDDIN, M. K.; SHANKER, K. (2002). *Grouping of parts and machines in presence of alternative process routes by genetic algorithm*. International Journal of Production Economics, n.76, p.219-228.

VAKHARIA, A.; MOILY, J.; HUANG, Y. (1999). *Evaluating virtual cells and multistage flow shops: an analytical approach*. The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, v.11, p.291-314.

VIEIRA, S. (1996). *Como escrever uma tese*. 3ª ed. Livraria Pioneira Editora, São Paulo.

WEI, Y.; EGBELU, P. J. (2000). *Process alternative generation from product geometric design data*. IIE Transactions, v.32, p.71-82.

YANG, T.; KUO, C. (2002). *A hierarchical AHP/DEA methodology for the facilities layout design problem*. European Journal of Operational Research, n.147, p.128-136.

ZEYDAN, M.; GOLEÇ, A. (2004). *Plant layout and design through the simulation and increasing the capacity of metal workshop of a furniture factory*. YA/EM'2004 - Yöneyem Araştırması/Endüstri Mühendisliği - XXIV Ulusal Kongresi, Gaziantep – Adana.

ZETU, D.; SCHNEIDER, P.; BANERJEE, P. (1996). *A fast data input model for virtual reality-aided factory layout and material handling decision support*. Proceedings for the Symposium on Virtual Reality in Manufacturing Research and Education, Chicago, IL, Oct. 7-8.

APÊNDICE A - Arranjos Físicos Clássicos

A.1 Desenvolvimento dos arranjos físicos clássicos

Em toda a história da humanidade, cita Huberman (1936, p.51), o crescimento do mercado constitui sempre um tremendo incentivo ao crescimento da produção. Sendo assim o desenvolvimento de novos arranjos físicos ocorre pela necessidade de adaptação a novas realidades.

O surgimento da indústria foi um processo lento. Do século XVI ao XVIII os artesões independentes da Idade Média desapareceram e em seu lugar surgiram os assalariados. Os trabalhadores eram divididos em grupos de acordo com o tipo de técnica necessária para operar os processos (BLACK, 1991, p.47). Essa organização é denominada atualmente como arranjo físico funcional, por processo ou departamental (OLIVERIO, 1985, p.174).

Grandes produtos como embarcações e motores a vapor necessitam de uma disposição diferente devido à sua inerente dificuldade de movimentação. Nesta situação a organização é denominada arranjo físico de posição fixa (GROOVER, 1987, p.28) ou arranjo físico posicional (OLIVERIO, 1985, p.174).

No início do século XX o industrial Henry Ford (1863-1947) desejava executar grandes produções de automóveis com sua empresa *Ford Motor Company*, fundada em 1903. Entre 1905 e 1908, inspirado por F. W. Taylor, introduziu a linha de montagem, implantando a subdivisão do trabalho, a análise dos movimentos e o seqüenciamento das operações. Foà (1978, p.699) cita que a montagem de um componente requeria 20 minutos quando executada por um único operário e apenas 5 minutos depois de dividida e organizada em 29 operações. Conforme Tompkins et al. (1996, p.288) essa forma de organização é denominada de arranjo físico linear ou por produto.

Até a década de 1980 esses três leiautes atenderam às necessidades do mercado e são citados tanto por Groover (1987, p.27) quanto por Oliverio (1985, p.173) como sendo os tipos clássicos de arranjo físico. A partir dessa época, citam Ham, Hitomi e Yoshida (1985, p.1), o desejo do consumidor em possuir produtos individualizados aumentou e o ciclo de vida dos produtos diminuiu e neste novo cenário nenhum dos arranjos físicos atendia satisfatoriamente aos requisitos de produção. A aplicação da filosofia denominada Tecnologia de Grupo foi uma das formas de se adaptar a essa

nova realidade, permitindo atingir altos volumes de produção com lotes reduzidos e grande variedade de produtos.

A idéia básica em tecnologia de grupo, segundo Black (1991, p.54), é encontrar peças similares que são agrupadas em famílias. Se esta família possui similaridade de processo de fabricação então teria o mesmo grupo de máquinas, que passa a ser denominado como célula de fabricação. Sendo assim o arranjo físico é denominado leiaute celular, por grupo ou por família de produtos.

Atualmente diversos autores, como Tompkins et al. (1996, p.288) e Slack et al. (1996, p.212), acrescentam o arranjo físico celular como o quarto tipo clássico de configuração do chão de fábrica.

Slack et al. (1996, p.217) lembra que é prática comum que as empresas adotem leiautes mistos que combinem elementos de algum ou de todos os arranjos físicos clássicos ou, alternativamente, usam mais de um tipos clássico de arranjo físico de forma *pura* em diferentes partes da instalação.

A.2 Características dos arranjos físicos clássicos

A.2.1 Arranjo físico posicional

Também é chamado de arranjo físico de posição fixa ou *project shop*. Devido ao seu peso e/ou tamanho o produto permanece fixo em determinada posição enquanto materiais, máquinas e pessoas são trazidos até o local onde são necessários. Os exemplos de uso deste arranjo citados por Oliverio (1985, p.174) são montagem de navios e de grandes alternadores, Groover (1987, p.28) cita aviões de grande porte (Figura A.1) e Black (1991, p.53) acrescenta locomotivas, prédios, pontes e represas. Outros exemplos são grandes motores à explosão, transformadores elétricos de grande potência etc.

Black (1991, p.53) lembra que, devido a grande complexidade do projeto, um arranjo físico posicional costuma ser servido por outros tipos de leiautes onde seus componentes são processados.

Adaptado de Groover (1987, p.29)

Figura A.1 - Arranjo físico posicional.

Em resumo este arranjo físico tem as seguintes características:

- Movimentação reduzida de material;
- Aumento da movimentação de pessoal e equipamentos;
- Pode resultar em equipamentos duplicados;
- Requer grande habilidade do pessoal;
- Requer supervisão geral;
- Pode resultar em aumento de espaço e grande material em processo;
- Requer grande atenção no controle e na programação da produção.
- Produção pequena;
- Grande flexibilidade que permite alterações no projeto do produto, no volume da produção e até no tipo de produto.

A.2.2 Arranjo físico funcional

Este arranjo físico também é referenciado como arranjo físico departamental, por processo, *process layout* e *job shop*. Sua característica fundamental é o agrupamento de operações de um mesmo tipo (OLIVERIO, 1985, p.174). Black (1991, p.56) destaca que devido a sua alta flexibilidade este arranjo físico trabalha na produção de uma grande variedade de produtos

em pequenos lotes, normalmente atendendo a pedidos específicos de clientes (produção sob encomenda). Os equipamentos de fabricação são de uso genérico e os trabalhadores devem possuir nível técnico relativamente alto para realizar tarefas diferentes. Outra característica importante, ressaltada por Tompkins et al. (1996, p.288), relaciona-se ao fluxo de peças, que é pequeno dentro de cada departamento (intradepartamental) e grande entre eles (interdepartamental).

O controle da produção é complexo devido à simultaneidade de diferentes lotes sendo executados ao mesmo tempo em setores distintos e para clientes variados. Em compensação a elaboração do processo de fabricação é uma atividade simples já que basta definir a rota pelos departamentos que executarão cada etapa do processo³² (Groover, 1987, p.28). A Figura A.2 mostra uma representação deste arranjo.

Adaptado de Black (1991, p.55)

Figura A.2 - Arranjo físico funcional

³² Deve ficar claro que a elaboração de um processo de fabricação exige muito mais que a simples definição da rota. Para cada etapa o processista deve definir: tipo de máquina, ferramental, dispositivos de sujeição, parâmetros de corte e meios de controle do resultado da operação.

Entre as principais limitações está o elevado tempo necessário para completar cada lote. Doumeingts³³ (1984 apud RIBEIRO e MEGUELATI, 2002, p.63) descreve que do tempo total consumido na produção de uma peça cerca de 5% são destinados à execução em máquina e os 95% restantes são gastos em movimentações e filas de espera. Além disso, dentro desses 5% apenas 30% do tempo é usinagem propriamente dita, uma vez que a preparação das máquinas e outras tarefas consomem a maior parte do tempo. Os mesmos dados são apresentados por Carter³⁴ (1972 apud HAM, HITOMI e YOSHIDA, 1985, p.8) e estão representados na Figura A.3.

Adaptado de Ham, Hitomi e Yoshida (1985, p.8)

Figura A.3 - Distribuição do tempo de produção de uma peça

Em resumo este arranjo físico tem as seguintes características:

- Manuseio elevado de material;
- Complexo controle de produção;
- Grande quantidade de material em processo;
- Máquinas de uso geral;
- Pequeno investimento total inicial;
- Grande flexibilidade;
- Baixa produtividade;

³³ DOUMEINGTS, G., **La production assistée par ordinateur**, Bulletin de Recherche en Informatique et Automatique, 1984.

³⁴ CARTER, C. F., Jr., **Trends in machine tool Development and applications**, Proceedings of 2nd International Conference on Product Development and Manufacturing Technology, 1971, London: MacDonald & Co., 1972.

- Facilidade de contornar quebras de equipamentos;
- O pessoal deve ter maiores habilidades;
- Grande utilização das máquinas.

A.2.3 Arranjo físico em linha

Também é denominado de arranjo físico linear, arranjo físico por produto, *product-flow layout*, *product layout* e *flow shop*. Black (1991, p.58) acrescenta que quando o volume de produção se torna muito grande, especialmente na linha de montagem, este arranjo físico é chamado de produção em massa.

A disposição dos locais de trabalho obedece a seqüência de processamento do produto buscando otimizar a movimentação de material (OLIVERIO, 1985, p.175). Os equipamentos são especializados para se dedicarem à fabricação de um produto em particular e também é comum existirem máquinas duplicadas para balancear o fluxo (BLACK, 1991, p.58). Esse balanceamento significa que o tempo total de trabalho em cada estação é praticamente o mesmo, reduzindo o tempo ocioso.

Groover (1987, p.28) destaca a grande rigidez deste arranjo físico, adotado somente quando o volume de produção justifica o investimento, que é extremamente alto. Enquanto um arranjo físico funcional pode ser elaborado aos poucos o arranjo físico em linha deve ser implantado de uma só vez. A Figura A.4 apresenta uma representação para este arranjo físico.

Adaptado de Groover (1987, p.29)

Figura A.4 - Arranjo físico em linha

Em resumo este arranjo físico tem as seguintes características:

- Manuseio reduzido de material;
- Simples controle de produção;
- Pequena quantidade de material em processo;
- Uso de equipamentos especiais;
- Investimento total inicial elevado;
- Baixa flexibilidade (mudanças no produto podem levar a obsolescência da linha);
- Grande produtividade;
- Se uma máquina para a linha toda interrompe suas atividades;
- Requer menor habilidade do pessoal (as atividades são específicas e repetitivas).

A.2.4 Arranjo físico celular

Este arranjo físico também é denominado de *group technology layout*, *cellular layout* e *group layout*. Está ligado à filosofia denominada Tecnologia de Grupo (TG) e, segundo Irani, Subramanian e Allam (1999, p.1) seu conceito foi originalmente proposto por Mitrofanov (1966)³⁵. Nesta filosofia, segundo Groover e Zimmers (1984, p.275), as peças com similaridades são identificadas e agrupadas com o objetivo de buscar vantagens no projeto e na manufatura. Esses grupos são denominados de famílias. Se o objetivo é a manufatura então as peças de uma mesma família terão necessidades de processamento similares, levando a formação de um grupo de máquinas responsáveis pela sua fabricação. Esse grupo de máquinas é denominado de célula de fabricação.

Black (1991, p.64) comenta que a disposição das máquinas de uma célula se parece com o arranjo físico em linha, mas é projetada para ter flexibilidade. Além disso, normalmente a célula inclui todos os processos necessários para concluir as peças de sua família. Esse autor destaca os seguintes pontos chave:

- As máquinas são dispostas na seqüência do processo;

³⁵ MITROFANOV, S. P., **Scientific principles of group technology**, Volumes I, II e III (English translation), National Lending Library for Science and Technology, Yorkshire, England, 1966

- Normalmente a célula é projetada em forma de U;
- Um tipo de peça é feito de cada vez dentro da célula;
- Os trabalhadores são treinados para lidar com mais de um tipo de processo;
- O tempo de ciclo para o sistema dita a taxa de produção para a célula;
- Os operadores trabalham em pé e caminhando;
- São usadas máquinas mais lentas e específicas, que são menores e mais baratas.

Na Figura A.5 é apresentado o esquema de uma célula de manufatura contendo oito postos de trabalho e operada por dois funcionários. Neste exemplo cada operário possui tarefas em quatro máquinas. A matéria-prima entra na célula e movimenta-se no sentido horário, conforme as setas azuis. Ao final as peças acabadas são dispostas em um transportador.

Adaptado de Black (1991, p.93)

Figura A.5 - Arranjo físico celular

Em resumo este arranjo físico tem as seguintes características:

- Alta utilização de máquinas;
- Atmosfera de equipe;
- Boa flexibilidade e produtividade;
- Equipamentos de uso geral com eventuais máquinas específicas;
- Operadores executam mais de uma atividade ao mesmo tempo;
- Redução do material em processo;
- Redução do manuseio de material;
- Redução dos tempos de preparação.

APÊNDICE B - Curvas de Preenchimento Espacial

B.1 Introdução

Segundo Sagan (1991, p.1) as curvas de preenchimento espacial (*space-filling curves*) também são chamadas de curvas de Peano, em homenagem ao matemático italiano Giuseppe Peano (1858-1932). Mello (2002) cita que por volta de 1890 Peano exibiu um exemplo de curva planar contínua e sem cruzamento, cujo traço é todo o quadrado de lado unitário ($[0,1] \times [0,1] \subset \mathbb{R}^2$). Outros pesquisadores, como David Hilbert, deram continuidade à pesquisa dessas curvas estendendo-as para espaços n-dimensionais (ALENCAR e SANTOS, 2003, p.24).

B.2 A curva de Peano

A curva de Peano é construída a partir de um bloco básico gerado em um quadrado dividido em nove partes, ou seja, cada face é dividida em três partes, como mostra a Figura B.1. A numeração mostrada indica a seqüência pela qual as regiões do quadrado são percorridas.

Figura B.1- Mapeamento e curva de Peano

A divisão do quadrado em múltiplos de 3 permite a construção da curva pela repetição do padrão básico com pequena alteração na seqüência. Na Figura B.2 tem-se um quadrado com seus lados divididos em 6 partes. O padrão básico é apresentado em preto enquanto os percursos de conexão estão em azul para dar maior destaque.

Figura B.2 - Curva de Peano com 6 divisões por lado

Na Figura B.3 pode-se observar a curva de Peano com o quadrado tendo suas faces divididas em 9 e 27 partes.

Figura B.3 - Curvas de Peano com 9 e 27 divisões nas faces

B.3 Variações da curva de Peano

Sagan (1991, p.44) mostra que o matemático Walter Wunderlich (1910-1998), entre diversas outras contribuições, enumerou outras três curvas que satisfazem as condições para a geração de curvas de preenchimento espacial. Na Figura B.4 tem-se a curva Peano-S (*switch-back type*). Na Figura B.5 é exibida a curva Peano-R (também denominada *switch-back type*). A curva da Figura B.6 é denominada Meander type (Peano-M).

Figura B.4 - Curva de Peano *Switch-back Type* (Peano-S)

Figura B.5 - Curva de Peano *Switch-back Type* (Peano-R)

Figura B.6 - Curva de Peano *Meander Type* (Peano-M)

B.4 Outras curvas de preenchimento

Embora Peano tenha descoberto a primeira curva de preenchimento espacial foi o matemático David Hilbert (1862-1942) que difundiu esse campo da geometria (SAGAN, 1991, p.10). A Figura B.7 mostra a geração da curva de Hilbert e onde pode-se perceber que o lado do quadrado é dividido em múltiplos de 2.

Figura B.7 - Criação da curva de preenchimento espacial de Hilbert

Na Figura B.8 tem-se a construção da curva de Moore que recebeu esse nome em homenagem ao matemático Eliakim Hastings Moore (1862-1932). Segundo Sagan (1991, p.24) Moore mostrou que o caminho de Hilbert não era o único para alinhar os subquadrados após sucessivos particionamentos em 2^{2n} réplicas. Nota-se que enquanto a curva de Hilbert parte do extremo de uma face e termina no extremo oposto da mesma face, a curva de Moore parte do centro de uma face e encerra na mesma posição.

Figura B.8 - Criação da curva de preenchimento de Moore

O matemático russo Wacław Sierpinski (1882-1969) introduziu um outro tipo de curva de preenchimento espacial, como mostra a Figura B.9.

Figura B.9 - Construção da curva de Sierpinski

Tanto a Figura B.10 quanto a Figura B.11 apresentam variações da curva de Sierpinski.

Figura B.10 - Construção da curva modificada de Sierpinski

Figura B.11 - Construção da curva modificada de Sierpinski

Sagan (1991, p.26) também cita definições tridimensionais das curvas de Peano, Hilbert e Sierpinski. A Figura B.12 apresenta a construção da curva de Hilbert no espaço 3D.

Fonte: Liu e Snoeyink (2003, p.7)

Figura B.12 - Construção da curva de Hilbert em 3D

B.5 Implementação

Foi implementado em Visual Basic 6.0 o procedimento baseado na curva de Peano tipo *Switch-back* (Peano-R) para a distribuição das máquinas em arranjos físicos funcionais, parcialmente distribuídos e aleatoriamente distribuídos, da forma usada por Askin, Ciarallo e Lundgren (1999, p.964), Benjaafar e Sheikhzadeh (2000, p.317), Lahmar e Benjaafar (2002b, p.16), Benjaafar, Heragu e Irani (2002, p.72) e Lahmar e Benjaafar (2005, p.311).

A Figura B.13 mostra a tela principal do programa com uma curva gerada. Os parâmetros informados foram: 15 linhas, 10 colunas e 3 faixas. Um detalhe importante a ser destacado é a impossibilidade de gerar a curva com mais de duas faixas se o número de colunas for par.

Figura B.13 - Tela do programa SFC

APÊNDICE C - Cálculo do Grau de Distribuição

C.1 Introdução

O objetivo deste apêndice é mostrar em detalhes a forma de cálculo do grau de distribuição de departamentos por meio de um exemplo simples. Como citado no texto principal o método usado para este cálculo é o mesmo adotado por Benjaafar e Sheikhzadeh (2000, p.317). Esse procedimento é quase o mesmo adotado por Montreuil, Venkatadri e Lefrançois (1991, p.7) e Montreuil e Venkatadri (1991, p.297). A diferença está no fato desses dois trabalhos usarem uma probabilidade de movimentação entre os diferentes tipos de máquinas. Removendo-se estas probabilidades tem-se o mesmo resultado entre as duas formas de cálculo.

C.2 Exemplo

Como mostra a Figura C.1 será usado um arranjo físico funcional composto por quatro departamentos e nove máquinas. O departamento 1 possui apenas uma máquina, o departamento 2 possui duas e os departamentos 3 e 4 possuem três máquinas cada um.

Figura C.1 - Arranjo físico funcional com 4 processos e 9 máquinas

O procedimento calcula a média da distância retilinear de cada máquina para a máquina mais próxima dos demais tipos, ou seja, é a média da distância mínima.

Processo 1

Suponha uma peça que saia da máquina 1.01 e necessite de uma máquina do processo 2. A máquina que está mais próxima é a 2.02, com apenas 1 unidade de distância. Caso fosse uma máquina do processo 3 o destino seria a máquina 3.02, também com 1 unidade de distância. Para o processo 4 a distância mínima é 1 unidade e tem-se a opção entre as máquinas 4.01 e 4.03. Sendo assim a soma das distâncias mínimas partindo da máquina 1.01 é 3. O somatório das distâncias mínimas de cada máquina é denominada *soma da máquina*. Como o processo 1 tem apenas uma máquina a *soma do processo*, bem como a *média* das distâncias mínimas também é 3. O Quadro C.1 resume o processo de cálculo.

Quadro C.1 - Cálculo partindo do processo 1

Origem		Destino		Distância	Soma da	Soma do	Média
Processo	Máquina	Processo	Máquina	Mínima	Máquina	Processo	
1	1.01	2	2.02	1	3	3	3
		3	3.02	1			
		4	4.01	1			

Processo 2

Seguindo o mesmo raciocínio do processo 1 tem-se no Quadro C.2 os valores usados no cálculo para o processo 2. Como esse processo possui duas máquinas (duas origens) a média é o resultado da soma do processo dividido por 2.

Quadro C.2 - Cálculo partindo do processo 2

Origem		Destino		Distância	Soma da	Soma do	Média
Processo	Máquina	Processo	Máquina	Mínima	Máquina	Processo	
2	2.01	1	1.01	2	5	9	4.5
		3	3.01	2			
		4	4.01	1			
	2.02	1	1.01	1	4		
		3	3.01	1			
		4	4.01	2			

Processos 3 e 4

No Quadro C.3 apresenta-se os valores os processos 3 e 4. Nota-se que para a obtenção da média dividiu-se a soma do processo por 3 pois tanto o processo 3 quanto o processo 4 possuem três máquinas.

Quadro C.3 - Cálculo partindo dos processos 3 e 4

Origem		Destino		Distância	Soma da	Soma do	Média
Processo	Máquina	Processo	Máquina	Mínima	Máquina	Processo	
3	3.01	1	1.01	2	6	17	5.667
		2	2.02	1			
		4	4.01	3			
	3.02	1	1.01	1	5		
		2	2.02	2			
		4	4.03	2			
	3.03	1	1.01	2	6		
		2	2.02	3			
		4	4.03	1			
4	4.01	1	1.01	1	4	14	4.667
		2	2.01	1			
		3	3.02	2			
	4.02	1	1.01	2	6		
		2	2.01	2			
		3	3.03	2			
	4.03	1	1.01	1	4		
		2	2.02	2			
		3	3.03	1			

O resultado final é o somatório das médias de cada processo (17.8333) dividido pelo número de processos (4) que, neste caso, resulta em 4.458, como mostra Figura C.2.

Figura C.2 - Janela com o resultado do cálculo

APÊNDICE D - Grafos

D.1 Introdução

Segundo Gondran, Minoux e Vajda (1984, p.ix) o primeiro artigo sobre grafos foi escrito por Euler em 1736 com o título “Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis”. Desde então a linguagem dos grafos ajuda a colocar uma idéia em prática: um bom desenho tem mais valor do que uma longa leitura³⁶.

A linguagem dos grafos torna possível representar a estrutura de um grande número de situações de uma simples maneira, tendo como exemplos: rotas em um mapa, estradas de ferro, linhas telefônicas, redes elétricas e o fluxo de informações dentro de uma organização, entre outros.

D.2 Conceitos básicos

Um grafo $G=[X, U]$ é definido por um conjunto X cujos elementos são denominados vértices (ou nós) e por um conjunto U , cujos elementos $u \in U$ são pares ordenados de vértices, denominados arcos ou arestas (GONDRAN, MINOUX e VAJDA, 1984, p.2). Graficamente os vértices são representados por pontos e as arestas por linhas que conectam os pontos. A Figura D.1 apresenta um grafo com 5 nós e 9 arestas.

Fonte: Gondran, Minoux e Vajda (1984, p.2)

Figura D.1 - Exemplo de grafo

³⁶ Provavelmente a expressão “uma imagem vale mais que mil palavras” tenha derivado dessa frase.

Martins (2004, p.9) cita que um grafo é denominado dirigido (ou dígrafo) quando suas arestas possuem orientação, caso contrário o grafo é denominado não dirigido. Outros termos importantes são:

- Laço ou aresta paralela: aresta que parte e chega a um mesmo nó. Em inglês é denominado *loop* ou *circuit*.
- Grafo rotulado: quando seus vértices e/ou arestas são distinguidos uns dos outros por rótulos. Caso contrário o grafo é não rotulado.
- Multígrafo: quando há laços.
- Grafo simples: quando o grafo não possui nenhum laço.
- Grafo completo: quando existe uma aresta entre cada par de vértices.
- Nós ancestrais: é o conjunto de todos os nós acima de um dado nó, em direção a raiz. Tem-se que Γ_i^{-1} representa matematicamente o conjunto de ancestrais do nó i .
- Nós descendentes: é o conjunto de todos os nós abaixo de um dado nó. Tem-se que Γ_i representa o conjunto de descendentes do nó i .
- Nó raiz: nó inicial de um grafo (não tem ancestrais, ou seja, $\Gamma_i^{-1} = \emptyset$).
- Nó pai: nó ao qual um outro nó está diretamente ligado.
- Nó filho: cada um dos nós derivados de um nó pai.
- Nós irmãos: nós com o mesmo pai.
- Nó folha ou terminal: nó sem filho (sem descendentes, isto é, $\Gamma_i = \emptyset$).

D.3 Algoritmo para determinação de níveis em grafos sem laços

O algoritmo para determinação de níveis em grafos sem laços, apresentado por Gondran, Minoux e Vajda (1984, p.55) é, entre os demais algoritmos detalhados na obra, o mais importante para o desenvolvimento deste trabalho. Os autores simplesmente o denominaram de Algoritmo 8, por ser o oitavo algoritmo apresentado.

O tipo de grafo analisado por esse algoritmo (Quadro D.1) representa bem os processos de fabricação, pois além de não possuir laços é orientado, possui ao menos um nó raiz e pelo menos um nó folha. A determinação de níveis explicita as relações de precedência e permite identificar cada conjunto

de operações que devem ser executadas (em qualquer ordem) para que as operações do nível seguinte sejam habilitadas.

Quadro D.1 - Algoritmo para determinação de níveis

- (a) Faça $d_i^- = |\Gamma_i^{-1}|$ para todo i , $k=0$, $S_0=\{1\}$
 (b) (S_k é o conjunto de vértices tal que $d_i^{-1}=0$)
 $S_{k+1}=\emptyset$
 Para todo $i \in S_k$ faça
 $r(i)=k$
 Para todo $j \in \Gamma_i$ faça $d_j^{-1} = d_i^{-1} - 1$
 Se $d_j^{-1}=0$ então $S_{k+1}=S_{k+1}+j$
 (c) Faça $k=k+1$
 Se $|S_k|=0$ então encerra senão vai para (b)

Adaptado de Gondran, Minoux e Vajda (1984, p.55)

Por ser muito simplificado o algoritmo não é de compreensão imediata. O vetor d_i^- possui dimensão igual ao número de nós do grafo e seus elementos contém o número de predecessores diretos de cada nó. A variável k , que é iniciada com valor zero, é incrementada a cada vez que um novo nível é definido. O vetor S recebe em cada etapa os nós que compõe cada nível e que serão os precedentes do nível seguinte. O vetor r tem dimensão igual ao número de nós do grafo e ao final do algoritmo cada elemento seu indicará a que nível o nó pertence. Os autores apresentam o grafo da Figura D.2 para exemplificar o funcionamento do algoritmo.

Figura D.2 - Grafo exemplo

Neste exemplo o algoritmo encontra 6 níveis como mostra a Figura D.3. Considerando que cada nó representa uma operação em uma peça nota-se que há duas seqüências possíveis: 1-3-2-6-4-5-7 ou 1-3-2-6-5-4-7.

Figura D.3 - Grafo separado em níveis

D.4 Representação do grafo

Além da forma gráfica pode-se representar um grafo usando a matriz de adjacência ou a matriz de incidência. Porém, os grafos dirigidos e sem circuitos podem ser representados simplesmente pelas suas relações de precedência, como mostram Gondran, Minoux e Vajda (1984, p.65). A Tabela D.1 apresenta as relações de precedência para a construção de uma casa de campo enquanto a Figura D.4 mostra o grafo em sua forma gráfica (já dividida em níveis pelo Algoritmo 8).

Tabela D.1 - Representação de grafo por precedências

Tarefa	Descrição	Tarefas precedentes
A	Alvenaria	-
B	Carpintaria do telhado	A
C	Telhado	B
D	Instalações elétricas e sanitárias	A
E	Fachada	C, D
F	Janelas	C, D
G	Jardim	C, D
H	Teto	F
I	Pintura	H
J	Mudança	E, G, I

Figura D.4 - Grafo referente à Tabela D.1

D.5 Implementação do algoritmo

O algoritmo 8 foi implementado em Visual Basic 6 e sua tela está apresentada na Figura D.5. O programa lê um arquivo com os dados (operação e precedentes) e apresenta os níveis.

Figura D.5 - Implementação do Algoritmo 8

Nota-se que o programa já informa o número total de seqüências possíveis. Esse valor é o resultado da multiplicação do fatorial do número de operações que existem em cada nível. No exemplo da Figura D.5 tem-se o seguinte cálculo: $1! * 2! * 1! * 3! * 1! * 1! * 1! = 12$. De forma genérica tem-se a eq.(D.1).

$$NTS = \prod_{i=0}^{nn} (nop(i)!) \quad (D.1)$$

Onde: NTS = Número Total de Seqüências

nn = número de níveis-1

nop(i) = número de operações do nível i

Em uma primeira implementação as precedências eram representadas por uma cadeia de caracteres onde cada elemento representava uma operação (por exemplo, ABF). Porém isso impedia o uso de elementos numéricos para representar as operações já que não haveria como identificar que 1101001000 significa 1 10 100 1000. Poderia ter sido definida uma quantidade fixa de dígitos para cada elemento, porém optou-se por adicionar o caractere “-” após cada elemento para servir como identificador. Isso possibilita o uso de elementos numérico e/ou combinações de letras. A Figura D.6 mostra a tela do programa com elementos numéricos.

Figura D.6 - Exemplo com elementos numéricos

APÊNDICE E - Algoritmo Genético

E.1 Introdução

Um algoritmo genético (AG, ou GA - *Genetic Algorithm*) é um procedimento computacional baseado nos mecanismos genéticos da seleção natural e seu objetivo é obter a otimização global de um problema. Segundo Goldberg (1989, p.1) esse procedimento foi criado por John Holland juntamente com colegas e alunos da Universidade de Michigan. Lacerda e Carvalho (1999, p.99) acrescentam que sua popularização ocorreu com a publicação do livro de Goldberg (1999), que foi aluno de Holland.

O problema é codificado de forma que cada possível solução seja representada por uma cadeia de caracteres que é denominada de *cromossomo* e onde cada caractere é denominado de *gene*. Salvador (2005, p.2) cita que tradicionalmente os indivíduos são representados por vetores binários, onde cada elemento de um vetor denota a presença (1) ou ausência (0) de uma determinada característica (o genótipo). Assim os elementos são combinados para formar as características do indivíduo (o fenótipo). Problemas mais complexos, como mostram Lacerda e Carvalho (1999, p.141), são representadas por cadeias de caracteres compostas por mais de dois tipos de elementos. Além disso, citam que muitos trabalhos têm mostrado preferência ao uso de representação com números reais ao invés de números binários.

O procedimento inicia-se com uma população inicial contendo um conjunto de indivíduos, ou seja, um conjunto de cromossomos. Na grande maioria das implementações o tamanho da população mantém-se fixo durante todo o procedimento. Em seguida, citam Gravel, Nsakanda e Price (1998, p.286), cada indivíduo é avaliado por uma função de *aptidão*, sendo que os mais aptos são levados diretamente para a próxima geração (processo de seleção natural dos indivíduos mais aptos). Lacerda e Carvalho (1999, p.108) citam que esse procedimento é denominado *elitismo*.

Para completar a nova população são selecionados indivíduos da população inicial para sofrerem modificações, denominadas de cruzamento (partes de dois cromossomos pais são trocadas para gerar dois cromossomos filhos) e mutação (alterações aleatórias nos genes). Quando a nova população está completa ela toma o lugar da geração anterior e o ciclo se reinicia até que

uma condição de encerramento seja satisfeita (LACERDA e CARVALHO, 1999, p.101). A Figura E.1 apresenta a estrutura geral do funcionamento do algoritmo genético.

Figura E.1 - Estrutura geral de um algoritmo genético

As principais características dos algoritmos genéticos, segundo Goldberg (1989, p.5), são: paralelismo, direcionamento e aleatoriedade. O paralelismo vem do fato do procedimento realizar a busca em um conjunto de pontos de forma simultânea (os elementos da população). O direcionamento relaciona-se com a passagem dos melhores elementos, sem alteração, para a geração seguinte (manutenção do ótimo atual). A aleatoriedade vem do fato

das alterações realizadas entre uma geração e outra e que tem dois diferentes níveis: a mutação realiza uma pequena alteração que pode resultar na melhoria do ótimo atual (e, por isso, possui uma probabilidade de ocorrência relativamente alta) enquanto o cruzamento realiza uma alteração mais drástica, buscando fugir do ótimo atual (que pode ser um ótimo local) e encontrar outros ótimos (que podem levar ao ótimo global).

E.2 Exemplo

Para demonstrar a funcionalidade do algoritmo implementado será usado o exemplo apresentado por Montreuil et al. (1993, p.5) que contém 150 máquinas divididas em 30 tipos. Em uma primeira execução o arranjo físico inicial é do tipo funcional, como mostra a Figura E.2.

Figura E.2 - Arranjo físico funcional adotado para iniciar para o AG

A Figura E.3 mostra a tela ao final da execução do algoritmo genético e a Figura E.4 mostra o arranjo físico obtido. Esse exemplo foi rodado em um Pentium III operando em 650 Mhz e com 256 Mb de memória RAM.

Figura E.3 - Tela após a execução do algoritmo genético

Figura E.4 – Arranjo físico obtido pelo algoritmo genético

APÊNDICE F - Estruturas de Precedência

F.1 Introdução

Para a geração automática de peças com flexibilidade de seqüência foram criadas estruturas de precedência para peças com número de operações variando de 3 até 15. Os quadros a seguir apresentam graficamente as relações de precedência elaboradas para cada número de operações.

Quadro F.1 - Relações de precedência para peças com 3 operações

Modelo	Estrutura	Número de Seqüências
1		6

Quadro F.2 - Relações de precedência para peças com 4 operações

Modelo	Estrutura	Número de Seqüências
1	<pre>graph LR; A((A)) --> D((D)); B((B)) --> D; C((C)) --> D;</pre>	6
2	<pre>graph LR; A((A)) --> B((B)); A --> C((C)); A --> D((D));</pre>	6
3	<pre>graph LR; A((A)); B((B)); C((C)); D((D));</pre>	24

Quadro F.3 - Relações de precedência para peças com 5 operações

Modelo	Estrutura	Número de Sequências
1	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) A --> C((C)) A --> D((D)) B --> E((E)) C --> E D --> E </pre>	6
2	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) A --> C((C)) A --> D((D)) A --> E((E)) </pre>	24
3	<pre> graph LR A((A)) --> E((E)) B((B)) --> E C((C)) --> E D((D)) --> E </pre>	24

Quadro F.4 - Relações de precedência para peças com 6 operações

Modelo	Estrutura	Número de Sequências
1	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) A --> C((C)) A --> D((D)) B --> E((E)) C --> E D --> F((F)) </pre>	12
2	<pre> graph LR A((A)) --> D((D)) B((B)) --> D C((C)) --> D D --> E((E)) D --> F((F)) </pre>	12
3	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) A --> C((C)) A --> D((D)) A --> E((E)) B --> F((F)) C --> F D --> F E --> F </pre>	24
4	<pre> graph LR A((A)) --> C((C)) A --> D((D)) B((B)) --> D B --> E((E)) C --> F((F)) D --> F E --> F </pre>	12

Quadro F.5 - Relações de precedência para peças com 7 operações

Modelo	Estrutura	Número de Sequências
1	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) A --> C((C)) B --> D((D)) B --> E((E)) C --> E C --> F((F)) D --> G((G)) E --> G F --> G </pre>	12
2	<pre> graph LR A((A)) --> C((C)) A --> D((D)) B((B)) --> D B --> E((E)) C --> F((F)) D --> F D --> G((G)) E --> G </pre>	24
3	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) A --> C((C)) A --> D((D)) A --> E((E)) B --> G((G)) C --> F((F)) D --> F E --> G F --> G </pre>	24
4	<pre> graph LR A((A)) --> D((D)) B((B)) --> D C((C)) --> D D --> E((E)) D --> F((F)) D --> G((G)) </pre>	36
5	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) A --> C((C)) A --> D((D)) B --> E((E)) C --> E C --> F((F)) D --> F E --> G((G)) F --> G </pre>	12

Quadro F.6 - Relações de precedência para peças com 8 operações

Modelo	Estrutura	Número de Sequências
1	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) A --> C((C)) A --> D((D)) B --> E((E)) C --> E C --> F((F)) D --> F E --> G((G)) F --> G G --> H((H)) </pre>	12
2	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) A --> C((C)) A --> D((D)) A --> E((E)) B --> F((F)) C --> F D --> F E --> F F --> G((G)) F --> H((H)) </pre>	48
3	<pre> graph LR A((A)) --> C((C)) A --> D((D)) B((B)) --> D C --> F((F)) D --> F D --> G((G)) E((E)) --> G F --> H((H)) </pre>	24
4	<pre> graph LR A((A)) --> D((D)) B((B)) --> D C((C)) --> D D --> E((E)) D --> G((G)) E --> H((H)) F((F)) --> H G --> H </pre>	36
5	<pre> graph LR A((A)) --> D((D)) B((B)) --> D B --> E((E)) C((C)) --> E D --> F((F)) D --> G((G)) E --> G E --> H((H)) </pre>	72

Quadro F.7 - Relações de precedência para peças com 9 operações

Modelo	Estrutura	Número de Sequências
1	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) A --> C((C)) B --> D((D)) C --> E((E)) C --> F((F)) D --> G((G)) E --> G F --> G G --> H((H)) H --> I((I)) </pre>	12
2	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) A --> C((C)) A --> D((D)) A --> E((E)) B --> F((F)) C --> F D --> F E --> F F --> G((G)) F --> H((H)) G --> I((I)) H --> I </pre>	48
3	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) A --> C((C)) A --> D((D)) B --> E((E)) C --> E D --> E E --> F((F)) E --> G((G)) E --> H((H)) F --> I((I)) G --> I H --> I </pre>	36
4	<pre> graph LR A((A)) --> C((C)) A --> D((D)) B((B)) --> D B --> E((E)) C --> F((F)) D --> F D --> G((G)) E --> G F --> H((H)) G --> H H --> I((I)) </pre>	24
5	<pre> graph LR A((A)) --> D((D)) A --> F((F)) B((B)) --> D B --> E((E)) C((C)) --> E D --> G((G)) E --> G E --> H((H)) F --> I((I)) G --> I H --> I </pre>	72

Quadro F.8 - Relações de precedência para peças com 10 operações

Modelo	Estrutura	Número de Sequências
1	<pre> graph LR A((A)) --> D((D)) B((B)) --> D D --> F((F)) C((C)) --> F F --> G((G)) F --> H((H)) F --> I((I)) H --> J((J)) I --> J </pre>	72
2	<pre> graph LR A((A)) --> D((D)) B((B)) --> D D --> F((F)) D --> G((G)) C((C)) --> F F --> H((H)) G --> H H --> I((I)) H --> J((J)) </pre>	48
3	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) A --> C((C)) B --> D((D)) B --> E((E)) C --> D C --> E C --> F((F)) D --> H((H)) E --> H E --> F E --> I((I)) F --> I G((G)) --> I H --> J((J)) I --> J </pre>	96
4	<pre> graph LR A((A)) --> D((D)) B((B)) --> D C((C)) --> D D --> E((E)) D --> G((G)) E --> H((H)) G --> H F((F)) --> H H --> I((I)) H --> J((J)) </pre>	72
5	<pre> graph LR A((A)) --> C((C)) B((B)) --> C C --> D((D)) C --> E((E)) D --> F((F)) D --> G((G)) E --> G E --> H((H)) F --> I((I)) G --> I H --> I I --> J((J)) </pre>	24

Quadro F.9 - Relações de precedência para peças com 11 operações

Modelo	Estrutura	Número de Sequências
1	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) A((A)) --> C((C)) B((B)) --> D((D)) C((C)) --> E((E)) D((D)) --> F((F)) E((E)) --> F((F)) F((F)) --> G((G)) F((F)) --> H((H)) F((F)) --> I((I)) G((G)) --> J((J)) H((H)) --> J((J)) I((I)) --> J((J)) J((J)) --> K((K)) </pre>	24
2	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) B((B)) --> C((C)) B((B)) --> D((D)) B((B)) --> E((E)) C((C)) --> F((F)) D((D)) --> F((F)) E((E)) --> F((F)) F((F)) --> G((G)) F((F)) --> H((H)) G((G)) --> I((I)) H((H)) --> J((J)) I((I)) --> K((K)) J((J)) --> K((K)) </pre>	24
3	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) A((A)) --> C((C)) B((B)) --> D((D)) C((C)) --> D((D)) D((D)) --> E((E)) E((E)) --> F((F)) E((E)) --> G((G)) E((E)) --> H((H)) F((F)) --> I((I)) G((G)) --> I((I)) H((H)) --> J((J)) I((I)) --> K((K)) J((J)) --> K((K)) </pre>	24
4	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) B((B)) --> C((C)) C((C)) --> D((D)) D((D)) --> E((E)) D((D)) --> F((F)) D((D)) --> G((G)) D((D)) --> H((H)) E((E)) --> I((I)) F((F)) --> I((I)) G((G)) --> I((I)) H((H)) --> I((I)) I((I)) --> J((J)) J((J)) --> K((K)) </pre>	24
5	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) A((A)) --> C((C)) B((B)) --> D((D)) C((C)) --> D((D)) D((D)) --> E((E)) D((D)) --> F((F)) D((D)) --> G((G)) E((E)) --> H((H)) F((F)) --> H((H)) G((G)) --> H((H)) H((H)) --> I((I)) H((H)) --> J((J)) I((I)) --> K((K)) J((J)) --> K((K)) </pre>	24

Quadro F.10 - Relações de precedência para peças com 12 operações

Modelo	Estrutura	Número de Sequências
1		24
2		48
3		24
4		24
5		24

Quadro F.11 - Relações de precedência para peças com 13 operações

Modelo	Estrutura	Número de Sequências
1	<pre>graph LR; A((A)) --> B((B)); A --> C((C)); B --> D((D)); C --> E((E)); D --> F((F)); E --> F; F --> G((G)); F --> H((H)); F --> I((I)); G --> J((J)); H --> J; H --> K((K)); I --> K; J --> L((L)); K --> L; L --> M((M))</pre>	48
2	<pre>graph LR; A((A)) --> B((B)); B --> C((C)); C --> D((D)); C --> E((E)); D --> F((F)); E --> F; F --> G((G)); F --> I((I)); G --> H((H)); I --> H; H --> J((J)); J --> K((K)); J --> L((L)); K --> M((M)); L --> M</pre>	24
3	<pre>graph LR; A((A)) --> B((B)); A --> C((C)); B --> D((D)); C --> D; D --> E((E)); D --> F((F)); E --> G((G)); F --> G; G --> H((H)); G --> I((I)); H --> J((J)); I --> J; J --> K((K)); J --> L((L)); K --> M((M)); L --> M</pre>	16
4	<pre>graph LR; A((A)) --> B((B)); A --> C((C)); B --> D((D)); C --> D; D --> E((E)); D --> F((F)); E --> G((G)); F --> G; G --> H((H)); G --> I((I)); G --> J((J)); H --> K((K)); I --> K; J --> L((L)); K --> M((M)); L --> M</pre>	48
5	<pre>graph LR; A((A)) --> B((B)); A --> C((C)); B --> D((D)); C --> D; D --> E((E)); D --> G((G)); E --> H((H)); G --> H; H --> I((I)); H --> J((J)); I --> K((K)); J --> K; K --> L((L)); L --> M((M))</pre>	24

Quadro F.12 - Relações de precedência para peças com 14 operações

Modelo	Estrutura	Número de Sequências
1		576
2		144
3		288
4		216
5		576

Quadro F.13 - Relações de precedência para peças com 15 operações

Modelo	Estrutura	Número de Sequências
1	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) A((A)) --> C((C)) B((B)) --> D((D)) C((C)) --> D((D)) D((D)) --> E((E)) D((D)) --> F((F)) D((D)) --> G((G)) E((E)) --> H((H)) F((F)) --> H((H)) G((G)) --> H((H)) H((H)) --> I((I)) H((H)) --> J((J)) H((H)) --> K((K)) I((I)) --> L((L)) J((J)) --> L((L)) J((J)) --> M((M)) K((K)) --> M((M)) L((L)) --> N((N)) M((M)) --> N((N)) N((N)) --> O((O)) </pre>	144
2	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) A((A)) --> C((C)) B((B)) --> D((D)) B((B)) --> E((E)) C((C)) --> F((F)) C((C)) --> G((G)) E((E)) --> H((H)) F((F)) --> H((H)) G((G)) --> H((H)) H((H)) --> I((I)) D((D)) --> I((I)) I((I)) --> J((J)) I((I)) --> K((K)) I((I)) --> L((L)) J((J)) --> M((M)) K((K)) --> O((O)) L((L)) --> N((N)) M((M)) --> O((O)) N((N)) --> O((O)) </pre>	576
3	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) A((A)) --> C((C)) B((B)) --> E((E)) C((C)) --> D((D)) C((C)) --> F((F)) E((E)) --> G((G)) D((D)) --> F((F)) F((F)) --> G((G)) G((G)) --> H((H)) G((G)) --> I((I)) H((H)) --> J((J)) I((I)) --> J((J)) J((J)) --> K((K)) J((J)) --> L((L)) J((J)) --> M((M)) K((K)) --> N((N)) L((L)) --> N((N)) M((M)) --> N((N)) N((N)) --> O((O)) </pre>	144
4	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) A((A)) --> C((C)) B((B)) --> D((D)) C((C)) --> D((D)) D((D)) --> E((E)) D((D)) --> F((F)) D((D)) --> G((G)) E((E)) --> I((I)) F((F)) --> I((I)) G((G)) --> I((I)) H((H)) --> I((I)) I((I)) --> J((J)) I((I)) --> K((K)) I((I)) --> L((L)) J((J)) --> L((L)) K((K)) --> L((L)) L((L)) --> M((M)) M((M)) --> N((N)) N((N)) --> O((O)) </pre>	480
5	<pre> graph LR A((A)) --> B((B)) B((B)) --> C((C)) B((B)) --> D((D)) B((B)) --> E((E)) C((C)) --> F((F)) D((D)) --> G((G)) E((E)) --> H((H)) F((F)) --> I((I)) G((G)) --> I((I)) H((H)) --> J((J)) I((I)) --> K((K)) J((J)) --> L((L)) K((K)) --> M((M)) L((L)) --> M((M)) M((M)) --> N((N)) N((N)) --> O((O)) </pre>	144

APÊNDICE G - Modelos para posicionamento de máquinas

G.1 Introdução

A etapa de cálculo da posição ideal para máquinas no algoritmo ALVO faz uso de posições pré-definidas. As figuras a seguir apresentam as dimensões adotadas para cada situação apresentada no Capítulo 6.

Figura G.1 - Dimensões para 3 máquinas

Figura G.2 - Dimensões para 4 máquinas

Figura G.3 - Dimensões para 5 máquinas

Figura G.4 - Dimensões para 6 máquinas

Figura G.5 - Dimensões para 7 máquinas

Figura G.6 - Dimensões para 8 máquinas

Figura G.7 - Dimensões para 9 máquinas

Figura G.8 - Dimensões para 10 máquinas

APÊNDICE H - Exemplos de roteamento

H.1 Introdução

Este apêndice mostra em detalhes as análises envolvidas no procedimento de roteamento descrito no Capítulo 5 (item 5.6), tanto no modo rígido quanto no flexível.

O exemplo usa 4 peças (P1, P2, P3 e P4) que possuem, cada uma, 4 operações com duração de 10 unidades de tempo. O arranjo físico usado no exemplo está representado na Figura H.1.

2.01	4.01	4.02
2.02	1.01	4.03
3.01	3.02	3.03

Figura H.1 - Arranjo físico

As possíveis rotas para cada seqüência de fabricação dependem do número de operações da peça e também do número de máquinas que podem executar cada operação. Por exemplo, supondo que a seqüência seja 1-2-3-4 a árvore de busca obtida está representada na Figura H.2 com suas 18 rotas possíveis. Outras seqüências para as mesmas 4 operações neste mesmo arranjo físico também irão levar a 18 rotas, porém a forma da árvore será diferente.

Figura H.2 - Árvore de rotas

H.2 Roteamento rígido

O roteamento rígido considera somente a primeira sequência de fabricação de cada peça e, neste caso, a sequência será 1-2-3-4 para as quatro peças.

A Figura H.3 mostra o gráfico de Gantt e sua matriz de alocação correspondente obtida pelo roteamento rígido.

Figura H.3 - Gráfico de Gantt e matriz de alocação (rígido)

A listagem a seguir é o conteúdo do arquivo detalhado de alocação. A parte inicial apresenta informações tais como: dia e hora em que o roteamento foi executado, detalhes sobre o arranjo físico (quantidade, nome do arquivo, descrição do arquivo, modo de geração e grau de distribuição), modo de roteamento, número de peças e diretório onde os arquivos de peças estavam localizados.

Nota-se que para cada peça, neste caso, é analisada somente uma sequência (Seq 1). Como as peças possuem 4 operações o roteamento requer 3 etapas. Ao final do roteamento de cada peça a listagem apresenta:

Melhor sequência: que neste caso será sempre a primeira.

Término: instante de encerramento da última operação.

Distância percorrida: é a distância retilinear entre as máquinas usadas.

Processo: mostra a sequência de máquinas a ser usada.

Alocação: mostra detalhes de cada operação (máquina selecionada, instante de início, duração e instante de finalização da operação).

O final da listagem mostra as informações gerais do roteamento.

Gerado em 28/06/2006 às 16:18:37

Arranjo: 1 de 1

Exemplo.ARR
Exemplo de roteamento para Apêndice H
Edição manual
GdD= 4.458333

Roteamento sem flexibilidade de seqüência.

Número de peças roteadas: 4

Diretório das peças: D:\Exemplo apêndice H\Pecas_01

=====

Peça: P1.PEC

Número de Operações: 4

Seq 1=> 1-2-3-4-

Etapa 1

Rota 1=> 1.1 2.1 -> (Término= 20 Distância= 2)

Rota 2=> 1.1 2.2 -> (Término= 20 Distância= 1)

Etapa 2

Rota 1=> 2.2 3.1 -> (Término= 30 Distância= 2)

Rota 2=> 2.2 3.2 -> (Término= 30 Distância= 3)

Rota 3=> 2.2 3.3 -> (Término= 30 Distância= 4)

Etapa 3

Rota 1=> 3.1 4.1 -> (Término= 40 Distância= 5)

Rota 2=> 3.1 4.2 -> (Término= 40 Distância= 6)

Rota 3=> 3.1 4.3 -> (Término= 40 Distância= 5)

Melhor Seqüência= 1 (1-2-3-4-)

Término= 40

Distância percorrida= 5

Processo: 1.1-> 2.2-> 3.1-> 4.1

Alocação

Op1 na máquina 1.1 (Início= 0 Duração= 10 Final= 10)

Op2 na máquina 2.2 (Início= 10 Duração= 10 Final= 20)

Op3 na máquina 3.1 (Início= 20 Duração= 10 Final= 30)

Op4 na máquina 4.1 (Início= 30 Duração= 10 Final= 40)

=====

Peça: P2.PEC

Número de Operações: 4

Seq 1=> 1-2-3-4-

Etapa 1

Rota 1=> 1.1 2.1 -> (Término= 30 Distância= 2)

Rota 2=> 1.1 2.2 -> (Término= 30 Distância= 1)

Etapa 2

Rota 1=> 2.2 3.1 -> (Término= 40 Distância= 2)

Rota 2=> 2.2 3.2 -> (Término= 40 Distância= 3)

Rota 3=> 2.2 3.3 -> (Término= 40 Distância= 4)

Etapa 3

Rota 1=> 3.1 4.1 -> (Término= 50 Distância= 5)

Rota 2=> 3.1 4.2 -> (Término= 50 Distância= 6)

Rota 3=> 3.1 4.3 -> (Término= 50 Distância= 5)

Melhor Seqüência= 1 (1-2-3-4-)

Término= 50

Distância percorrida= 5

Processo: 1.1-> 2.2-> 3.1-> 4.1

Alocação

Op1 na máquina 1.1 (Início= 10 Duração= 10 Final= 20)

Op2 na máquina 2.2 (Início= 20 Duração= 10 Final= 30)

Op3 na máquina 3.1 (Início= 30 Duração= 10 Final= 40)
 Op4 na máquina 4.1 (Início= 40 Duração= 10 Final= 50)

=====

Peça: P3.PEC

Número de Operações: 4

Seq 1=> 1-2-3-4-

Etapa 1

Rota 1=> 1.1 2.1 -> (Término= 40 Distância= 2)

Rota 2=> 1.1 2.2 -> (Término= 40 Distância= 1)

Etapa 2

Rota 1=> 2.2 3.1 -> (Término= 50 Distância= 2)

Rota 2=> 2.2 3.2 -> (Término= 50 Distância= 3)

Rota 3=> 2.2 3.3 -> (Término= 50 Distância= 4)

Etapa 3

Rota 1=> 3.1 4.1 -> (Término= 60 Distância= 5)

Rota 2=> 3.1 4.2 -> (Término= 60 Distância= 6)

Rota 3=> 3.1 4.3 -> (Término= 60 Distância= 5)

Melhor Seqüência= 1 (1-2-3-4-)

Término= 60

Distância percorrida= 5

Processo: 1.1-> 2.2-> 3.1-> 4.1

Alocação

Op1 na máquina 1.1 (Início= 20 Duração= 10 Final= 30)

Op2 na máquina 2.2 (Início= 30 Duração= 10 Final= 40)

Op3 na máquina 3.1 (Início= 40 Duração= 10 Final= 50)

Op4 na máquina 4.1 (Início= 50 Duração= 10 Final= 60)

=====

Peça: P4.PEC

Número de Operações: 4

Seq 1=> 1-2-3-4-

Etapa 1

Rota 1=> 1.1 2.1 -> (Término= 50 Distância= 2)

Rota 2=> 1.1 2.2 -> (Término= 50 Distância= 1)

Etapa 2

Rota 1=> 2.2 3.1 -> (Término= 60 Distância= 2)

Rota 2=> 2.2 3.2 -> (Término= 60 Distância= 3)

Rota 3=> 2.2 3.3 -> (Término= 60 Distância= 4)

Etapa 3

Rota 1=> 3.1 4.1 -> (Término= 70 Distância= 5)

Rota 2=> 3.1 4.2 -> (Término= 70 Distância= 6)

Rota 3=> 3.1 4.3 -> (Término= 70 Distância= 5)

Melhor Seqüência= 1 (1-2-3-4-)

Término= 70

Distância percorrida= 5

Processo: 1.1-> 2.2-> 3.1-> 4.1

Alocação

Op1 na máquina 1.1 (Início= 30 Duração= 10 Final= 40)

Op2 na máquina 2.2 (Início= 40 Duração= 10 Final= 50)

Op3 na máquina 3.1 (Início= 50 Duração= 10 Final= 60)

Op4 na máquina 4.1 (Início= 60 Duração= 10 Final= 70)

=====

== MakeSpan Total= 70 ==

== Distância total percorrida= 20 ==

== Tempo de processamento= 00h 00m 00.02s ==

=====

H.3 Roteamento flexível

Neste modo de roteamento cada peça terá 24 seqüências a serem avaliadas (4!). Cada seqüência terá três etapas. O resultado desse procedimento pode ser melhor visualizado pelo gráfico da Figura H.4, juntamente com a matriz de alocação.

Figura H.4 – Gráfico de Gantt e matriz de alocação (flexibilidade)

As informações da listagem a seguir são as mesmas apresentadas anteriormente.

Observando essas informações é possível compreender a dimensão do processo e as vantagens que essa maior quantidade de análises obtém sobre o roteamento rígido.

É interessante lembrar que este exemplo possui apenas 4 peças com 4 operações em um arranjo físico com somente 9 máquinas. Isso permite compreender algumas simulações realizadas nesta pesquisa consumiram mais de 15 horas de processamento: arranjos físicos com 80 máquinas e 150 peças (algumas com até 72 seqüências de fabricação).

Gerado em 28/06/2006 às 16:18:43

Arranjo: 1 de 1
 Exemplo.ARR
 Exemplo de roteamento para Apêndice H
 Edição manual
 GdD= 4.458333

Roteamento com flexibilidade de seqüência.
 Número de peças roteadas: 4
 Diretório das peças: D:\Exemplo apêndice H\Pecas_01

=====

Peça: P1.PEC

Número de Operações: 4

Seq 1=> 1-2-3-4-

Etapa 1

Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)

Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 1)

Etapa 2

Rota 1=> 2.02 3.01 -> (Término= 30 Distância= 2)

Rota 2=> 2.02 3.02 -> (Término= 30 Distância= 3)

Rota 3=> 2.02 3.03 -> (Término= 30 Distância= 4)

Etapa 3

Rota 1=> 3.01 4.01 -> (Término= 40 Distância= 5)

Rota 2=> 3.01 4.02 -> (Término= 40 Distância= 6)

Rota 3=> 3.01 4.03 -> (Término= 40 Distância= 5)

Seq 2=> 1-2-4-3-

Etapa 1

Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)

Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 1)

Etapa 2

Rota 1=> 2.02 4.01 -> (Término= 30 Distância= 3)

Rota 2=> 2.02 4.02 -> (Término= 30 Distância= 4)

Rota 3=> 2.02 4.03 -> (Término= 30 Distância= 3)

Etapa 3

Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 40 Distância= 6)

Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 40 Distância= 5)

Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 40 Distância= 6)

Rota 4=> 4.03 3.01 -> (Término= 40 Distância= 6)

Rota 5=> 4.03 3.02 -> (Término= 40 Distância= 5)

Rota 6=> 4.03 3.3 -> (Término= 40 Distância= 4)

Seq 3=> 1-3-2-4-

Etapa 1

Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 20 Distância= 2)

Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 20 Distância= 1)

Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 20 Distância= 2)

Etapa 2

Rota 1=> 3.02 2.01 -> (Término= 30 Distância= 4)

Rota 2=> 3.02 2.02 -> (Término= 30 Distância= 3)

Etapa 3

Rota 1=> 2.02 4.01 -> (Término= 40 Distância= 5)

Rota 2=> 2.02 4.02 -> (Término= 40 Distância= 6)

Rota 3=> 2.02 4.03 -> (Término= 40 Distância= 5)

Seq 4=> 1-3-4-2-

Etapa 1

Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 20 Distância= 2)

Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 20 Distância= 1)

Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 20 Distância= 2)

Etapa 2

Rota 1=> 3.02 4.01 -> (Término= 30 Distância= 3)

Rota 2=> 3.02 4.02 -> (Término= 30 Distância= 4)

Rota 3=> 3.02 4.03 -> (Término= 30 Distância= 3)

Etapa 3

Rota 1=> 4.01 2.01 -> (Término= 40 Distância= 4)

Rota 2=> 4.01 2.02 -> (Término= 40 Distância= 5)

Rota 3=> 4.03 2.01 -> (Término= 40 Distância= 6)

Rota 4=> 4.03 20.2 -> (Término= 40 Distância= 5)

Seq 5=> 1-4-2-3-

Etapa 1

Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 20 Distância= 1)

Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 20 Distância= 2)

```

    Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 20 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 4.01 2.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 2=> 4.01 2.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 3=> 4.03 2.01 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 4=> 4.03 2.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 2.01 3.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
    Rota 2=> 2.01 3.02 -> (Término= 40 Distância= 5)
    Rota 3=> 2.01 3.03 -> (Término= 40 Distância= 6)
Seq 6=> 1-4-3-2-
  Etapa 1
    Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
    Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 20 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 4=> 4.03 3.01 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 5=> 4.03 3.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 6=> 4.03 3.03 -> (Término= 30 Distância= 2)
  Etapa 3
    Rota 1=> 3.03 2.01 -> (Término= 40 Distância= 6)
    Rota 2=> 3.03 2.02 -> (Término= 40 Distância= 5)
Seq 7=> 2-1-3-4-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 1.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 2=> 2.02 1.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 30 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 3.02 4.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
    Rota 2=> 3.02 4.02 -> (Término= 40 Distância= 5)
    Rota 3=> 3.02 4.03 -> (Término= 40 Distância= 4)
Seq 8=> 2-1-4-3-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 1.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 2=> 2.02 1.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 30 Distância= 2)
  Etapa 3
    Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 40 Distância= 5)
    Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 40 Distância= 4)
    Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 40 Distância= 5)
    Rota 4=> 4.03 3.01 -> (Término= 40 Distância= 5)
    Rota 5=> 4.03 3.02 -> (Término= 40 Distância= 4)
    Rota 6=> 4.03 3.03 -> (Término= 40 Distância= 3)
Seq 9=> 2-3-1-4-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 3.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 2=> 2.01 3.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 3=> 2.01 3.03 -> (Término= 20 Distância= 4)
    Rota 4=> 2.02 3.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
    Rota 5=> 2.02 3.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 6=> 2.02 3.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
  Etapa 2

```

```

    Rota 1=> 3.01 1.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
    Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 40 Distância= 5)
    Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 40 Distância= 4)
Seq 10=> 2-3-4-1-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 3.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 2=> 2.01 3.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 3=> 2.01 3.03 -> (Término= 20 Distância= 4)
    Rota 4=> 2.02 3.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
    Rota 5=> 2.02 3.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 6=> 2.02 3.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
  Etapa 2
    Rota 1=> 3.01 4.01 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 2=> 3.01 4.02 -> (Término= 30 Distância= 5)
    Rota 3=> 3.01 4.03 -> (Término= 30 Distância= 4)
  Etapa 3
    Rota 1=> 4.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 5)
    Rota 2=> 4.03 1.01 -> (Término= 40 Distância= 5)
Seq 11=> 2-4-1-3-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 4.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
    Rota 2=> 2.01 4.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 3=> 2.01 4.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 4=> 2.02 4.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 5=> 2.02 4.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 6=> 2.02 4.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
  Etapa 2
    Rota 1=> 4.01 1.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
  Etapa 3
    Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
    Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 40 Distância= 3)
    Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 40 Distância= 4)
Seq 12=> 2-4-3-1-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 4.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
    Rota 2=> 2.01 4.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 3=> 2.01 4.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 4=> 2.02 4.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 5=> 2.02 4.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 6=> 2.02 4.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
  Etapa 2
    Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 30 Distância= 4)
  Etapa 3
    Rota 1=> 3.2 1.1 -> (Término= 40 Distância= 4)
Seq 13=> 3-1-2-4-
  Etapa 1
    Rota 1=> 3.01 1.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 2=> 3.02 1.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
    Rota 3=> 3.03 1.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
  Etapa 2
    Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 30 Distância= 2)
  Etapa 3
    Rota 1=> 2.02 4.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
    Rota 2=> 2.02 4.02 -> (Término= 40 Distância= 5)
    Rota 3=> 2.02 4.03 -> (Término= 40 Distância= 4)
Seq 14=> 3-1-4-2-

```

```

Etapa 1
  Rota 1=> 3.01 1.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
  Rota 2=> 3.02 1.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
  Rota 3=> 3.03 1.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
Etapa 2
  Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
  Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
  Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 30 Distância= 2)
Etapa 3
  Rota 1=> 4.01 2.01 -> (Término= 40 Distância= 3)
  Rota 2=> 4.01 2.02 -> (Término= 40 Distância= 4)
  Rota 3=> 4.03 2.01 -> (Término= 40 Distância= 5)
  Rota 4=> 4.03 2.02 -> (Término= 40 Distância= 4)
Seq 15=> 3-2-1-4-
  Etapa 1
    Rota 1=> 3.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 2=> 3.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 1)
    Rota 3=> 3.02 2.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 4=> 3.02 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 5=> 3.03 2.01 -> (Término= 20 Distância= 4)
    Rota 6=> 3.03 2.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
  Etapa 2
    Rota 1=> 2.02 1.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
  Etapa 3
    Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 40 Distância= 3)
    Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 40 Distância= 4)
    Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 40 Distância= 3)
Seq 16=> 3-2-4-1-
  Etapa 1
    Rota 1=> 3.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 2=> 3.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 1)
    Rota 3=> 3.02 2.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 4=> 3.02 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 5=> 3.03 2.01 -> (Término= 20 Distância= 4)
    Rota 6=> 3.03 2.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
  Etapa 2
    Rota 1=> 2.02 4.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 2=> 2.02 4.02 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 3=> 2.02 4.03 -> (Término= 30 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 4.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
    Rota 2=> 4.03 1.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
Seq 17=> 3-4-1-2-
  Etapa 1
    Rota 1=> 3.01 4.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 2=> 3.01 4.02 -> (Término= 20 Distância= 4)
    Rota 3=> 3.01 4.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 4=> 3.02 4.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 5=> 3.02 4.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 6=> 3.02 4.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 7=> 3.03 4.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 8=> 3.03 4.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 9=> 3.03 4.03 -> (Término= 20 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 4.03 1.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
  Etapa 3
    Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
    Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 40 Distância= 3)
Seq 18=> 3-4-2-1-
  Etapa 1
    Rota 1=> 3.01 4.01 -> (Término= 20 Distância= 3)

```

```

Rota 2=> 3.01 4.02 -> (Término= 20 Distância= 4)
Rota 3=> 3.01 4.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
Rota 4=> 3.02 4.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
Rota 5=> 3.02 4.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
Rota 6=> 3.02 4.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
Rota 7=> 3.03 4.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
Rota 8=> 3.03 4.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
Rota 9=> 3.03 40.3 -> (Término= 20 Distância= 1)
Etapa 2
Rota 1=> 4.03 2.01 -> (Término= 30 Distância= 4)
Rota 2=> 4.03 2.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
Etapa 3
Rota 1=> 2.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
Seq 19=> 4-1-2-3-
Etapa 1
Rota 1=> 4.01 1.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
Rota 2=> 4.02 1.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
Rota 3=> 4.03 1.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
Etapa 2
Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 30 Distância= 2)
Rota 3=> 1.01 2.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
Rota 4=> 1.01 2.02 -> (Término= 30 Distância= 2)
Etapa 3
Rota 1=> 2.02 3.01 -> (Término= 40 Distância= 3)
Rota 2=> 2.02 3.02 -> (Término= 40 Distância= 4)
Rota 3=> 2.02 3.03 -> (Término= 40 Distância= 5)
Rota 4=> 2.02 3.01 -> (Término= 40 Distância= 3)
Rota 5=> 2.02 3.02 -> (Término= 40 Distância= 4)
Rota 6=> 2.02 3.03 -> (Término= 40 Distância= 5)
Seq 20=> 4-1-3-2-
Etapa 1
Rota 1=> 4.01 1.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
Rota 2=> 4.02 1.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
Rota 3=> 4.03 1.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
Etapa 2
Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 30 Distância= 2)
Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 30 Distância= 3)
Rota 4=> 1.01 3.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
Rota 5=> 1.01 3.02 -> (Término= 30 Distância= 2)
Rota 6=> 1.01 3.03 -> (Término= 30 Distância= 3)
Etapa 3
Rota 1=> 3.02 2.01 -> (Término= 40 Distância= 5)
Rota 2=> 3.02 2.02 -> (Término= 40 Distância= 4)
Rota 3=> 3.02 2.01 -> (Término= 40 Distância= 5)
Rota 4=> 3.02 2.02 -> (Término= 40 Distância= 4)
Seq 21=> 4-2-1-3-
Etapa 1
Rota 1=> 4.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
Rota 2=> 4.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
Rota 3=> 4.02 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
Rota 4=> 4.02 2.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
Rota 5=> 4.03 2.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
Rota 6=> 4.03 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
Etapa 2
Rota 1=> 2.01 1.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
Etapa 3
Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 40 Distância= 5)
Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 40 Distância= 4)
Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 40 Distância= 5)

```

Seq 22=> 4-2-3-1-

Etapa 1

Rota 1=> 4.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
 Rota 2=> 4.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
 Rota 3=> 4.02 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
 Rota 4=> 4.02 2.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
 Rota 5=> 4.03 2.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
 Rota 6=> 4.03 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)

Etapa 2

Rota 1=> 2.01 3.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
 Rota 2=> 2.01 3.02 -> (Término= 30 Distância= 4)
 Rota 3=> 2.01 3.03 -> (Término= 30 Distância= 5)

Etapa 3

Rota 1=> 3.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 5)

Seq 23=> 4-3-1-2-

Etapa 1

Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
 Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
 Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
 Rota 4=> 4.02 3.01 -> (Término= 20 Distância= 4)
 Rota 5=> 4.02 3.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
 Rota 6=> 4.02 3.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
 Rota 7=> 4.03 3.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
 Rota 8=> 4.03 3.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
 Rota 9=> 4.03 3.03 -> (Término= 20 Distância= 1)

Etapa 2

Rota 1=> 3.03 1.01 -> (Término= 30 Distância= 3)

Etapa 3

Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 40 Distância= 5)
 Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 40 Distância= 4)

Seq 24=> 4-3-2-1-

Etapa 1

Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
 Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
 Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
 Rota 4=> 4.02 3.01 -> (Término= 20 Distância= 4)
 Rota 5=> 4.02 3.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
 Rota 6=> 4.02 3.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
 Rota 7=> 4.03 3.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
 Rota 8=> 4.03 3.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
 Rota 9=> 4.03 3.03 -> (Término= 20 Distância= 1)

Etapa 2

Rota 1=> 3.03 2.01 -> (Término= 30 Distância= 5)
 Rota 2=> 3.03 2.02 -> (Término= 30 Distância= 4)

Etapa 3

Rota 1=> 2.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 5)

Melhor Sequência= 8 (2-1-4-3-)**Término= 40****Distância percorrida= 3****Processo: 2.02-> 1.01-> 4.03-> 3.03****Alocação**

Op1 na máquina 2.02 (Início= 0 Duração= 10 Final= 10)
 Op2 na máquina 1.01 (Início= 10 Duração= 10 Final= 20)
 Op3 na máquina 4.03 (Início= 20 Duração= 10 Final= 30)
 Op4 na máquina 3.03 (Início= 30 Duração= 10 Final= 40)

=====

Peça: P2.PEC

Número de Operações: 4

Seq 1=> 1-2-3-4-

Etapa 1

```

        Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
        Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 1)
    Etapa 2
        Rota 1=> 2.02 3.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
        Rota 2=> 2.02 3.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
        Rota 3=> 2.02 3.03 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Etapa 3
        Rota 1=> 3.01 4.01 -> (Término= 40 Distância= 5)
        Rota 2=> 3.01 4.02 -> (Término= 40 Distância= 6)
        Rota 3=> 3.01 4.03 -> (Término= 40 Distância= 5)
Seq 2=> 1-2-4-3-
    Etapa 1
        Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
        Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 1)
    Etapa 2
        Rota 1=> 2.02 4.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
        Rota 2=> 2.02 4.02 -> (Término= 30 Distância= 4)
        Rota 3=> 2.02 4.03 -> (Término= 40 Distância= 3)
    Etapa 3
        Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 40 Distância= 6)
        Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 40 Distância= 5)
        Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 6)
Seq 3=> 1-3-2-4-
    Etapa 1
        Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
        Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 20 Distância= 1)
        Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Etapa 2
        Rota 1=> 3.02 2.01 -> (Término= 30 Distância= 4)
        Rota 2=> 3.02 2.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Etapa 3
        Rota 1=> 2.02 4.01 -> (Término= 40 Distância= 5)
        Rota 2=> 2.02 4.02 -> (Término= 40 Distância= 6)
        Rota 3=> 2.02 4.03 -> (Término= 40 Distância= 5)
Seq 4=> 1-3-4-2-
    Etapa 1
        Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
        Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 20 Distância= 1)
        Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Etapa 2
        Rota 1=> 3.02 4.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
        Rota 2=> 3.02 4.02 -> (Término= 30 Distância= 4)
        Rota 3=> 3.02 4.03 -> (Término= 40 Distância= 3)
    Etapa 3
        Rota 1=> 4.01 2.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
        Rota 2=> 4.01 2.02 -> (Término= 40 Distância= 5)
Seq 5=> 1-4-2-3-
    Etapa 1
        Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
        Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
        Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 20 Distância= 1)
    Etapa 2
        Rota 1=> 4.01 2.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
        Rota 2=> 4.01 2.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
        Rota 3=> 4.03 2.01 -> (Término= 30 Distância= 4)
        Rota 4=> 4.03 2.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Etapa 3
        Rota 1=> 2.01 3.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
        Rota 2=> 2.01 3.02 -> (Término= 40 Distância= 5)
        Rota 3=> 2.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 6)
Seq 6=> 1-4-3-2-

```

```

Etapa 1
  Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
  Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
  Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 20 Distância= 1)
Etapa 2
  Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 30 Distância= 4)
  Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
  Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 30 Distância= 4)
  Rota 4=> 4.03 3.01 -> (Término= 30 Distância= 4)
  Rota 5=> 4.03 3.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
  Rota 6=> 4.03 3.03 -> (Término= 30 Distância= 2)
Etapa 3
  Rota 1=> 3.03 2.01 -> (Término= 40 Distância= 6)
  Rota 2=> 3.03 2.02 -> (Término= 40 Distância= 5)
Seq 7=> 2-1-3-4-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 1.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 2=> 2.02 1.01 -> (Término= 30 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 40 Distância= 3)
    Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 40 Distância= 2)
    Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 3.02 4.01 -> (Término= 50 Distância= 4)
    Rota 2=> 3.02 4.02 -> (Término= 50 Distância= 5)
    Rota 3=> 3.02 4.03 -> (Término= 50 Distância= 4)
Seq 8=> 2-1-4-3-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 1.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 2=> 2.02 1.01 -> (Término= 30 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
    Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 40 Distância= 3)
    Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 40 Distância= 2)
  Etapa 3
    Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 50 Distância= 5)
    Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 50 Distância= 4)
    Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 5)
    Rota 4=> 4.03 3.01 -> (Término= 50 Distância= 5)
    Rota 5=> 4.03 3.02 -> (Término= 50 Distância= 4)
    Rota 6=> 4.03 3.03 -> (Término= 50 Distância= 3)
Seq 9=> 2-3-1-4-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 3.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 2=> 2.01 3.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 3=> 2.01 3.03 -> (Término= 20 Distância= 4)
    Rota 4=> 2.02 3.01 -> (Término= 30 Distância= 1)
    Rota 5=> 2.02 3.02 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 6=> 2.02 3.03 -> (Término= 30 Distância= 3)
  Etapa 2
    Rota 1=> 3.01 1.01 -> (Término= 30 Distância= 4)
  Etapa 3
    Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 40 Distância= 5)
    Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 40 Distância= 6)
    Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 40 Distância= 5)
Seq 10=> 2-3-4-1-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 3.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 2=> 2.01 3.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 3=> 2.01 3.03 -> (Término= 20 Distância= 4)
    Rota 4=> 2.02 3.01 -> (Término= 30 Distância= 1)

```



```

        Rota 5=> 2.02 3.02 -> (Término= 30 Distância= 2)
        Rota 6=> 2.02 3.03 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Etapa 2
        Rota 1=> 3.01 4.01 -> (Término= 30 Distância= 5)
        Rota 2=> 3.01 4.02 -> (Término= 30 Distância= 6)
        Rota 3=> 3.01 4.03 -> (Término= 40 Distância= 5)
    Etapa 3
        Rota 1=> 4.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 6)
Seq 11=> 2-4-1-3-
    Etapa 1
        Rota 1=> 2.01 4.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
        Rota 2=> 2.01 4.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
        Rota 3=> 2.01 4.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
        Rota 4=> 2.02 4.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
        Rota 5=> 2.02 4.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
        Rota 6=> 2.02 4.03 -> (Término= 40 Distância= 2)
    Etapa 2
        Rota 1=> 4.01 1.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Etapa 3
        Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
        Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 40 Distância= 3)
        Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 4)
Seq 12=> 2-4-3-1-
    Etapa 1
        Rota 1=> 2.01 4.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
        Rota 2=> 2.01 4.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
        Rota 3=> 2.01 4.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
        Rota 4=> 2.02 4.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
        Rota 5=> 2.02 4.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
        Rota 6=> 2.02 4.03 -> (Término= 40 Distância= 2)
    Etapa 2
        Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 30 Distância= 4)
        Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
        Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Etapa 3
        Rota 1=> 3.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
Seq 13=> 3-1-2-4-
    Etapa 1
        Rota 1=> 3.01 1.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
        Rota 2=> 3.02 1.01 -> (Término= 30 Distância= 1)
        Rota 3=> 3.03 1.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Etapa 2
        Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 40 Distância= 3)
        Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 40 Distância= 2)
    Etapa 3
        Rota 1=> 2.02 4.01 -> (Término= 50 Distância= 4)
        Rota 2=> 2.02 4.02 -> (Término= 50 Distância= 5)
        Rota 3=> 2.02 4.03 -> (Término= 50 Distância= 4)
Seq 14=> 3-1-4-2-
    Etapa 1
        Rota 1=> 3.01 1.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
        Rota 2=> 3.02 1.01 -> (Término= 30 Distância= 1)
        Rota 3=> 3.03 1.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Etapa 2
        Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
        Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 40 Distância= 3)
        Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 40 Distância= 2)
    Etapa 3
        Rota 1=> 4.01 2.01 -> (Término= 50 Distância= 3)
        Rota 2=> 4.01 2.02 -> (Término= 50 Distância= 4)
        Rota 3=> 4.03 2.01 -> (Término= 50 Distância= 5)

```

```

    Rota 4=> 4.03 2.02 -> (Término= 50 Distância= 4)
Seq 15=> 3-2-1-4-
  Etapa 1
    Rota 1=> 3.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 2=> 3.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 1)
    Rota 3=> 3.02 2.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 4=> 3.02 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 5=> 3.03 2.01 -> (Término= 20 Distância= 4)
    Rota 6=> 3.03 2.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
  Etapa 2
    Rota 1=> 2.02 1.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
  Etapa 3
    Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 40 Distância= 3)
    Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 40 Distância= 4)
    Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 40 Distância= 3)
Seq 16=> 3-2-4-1-
  Etapa 1
    Rota 1=> 3.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 2=> 3.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 1)
    Rota 3=> 3.02 2.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 4=> 3.02 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 5=> 3.03 2.01 -> (Término= 20 Distância= 4)
    Rota 6=> 3.03 2.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
  Etapa 2
    Rota 1=> 2.02 4.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 2=> 2.02 4.02 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 3=> 2.02 4.03 -> (Término= 40 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 4.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
Seq 17=> 3-4-1-2-
  Etapa 1
    Rota 1=> 3.01 4.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 2=> 3.01 4.02 -> (Término= 20 Distância= 4)
    Rota 3=> 3.01 4.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 4=> 3.02 4.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 5=> 3.02 4.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 6=> 3.02 4.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 7=> 3.03 4.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 8=> 3.03 4.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 9=> 3.03 4.03 -> (Término= 20 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 4.03 1.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
  Etapa 3
    Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
    Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 40 Distância= 3)
Seq 18=> 3-4-2-1-
  Etapa 1
    Rota 1=> 3.01 4.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 2=> 3.01 4.02 -> (Término= 20 Distância= 4)
    Rota 3=> 3.01 4.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 4=> 3.02 4.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 5=> 3.02 4.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 6=> 3.02 4.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 7=> 3.03 4.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 8=> 3.03 4.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 9=> 3.03 4.03 -> (Término= 20 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 4.03 2.01 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 2=> 4.03 2.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 2.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 4)

```

Seq 19=> 4-1-2-3-

Etapa 1

Rota 1=> 4.01 1.01 -> (Término= 30 Distância= 1)

Rota 2=> 4.02 1.01 -> (Término= 30 Distância= 2)

Rota 3=> 4.03 1.01 -> (Término= 30 Distância= 1)

Etapa 2

Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 40 Distância= 3)

Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 40 Distância= 2)

Rota 3=> 1.01 2.01 -> (Término= 40 Distância= 3)

Rota 4=> 1.01 2.02 -> (Término= 40 Distância= 2)

Etapa 3

Rota 1=> 2.02 3.01 -> (Término= 50 Distância= 3)

Rota 2=> 2.02 3.02 -> (Término= 50 Distância= 4)

Rota 3=> 2.02 3.03 -> (Término= 50 Distância= 5)

Rota 4=> 2.02 3.01 -> (Término= 50 Distância= 3)

Rota 5=> 2.02 3.02 -> (Término= 50 Distância= 4)

Rota 6=> 2.02 3.03 -> (Término= 50 Distância= 5)

Seq 20=> 4-1-3-2-

Etapa 1

Rota 1=> 4.01 1.01 -> (Término= 30 Distância= 1)

Rota 2=> 4.02 1.01 -> (Término= 30 Distância= 2)

Rota 3=> 4.03 1.01 -> (Término= 30 Distância= 1)

Etapa 2

Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 40 Distância= 3)

Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 40 Distância= 2)

Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 3)

Rota 4=> 1.01 3.01 -> (Término= 40 Distância= 3)

Rota 5=> 1.01 3.02 -> (Término= 40 Distância= 2)

Rota 6=> 1.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 3)

Etapa 3

Rota 1=> 3.02 2.01 -> (Término= 50 Distância= 5)

Rota 2=> 3.02 2.02 -> (Término= 50 Distância= 4)

Rota 3=> 3.02 2.01 -> (Término= 50 Distância= 5)

Rota 4=> 3.02 2.02 -> (Término= 50 Distância= 4)

Seq 21=> 4-2-1-3-

Etapa 1

Rota 1=> 4.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 1)

Rota 2=> 4.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)

Rota 3=> 4.02 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)

Rota 4=> 4.02 2.02 -> (Término= 20 Distância= 3)

Rota 5=> 4.03 2.01 -> (Término= 20 Distância= 3)

Rota 6=> 4.03 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)

Etapa 2

Rota 1=> 2.01 1.01 -> (Término= 30 Distância= 3)

Etapa 3

Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 40 Distância= 5)

Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 40 Distância= 4)

Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 5)

Seq 22=> 4-2-3-1-

Etapa 1

Rota 1=> 4.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 1)

Rota 2=> 4.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)

Rota 3=> 4.02 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)

Rota 4=> 4.02 2.02 -> (Término= 20 Distância= 3)

Rota 5=> 4.03 2.01 -> (Término= 20 Distância= 3)

Rota 6=> 4.03 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)

Etapa 2

Rota 1=> 2.01 3.01 -> (Término= 30 Distância= 3)

Rota 2=> 2.01 3.02 -> (Término= 30 Distância= 4)

Rota 3=> 2.01 3.03 -> (Término= 30 Distância= 5)

Etapa 3

```

    Rota 1=> 3.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 5)
Seq 23=> 4-3-1-2-
  Etapa 1
    Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 4=> 4.02 3.01 -> (Término= 20 Distância= 4)
    Rota 5=> 4.02 3.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 6=> 4.02 3.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 7=> 4.03 3.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 8=> 4.03 3.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 9=> 4.03 3.03 -> (Término= 20 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 3.03 1.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 40 Distância= 5)
    Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 40 Distância= 4)
Seq 24=> 4-3-2-1-
  Etapa 1
    Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 4=> 4.02 3.01 -> (Término= 20 Distância= 4)
    Rota 5=> 4.02 3.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 6=> 4.02 3.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 7=> 4.03 3.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 8=> 4.03 3.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 9=> 4.03 3.03 -> (Término= 20 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 3.03 2.01 -> (Término= 30 Distância= 5)
    Rota 2=> 3.03 2.02 -> (Término= 30 Distância= 4)
  Etapa 3
    Rota 1=> 2.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 5)
Melhor Sequência= 11 (2-4-1-3-)
Término= 40
Distância percorrida= 3
Processo: 2.01-> 4.01-> 1.01-> 3.02
Alocação
  Op1 na máquina 2.01 (Início= 0 Duração= 10 Final= 10)
  Op2 na máquina 4.01 (Início= 10 Duração= 10 Final= 20)
  Op3 na máquina 1.01 (Início= 20 Duração= 10 Final= 30)
  Op4 na máquina 3.02 (Início= 30 Duração= 10 Final= 40)

```

Peça: P3.PEC

Número de Operações: 4

Seq 1=> 1-2-3-4-

Etapa 1

```

  Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
  Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 1)

```

Etapa 2

```

  Rota 1=> 2.02 3.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
  Rota 2=> 2.02 3.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
  Rota 3=> 2.02 3.03 -> (Término= 30 Distância= 4)

```

Etapa 3

```

  Rota 1=> 3.01 4.01 -> (Término= 40 Distância= 5)
  Rota 2=> 3.01 4.02 -> (Término= 40 Distância= 6)
  Rota 3=> 3.01 4.03 -> (Término= 40 Distância= 5)

```

Seq 2=> 1-2-4-3-

Etapa 1

```

  Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)

```

```

    Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 2.02 4.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 2=> 2.02 4.02 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 3=> 2.02 4.03 -> (Término= 40 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 40 Distância= 6)
    Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 50 Distância= 5)
    Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 6)
Seq 3=> 1-3-2-4-
  Etapa 1
    Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 20 Distância= 1)
    Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
  Etapa 2
    Rota 1=> 3.02 2.01 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 2=> 3.02 2.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 2.02 4.01 -> (Término= 40 Distância= 5)
    Rota 2=> 2.02 4.02 -> (Término= 40 Distância= 6)
    Rota 3=> 2.02 4.03 -> (Término= 40 Distância= 5)
Seq 4=> 1-3-4-2-
  Etapa 1
    Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 20 Distância= 1)
    Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
  Etapa 2
    Rota 1=> 3.02 4.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 2=> 3.02 4.02 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 3=> 3.02 4.03 -> (Término= 40 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 4.01 2.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
    Rota 2=> 4.01 2.02 -> (Término= 40 Distância= 5)
Seq 5=> 1-4-2-3-
  Etapa 1
    Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 30 Distância= 1)
    Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 20 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 4.03 2.01 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 2=> 4.03 2.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 2.02 3.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
    Rota 2=> 2.02 3.02 -> (Término= 50 Distância= 5)
    Rota 3=> 2.02 3.03 -> (Término= 50 Distância= 6)
Seq 6=> 1-4-3-2-
  Etapa 1
    Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 30 Distância= 1)
    Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 20 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 4.03 3.01 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 2=> 4.03 3.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 3=> 4.03 3.03 -> (Término= 30 Distância= 2)
  Etapa 3
    Rota 1=> 3.03 2.01 -> (Término= 40 Distância= 6)
    Rota 2=> 3.03 2.02 -> (Término= 40 Distância= 5)
Seq 7=> 2-1-3-4-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
    Rota 2=> 2.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 1)

```

```

Etapa 2
  Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 50 Distância= 3)
  Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 50 Distância= 2)
  Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 3)
Etapa 3
  Rota 1=> 3.02 4.01 -> (Término= 60 Distância= 4)
  Rota 2=> 3.02 4.02 -> (Término= 60 Distância= 5)
  Rota 3=> 3.02 4.03 -> (Término= 60 Distância= 4)
Seq 8=> 2-1-4-3-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
    Rota 2=> 2.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 50 Distância= 2)
    Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 50 Distância= 3)
    Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 50 Distância= 2)
  Etapa 3
    Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 60 Distância= 5)
    Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 60 Distância= 4)
    Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 60 Distância= 5)
    Rota 4=> 4.03 3.01 -> (Término= 60 Distância= 5)
    Rota 5=> 4.03 3.02 -> (Término= 60 Distância= 4)
    Rota 6=> 4.03 3.03 -> (Término= 60 Distância= 3)
Seq 9=> 2-3-1-4-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 3.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 2=> 2.01 3.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 3=> 2.01 3.03 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 4=> 2.02 3.01 -> (Término= 30 Distância= 1)
    Rota 5=> 2.02 3.02 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 6=> 2.02 3.03 -> (Término= 30 Distância= 3)
  Etapa 2
    Rota 1=> 3.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 50 Distância= 4)
    Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 50 Distância= 5)
    Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 50 Distância= 4)
Seq 10=> 2-3-4-1-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 3.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 2=> 2.01 3.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 3=> 2.01 3.03 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 4=> 2.02 3.01 -> (Término= 30 Distância= 1)
    Rota 5=> 2.02 3.02 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 6=> 2.02 3.03 -> (Término= 30 Distância= 3)
  Etapa 2
    Rota 1=> 3.01 4.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
    Rota 2=> 3.01 4.02 -> (Término= 40 Distância= 5)
    Rota 3=> 3.01 4.03 -> (Término= 40 Distância= 4)
  Etapa 3
    Rota 1=> 4.01 1.01 -> (Término= 50 Distância= 5)
    Rota 2=> 4.03 1.01 -> (Término= 50 Distância= 5)
Seq 11=> 2-4-1-3-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 4.01 -> (Término= 30 Distância= 1)
    Rota 2=> 2.01 4.02 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 3=> 2.01 4.03 -> (Término= 40 Distância= 3)
    Rota 4=> 2.02 4.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 5=> 2.02 4.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 6=> 2.02 4.03 -> (Término= 40 Distância= 2)
  Etapa 2

```

```

    Rota 1=> 4.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
  Etapa 3
    Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 50 Distância= 4)
    Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 50 Distância= 3)
    Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 4)
Seq 12=> 2-4-3-1-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 4.01 -> (Término= 30 Distância= 1)
    Rota 2=> 2.01 4.02 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 3=> 2.01 4.03 -> (Término= 40 Distância= 3)
    Rota 4=> 2.02 4.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 5=> 2.02 4.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 6=> 2.02 4.03 -> (Término= 40 Distância= 2)
  Etapa 2
    Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
    Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 50 Distância= 3)
    Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 4)
  Etapa 3
    Rota 1=> 3.01 1.01 -> (Término= 50 Distância= 6)
Seq 13=> 3-1-2-4-
  Etapa 1
    Rota 1=> 3.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
    Rota 2=> 3.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 1)
    Rota 3=> 3.03 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
  Etapa 2
    Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 50 Distância= 3)
    Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 50 Distância= 2)
  Etapa 3
    Rota 1=> 2.02 4.01 -> (Término= 60 Distância= 4)
    Rota 2=> 2.02 4.02 -> (Término= 60 Distância= 5)
    Rota 3=> 2.02 4.03 -> (Término= 60 Distância= 4)
Seq 14=> 3-1-4-2-
  Etapa 1
    Rota 1=> 3.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
    Rota 2=> 3.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 1)
    Rota 3=> 3.03 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
  Etapa 2
    Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 50 Distância= 2)
    Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 50 Distância= 3)
    Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 50 Distância= 2)
  Etapa 3
    Rota 1=> 4.01 2.01 -> (Término= 60 Distância= 3)
    Rota 2=> 4.01 2.02 -> (Término= 60 Distância= 4)
    Rota 3=> 4.03 2.01 -> (Término= 60 Distância= 5)
    Rota 4=> 4.03 2.02 -> (Término= 60 Distância= 4)
Seq 15=> 3-2-1-4-
  Etapa 1
    Rota 1=> 3.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 2=> 3.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 1)
    Rota 3=> 3.02 2.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 4=> 3.02 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 5=> 3.03 2.01 -> (Término= 20 Distância= 4)
    Rota 6=> 3.03 2.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
  Etapa 2
    Rota 1=> 2.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
  Etapa 3
    Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 50 Distância= 3)
    Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 50 Distância= 4)
    Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 50 Distância= 3)
Seq 16=> 3-2-4-1-
  Etapa 1

```

```

Rota 1=> 3.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
Rota 2=> 3.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 1)
Rota 3=> 3.02 2.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
Rota 4=> 3.02 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
Rota 5=> 3.03 2.01 -> (Término= 20 Distância= 4)
Rota 6=> 3.03 2.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
Etapa 2
Rota 1=> 2.02 4.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
Rota 2=> 2.02 4.02 -> (Término= 30 Distância= 4)
Rota 3=> 2.02 4.03 -> (Término= 40 Distância= 3)
Etapa 3
Rota 1=> 4.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
Seq 17=> 3-4-1-2-
Etapa 1
Rota 1=> 3.01 4.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
Rota 2=> 3.01 4.02 -> (Término= 20 Distância= 4)
Rota 3=> 3.01 4.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
Rota 4=> 3.02 4.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
Rota 5=> 3.02 4.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
Rota 6=> 3.02 4.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
Rota 7=> 3.03 4.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
Rota 8=> 3.03 4.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
Rota 9=> 3.03 4.03 -> (Término= 20 Distância= 1)
Etapa 2
Rota 1=> 4.03 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
Etapa 3
Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 50 Distância= 4)
Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 50 Distância= 3)
Seq 18=> 3-4-2-1-
Etapa 1
Rota 1=> 3.01 4.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
Rota 2=> 3.01 4.02 -> (Término= 20 Distância= 4)
Rota 3=> 3.01 4.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
Rota 4=> 3.02 4.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
Rota 5=> 3.02 4.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
Rota 6=> 3.02 4.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
Rota 7=> 3.03 4.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
Rota 8=> 3.03 4.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
Rota 9=> 3.03 4.03 -> (Término= 20 Distância= 1)
Etapa 2
Rota 1=> 4.03 2.01 -> (Término= 30 Distância= 4)
Rota 2=> 4.03 2.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
Etapa 3
Rota 1=> 2.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
Seq 19=> 4-1-2-3-
Etapa 1
Rota 1=> 4.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 1)
Rota 2=> 4.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
Rota 3=> 4.03 1.01 -> (Término= 40 Distância= 1)
Etapa 2
Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 50 Distância= 3)
Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 50 Distância= 2)
Rota 3=> 1.01 2.01 -> (Término= 50 Distância= 3)
Rota 4=> 1.01 2.02 -> (Término= 50 Distância= 2)
Etapa 3
Rota 1=> 2.02 3.01 -> (Término= 60 Distância= 3)
Rota 2=> 2.02 3.02 -> (Término= 60 Distância= 4)
Rota 3=> 2.02 3.03 -> (Término= 60 Distância= 5)
Rota 4=> 2.02 3.01 -> (Término= 60 Distância= 3)
Rota 5=> 2.02 3.02 -> (Término= 60 Distância= 4)
Rota 6=> 2.02 3.03 -> (Término= 60 Distância= 5)

```


Seq 20=> 4-1-3-2-

Etapa 1

Rota 1=> 4.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 1)

Rota 2=> 4.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)

Rota 3=> 4.03 1.01 -> (Término= 40 Distância= 1)

Etapa 2

Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 50 Distância= 3)

Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 50 Distância= 2)

Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 3)

Rota 4=> 1.01 3.01 -> (Término= 50 Distância= 3)

Rota 5=> 1.01 3.02 -> (Término= 50 Distância= 2)

Rota 6=> 1.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 3)

Etapa 3

Rota 1=> 3.02 2.01 -> (Término= 60 Distância= 5)

Rota 2=> 3.02 2.02 -> (Término= 60 Distância= 4)

Rota 3=> 3.02 2.01 -> (Término= 60 Distância= 5)

Rota 4=> 3.02 2.02 -> (Término= 60 Distância= 4)

Seq 21=> 4-2-1-3-

Etapa 1

Rota 1=> 4.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 1)

Rota 2=> 4.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)

Rota 3=> 4.02 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)

Rota 4=> 4.02 2.02 -> (Término= 20 Distância= 3)

Rota 5=> 4.03 2.01 -> (Término= 20 Distância= 3)

Rota 6=> 4.03 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)

Etapa 2

Rota 1=> 2.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 3)

Etapa 3

Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 50 Distância= 5)

Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 50 Distância= 4)

Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 5)

Seq 22=> 4-2-3-1-

Etapa 1

Rota 1=> 4.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 1)

Rota 2=> 4.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)

Rota 3=> 4.02 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)

Rota 4=> 4.02 2.02 -> (Término= 20 Distância= 3)

Rota 5=> 4.03 2.01 -> (Término= 20 Distância= 3)

Rota 6=> 4.03 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)

Etapa 2

Rota 1=> 2.01 3.01 -> (Término= 30 Distância= 3)

Rota 2=> 2.01 3.02 -> (Término= 30 Distância= 4)

Rota 3=> 2.01 3.03 -> (Término= 30 Distância= 5)

Etapa 3

Rota 1=> 3.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 5)

Seq 23=> 4-3-1-2-

Etapa 1

Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 20 Distância= 3)

Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 20 Distância= 2)

Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 20 Distância= 3)

Rota 4=> 4.02 3.01 -> (Término= 20 Distância= 4)

Rota 5=> 4.02 3.02 -> (Término= 20 Distância= 3)

Rota 6=> 4.02 3.03 -> (Término= 20 Distância= 2)

Rota 7=> 4.03 3.01 -> (Término= 20 Distância= 3)

Rota 8=> 4.03 3.02 -> (Término= 20 Distância= 2)

Rota 9=> 4.03 3.03 -> (Término= 20 Distância= 1)

Etapa 2

Rota 1=> 3.03 1.01 -> (Término= 40 Distância= 3)

Etapa 3

Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 50 Distância= 5)

Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 50 Distância= 4)

Seq 24=> 4-3-2-1-

Etapa 1

Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
 Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
 Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
 Rota 4=> 4.02 3.01 -> (Término= 20 Distância= 4)
 Rota 5=> 4.02 3.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
 Rota 6=> 4.02 3.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
 Rota 7=> 4.03 3.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
 Rota 8=> 4.03 3.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
 Rota 9=> 4.03 3.03 -> (Término= 20 Distância= 1)

Etapa 2

Rota 1=> 3.03 2.01 -> (Término= 30 Distância= 5)
 Rota 2=> 3.03 2.02 -> (Término= 30 Distância= 4)

Etapa 3

Rota 1=> 2.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 5)

Melhor Sequência= 4 (1-3-4-2-)**Término= 40****Distância percorrida= 4****Processo: 1.01-> 3.02-> 4.01-> 2.01****Alocação**

Op1 na máquina 1.01 (Início= 0 Duração= 10 Final= 10)
 Op2 na máquina 3.02 (Início= 10 Duração= 10 Final= 20)
 Op3 na máquina 4.01 (Início= 20 Duração= 10 Final= 30)
 Op4 na máquina 2.01 (Início= 30 Duração= 10 Final= 40)

=====

Peça: P4.PEC

Número de Operações: 4

Seq 1=> 1-2-3-4-

Etapa 1

Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 50 Distância= 2)
 Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 50 Distância= 1)

Etapa 2

Rota 1=> 2.02 3.01 -> (Término= 60 Distância= 2)
 Rota 2=> 2.02 3.02 -> (Término= 60 Distância= 3)
 Rota 3=> 2.02 3.03 -> (Término= 60 Distância= 4)

Etapa 3

Rota 1=> 3.01 4.01 -> (Término= 70 Distância= 5)
 Rota 2=> 3.01 4.02 -> (Término= 70 Distância= 6)
 Rota 3=> 3.01 4.03 -> (Término= 70 Distância= 5)

Seq 2=> 1-2-4-3-

Etapa 1

Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 50 Distância= 2)
 Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 50 Distância= 1)

Etapa 2

Rota 1=> 2.02 4.01 -> (Término= 60 Distância= 3)
 Rota 2=> 2.02 4.02 -> (Término= 60 Distância= 4)
 Rota 3=> 2.02 4.03 -> (Término= 60 Distância= 3)

Etapa 3

Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 70 Distância= 6)
 Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 70 Distância= 5)
 Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 70 Distância= 6)
 Rota 4=> 4.03 3.01 -> (Término= 70 Distância= 6)
 Rota 5=> 4.03 3.02 -> (Término= 70 Distância= 5)
 Rota 6=> 4.03 3.03 -> (Término= 70 Distância= 4)

Seq 3=> 1-3-2-4-

Etapa 1

Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 50 Distância= 2)
 Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 50 Distância= 1)
 Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 2)

```

Etapa 2
  Rota 1=> 3.02 2.01 -> (Término= 60 Distância= 4)
  Rota 2=> 3.02 2.02 -> (Término= 60 Distância= 3)
Etapa 3
  Rota 1=> 2.02 4.01 -> (Término= 70 Distância= 5)
  Rota 2=> 2.02 4.02 -> (Término= 70 Distância= 6)
  Rota 3=> 2.02 4.03 -> (Término= 70 Distância= 5)
Seq 4=> 1-3-4-2-
  Etapa 1
    Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 50 Distância= 2)
    Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 50 Distância= 1)
    Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 2)
  Etapa 2
    Rota 1=> 3.02 4.01 -> (Término= 60 Distância= 3)
    Rota 2=> 3.02 4.02 -> (Término= 60 Distância= 4)
    Rota 3=> 3.02 4.03 -> (Término= 60 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 4.01 2.01 -> (Término= 70 Distância= 4)
    Rota 2=> 4.01 2.02 -> (Término= 70 Distância= 5)
    Rota 3=> 4.03 2.01 -> (Término= 70 Distância= 6)
    Rota 4=> 4.03 2.02 -> (Término= 70 Distância= 5)
Seq 5=> 1-4-2-3-
  Etapa 1
    Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 50 Distância= 1)
    Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 50 Distância= 2)
    Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 50 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 4.01 2.01 -> (Término= 60 Distância= 2)
    Rota 2=> 4.01 2.02 -> (Término= 60 Distância= 3)
    Rota 3=> 4.03 2.01 -> (Término= 60 Distância= 4)
    Rota 4=> 4.03 2.02 -> (Término= 60 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 2.01 3.01 -> (Término= 70 Distância= 4)
    Rota 2=> 2.01 3.02 -> (Término= 70 Distância= 5)
    Rota 3=> 2.01 3.03 -> (Término= 70 Distância= 6)
Seq 6=> 1-4-3-2-
  Etapa 1
    Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 50 Distância= 1)
    Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 50 Distância= 2)
    Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 50 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 60 Distância= 4)
    Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 60 Distância= 3)
    Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 60 Distância= 4)
    Rota 4=> 4.03 3.01 -> (Término= 60 Distância= 4)
    Rota 5=> 4.03 3.02 -> (Término= 60 Distância= 3)
    Rota 6=> 4.03 3.03 -> (Término= 60 Distância= 2)
  Etapa 3
    Rota 1=> 3.03 2.01 -> (Término= 70 Distância= 6)
    Rota 2=> 3.03 2.02 -> (Término= 70 Distância= 5)
Seq 7=> 2-1-3-4-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
    Rota 2=> 2.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 50 Distância= 3)
    Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 50 Distância= 2)
    Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 3.02 4.01 -> (Término= 60 Distância= 4)
    Rota 2=> 3.02 4.02 -> (Término= 60 Distância= 5)

```

```

    Rota 3=> 3.02 4.03 -> (Término= 60 Distância= 4)
Seq 8=> 2-1-4-3-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
    Rota 2=> 2.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 50 Distância= 2)
    Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 50 Distância= 3)
    Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 50 Distância= 2)
  Etapa 3
    Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 60 Distância= 5)
    Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 60 Distância= 4)
    Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 60 Distância= 5)
    Rota 4=> 4.03 3.01 -> (Término= 60 Distância= 5)
    Rota 5=> 4.03 3.02 -> (Término= 60 Distância= 4)
    Rota 6=> 4.03 3.03 -> (Término= 60 Distância= 3)
Seq 9=> 2-3-1-4-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 3.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 2=> 2.01 3.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 3=> 2.01 3.03 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 4=> 2.02 3.01 -> (Término= 30 Distância= 1)
    Rota 5=> 2.02 3.02 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 6=> 2.02 3.03 -> (Término= 30 Distância= 3)
  Etapa 2
    Rota 1=> 3.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 50 Distância= 4)
    Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 50 Distância= 5)
    Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 50 Distância= 4)
Seq 10=> 2-3-4-1-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 3.01 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 2=> 2.01 3.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 3=> 2.01 3.03 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 4=> 2.02 3.01 -> (Término= 30 Distância= 1)
    Rota 5=> 2.02 3.02 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 6=> 2.02 3.03 -> (Término= 30 Distância= 3)
  Etapa 2
    Rota 1=> 3.01 4.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
    Rota 2=> 3.01 4.02 -> (Término= 40 Distância= 5)
    Rota 3=> 3.01 4.03 -> (Término= 40 Distância= 4)
  Etapa 3
    Rota 1=> 4.01 1.01 -> (Término= 50 Distância= 5)
    Rota 2=> 4.03 1.01 -> (Término= 50 Distância= 5)
Seq 11=> 2-4-1-3-
  Etapa 1
    Rota 1=> 2.01 4.01 -> (Término= 40 Distância= 1)
    Rota 2=> 2.01 4.02 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 3=> 2.01 4.03 -> (Término= 40 Distância= 3)
    Rota 4=> 2.02 4.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
    Rota 5=> 2.02 4.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 6=> 2.02 4.03 -> (Término= 40 Distância= 2)
  Etapa 2
    Rota 1=> 4.02 10.1 -> (Término= 40 Distância= 4)
  Etapa 3
    Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 50 Distância= 6)
    Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 50 Distância= 5)
    Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 6)
Seq 12=> 2-4-3-1-
  Etapa 1

```

```

Rota 1=> 2.01 4.01 -> (Término= 40 Distância= 1)
Rota 2=> 2.01 4.02 -> (Término= 30 Distância= 2)
Rota 3=> 2.01 4.03 -> (Término= 40 Distância= 3)
Rota 4=> 2.02 4.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
Rota 5=> 2.02 4.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
Rota 6=> 2.02 4.03 -> (Término= 40 Distância= 2)
Etapa 2
Rota 1=> 4.02 3.01 -> (Término= 40 Distância= 6)
Rota 2=> 4.02 3.02 -> (Término= 50 Distância= 5)
Rota 3=> 4.02 3.03 -> (Término= 50 Distância= 4)
Etapa 3
Rota 1=> 3.01 1.01 -> (Término= 50 Distância= 8)
Seq 13=> 3-1-2-4-
Etapa 1
Rota 1=> 3.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
Rota 2=> 3.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 1)
Rota 3=> 3.03 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
Etapa 2
Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 50 Distância= 3)
Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 50 Distância= 2)
Etapa 3
Rota 1=> 2.02 4.01 -> (Término= 60 Distância= 4)
Rota 2=> 2.02 4.02 -> (Término= 60 Distância= 5)
Rota 3=> 2.02 4.03 -> (Término= 60 Distância= 4)
Seq 14=> 3-1-4-2-
Etapa 1
Rota 1=> 3.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
Rota 2=> 3.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 1)
Rota 3=> 3.03 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
Etapa 2
Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 50 Distância= 2)
Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 50 Distância= 3)
Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 50 Distância= 2)
Etapa 3
Rota 1=> 4.01 2.01 -> (Término= 60 Distância= 3)
Rota 2=> 4.01 2.02 -> (Término= 60 Distância= 4)
Rota 3=> 4.03 2.01 -> (Término= 60 Distância= 5)
Rota 4=> 4.03 2.02 -> (Término= 60 Distância= 4)
Seq 15=> 3-2-1-4-
Etapa 1
Rota 1=> 3.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
Rota 2=> 3.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 1)
Rota 3=> 3.02 2.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
Rota 4=> 3.02 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
Rota 5=> 3.03 2.01 -> (Término= 20 Distância= 4)
Rota 6=> 3.03 2.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
Etapa 2
Rota 1=> 2.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
Etapa 3
Rota 1=> 1.01 4.01 -> (Término= 50 Distância= 3)
Rota 2=> 1.01 4.02 -> (Término= 50 Distância= 4)
Rota 3=> 1.01 4.03 -> (Término= 50 Distância= 3)
Seq 16=> 3-2-4-1-
Etapa 1
Rota 1=> 3.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
Rota 2=> 3.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 1)
Rota 3=> 3.02 2.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
Rota 4=> 3.02 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
Rota 5=> 3.03 2.01 -> (Término= 20 Distância= 4)
Rota 6=> 3.03 2.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
Etapa 2

```

```

    Rota 1=> 2.02 4.01 -> (Término= 40 Distância= 3)
    Rota 2=> 2.02 4.02 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 3=> 2.02 4.03 -> (Término= 40 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 4.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 6)
Seq 17=> 3-4-1-2-
  Etapa 1
    Rota 1=> 3.01 4.01 -> (Término= 40 Distância= 3)
    Rota 2=> 3.01 4.02 -> (Término= 20 Distância= 4)
    Rota 3=> 3.01 4.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 4=> 3.02 4.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
    Rota 5=> 3.02 4.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 6=> 3.02 4.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 7=> 3.03 4.01 -> (Término= 40 Distância= 3)
    Rota 8=> 3.03 4.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 9=> 3.03 4.03 -> (Término= 20 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 4.03 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
  Etapa 3
    Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 50 Distância= 4)
    Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 50 Distância= 3)
Seq 18=> 3-4-2-1-
  Etapa 1
    Rota 1=> 3.01 4.01 -> (Término= 40 Distância= 3)
    Rota 2=> 3.01 4.02 -> (Término= 20 Distância= 4)
    Rota 3=> 3.01 4.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 4=> 3.02 4.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
    Rota 5=> 3.02 4.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 6=> 3.02 4.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 7=> 3.03 4.01 -> (Término= 40 Distância= 3)
    Rota 8=> 3.03 4.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 9=> 3.03 4.03 -> (Término= 20 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 4.03 2.01 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 2=> 4.03 2.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 2.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 4)
Seq 19=> 4-1-2-3-
  Etapa 1
    Rota 1=> 4.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 1)
    Rota 2=> 4.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
    Rota 3=> 4.03 1.01 -> (Término= 40 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 50 Distância= 3)
    Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 50 Distância= 2)
    Rota 3=> 1.01 2.01 -> (Término= 50 Distância= 3)
    Rota 4=> 1.01 2.02 -> (Término= 50 Distância= 2)
  Etapa 3
    Rota 1=> 2.02 3.01 -> (Término= 60 Distância= 3)
    Rota 2=> 2.02 3.02 -> (Término= 60 Distância= 4)
    Rota 3=> 2.02 3.03 -> (Término= 60 Distância= 5)
    Rota 4=> 2.02 3.01 -> (Término= 60 Distância= 3)
    Rota 5=> 2.02 3.02 -> (Término= 60 Distância= 4)
    Rota 6=> 2.02 3.03 -> (Término= 60 Distância= 5)
Seq 20=> 4-1-3-2-
  Etapa 1
    Rota 1=> 4.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 1)
    Rota 2=> 4.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 2)
    Rota 3=> 4.03 1.01 -> (Término= 40 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 50 Distância= 3)

```

```

    Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 50 Distância= 2)
    Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 3)
    Rota 4=> 1.01 3.01 -> (Término= 50 Distância= 3)
    Rota 5=> 1.01 3.02 -> (Término= 50 Distância= 2)
    Rota 6=> 1.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 3.02 2.01 -> (Término= 60 Distância= 5)
    Rota 2=> 3.02 2.02 -> (Término= 60 Distância= 4)
    Rota 3=> 3.02 2.01 -> (Término= 60 Distância= 5)
    Rota 4=> 3.02 2.02 -> (Término= 60 Distância= 4)
Seq 21=> 4-2-1-3-
  Etapa 1
    Rota 1=> 4.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
    Rota 2=> 4.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 3=> 4.02 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 4=> 4.02 2.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 5=> 4.03 2.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 6=> 4.03 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
  Etapa 2
    Rota 1=> 2.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 1.01 3.01 -> (Término= 50 Distância= 5)
    Rota 2=> 1.01 3.02 -> (Término= 50 Distância= 4)
    Rota 3=> 1.01 3.03 -> (Término= 50 Distância= 5)
Seq 22=> 4-2-3-1-
  Etapa 1
    Rota 1=> 4.01 2.01 -> (Término= 20 Distância= 1)
    Rota 2=> 4.01 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 3=> 4.02 2.01 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 4=> 4.02 2.02 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 5=> 4.03 2.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 6=> 4.03 2.02 -> (Término= 20 Distância= 2)
  Etapa 2
    Rota 1=> 2.01 3.01 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 2=> 2.01 3.02 -> (Término= 30 Distância= 4)
    Rota 3=> 2.01 3.03 -> (Término= 30 Distância= 5)
  Etapa 3
    Rota 1=> 3.01 1.01 -> (Término= 40 Distância= 5)
Seq 23=> 4-3-1-2-
  Etapa 1
    Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 4=> 4.02 3.01 -> (Término= 20 Distância= 4)
    Rota 5=> 4.02 3.02 -> (Término= 30 Distância= 3)
    Rota 6=> 4.02 3.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
    Rota 7=> 4.03 3.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 8=> 4.03 3.02 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 9=> 4.03 3.03 -> (Término= 20 Distância= 1)
  Etapa 2
    Rota 1=> 3.03 1.01 -> (Término= 40 Distância= 3)
  Etapa 3
    Rota 1=> 1.01 2.01 -> (Término= 50 Distância= 5)
    Rota 2=> 1.01 2.02 -> (Término= 50 Distância= 4)
Seq 24=> 4-3-2-1-
  Etapa 1
    Rota 1=> 4.01 3.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 2=> 4.01 3.02 -> (Término= 30 Distância= 2)
    Rota 3=> 4.01 3.03 -> (Término= 20 Distância= 3)
    Rota 4=> 4.02 3.01 -> (Término= 20 Distância= 4)
    Rota 5=> 4.02 3.02 -> (Término= 30 Distância= 3)

```

```

Rota 6=> 4.02 3.03 -> (Término= 20 Distância= 2)
Rota 7=> 4.03 3.01 -> (Término= 20 Distância= 3)
Rota 8=> 4.03 3.02 -> (Término= 30 Distância= 2)
Rota 9=> 4.03 3.03 -> (Término= 20 Distância= 1)
Etapa 2
Rota 1=> 3.03 2.01 -> (Término= 30 Distância= 5)
Rota 2=> 3.03 2.02 -> (Término= 30 Distância= 4)
Etapa 3
Rota 1=> 2.02 1.01 -> (Término= 40 Distância= 5)
Melhor Sequência= 18 (3-4-2-1-)
Término= 40
Distância percorrida= 4
Processo: 3.03-> 4.03-> 2.02-> 1.01
Alocação
Op1 na máquina 3.03 (Início= 0 Duração= 10 Final= 10)
Op2 na máquina 4.03 (Início= 10 Duração= 10 Final= 20)
Op3 na máquina 2.02 (Início= 20 Duração= 10 Final= 30)
Op4 na máquina 1.01 (Início= 30 Duração= 10 Final= 40)

```

```

=====
== MakeSpan Total= 40 ==
== Distância total percorrida= 14 ==
== Tempo de processamento= 00h 00m 00.10s ==
=====

```


APÊNDICE I - Permutação

I.1 Introdução

Permutações simples de n elementos distintos são os agrupamentos formados com todos os n elementos de modo que cada agrupamento difira do outro apenas pela ordem de seus elementos.

Knuth (1972, p.44) apresenta dois métodos para gerar todas as combinações provenientes da permutação de n elementos. O *método 1*, que foi adotado neste trabalho, diz: para cada permutação $a_1 a_2 \dots a_{n-1}$ de $(n-1)$ elementos, forme n outros conjuntos pela inserção do elemento a_n em todos os lugares possíveis obtendo: $a_n a_1 a_2 \dots a_{n-1}$, $a_1 a_n a_2 \dots a_{n-1}$, $a_1 a_2 \dots a_n a_{n-1}$ e $a_1 a_2 \dots a_{n-1} a_n$.

Por exemplo, seja gerar as permutações do seguinte conjunto de elementos $\{A, B, C, D\}$. No primeiro passo tem-se apenas o primeiro elemento:

A

O segundo passo consiste em colocar o próximo elemento (B) em todas as possíveis posições em relação ao primeiro elemento. Neste caso há apenas duas posições: antes e depois de A. O número de elementos gerados em cada fase é igual ao fatorial do número do elemento a ser inserido. Como neste caso trata-se do segundo elemento tem-se $2! = 2$.

BA AB

O elemento seguinte (C) deverá ser colocado nas 3 possíveis posições em cada uma das 2 seqüências anteriores, totalizando 6 agrupamentos.

CBA BCA BAC CAB ACB ABC

Finalmente o elemento D é colocado nas 4 possíveis posições em cada uma das 6 seqüências da terceira etapa, resultando nas 24 permutações possíveis para o conjunto de 4 elementos.

DCBA	CDBA	CBDA	CBAD
DBCA	BDCA	BCDA	BCAD
DBAC	BDAC	BADC	BACD
DCAB	CDAB	CADB	CABD
DACB	ADCB	ACDB	ACBD
DABC	ADBC	ABDC	ABCD

I.2 Recursividade

Por tratar-se de um procedimento repetitivo é comum encontrar na literatura rotinas que usam a técnica de programação denominada *recursividade*. Segundo Herget (1989, p.363) recursividade é a técnica através da qual uma rotina faz chamadas a si mesma durante a realização de uma determinada tarefa. O autor ainda acrescenta que essa técnica pode resultar em algoritmos de difícil compreensão e depuração, apesar de poder realizar as tarefas de forma mais elegante e veloz.

UFMG (2004, p.77) alerta que todo cuidado é pouco ao se fazer funções recursivas, sendo que a primeira providência é determinar um critério de parada. É esse critério que vai definir quando a função deverá parar de chamar a si mesma, impedindo que entre em um ciclo infinito.

Um ponto importante a ser considerado ao criar algoritmos recursivos é a quantidade de memória destinada à pilha. A pilha é um bloco de memória onde o programa controla as repetidas chamadas à função (HERGET, 1989, p.363). Quando a função é chamada ela deve ter um conjunto de diferentes registradores de trabalho que devem ser alocados e também um lugar diferente para armazenar seu resultado (BARRON, 1970, p.34). Quando sair, antes de transferir o controle para o endereço de retorno, o ambiente (registradores de trabalho etc) devem restaurar a condição existente quando a função foi chamada.

Apesar de certos algoritmos serem mais eficientes quando feitos de maneira recursiva, UFMG (2004, p.77) destaca que é interessante evitar essa técnica sempre que possível, pois, se usada incorretamente, tende a consumir muita memória, tornar-se lenta ou levar ao travamento do sistema. Além disso, segundo Barron (1970, p.7), todas as relações recursivas podem ser reduzidas para definições iterativas.

I.3 Técnica adotada

Para evitar as dificuldades decorrentes da recursividade elaborou-se um procedimento para a geração de todas as combinações de n elementos usando um único vetor com dimensão $n!$.

A idéia é gerar as novas seqüências da parte inferior do vetor para a superior, sobrepondo as seqüências do passo anterior. Basicamente o que o procedimento faz é realizar o sincronismo entre a célula de origem (seqüência anterior) e a célula destino (nova seqüência). O pseudocódigo do Quadro I.1 ilustra o procedimento elaborado. Os n elementos a serem permutados são armazenados no vetor **E** que possui dimensão n e é do tipo caractere. As permutações serão realizadas no vetor **P** de dimensão $n!$ e também do tipo caractere. A variável **e** é o contador de elementos enquanto a variável **i** é o contador de inserções. A variável **ni** recebe o número de inserções de cada elemento. A variável **O** identifica a célula de origem e a **D** a célula de destino.

Quadro I.1 - Pseudocódigo do gerador de permutações

```
P(1) = E(1)
Para e de 2 até n
  O = Fatorial(e - 1)
  D = Fatorial(e)
  ni = D / O
  Faça
    Para i de 1 até ni
      Se i = 1 então P(D)=E(e) + P(O)  'Primeira inserção
      Se i = ni então P(D)=P(O) + E(e) 'Última inserção
      Se i > 1 e i < ni então          'Demais inserções
        A= i primeiros caracteres de P(O)
        B= do caractere i + 1 até o final de P(O)
        P(D) = A + E(e) + B
      Fim-se
    D = D - 1
  Fim-para
  O = O - 1
Enquanto O > 0
Fim-para
```

Um exemplo de aplicação torna mais simples a compreensão do procedimento. Supondo $n=3$ e $E=\{A, B, C\}$ tem-se que o vetor **P** tem dimensão 6. A primeira linha do pseudocódigo coloca o primeiro elemento de **E** no primeiro elemento de **P**, como mostra a Figura I.1.

A

Figura I.1 - Vetor **P** com o primeiro elemento

Entrando pela primeira vez no ciclo de contagem de elementos faz-se $e=2$. A célula de origem será $O=1$ e a célula de destino será $D=2$. O número de inserções do elemento B será $n_i=2$. Na seqüência entra-se no ciclo que controla a célula de origem do vetor P (Faça... Enquanto $O>0$). O valor de O só é atualizado após o ciclo interno de inserção (Para i de 1 até n_i ... Fim-para).

O ciclo de inserção é executado 2 vezes pois $n_i=2$. Na primeira execução tem-se $i=1$ e a regra de primeira inserção é disparada, gerando a primeira seqüência desta fase, como mostra a Figura I.2.

Figura I.2 - Vetor P antes e depois da primeira inserção do elemento B

Após a primeira inserção a célula de destino é atualizada em direção ao topo do vetor por meio da declaração $D=D-1$. Isso fará com que na próxima execução do ciclo de inserção tanto a origem quanto o destino sejam a primeira célula de P. Nota-se também que a regra de inserção que será disparada é a que adiciona o elemento B no final do conteúdo da célula de origem, como mostra a Figura I.3.

Figura I.3 - Vetor P antes e depois da segunda inserção do elemento B

Após essa operação a variável D é atualizada para zero devido a declaração $D=D-1$ e, em seguida, encerra-se o ciclo de inserções do segundo elemento (B) e faz-se $O=O-1$. Como o valor de O será zero o ciclo de controle

de origem também é encerrado, retornando o controle para o ciclo principal que fará $e=3$. Na sequência tem-se $O=2$, $D=6$ e, conseqüentemente, $ni=3$.

O ciclo de inserção será executado 3 vezes mantendo como origem a célula 2 (BA). Os destinos serão as células 6, 5 e 4 (Figura I.4).

Figura I.4 - Inserções do elemento C na primeira origem

Após a terceira inserção tem-se $D=3$, a origem é atualizada ($O=1$) e o ciclo de inserção será executado novamente 3 vezes. Nota-se que os três destinos serão agora as células 3, 2 e 1. Quando a célula 2 for atualizada o seu conteúdo anterior será perdido, porém como já foi usado nas inserções anteriores não fará falta. A Figura I.5 mostra as 3 últimas inserções do último elemento.

Figura I.5 - Últimas 3 inserções do elemento C

Nota-se que a cada novo elemento a ser inserido a primeira célula de origem é onde foi colocada a última sequência gerada na etapa anterior e que a primeira célula de destino é a mais inferior necessária para a etapa. Tanto origem como destino vão sendo atualizadas em direção ao topo do vetor de forma que quando os dados da etapa anterior forem sobrepostos é porque já foram usados.

Essa sobreposição dos elementos anteriores fica clara pela observação da Figura I.6. Essa figura mostra a subida das origens e dos destinos com a

inserção de um quarto elemento (D). A quinta inserção sobrepõe as duas primeiras origens. A última inserção as quatro últimas.

Figura I.6 - Passos para inserção de um quarto elemento

I.4 Implementação computacional

Os exemplos apresentados consideram que cada elemento é representado por um único caractere. Porém, para os propósitos deste trabalho, esses elementos serão os números que representam os processos que, em geral, são representados numericamente e com mais de um algarismo. Sendo assim, para permitir que os elementos a serem permutados possuam mais de um caractere optou-se por adotar o sinal “-” para indicar o final de cada elemento. A adoção deste indicador levou a inclusão de uma rotina que separa corretamente os elementos quando uma inserção ocorre no meio dos mesmos.

A Figura I.7 mostra a tela do programa que foi implementado para testar o procedimento de permutação.

Figura I.7 - Tela do programa de permutação

No campo superior digitam-se os elementos a permutar. O botão *Analisa* verifica quantos elementos existem, calcula o número de permutações e libera o botão *Gerar*. Essas informações são apresentadas abaixo dos botões.

O botão *Gerar* executa o procedimento proposto anteriormente e, ao final, gera um arquivo tipo TXT com o resultado (Figura I.8). Também foi implementada uma rotina de ordenação do tipo Bubble Sort para facilitar a análise dos resultados. A implementação desse algoritmo é simples, porém obtém um baixo desempenho, consumindo muito tempo.

Figura I.8 - Permutação dos elementos da Figura I.7

Para verificar seu desempenho o programa foi testado com um número de elementos maior do que os que serão usados na pesquisa. A Figura I.9 mostra que a permutação de 10 elementos consumiu 23 segundos enquanto que a gravação do arquivo demorou 7 segundos. Esses tempos foram obtidos em um Athlon XP 2600+ operando a 2.08 GHz e com 1 Gb de memória Ram. Nota-se no lado superior esquerdo da figura que o arquivo com as permutações ficou com mais de 81 Mb.

Figura I.9 - Teste de permutação com 10 elementos

APÊNDICE J - Gerador de seqüências

J.1 Introdução

Este apêndice apresenta o procedimento elaborado para gerar as seqüências de fabricação a partir das relações previstas no diagrama de precedência das peças. Trata-se da união dos procedimentos descritos nos apêndices D e I.

No apêndice D foi apresentada a rotina que lê o arquivo da peça, define o número de níveis e em a qual nível cada operação pertence. Com base nessa informação basta executar a permutação das operações de cada nível usando a rotina descrita no apêndice I.

J.2 Procedimento básico

O procedimento básico é dividir as operações em níveis e realizar as permutações entre as operações de cada nível para, em seguida, agrupá-las nas seqüências finais. Um exemplo auxilia a compreender o raciocínio. Na Figura J.1 vê-se as relações de precedência para uma peça com 7 operações divididas em 4 níveis. Estas relações permitem obter 12 seqüências.

Figura J.1 - Relações de precedência de uma peça

Os níveis 1 e 4 possuem apenas uma operação cada um. Como resultado suas permutações são os próprios elementos. O nível 2 possui três operações que levam a 6 permutações e o nível 3, com duas operações, terá 2 permutações. O Quadro J.1 mostra as permutações de cada um dos quatro níveis (observa-se que as operações são separadas pelo caractere “-“, como discutido no Apêndice I).

Quadro J.1 - Permutações de cada nível

Nível	1	2	3	4
Permutações	A-	B-C-D- B-D-C- C-B-D- C-D-B- D-B-C- D-C-B-	E-F- F-E-	G-

A união dos níveis leva à composição das seqüências finais. No Quadro J.2 tem-se a combinação dos dois primeiros níveis. O número de novas combinações é igual à multiplicação do número de seqüências de cada nível.

Quadro J.2 - Composição dos níveis 1 e 2.

Nível	1 + 2	3	4
Permutações	A-B-C-D- A-B-D-C- A-C-B-D- A-C-D-B- A-D-B-C- A-D-C-B-	E-F- F-E-	G-

O Quadro J.3 mostra inicialmente a composição dos dois primeiros níveis com o nível 3 e, no lado direito, a composição dos 4 níveis.

Quadro J.3 - Composições finais

Nível	1 + 2 + 3	4	1 + 2 + 3 + 4
Permutações	A-B-C-D-E-F- A-B-D-C-E-F- A-C-B-D-E-F- A-C-D-B-E-F- A-D-B-C-E-F- A-D-C-B-E-F- A-B-C-D-F-E- A-B-D-C-F-E- A-C-B-D-F-E- A-C-D-B-F-E- A-D-B-C-F-E- A-D-C-B-F-E-	G-	A-B-C-D-E-F-G- A-B-D-C-E-F-G- A-C-B-D-E-F-G- A-C-D-B-E-F-G- A-D-B-C-E-F-G- A-D-C-B-E-F-G- A-B-C-D-F-E-G- A-B-D-C-F-E-G- A-C-B-D-F-E-G- A-C-D-B-F-E-G- A-D-B-C-F-E-G- A-D-C-B-F-E-G-

J.3 Implementação computacional

Dependendo das relações de precedência o procedimento tem que manipular um grande número de seqüências, podendo consumir toda a memória do sistema. Assim, nesta implementação, optou-se por armazenar as permutações dos níveis em arquivos ao invés de manter os dados na memória.

O fluxograma da Figura J.2 mostra em sua parte superior o ciclo que gera as permutações de cada nível e seus respectivos arquivos. O ciclo da parte inferior do fluxograma representa a manipulação dos arquivos de níveis para gerar as seqüências.

Figura J.2 - Fluxograma do gerador de seqüências

O procedimento foi implementado em um programa protótipo para que sua funcionalidade fosse verificada. Na Figura J.3 tem-se a tela do programa onde é possível observar, do lado esquerdo, as relações de precedência da peça mostrada pela Figura J.1 e do lado direito as informações referentes à execução do procedimento.

Figura J.3 - Tela do programa protótipo

Como as relações de precedência geram apenas 4 níveis e 12 seqüências o tempo de processamento é desprezível. O programa cronometra o tempo consumido no procedimento de permutação de cada nível, o tempo de composição de um nível com o nível seguinte e o tempo total gasto em todo processo.

A Figura J.4 mostra os arquivos gerados após a execução do programa, para o exemplo da Figura J.1. O arquivo AL8 contém as informações de precedência da peça e o arquivo LOG traz os mesmos dados mostrados no lado direito da janela do programa. No arquivo PRO estão todos os processos gerados pelo procedimento. Há também um arquivo TXT com as permutações de cada nível. Esses arquivos são cópias dos arquivos que são apagados durante o procedimento de composição, como descrito no fluxograma.

Na realidade o único arquivo de interesse é o PRO, porém, durante a fase de depuração do programa, os demais arquivos são necessários para acompanhar a execução do algoritmo e avaliar seu funcionamento.

Figura J.4 - Arquivos gerados para a peça da Figura J.1

Depois de confirmada a correta operação usando exemplos pequenos realizou-se um teste para verificar se o programa poderia trabalhar com peças que geram muitas seqüências. Adotou-se como teste o exemplo apresentado por Groover (1987, p.169) que é composto por 24 operações. O algoritmo dividiu essas operações em 10 níveis que geram 6.912.000 seqüências. As relações de precedência dessa peça são mostradas pela Figura J.5.

A Figura J.6 mostra a tela do programa após a conclusão do processo que levou pouco mais de 50 minutos. O tempo gasto na geração dos níveis é desprezível pois o maior número de permutações foi 120 (5!). Nota-se que o processo de composição dos níveis é o grande consumidor de tempo.

Os arquivos gerados para esse exemplo são mostrados pela Figura J.7. Enquanto os arquivos de níveis são pequenos o arquivo com todos os processos tem um tamanho considerável, atingindo quase 429 MB ou, mais exatamente, 438.750 KB (1 MB = 1024 KB por usar base 2 – sistema binário).

Figura J.5 - Exemplo de Groover (1987, p.169)

Figura J.6 - Tela com os dados do exemplo de Groover (1987, p.169)

Figura J.7 - Arquivos gerados para o exemplo de Groover (1987, p.169)

J.4 Comentários sobre o desempenho computacional

O computador possuía processador Athlon XP2600+ (2.08 Ghz), 1 GB de RAM, HD Maxtor 6L040J2 (PATA³⁷, 40GB, 7200 rpm, 2Mb de buffer) formatado em FAT32³⁸ e modo de transferência UltraDMA-6. O disco foi desfragmentado antes do programa ser executado (Windows 98 SE2).

Na geração de um número elevado de seqüências a composição dos níveis é o grande consumidor de tempo porque os tempos de acesso de uma unidade de disco rígido são extremamente superiores aos da memória RAM. Soma-se a isso o fato da composição manipular 3 arquivos simultaneamente e que o tamanho desses arquivos eleva-se rapidamente.

O tempo da composição 1 foi desprezível e gerou 14.400 combinações. O Quadro J.4 mostra os seguintes detalhes: nome do arquivo, número de elementos armazenados e tamanho real (o tamanho mostrado pelo gerenciador de arquivos é arredondado e depende do tamanho do cluster³⁹).

³⁷ PATA significa Parallel ATA. É um dos tipos de interface de unidades de disco rígido.

³⁸ FAT significa File Allocation Table (tabela de alocação de arquivos). É uma espécie de tabela que contém as indicações de onde estão localizados cada arquivo em uma unidade de disco.

³⁹ Cluster é o nome da menor unidade de alocação de arquivos que pode ser reconhecido pelo sistema operacional e seu tamanho depende do tamanho da partição e do tipo de formatação.

Quadro J.4 - Composição dos níveis 1 e 2

Arquivo 1	Arquivo 2	Arquivo 3	Tempo
Nível_1.txt 120 1.802 bytes	Nível_2.txt 120 1.682 bytes	Temp.txt 14.400 379,7 Kb	00s

Os detalhes das demais composições estão detalhados pelo Quadro J.5, lembrando que após completada cada composição os Arquivos 1 e 2 são apagados e o Arquivo 3 recebe o nome do Arquivo 2 para iniciar a composição seguinte. Os valores mostram que cada uma das cinco últimas composições movimentou aproximadamente 800 MB de dados e, sendo assim, os tempos foram similares.

Quadro J.5 - Dados das composições

Composição	Arquivo 1	Arquivo 2	Arquivo 3	Tempo
2	Nível_2.txt 14.400 379,7 Kb	Nível_3.txt 120 1.562 bytes	Temp.txt 1.728.000 62,6 MB	00m 15s
3	Nível_3.txt 1.728.000 62,6 MB	Nível_4.txt 2 18 bytes	Temp.txt 3.456.000 145 MB	02m 25s
4	Nível_4.txt 3.456.000 145 MB	Nível_5.txt 2 18 bytes	Temp.txt 6.912.000 329 MB	04m 44s
5	Nível_5.txt 6.912.000 329 MB	Nível_6.txt 1 7 bytes	Temp.txt 6.912.000 349 MB	08m 26s
6	Nível_6.txt 6.912.000 349 MB	Nível_7.txt 1 7 bytes	Temp.txt 6.912.000 369 MB	08m 29s
7	Nível_7.txt 6.912.000 369 MB	Nível_8.txt 1 7 bytes	Temp.txt 6.912.000 388 MB	08m 32s
8	Nível_8.txt 6.912.000 388 MB	Nível_9.txt 1 7 bytes	Temp.txt 6.912.000 408 MB	08m 34s
9	Nível_9.txt 6.912.000 408 MB	Nível_10.txt 1 7 bytes	Temp.txt 6.912.000 428 MB	08m 36s

J.5 Comentários finais sobre o gerador de seqüências

O procedimento implementado mostrou-se bastante robusto e funcional apesar do baixo desempenho obtido devido a opção de armazenamento de dados em arquivos de disco. Porém, como as peças a serem roteadas na simulação não geram um número elevado de seqüências, optou-se, na implementação final, por não usar armazenamento de dados em arquivos, ou seja, todos os dados são manipulados em vetores diretamente na memória RAM, oferecendo um desempenho superior. Essa implementação não foi testada com exemplos grandes como o apresentado neste apêndice devido a grande probabilidade de ser necessária mais memória RAM e, provavelmente, extrapolar os limites gerenciáveis pelo Visual Basic. A implementação do procedimento usando outra linguagem de programação pode contornar essa barreira.

Um outro limitante, que não foi atingido pelo exemplo testado, é o tamanho máximo do arquivo a ser manipulado. Na formatação FAT32 o sistema operacional pode manipular arquivos de até 4GB enquanto que não existe limite na formatação NTFS.

Foi notada uma possibilidade de melhoria no desempenho do programa mas, por ser desnecessário para o trabalho, não foi implementada. Trata-se da união de níveis que são compostos por poucas operações antes do procedimento de composição.

No exemplo de Groover (1987, p.169) os últimos 5 níveis são compostos por apenas 1 operação cada, cuja seqüência será a mesma em todos os processos: 17-21-22-23-24. Unidas elas formariam o Nível_6 e o processo todo seria reduzido em 34 minutos aproximadamente.

Uma opção ainda melhor seria se os últimos 7 níveis fossem processados antes dos demais, formando um novo Nível_4 que teria apenas 4 seqüências com as 9 operações finais:

13-14-15-16-17-21-22-23-24

13-14-16-15-17-21-22-23-24

14-13-15-16-17-21-22-23-24

14-13-16-15-17-21-22-23-24

Nessa situação é provável que todo o processo fosse encerrado em menos de 5 minutos. Usando discos rígidos de 10.000 rpm, interface SATA-II⁴⁰, 16MB de buffer e configuração RAID⁴¹ a taxa de transferência seria ainda maior aumentando o desempenho e diminuindo o tempo consumido.

⁴⁰ SATA-II significa Serial ATA versão 2. É uma interface de unidades de disco lançada entre 2002 e 2003 que possui taxa de transferência teórica de 300 MB/s (com previsão de atingir 600 MB/s em 2007).

⁴¹ RAID significa Redundant Array of Independent Drives. Trata-se de uma técnica pela qual vários discos rígidos físicos são associados logicamente de modo a prover tolerância a falhas e/ou melhorar o desempenho do sistema (aumentando a taxa de transferência e reduzindo os tempos de acesso).

APÊNDICE K - Estrutura do arquivo SCH

K.1 O arquivo SCH

O arquivo SCH é um arquivo de texto puro (ASCII) que contém todas as informações necessárias para gerar o gráfico de Gantt, ou seja, dados do arranjo físico, dados das peças e dados do roteamento. Com relação ao arranjo físico apenas os nomes das máquinas são necessários, mas optou-se por armazenar também a disposição das mesmas permitindo recuperar essa informação sem a necessidade de outro arquivo.

Antes de cada informação gravada há uma linha explicativa sobre o dado, facilitando o entendimento do arquivo quando aberto em um editor de textos. Essas linhas explicativas iniciam-se com os caracteres '=>'.

Para facilitar a compreensão da estrutura adotada para o arquivo SCH será usado o mesmo exemplo do Apêndice H, cujo arranjo físico é mostrado pela Figura K.1 e gráfico de Gantt pela Figura K.2, lembrando que trata-se do roteamento de 4 peças com 4 operações que duram 10 unidades de tempo na seguinte ordem de processos: 1–2–3–4. No Quadro K.1 tem-se o arquivo SCH correspondente.

2.01	4.01	4.02
2.02	1.01	4.03
3.01	3.02	3.03

Figura K.1 - Arranjo físico

	P1	P2	P3	P4
1.01	0, 10	10, 20	20, 30	30, 40
2.01				
2.02	10, 20	20, 30	30, 40	40, 50
3.01	20, 30	30, 40	40, 50	50, 60
3.02				
3.03				
4.01	30, 40	40, 50	50, 60	60, 70
4.02				
4.03				

Figura K.2 - Gráfico de Gantt e matriz de alocação

Quadro K.1 - Arquivo SCH

```
-- Arquivo SCH versão 2 --
=> Descrição
Gerado em 28/06/2006 às 16:18:37
=> Tipo de roteamento
Roteamento sem flexibilidade de seqüência.
=> DADOS DO ARRANJO FÍSICO
Exemplo de programação
=> Número de linhas do arranjo
3
=> Número de colunas do arranjo
3
=> Número de processos
4
=> Método de geração do arranjo
Edição manual
=> Grau de distribuição
4.458333
=> Disposição das máquinas
2.01, 4.01, 4.02
2.02, 1.01, 4.03
3.01, 3.02, 3.03
Fim dos dados do arranjo.
=> DADOS DAS PEÇAS
=> Diretório das peças
E:\Exemplo SCH\Pecas_01
=> Número de peças
4
P1.PEC
10, 10, 10, 10
P2.PEC
10, 10, 10, 10
P3.PEC
10, 10, 10, 10
P4.PEC
10, 10, 10, 10
Fim dos dados das peças.
=> DADOS DO ROTEAMENTO
=> INÍCIOS
0, 0, 10, 20, 0, 0, 30, 0, 0
10, 0, 20, 30, 0, 0, 40, 0, 0
20, 0, 30, 40, 0, 0, 50, 0, 0
30, 0, 40, 50, 0, 0, 60, 0, 0
=> FINAIS
10, 0, 20, 30, 0, 0, 40, 0, 0
20, 0, 30, 40, 0, 0, 50, 0, 0
30, 0, 40, 50, 0, 0, 60, 0, 0
40, 0, 50, 60, 0, 0, 70, 0, 0
Fim dos dados de roteamento.
=> MakeSpan
70
=> Distâncias percorridas
5
5
5
5
=> Distância total
20
=> Tempo de processamento
00h 00m 00.02s
Fim do arquivo SCR.
```

A primeira linha é um *identificador de arquivo*. Quando o arquivo é aberto verifica-se se contém exatamente esse texto. Caso a comparação seja verdadeira o processo de leitura continua e, no caso contrário, uma mensagem de erro é apresentada ao usuário. Essa verificação impede que um arquivo qualquer seja renomeado com extensão SCH e gere erros no programa.

O primeiro bloco de informações traz dois dados: data e hora em que foi gerado e o tipo de roteamento usado (com ou sem flexibilidade de seqüenciamento de operações).

O segundo bloco traz os dados do arranjo físico: nome (definido pelo usuário no programa gerador de arranjos físicos), número de linhas e colunas, número de processos, forma de geração, grau de distribuição e disposição das máquinas. Para simplificar a visualização adotou-se armazenar cada linha do arranjo físico em uma linha do arquivo SCH usando o caractere vírgula como separador⁴². Comparando estes dados e o arranjo físico da Figura K.1 verifica-se a correlação direta dos dados.

O segundo bloco encerra-se com uma linha de verificação (*Fim dos dados do arranjo.*) que é comparada no processo de leitura do arquivo. Caso haja uma edição manual dos dados e estes fiquem inconsistentes, como a alteração do número de linhas ou colunas por exemplo, uma mensagem de erro será apresentada.

O bloco de dados seguinte traz informações sobre as peças, sendo as primeiras o diretório onde os arquivos estavam localizados e sua quantidade. Em seguida vem uma seqüência de linhas onde a primeira traz o nome do arquivo da peça e a segunda traz a duração de cada operação em cada um dos processos do arranjo físico. O bloco também é encerrado com uma linha de verificação.

A compreensão desses dados pode ficar prejudicada pois o exemplo adotado traz peças que usam todos os processos e cujos tempos são iguais. Tomemos então como exemplo duas peças em um arranjo físico que possua 15 processos, como mostra a Figura K.3.

⁴² Em um arquivo seqüencial os dados devem estar em linhas distintas ou separados por vírgulas (ou outro caractere determinado pela linguagem de programação usada).

Figura K.3 - Peças para arranjo com 15 processos

Essas duas peças seriam armazenadas no arquivo SCH da forma mostrada pelo Quadro K.2. Como o arranjo físico possui 15 processos cada peça é representada por 15 valores. Cada valor corresponde ao tempo da operação no processo definido pela ordem dos dados, ou seja, o primeiro dado é o tempo da operação que usa o processo 1 e o último é o tempo da operação que usa o processo 15.

Quadro K.2 - Dados das peças

P001.PEC
0, 0, 0, 0, 0, 27, 0, 92, 27, 0, 62, 0, 14, 36, 0
P002.PEC
39, 0, 0, 0, 0, 66, 0, 15, 0, 0, 88, 0, 28, 0, 95

Como a peça P001 não usa os processos 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 12 e 15 os tempos referentes a eles são representados por 0. Não são armazenadas informações sobre as relações de precedência e nem sobre a seqüência adotada pelo roteamento.

O quarto bloco de dados traz as informações do roteamento, mais especificamente, da matriz de alocação. Esses dados são divididos em duas partes. A primeira traz os instantes de início das operações e a segunda os instantes de finalização. O bloco também é encerrado com a linha de verificação “*Fim dos dados de roteamento.*”.

Cada parte das informações de roteamento é representada por uma matriz cujo número de linhas corresponde ao número de peças roteadas e o número de colunas corresponde ao número de máquinas do arranjo físico.

A Figura K.4 mostra a matriz de alocação da Figura K.2 e sua versão transposta que possibilita uma comparação direta com os valores armazenados no arquivo SCH do Quadro K.1, cujo quarto bloco de dados também está representado.

Figura K.4 - Organização dos dados de roteamento

O bloco de dados final contém 5 informações: tempo total consumido pelas peças (makespan), distância percorrida por cada peça, distância total percorrida pelo conjunto de peças e o tempo de processamento do conjunto de peças no arranjo físico.

A última linha do arquivo também é usada na verificação (“*Fim do arquivo SCH.*”).

APÊNDICE L - Testes de Hipótese

L.1 Comentários iniciais

Neste apêndice estão os testes de hipótese realizados para confirmar que as diferenças percentuais detectadas entre os roteamentos rígidos e flexíveis são estatisticamente relevantes.

Para cada teste é apresentada a fonte dos dados (quadro de origem, do capítulo 8) e uma figura que resume todo o procedimento. No lado esquerdo das figuras estão os dados de cada população, o tipo de teste adotado e o nível de significância escolhido. Ainda do lado esquerdo um gráfico apresenta a curva normal padrão, a região de rejeição (em cinza) e também o valor da estatística de teste Z (linha vermelha).

Do lado direito das figuras estão os detalhes do procedimento do teste, desde a formulação das hipóteses nula e alternativa até a conclusão final, que é a mesma em todos os casos.

Todos os testes utilizaram o nível de significância de 5%, mas a observação dos gráficos mostra que qualquer outro valor levaria a mesma conclusão.

Ao teste de hipótese do arranjo físico desequilibrado pequeno também foi incluído neste apêndice apesar de ter sido apresentado no capítulo 9.

L.2 Arranjos físicos desequilibrados pequenos

A Figura L.1 apresenta o teste de hipótese para os arranjos físicos desequilibrados pequenos, cujos dados originais são provenientes do Quadro 8.1 (roteamento rígido - população 1) e Quadro 8.3 (roteamento flexível - população 2).

Figura L.1 - Teste de hipótese (AFDP)

L.3 Arranjos físicos desequilibrados médios

A Figura L.2 apresenta o teste de hipótese para os arranjos físicos desequilibrados médios, cujos dados originais são provenientes do Quadro 8.5 (roteamento rígido - população 1) e Quadro 8.7 (roteamento flexível - população 2).

Figura L.2 - Teste de hipótese (AFDM)

L.4 Arranjos físicos desequilibrados grandes

A Figura L.3 apresenta o teste de hipótese para os arranjos físicos desequilibrados grandes, cujos dados originais são provenientes do Quadro 8.9 (roteamento rígido - população 1) e Quadro 8.11 (roteamento flexível - população 2).

Figura L.3 - Teste de hipótese (AFDG)

L.5 Arranjos físicos equilibrados pequenos

A Figura L.4 apresenta o teste de hipótese para os arranjos físicos equilibrados pequenos, cujos dados originais são provenientes do Quadro 8.13 (roteamento rígido - população 1) e Quadro 8.15 (roteamento flexível - população 2).

Figura L.4 - Teste de hipótese (AFEP)

L.6 Arranjos físicos equilibrados médios

A Figura L.5 apresenta o teste de hipótese para os arranjos físicos equilibrados pequenos, cujos dados originais são provenientes do Quadro 8.17 (roteamento rígido - população 1) e Quadro 8.19 (roteamento flexível - população 2).

Figura L.5 - Teste de hipótese (AFEM)

L.7 Arranjos físicos equilibrados médios

A Figura L.6 Figura L.5 apresenta o teste de hipótese para os arranjos físicos equilibrados pequenos, cujos dados originais são provenientes do Quadro 8.21 (roteamento rígido - população 1) e Quadro 8.23 (roteamento flexível - população 2).

Figura L.6 - Teste de hipótese (AFEG)

L.8 Arranjos físicos para influência da divisão dos departamentos

A Figura L.7 apresenta o teste de hipótese para os arranjos físicos equilibrados pequenos, cujos dados originais são provenientes do Quadro 8.25 (roteamento rígido - população 1) e Quadro 8.27 (roteamento flexível - população 2).

Figura L.7 - Teste de hipótese