





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carina Maria Oliveira Pimentel | **Modelos e Métodos para Problemas de Dimensionamento de Lotes e Escalonamento**

Carina Maria Oliveira Pimentel

Modelos e Métodos para Problemas de Dimensionamento de Lotes e Escalonamento

UMinho | 2010

Dezembro de 2010



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carina Maria Oliveira Pimentel

Modelos e Métodos para Problemas de Dimensionamento de Lotes e Escalonamento

Programa Doutoral em Engenharia Industrial e de Sistemas

Trabalho efectuado sob a orientação do
**Professor Doutor Filipe Pereira Pinto da
Cunha e Alvelos**
e do
**Professor Doutor José Manuel Vasconcelos
Valério de Carvalho**

Dezembro de 2010

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO PARCIAL DESTA TESE APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

Agradecimentos

A minha primeira palavra de agradecimento vai naturalmente para os meus orientadores. Agradeço-lhes a partilha de conhecimento, a confiança depositada em mim e a dedicação. Tenho ainda a agradecer-lhes todas as sugestões e contribuições ao longo do trabalho, bem como os valiosos comentários de revisão da componente escrita. Por último, agradeço-lhes a sua amizade.

Agradeço à Escola de Engenharia da Universidade do Minho, ao Departamento de Produção e Sistemas e ao Centro Algoritmi por terem apoiado este projecto.

Um dos problemas tratado neste trabalho resulta de um estudo de caso. Agradeço-o ao Engenheiro Paulo Rodrigues, por mais uma vez ter acreditado em mim e por me ter dado esta oportunidade. Agradeço também à Orfama, S. A., a possibilidade de estudar este problema e de passar na empresa um período de cerca de 1 mês, que foi essencial para o conhecimento do problema e para a recolha de informação. Agradeço a todas as pessoas da Orfama com quem tive o privilégio de conversar, todo o tempo que me dispensaram e toda a informação que partilharam comigo. Este estudo de caso, foi sem dúvida um forte factor de motivação neste trabalho.

Ao António Duarte, co-autor de algumas publicações deste trabalho, agradeço-lhe o rigor na leitura dos textos e as suas críticas e sugestões, que enriqueceram este trabalho.

Quero agradecer ao Paulo Vilaça a codificação do gerador de instâncias e da heurística de fluxos em rede e escalonamento.

Aos meus colegas de gabinete, particularmente ao Paulo, ao Tó e à Mariana, agradeço-lhes todos os bons momentos de descontração, o ânimo e a sua amizade.

Quero agradecer à minha família a motivação, a compreensão, a ajuda e acima de tudo a paciência.

Quero agradecer ainda à Fundação para a Ciência e a Tecnologia o apoio financeiro concedido para a realização desta Tese de Doutoramento, através da bolsa com a referência SFRH/BD/38582/2007.

A minha última palavra de agradecimento é para a minha filha Carolina. A ela fui buscar inúmeras vezes força e inspiração para este trabalho. Ela foi também muitas vezes prejudicada por este trabalho, por isso, dedico-lho na íntegra.

Resumo

O trabalho que se apresenta nesta tese relaciona-se com o desenvolvimento de modelos e de métodos para a resolução de dois problemas de planeamento da produção de médio/curto prazo. A principal motivação consiste na exploração e comparação de diferentes abordagens, baseadas em programação inteira mista, em modelos/métodos de decomposição e em métodos heurísticos, para os problemas em estudo.

O primeiro problema, é um problema clássico de dimensionamento de lotes, que está associado às decisões de planeamento da produção de médio-prazo. O problema consiste na determinação de um plano de produção para vários produtos finais ao longo de um determinado horizonte temporal, que minimize todos os custos envolvidos e respeite restrições de procura e de capacidade. Para este problema desenvolve-se um novo modelo exacto, que resulta da aplicação dos princípios da decomposição de Dantzig-Wolfe múltipla a uma formulação de programação inteira mista para o problema. Os princípios gerais de aplicação desta decomposição são também apresentados neste trabalho. A potencial mais valia deste modelo relaciona-se com a obtenção de limites inferiores de boa qualidade. O modelo que resulta da decomposição de Dantzig-Wolfe múltipla é comparado com dois modelos de decomposição alternativos, que se obtêm aplicando directamente os princípios da decomposição de Dantzig-Wolfe, e com o modelo de programação inteira mista, resolvido directamente através de um *software* de estado-da-arte. Para determinar a solução óptima inteira dos modelos de decomposição aplica-se o método de partição e geração de colunas (*branch-and-price*). São apresentados resultados computacionais partindo de um conjunto de instâncias da literatura, para os vários modelos e métodos.

O segundo problema estudado neste trabalho surge associado ao planeamento de curto-prazo e combina as decisões de dimensionamento de lotes, com as decisões de afectação e escalonamento desses lotes. Este estudo foi motivado por um problema real da indústria têxtil, no qual se pretende definir um plano de produção para uma secção de tricotagem, onde os principais componentes dos produtos finais são realizados num

conjunto de máquinas paralelas idênticas. Para este problema propõe-se um novo modelo de programação inteira mista, que se resolve através de um *software* de estado-da-arte. Paralelamente, propõem-se vários métodos heurísticos. Duas das heurísticas propostas são: uma heurística de fluxos em rede e escalonamento e uma heurística de ordenação e escalonamento. Estas heurísticas visam a obtenção de soluções com alguma qualidade em pouco tempo. Propõem-se ainda quatro algoritmos de pesquisa local, que têm em consideração características específicas do problema e que tentam melhorar a qualidade das soluções das heurísticas anteriores. Atendendo ao desempenho dos algoritmos de pesquisa local, estes são combinados através de mudanças sistemáticas das vizinhanças, dando origem a duas meta-heurísticas: uma de descida em vizinhanças variáveis e outra de pesquisa em vizinhanças variáveis.

Para avaliar as soluções do modelo de programação inteira mista e dos métodos heurísticos sugere-se uma função de avaliação inovadora, que minimiza os atrasos totais e os níveis em curso de fabrico entre duas etapas sucessivas do processo produtivo. É ainda sugerida uma nova função de avaliação nos métodos heurísticos, também baseada na minimização dos atrasos totais e na minimização dos níveis em curso de fabrico. A principal vantagem desta segunda medida de avaliação é contabilizar de um modo mais rigoroso os níveis em curso de fabrico.

Para avaliar o desempenho e a qualidade das soluções do modelo de programação inteira mista e dos métodos heurísticos, desenvolveu-se um gerador de instâncias, que gera instâncias semelhantes às do problema real.

Abstract

This work is associated with the development of models and methods for two medium/short term production planning problems. Our main motivation is the exploration and comparison of different approaches, based on mixed integer programming, on decomposition models and methods and on heuristics, for those two problems.

The first one is a classical lot sizing problem associated with the medium-term production planning decisions. The problem consists of finding a production plan for several final items over a given planning horizon that minimizes the overall costs involved, while respecting demand and capacity constraints. An exact model based on a multiple Dantzig-Wolfe decomposition is developed. The general principles of this decomposition are presented in this work too. The potential benefit of this decomposition is the achievement of good quality lower bounds, although our purpose is to obtain integer optimal solutions. The resulting model of multiple Dantzig-Wolfe decomposition is compared with two alternative decomposition models that are obtained when applying directly the Dantzig-Wolfe decomposition principles, and is also compared with an integer programming formulation solved by a state-of-art software.

The integer optimal solutions of all the decomposition models are obtained through branch-and-price algorithms. We present computational results for a set of instances from the literature.

The second problem studied in this work is a short-term production planning problem that integrates lot sizing, assignment and scheduling decisions. This study was motivated by a real problem from a textile industry. The aim is to define a production plan for a knitting section where the main components of the final items are processed on a set of identical parallel machines. A new mixed integer programming model is proposed for this problem, as well as several heuristics. Two of those heuristics are: a

network flow and scheduling heuristic and an ordering and scheduling heuristic. The purpose of these heuristics is to find good quality solutions quickly. Four local search based algorithms that consider specific characteristics of the problem are developed too, in order to try to improve the solutions of the previous heuristics. Taking into account the performance of the four local search heuristics, we combine them through systematic changes of neighborhoods, testing two metaheuristics: variable neighborhood descent and variable neighborhood search.

To evaluate the mixed integer programming model solutions and the solutions of all the heuristics, an innovative evaluation function that minimizes a weighted sum of total tardiness and work-in-process levels between two successive production processes is suggested. We study another new evaluation function for the heuristic methods, which is related to the previous one. The main advantage of the second evaluation function over the first one is that it calculates in a more precise way the levels of work-in-process inventory.

The performance and quality of solutions of all the above presented methods for the second problem are evaluated using a set of instances that are similar to the real ones. Those instances were generated by an instance generator developed by us.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice	ix
Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xv
Capítulo 1	1
Introdução Geral	1
1.1 Tema e Âmbito da Tese.....	1
1.2 Motivações	5
1.3 Contribuições.....	6
1.4 Estrutura da Tese	8
Capítulo 2	11
Problema de Dimensionamento de Lotes de Produção	11
2.1 Caracterização do Problema e Revisão de Literatura.....	12
2.2 Modelo Compacto	15
2.3 Decomposições de Dantzig-Wolfe	19
2.3.1 Decomposição por Produto.....	19
2.3.1.1 Problema Mestre da Decomposição por Produto.....	19
2.3.1.2 Subproblemas da Decomposição por Produto	21
2.3.2 Decomposição por Período	23
2.3.2.1 Problema Mestre da Decomposição por Período	23
2.3.2.2 Subproblemas da Decomposição por Período.....	25
2.4 Decomposição de Dantzig-Wolfe Múltipla.....	26
2.4.1 Conceitos Gerais	26
2.4.2 Aplicação da DDWM ao Problema LPMACC.....	30
2.4.2.1 Problema Mestre da DDWM	30
2.4.2.2 Subproblemas da DDWM	32
2.4.2.3 Algoritmo de Geração de Colunas	33
2.5 Partição e Geração de Colunas	35

2.6	Resultados Computacionais.....	38
2.6.1	Instâncias de Teste	38
2.6.2	Implementação	40
2.6.3	Resultados da Relaxação Linear	41
2.6.4	Resultados do Problema Inteiro	45
2.7	Conclusões.....	50
Capítulo 3		53
	Problema de Dimensionamento de Lotes e Escalonamento Integrados em Máquinas Paralelas: Estudo de Caso	53
3.1	Contextualização e Caracterização do Problema Real	53
3.2	Revisão de Literatura.....	59
3.3	Instâncias de Teste.....	70
3.4	Conclusões.....	73
Capítulo 4		75
	Método Exacto para o Problema de Dimensionamento de Lotes e Escalonamento Integrados em Máquinas Paralelas	75
4.1	Modelo de Programação Inteira Mista	75
4.2	Resultados Computacionais.....	84
4.3	Conclusões.....	93
Capítulo 5		95
	Heurísticas Dedicadas para o Problema de Dimensionamento de Lotes e Escalonamento Integrados em Máquinas Paralelas	95
5.1	Heurística de Fluxos em Rede e Escalonamento.....	95
5.1.1	Etapa 1	96
5.1.2	Etapa 2	108
5.1.3	Resultados Computacionais.....	113
5.2	Heurística de Ordenação e Escalonamento	121
5.2.1	Resultados Computacionais.....	128
5.3	Conclusões.....	136
Capítulo 6		141
	Heurísticas Baseadas em Pesquisa Local para o Problema de Dimensionamento de Lotes e Escalonamento Integrados em Máquinas Paralelas	141
6.1	Algoritmos de Pesquisa Local	142
6.1.1	Representação de uma Solução.....	142
6.1.2	Estruturas de Vizinhança	142
6.1.3	Funções de Avaliação	149
6.1.4	Resultados Computacionais.....	153

6.1.4.1	Resultados da Pesquisa Local partindo da Heurística de Fluxos em Rede e Escalonamento e usando a Função de Avaliação 1	154
6.1.4.2	Resultados da Pesquisa Local partindo da Heurística de Fluxos em Rede e Escalonamento e usando a Função de Avaliação 2	160
6.1.4.3	Resultados da Pesquisa Local partindo da Heurística de Ordenação e Escalonamento e usando a Função de Avaliação 1	167
6.1.4.4	Resultados da Pesquisa Local partindo da Heurística de Ordenação e Escalonamento e usando a Função de Avaliação 2	173
6.2	Meta-heurísticas	180
6.2.1	VND e VNS	180
6.2.2	Resultados Computacionais.....	185
6.2.2.1	Resultados das Meta-Heurísticas partindo da Heurística de Fluxos em Rede e Escalonamento e usando a Função de Avaliação 1	185
6.2.2.2	Resultados das Meta-Heurísticas partindo da Heurística de Fluxos em Rede e Escalonamento e usando a Função de Avaliação 2	192
6.2.2.3	Resultados das Meta-Heurísticas partindo da Heurística de Ordenação e Escalonamento e usando a Função de Avaliação 1	198
6.2.2.4	Resultados das Meta-Heurísticas partindo da Heurística de Ordenação e Escalonamento e usando a Função de Avaliação 2	204
6.3	Conclusões.....	210
Capítulo 7.....		215
Conclusões e Trabalho Futuro.....		215
Bibliografia		221
Anexo 1 Procedimento de Geração de Instâncias		227
Anexo 2 Estrutura das Instâncias de Teste		235

Lista de Figuras

Figura 2.1 Primeira alternativa de articulação entre o PMR do modelo PMIJ e os subproblemas no método de geração de colunas	34
Figura 2.2 Segunda alternativa de articulação entre o PMR do modelo PMIJ e os subproblemas no método de geração de colunas	35
Figura 3.1 Representação das subsecções de tricotagem e tipos de componentes a elas associados	54
Figura 3.2 Solução admissível para o Exemplo 3.1 sem produção de mais do que um lote do mesmo componente na mesma máquina	59
Figura 3.3 Solução admissível para o Exemplo 3.1 com produção de mais do que um lote do mesmo componente na mesma máquina	59
Figura 4.1 Representação do tempo no modelo de PIM.....	76
Figura 4.2 Exemplo de solução admissível para o problema DLEMP.....	84
Figura 4.3 Comportamento do atraso total dos produtos finais face ao aumento da percentagem média de utilização das máquinas – modelo de PIM	89
Figura 4.4 Comportamento do atraso total dos produtos finais face ao aumento do número de componentes – modelo de PIM	90
Figura 4.5 Comportamento do desvio total dos produtos finais face ao aumento do número de componentes – modelo de PIM	90
Figura 4.6 Comportamento do desvio total dos produtos finais face ao aumento da percentagem média de utilização das máquinas – modelo de PIM	91
Figura 4.7 Comportamento do número de lotes face ao aumento do desvio total dos produtos finais – modelo de PIM.....	92
Figura 4.8 Comportamento do número de lotes face ao aumento do atraso total dos produtos finais – modelo de PIM.....	92
Figura 4.9 Comportamento do atraso total dos produtos finais face ao aumento do desvio total dos produtos finais – modelo de PIM.....	93
Figura 5.1 Intervalos de tempo do Exemplo 5.1.....	99
Figura 5.2 Modelo de fluxos em rede do Exemplo 5.2 – formulação errada	101

Figura 5.3 Modelo de fluxos em rede do Exemplo 5.2 – formulação correcta	101
Figura 5.4 Solução do Exemplo 5.1 no final da Etapa 1	108
Figura 5.5 Solução do Exemplo 5.1 no final da Etapa 1 e intervalos de tempo da Etapa 2	110
Figura 5.6 Solução do Exemplo 5.1 no final da Etapa 1, intervalos de tempo da Etapa 2 e números de ordem associados a cada intervalo de tempo na Etapa 2.....	111
Figura 5.7 Solução final do Exemplo 5.1	113
Figura 5.8 Comportamento do atraso total dos produtos finais face ao aumento do número de componentes - heurística de fluxos em rede e escalonamento	117
Figura 5.9 Comportamento do atraso total dos produtos finais face ao aumento da percentagem média de utilização das máquinas - heurística de fluxos em rede e escalonamento.....	118
Figura 5.10 Comportamento do número de lotes face ao aumento do atraso total dos produtos finais - heurística de fluxos em rede e escalonamento.....	118
Figura 5.11 Comportamento do desvio total dos produtos finais face ao aumento do número de componentes - heurística de fluxos em rede e escalonamento	119
Figura 5.12 Comportamento do desvio total dos produtos finais face ao aumento da percentagem média de utilização das máquinas - heurística de fluxos em rede e escalonamento.....	119
Figura 5.13 Comportamento do número de lotes face ao aumento do desvio total dos produtos finais - heurística de fluxos em rede e escalonamento.....	120
Figura 5.14 Comportamento do atraso total dos produtos finais face ao aumento do desvio total dos produtos finais – heurística de fluxos em rede e escalonamento.....	120
Figura 5.15 Comportamento do número de lotes face ao aumento do número de componentes – heurística de fluxos em rede e escalonamento.....	121
Figura 5.16 Solução do Exemplo 5.3.....	128
Figura 5.17 Comportamento do atraso total dos produtos finais face ao aumento do número de componentes – heurística de ordenação e escalonamento	132
Figura 5.18 Comportamento do atraso total dos produtos finais face ao aumento da percentagem média de utilização das máquinas – heurística de ordenação e escalonamento.....	132

Figura 5.19 Comportamento do número de lotes face ao aumento do atraso total dos produtos finais – heurística de ordenação e escalonamento	133
Figura 5.20 Comportamento do desvio total dos produtos finais face ao aumento do número de componentes – heurística de ordenação e escalonamento	134
Figura 5.21 Comportamento do desvio total dos produtos finais face ao aumento da percentagem média de utilização das máquinas – heurística de ordenação e escalonamento.....	134
Figura 5.22 Comportamento do número de lotes face ao aumento do desvio total dos produtos finais – heurística de ordenação e escalonamento	135
Figura 5.23 Comportamento do atraso total face ao aumento do desvio total dos produtos finais – heurística de ordenação e escalonamento	135
Figura 5.24 Comportamento do número de lotes face ao aumento do número de componentes – heurística de ordenação e escalonamento	136
Figura 6.1 Representação das implicações da inserção de um lote na solução actual (lote LI), que ocupa parte de um lote da solução actual (lote A), na solução vizinha de cada estrutura de vizinhança	145
Figura 6.2 Representação das implicações da inserção de um lote na solução actual (lote LI), que ocupa parte dos lotes A e C da solução actual e a totalidade do lote B, na solução vizinha de cada estrutura de vizinhança	146
Figura 6.3 Solução actual do Exemplo 6.1	147
Figura 6.4 Inserção total para trás - Exemplo 6.1	147
Figura 6.5 Inserção total para a frente - Exemplo 6.1	148
Figura 6.6 Inserção parcial para trás - Exemplo 6.1	148
Figura 6.7 Inserção parcial para a frente - Exemplo 6.1.....	149
Figura 6.8 Expressão de cálculo do stock médio associado a um lote	150
Figura 6.9 Pseudo-código da segunda função de avaliação	152
Figura 6.10 Pseudo-código do stock médio durante a produção com atraso.....	153
Figura 6.11 Pseudo-código do algoritmo VND.....	182
Figura 6.12 Pseudo-código do algoritmo VNS.....	183
Figura 6.13 Comparação de métodos para a função de avaliação 1	214
Figura 6.14 Comparação de métodos para a função de avaliação 2.....	214

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Características das instâncias	39
Tabela 2.2 Tempo médio de resolução da relaxação linear, desvio médio relativo do limite inferior e desvio médio de integralidade relativo	43
Tabela 2.3 Tempo médio de resolução da relaxação linear, desvio médio relativo do limite inferior e desvio médio de integralidade relativo (continuação)	44
Tabela 2.4 Tempos médios de resolução do problema inteiro, número de instâncias resolvidas, diferenças médias relativas para a melhor incumbente e desvios médios de integralidade relativos	47
Tabela 2.5 Tempos médios de resolução do problema inteiro, número de instâncias resolvidas, diferenças médias relativas para a melhor incumbente e desvios médios de integralidade relativos (continuação).....	48
Tabela 2.6 Número de instâncias resolvidas por característica	49
Tabela 3.1 Características principais das instâncias de teste	72
Tabela 4.1 Resultados computacionais do modelo DLEMP – soluções inteiras	87
Tabela 4.2 Resultados Computacionais do modelo DLEMP – soluções inteiras (continuação)	88
Tabela 5.1 Dados do Exemplo 5.1	98
Tabela 5.2 Datas de disponibilidade das máquinas	98
Tabela 5.3 Solução ótima do modelo de fluxos em rede da Etapa 1 do Exemplo 5.1106	
Tabela 5.4 Solução ótima do modelo de fluxos em rede da Etapa 2 do Exemplo 5.1112	
Tabela 5.5 Resultados computacionais da heurística de fluxos em rede e escalonamento	115
Tabela 5.6 Resultados computacionais da heurística de fluxos em rede e escalonamento (continuação)	116
Tabela 5.7 Dados do Exemplo 5.3	126
Tabela 5.8 Datas de disponibilidade das máquinas do Exemplo 5.3	126
Tabela 5.9 Informação do Exemplo 5.3 usada no passo 1	127
Tabela 5.10 Resultados computacionais da heurística de ordenação e escalonamento	129

Tabela 5.11 Resultados computacionais da heurística de ordenação e escalonamento (continuação)	130
Tabela 6.1 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 1	155
Tabela 6.2 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 1 (continuação)	156
Tabela 6.3 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 1	157
Tabela 6.4 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 1 (continuação)	158
Tabela 6.5 Comparação dos valores da função de avaliação 1 da solução inicial da heurística de fluxos em rede e escalonamento com os valores da função de avaliação 1 dos algoritmos de pesquisa local, e número de instâncias com melhoria do atraso total e com melhoria do desvio total.....	160
Tabela 6.6 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 2	162
Tabela 6.7 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 2 (continuação)	163
Tabela 6.8 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 2	164
Tabela 6.9 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 2 (continuação)	165
Tabela 6.10 Comparação dos valores da função de avaliação 2 da solução inicial da heurística de fluxos em rede e escalonamento com os valores da função de avaliação 2 dos algoritmos de pesquisa local	166
Tabela 6.11 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 1	168

Tabela 6.12 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 1 (continuação)	169
Tabela 6.13 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 1	170
Tabela 6.14 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 1 (continuação)	171
Tabela 6.15 Comparação dos valores da função de avaliação 1 da solução inicial da heurística de ordenação e escalonamento com os valores da função de avaliação 1 dos algoritmos de pesquisa local e número de instâncias com melhoria do desvio total da solução inicial	172
Tabela 6.16 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 2.....	175
Tabela 6.17 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 2 (continuação)	176
Tabela 6.18 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 2.....	177
Tabela 6.19 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 2 (continuação)	178
Tabela 6.20 Comparação dos valores da função de avaliação 2 da solução inicial da heurística de ordenação e escalonamento com os valores da função de avaliação 2 dos algoritmos de pesquisa local	179
Tabela 6.21 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 1.....	187
Tabela 6.22 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 1 (continuação).....	188
Tabela 6.23 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 1.....	189
Tabela 6.24 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 1 (continuação).....	190
Tabela 6.25 Número de instâncias com melhoria do atraso total e do desvio total da melhor solução da pesquisa local.....	191

Tabela 6.26 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 2.....	193
Tabela 6.27 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 2 (continuação).....	194
Tabela 6.28 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 2.....	195
Tabela 6.29 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 2 (continuação).....	196
Tabela 6.30 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 1	199
Tabela 6.31 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 1 (continuação)	200
Tabela 6.32 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 1	201
Tabela 6.33 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 1 (continuação)	202
Tabela 6.34 Número de instâncias com melhoria do desvio total da melhor solução da pesquisa local	203
Tabela 6.35 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 2	205
Tabela 6.36 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 2 (continuação)	206
Tabela 6.37 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 2	207
Tabela 6.38 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 2 (continuação)	208
Tabela A1.1 Representatividade de cada tipo de encomenda.....	227
Tabela A1.2 Tipo de produto final e sua representatividade, número de componentes associados e sua representatividade e factores de incorporação dos componentes	228
Tabela A1.3 Representatividade do jogo	229
Tabela A1.4 Procedimento de atribuição do número de fios aos produtos finais.....	229

Tabela A1.5 Probabilidade de ocorrência de cada valor da variável número de tamanhos	230
Tabela A1.6 Padrão de procura por tipo de encomenda	231
Tabela A1.7 Tempos unitários de produção por tipo de componente para um tamanho médio	232
Tabela A1.8 Probabilidade de ocorrência de cada valor da variável número de máquinas de jogo 21	233
Tabela A1.9 Probabilidade de ocorrência de cada valor da variável número de máquinas de jogo 24	233
Tabela A1.10 Probabilidade de ocorrência de cada valor da variável número de máquinas de jogo 27	234

Capítulo 1

Introdução Geral

Neste capítulo faz-se uma introdução ao tema e ao trabalho desenvolvido nesta tese. Apresentam-se as motivações para este trabalho assim como as suas principais contribuições. Faz-se uma introdução aos problemas abordados e enquadram-se os mesmos na respectiva área do conhecimento. Paralelamente, descrevem-se resumidamente os modelos e métodos de resolução desenvolvidos. Na última secção do capítulo, apresenta-se a estrutura da tese.

1.1 Tema e Âmbito da Tese

Nesta tese abordam-se problemas de planeamento da produção de médio/curto prazo. O estudo centra-se no desenvolvimento de modelos e de métodos, exactos e heurísticos, para dois problemas de planeamento da produção.

O primeiro problema, frequentemente associado ao planeamento da produção de médio-prazo, é um problema de lotes de produção multi-artigo capacitado com tempos de preparação (LPMACC). Este problema corresponde ao problema resolvido ao nível do plano mestre de produção e tem sido extensivamente estudado, pelo facto de ser um problema importante do planeamento da produção. Em termos gerais, o problema consiste na determinação de um plano de produção para vários artigos, habitualmente

produtos acabados, num número finito de períodos de planeamento de forma a satisfazer a procura dos clientes, tendo em conta a escassez dos recursos, ao menor custo possível. Tipicamente o objectivo é o da minimização de custos de produção, de armazenagem e de preparação. Numa solução (ou plano de produção) para o problema LPMACC determina-se o tamanho dos lotes a produzir de cada produto final, em cada período de planeamento, assim como as quantidades a armazenar de cada produto final no final de cada período de planeamento, para satisfazer procuras posteriores.

O problema LPMACC, para além de estar relacionado com um tema de elevada relevância, é um problema que se reveste de grande complexidade, dado que pertence à classe de problemas NP-difíceis.

Ao longo das últimas décadas têm sido estudados vários modelos/problemas de lotes de produção relacionados com o LPMACC, assim como algumas suas extensões. Para uma visão global acerca dos modelos e métodos de lotes de produção e de outros problemas relacionados, assim como para a sua contextualização ao nível dos sistemas de planeamento e controlo da produção, recomenda-se a leitura de Pochet (2001) e de Pochet e Wolsey (2006).

No trabalho descrito nesta tese para resolver o problema LPMACC, partindo de uma formulação de programação inteira mista (PIM) definem-se três modelos de decomposição, com o objectivo de obter limites inferiores de melhor qualidade que os obtidos resolvendo directamente a formulação de PIM. Os três modelos de decomposição resultam da aplicação da decomposição de Dantzig-Wolfe. No primeiro modelo de decomposição os subproblemas ficam associados a produtos. No segundo, os subproblemas estão associados a períodos. No terceiro e último modelo de decomposição, aplica-se uma decomposição de Dantzig-Wolfe múltipla. A principal diferença entre as decomposições de Dantzig-Wolfe aplicadas no primeiro e segundo modelo de decomposição e a decomposição de Dantzig-Wolfe múltipla, reside no facto de na decomposição múltipla se trabalhar com mais do que um tipo de subproblema, o que leva a que no problema mestre existam colunas com estruturas diferentes. Em termos teóricos, sabe-se que quando mais do que um dos subproblemas resultantes da decomposição múltipla não tem a propriedade da integralidade, os limites inferiores que se obtêm podem ser melhores dos que se obtêm aplicando uma decomposição de

Dantzig-Wolfe (básica). A decomposição múltipla foi em geral pouco abordada na literatura, e no melhor conhecimento da autora, nunca foi abordada no contexto do problema LPMACC, o que constitui uma motivação para o seu estudo.

No modelo de decomposição múltipla abordado neste trabalho, definem-se dois tipos de subproblemas: os que resultam da primeira decomposição (associados a produtos) e os que resultam da segunda decomposição (associados a períodos).

Para resolver os problemas decompostos, devido ao elevado número de variáveis dos modelos, utiliza-se o método de geração de colunas. Como este método não garante a obtenção de soluções óptimas inteiras, após resolvida a raiz da árvore de pesquisa, aplica-se o método de partição e geração de colunas (*branch-and-price*), que resulta da combinação do método de geração de colunas com o método de partição e avaliação (*branch-and-bound*).

O segundo problema abordado nesta tese é um problema de planeamento da produção de curto-prazo que combina o dimensionamento de lotes e o seu escalonamento (o que corresponde a determinar os instantes de início e de conclusão dos lotes) num conjunto de máquinas paralelas idênticas. Este problema surgiu de um estudo de caso de um problema real de uma indústria têxtil de média dimensão, que se dedica à fabricação de artigos de malha fina. Para além da consideração de máquinas paralelas idênticas, o problema caracteriza-se pela existência de procuras e datas de entrega (determinísticas) associadas a produtos finais, pela existência de uma matriz de compatibilidades entre máquinas e componentes, pela existência de datas de disponibilidade de máquinas e, por último, pela existência de relações entre componentes pertencentes ao mesmo produto final.

Neste problema, doravante designado por problema de dimensionamento de lotes e escalonamento integrados em máquinas paralelas (DLEMP), pretende-se definir um plano de produção para uma secção de tricotagem, no qual se faz a afectação da procura associada a cada componente a uma ou mais máquinas e se determina o escalonamento da produção em cada máquina. Esta procura pode ser dividida em lotes de menor quantidade e os lotes podem ser produzidos em qualquer altura em uma ou mais máquinas de entre as disponíveis, desde que o componente associado ao lote possa

ser produzido nessa máquina. Os objectivos passam por um lado por garantir a entrega atempada dos produtos e por outro lado por minimizar os níveis de trabalho em curso de fabrico.

Tradicionalmente, quer na vertente prática quer na vertente teórica dos sistemas de planeamento da produção, as decisões de dimensionamento de lotes e de escalonamento são tomadas sequencialmente, em diferentes níveis hierárquicos. O dimensionamento de lotes trata-se habitualmente com base em informação agregada, constituindo a solução de dimensionamento de lotes um *input* para o problema de escalonamento, que trata a informação de modo detalhado. Em Dauzère-Pérès e Lasserre (2002), por exemplo, esta metodologia é colocada em causa, levantando-se algumas questões quanto à coerência entre as decisões tomadas nos diferentes níveis. Por força do objectivo tratado no problema DLEMP, é fundamental que ambas as decisões sejam tomadas ao mesmo nível.

A literatura relativa ao problema DLEMP é reduzida, como se mostrará mais tarde, no Capítulo 3, secção 3.2 de revisão de literatura. Embora este problema tenha semelhanças com vários problemas que têm sido abordados na literatura, por exemplo com o problema de sequenciamento de máquinas paralelas com e sem a possibilidade de interrupção e com o problema de tarefas maleáveis, tem algumas particularidades, ainda pouco estudadas, que o distingue dos problemas anteriores, como sendo as funções objectivo tratadas neste trabalho e a possibilidade de a procura associada a um produto poder ser dividida em lotes de menor dimensão (variável), que podem ser produzidos simultaneamente em mais do que uma máquina.

Para o problema DLEMP define-se um modelo de PIM, que considera a minimização do atraso total dos produtos finais e a minimização do desvio entre as datas de conclusão de todos os lotes pertencentes ao mesmo produto final. Na segunda componente da função objectivo, pretende-se garantir que os componentes pertencentes ao mesmo produto final terminam o mais próximo possível.

Dada a enorme complexidade do problema, resolvendo directamente o modelo de PIM não se obtêm facilmente soluções óptimas inteiras. Por esse motivo, o problema

DLEMP foi também abordado através de vários métodos heurísticos baseados em pesquisa local.

O modelo de PIM e os métodos desenvolvidos para o problema DLEMP foram testados computacionalmente, através de um conjunto de instâncias de teste com características semelhantes às do problema real.

1.2 Motivações

Embora amplamente estudados por teóricos e práticos os problemas de planeamento da produção constituem ainda um desafio, para ambas as comunidades, provavelmente pela sua elevada complexidade e pela necessidade de se desenvolverem modelos que sejam capazes de responder em tempo real com rigor às permanentes solicitações de todas as entidades intervenientes no planeamento da produção. Uma parte significativa de estudos na área aborda problemas teóricos difíceis de transpor para a realidade, sendo que a quantidade de trabalhos que aborda problemas reais, embora esteja em expansão é claramente insuficiente. Parte do trabalho desenvolvido nesta tese é dedicado a um problema real, de grande complexidade e de elevada dimensão, para o qual são necessários planos de produção eficientes já que se trata de um gargalo de produção. Deste modo, pretende-se dar mais um contributo na redução do *gap* existente entre as abordagens teóricas e os problemas reais de planeamento de produção.

Um dos capítulos da tese é dedicado a um problema de dimensionamento de lotes e resultou da continuidade do trabalho iniciado na tese de mestrado (Pimentel, 2005). Os restantes capítulos são dedicados a um problema de dimensionamento de lotes e de escalonamento, baseado num problema real. Uma das motivações principais para o estudo apresentado nesta tese, consiste na exploração de diferentes abordagens (baseadas em PIM e/ou em heurísticas) para a resolução dos dois problemas, assim como na comparação dessas abordagens, através da implementação das mesmas e da realização de testes computacionais exaustivos.

Tipicamente o dimensionamento de lotes e o escalonamento da produção são resolvidos em fases distintas como se referiu anteriormente, o que pode resultar em soluções de menor qualidade pelo facto de ao nível do dimensionamento de lotes se trabalhar com informação agregada (por exemplo com capacidades de produção agregadas associadas a um conjunto de máquinas). Idealmente os dois problemas devem ser resolvidos de forma integrada pois ambos estão intimamente relacionados. Dado o elevado grau de complexidade do problema integrado e mesmo de cada um isoladamente, na maioria dos sistemas de planeamento de produção opta-se por resolver os dois problemas em dois níveis hierárquicos. Nos últimos anos têm sido publicados alguns trabalhos que combinam o dimensionamento de lotes de produção com o seu escalonamento, embora ainda em número insuficiente. A motivação para estudar o problema integrado surgiu, por um lado, por se considerar uma área ainda não suficientemente abordada, onde existem contributos científicos a dar, e por outro lado, por se tratar de um problema real, podendo as ferramentas apresentadas neste texto contribuir efectivamente para um melhor planeamento da produção em algumas empresas.

1.3 Contribuições

A contribuição geral deste trabalho está associada ao desenvolvimento e teste de vários modelos, e de vários métodos para a resolução desses modelos, para problemas de planeamento da produção de médio/curto prazo.

Ao nível do problema LPMACC a principal contribuição é a comparação de diferentes formulações para o problema, quer em termos de limites inferiores, quer em termos da qualidade das soluções obtidas. Outras contribuições são a apresentação de um novo modelo de decomposição para o problema LPMACC, baseado na decomposição de Dantzig-Wolfe múltipla e o desenvolvimento de um algoritmo de partição e geração de colunas para resolver o modelo que resulta da aplicação da decomposição múltipla.

As principais contribuições ao nível do problema DLEMP detalham-se nos parágrafos seguintes.

O desenvolvimento de um modelo de PIM para um problema nunca antes abordado na literatura, no melhor conhecimento da autora, que integra as decisões de dimensionamento e de escalonamento de lotes, assim como considera uma função objectivo inovadora, que trata os desvios entre os instantes de conclusão dos vários componentes que pertencem ao mesmo produto final, com o intuito de tornar a produção mais sincronizada.

A concepção de um algoritmo de geração de instâncias de teste para o problema DLEMP.

O desenvolvimento de dois novos métodos heurísticos alternativos, para o problema DLEMP. O primeiro método baseia-se na combinação de modelos de fluxos em rede com uma heurística de escalonamento e o segundo método é uma heurística construtiva, baseada na ordenação prévia dos componentes a produzir, que explora algumas características específicas do problema.

A concepção de quatro novos algoritmos de pesquisa local, baseados em inserções de lotes, para duas funções de avaliação alternativas. A primeira função de avaliação é uma função pesada das seguintes medidas de desempenho: atraso total dos produtos finais e desvios totais ocorridos na produção de cada produto final. A segunda função de avaliação é baseada nos níveis de stock, e é, também, uma função pesada do stock médio durante a produção e do stock médio após a produção (no qual se contabiliza para cada lote associado a um dado produto final o desvio em termos de stock em relação ao instante de conclusão do produto final). Os quatro algoritmos de pesquisa local são testados para as duas funções de avaliação alternativas, partindo dos dois métodos heurísticos referidos no parágrafo anterior.

O desenvolvimento de duas meta-heurísticas baseadas em mudanças sistemáticas de vizinhança, para as duas funções de avaliação acima apresentadas. A primeira meta-heurística é um algoritmo de descida em vizinhanças variáveis (*variable neighborhood descent*) e a segunda meta-heurística um algoritmo de pesquisa em

vizinhanças variáveis (*variable neighborhood search*). As duas meta-heurísticas são também testadas para as duas funções de avaliação alternativas, partindo dos dois métodos heurísticos acima referidos.

Por último, a comparação de um conjunto de métodos alternativos que permitem elaborar de forma automática planos de dimensionamento de lotes e de escalonamento desses lotes, para um problema complexo de grandes dimensões.

1.4 Estrutura da Tese

Esta tese encontra-se dividida em sete capítulos.

O Capítulo 2 é dedicado ao estudo do problema de lotes de produção multi-artigo capacitado com tempos de preparação. O objectivo deste capítulo centra-se na comparação de várias decomposições de Dantzig-Wolfe alternativas, entre si e com um modelo compacto resolvido com um *software* de estado-da-arte.

No Capítulo 3 apresenta-se o problema de dimensionamento de lotes e escalonamento integrados em máquinas paralelas. Este problema resultou de um estudo de caso de um sector de tricotagem de uma indústria têxtil. O objectivo principal deste capítulo é o de contextualizar o problema real nos problemas de dimensionamento de lotes e de escalonamento. Para além disso, revêem-se as contribuições divulgadas na literatura para este problema e outros problemas relacionados e apresentam-se as instâncias de teste que serão usadas nos capítulos seguintes para avaliar os modelos e métodos desenvolvidos para este problema.

O Capítulo 4 apresenta um modelo original de programação inteira mista para resolver o problema DLEMP de modo exacto. Neste capítulo são também apresentados resultados computacionais para o conjunto de instâncias de teste apresentadas no capítulo anterior e faz-se uma avaliação da qualidade das soluções e das suas características, considerando para o efeito um conjunto de medidas de desempenho relevantes.

No Capítulo 5 desenvolvem-se duas heurísticas dedicadas para o problema DLEMP, que têm por objectivo a obtenção de soluções com alguma qualidade em pouco tempo. A primeira heurística dedicada combina modelos de fluxos em rede com uma heurística de escalonamento e a segunda é uma heurística construtiva. As heurísticas são testadas e avaliadas através do conjunto de instâncias de teste apresentado no Capítulo 3. Um dos objectivos do capítulo é a comparação das heurísticas dedicadas entre si, bem como a sua comparação com o modelo de programação inteira mista.

No Capítulo 6 introduzem-se várias heurísticas e meta-heurísticas baseadas em pesquisa local para o problema DLEMP, com o intuito de melhorar a qualidade das soluções das heurísticas dedicadas. Uma questão central das estruturas de vizinhança desenvolvidas é a introdução do conceito de data objectivo, com o intuito de tornar a pesquisa mais eficiente.

Por fim, no Capítulo 7 apresenta-se de modo resumido o trabalho que foi desenvolvido nos capítulos anteriores e as suas contribuições, realçando-se os aspectos inovadores do trabalho e apresentam-se sugestões de trabalho futuro.

Capítulo 2

Problema de Dimensionamento de Lotes de Produção

Este capítulo é dedicado ao estudo do problema de lotes de produção multi-artigo capacitado com tempos de preparação (LPMACC). Partindo de uma formulação compacta de programação inteira mista (PIM) para o problema, a decomposição básica de Dantzig-Wolfe é aplicada a essa formulação de duas formas alternativas: na primeira decomposição os subproblemas ficam associados a produtos e na segunda ficam associados a períodos. Neste capítulo aborda-se ainda, uma terceira decomposição, na qual os subproblemas por produto e os subproblemas por período são integrados no mesmo modelo. A relaxação linear desta terceira decomposição, a qual se designa por decomposição de Dantzig-Wolfe múltipla, produz limites inferiores melhores ou iguais que os obtidos com as decomposições básicas de Dantzig-Wolfe. Por sua vez, os limites inferiores das decomposições básicas de Dantzig-Wolfe são melhores ou iguais aos limites inferiores do modelo original de PIM.

Para resolver os três modelos de decomposição apresentam-se três algoritmos de partição e geração de colunas (*branch-and-price*).

Na secção 2.1 descreve-se o problema LPMACC e apresenta-se uma revisão de literatura. A secção 2.2 é dedicada ao modelo compacto de PIM e a secção 2.3 às decomposições básicas de Dantzig-Wolfe. Na secção 2.4 introduz-se a decomposição de Dantzig-Wolfe múltipla de um modo geral e apresenta-se a sua aplicação ao problema LPMACC. Na secção 2.5 discutem-se e descrevem-se as estratégias de partição dos três algoritmos de partição e geração de colunas, que correspondem às três decomposições apresentadas nas secções anteriores. Na secção 2.6 apresentam-se e analisam-se os

resultados computacionais. Na secção 2.7 sumarizam-se as conclusões do trabalho descrito neste capítulo.

Parte deste trabalho foi publicado em Pimentel et al. (2010a).

2.1 Caracterização do Problema e Revisão de Literatura

O problema de lotes de produção multi-artigo capacitado com tempos de preparação relaciona-se com as decisões de planeamento da produção de médio-prazo. Neste problema pretende-se determinar as quantidades (ou tamanho dos lotes) a produzir de um conjunto de produtos finais ao longo de um número finito de períodos de produção, de modo a satisfazer a procura conhecida de cada produto em cada período, garantindo que a capacidade disponível em cada período é respeitada. A capacidade disponível é consumida quer na produção dos produtos quer na preparação da sua produção e antes de se iniciar a produção de um dado produto num dado período deve ocorrer uma preparação. O objectivo do problema passa por definir um plano de produção que minimize os custos totais envolvidos, tipicamente custos de preparação, custos de produção e custos de armazenagem. Numa solução para o problema determinam-se as quantidades a produzir de cada produto em cada período e as quantidades a armazenar de cada produto no final de cada período para satisfazer procuras futuras. Frequentemente, nos sistemas de planeamento e controlo de produção este problema é designado por plano mestre de produção ou por *master production schedule* na literatura Anglo-Saxónica.

O problema LPMACC assenta na classe de problemas multi-artigo, com capacidades limitadas e com tempos e custos de preparação. É de nível único, já que apenas considera produtos finais, sendo as procuras desses produtos finais determinísticas e dinâmicas.

Em termos de complexidade do problema Bitran e Yanasse (1982) mostraram que o problema de lotes de produção de artigo único capacitado é NP-difícil. Mais tarde Chen e Thizy (1990) mostraram que o problema de lotes de produção multi-artigo

capacitado sem tempos de preparação é também NP-difícil. Em Maes et al. (1991) demonstra-se que a determinação de uma solução válida para o problema LPMACC é um problema NP-completo.

Kuik et al. (1994) e Drexl e Kimms (1997) apresentam uma revisão da literatura para vários problemas de dimensionamento de lotes, entre os quais se inclui o problema LPMACC. O livro de Pochet e Wolsey (2006) é uma referência obrigatória quer para uma introdução aos problemas de dimensionamento de lotes quer para um estudo mais aprofundado, já que revê com detalhe formulações e algoritmos para vários problemas de dimensionamento de lotes frequentemente abordados na literatura. Em Jans e Degraeve (2008) e em Quadt e Kuhn (2008) revêem-se as principais extensões do problema LPMACC.

Um modelo clássico de PIM para o problema LPMACC é o que se baseia na definição de dois conjuntos de variáveis, associadas às quantidades a produzir de cada produto em cada período e à existência de uma preparação para cada produto em cada período. Este modelo original considera dois tipos de restrições principais: o conjunto de restrições que garante a satisfação da procura de cada produto em cada período e o conjunto que garante que a capacidade disponível em cada período não é excedida. Os dois primeiros modelos de decomposição que se apresentam neste capítulo, a decomposição por produto e a decomposição por período, baseiam-se na aplicação dos princípios da decomposição de Dantzig-Wolfe (Dantzig e Wolfe, 1960) a este modelo clássico. Embora sejam baseadas nos mesmos princípios, as duas decomposições diferem na forma como os subproblemas são definidos.

Na decomposição por produto, as restrições de capacidade ficam no problema mestre, ficando os subproblemas associados aos produtos. Cada subproblema é um problema de lotes de produção de artigo-único não capacitado. O modelo resultante da decomposição por produto é também um modelo clássico, abordado pela primeira vez em Manne (1958). Posteriormente, Chen e Thizy (1990) resolveram a relaxação linear do modelo decomposto com o método de geração de colunas. Mais recentemente, em Degraeve e Jans (2007) o modelo decomposto foi resolvido com o método de partição e geração de colunas. Em Diaby et al. (1992b), Thizy e Wassenhove (1985) e Trigeiro et al. (1989) o problema LPMACC é resolvido através da relaxação Lagrangeana, na qual

as restrições de capacidade são dualizadas. Os autores combinam o método de subgradiente com heurísticas para obter soluções inteiras admissíveis.

Na decomposição por período, as restrições de procura ficam no problema mestre e as restrições de capacidade passam para o subproblema. O número de subproblemas desta decomposição é igual ao número de períodos, estando cada subproblema associado ao problema da mochila contínuo com preparações. Esta decomposição está relacionada com a abordagem apresentada em Diaby et al. (1992a), na qual se usa uma relaxação Lagrangeana em que as restrições de procura são dualizadas. Os autores resolvem o problema relaxado pelo método de subgradiente, combinado com o método de partição e avaliação. Na secção 2.3 deste capítulo descreve-se como é que a decomposição por período pode ser usada no contexto do método de partição e geração de colunas, com o intuito de se obterem soluções óptimas inteiras para o problema LPMACC.

Em Pimentel (2005) o modelo clássico de PIM para o problema LPMACC, a decomposição por produto e a decomposição por período são apresentados em detalhe.

O terceiro modelo de decomposição apresentado neste capítulo resulta da aplicação da decomposição de Dantzig-Wolfe múltipla (DDWM) ao modelo clássico para o LPMACC. A DDWM pode ser vista como o dual da decomposição Lagrangeana proposta em Guignard e Kim (1987). A motivação para aplicar a DDWM neste trabalho prende-se com o objectivo de obter soluções óptimas inteiras (primais) para o problema LPMACC. Por esse motivo, para além de se definir o modelo de decomposição na perspectiva primal (e de como o problema mestre e os diferentes tipos de subproblemas devem interagir), também se introduz um esquema de partição que não altera a estrutura dos subproblemas associados aos nodos da árvore de pesquisa. A potencial vantagem desta decomposição sobre as duas decomposições atrás referidas relaciona-se com a qualidade dos limites inferiores. Na decomposição múltipla ambos os tipos de subproblema (por produto e por período) são integrados num único modelo, cuja solução da relaxação linear dá melhores (ou iguais) limites inferiores que os limites inferiores que se obtêm quer na decomposição por produto quer na decomposição por período.

Os três modelos de decomposição abordados neste capítulo são resolvidos pelo método de partição e geração de colunas (Barnhart et al., 1998), que resulta da combinação do método de geração de colunas com o método de partição e avaliação. As primeiras aplicações do método de geração de colunas surgem associadas ao problema de fluxo multicomodidade (Ford e Fulkerson, 1958) e ao problema de corte (Gilmory e Gomory, 1961, Gilmory e Gomory, 1963). No problema de corte as soluções ótimas fraccionárias são usadas para obter heurísticamente soluções inteiras. Só muito mais tarde, se passou a utilizar o método de geração de colunas para obter soluções ótimas de modelos de programação inteira, em várias áreas de aplicação (Lübbecke e Desrosiers, 2005, Wilhelm, 2001).

Em Chen e Thizy (1990) e/ou em Jans e Degraeve (2004) apresentam-se várias relaxações (relaxação linear, relaxação das restrições de capacidade, relaxação das restrições de procura e relaxação das restrições de preparação) e decomposições para o problema LPMACC e avalia-se a sua qualidade em termos de limites inferiores. Outras abordagens de solução para o problema LPMACC podem ser encontradas por exemplo em Belvaux e Wolsey (2000), em Eppen e Martin (1987) e em Pochet e Wolsey (1991). Em Karimi et al. (2003) é apresentada uma revisão detalhada sobre métodos de resolução para o LPMACC.

2.2 Modelo Compacto

A formulação de PIM que se apresenta nesta secção é baseada na discretização do tempo em vários períodos de planeamento, sendo que em cada período podem produzir-se vários produtos diferentes (*big bucket model*). Sempre que num dado período ocorre uma mudança de produto, tem de ocorrer também a preparação do(s) recurso(s), previamente ao início da produção do novo produto. A procura de cada produto pode-se repetir ao longo dos períodos de planeamento, devendo ser sempre respeitada sem atraso. Por sua vez, cada período de planeamento tem uma capacidade limitada, que é usada na produção e na preparação dos produtos.

O modelo compacto considera três tipos de variáveis de decisão. Um conjunto de variáveis que podem tomar qualquer valor não negativo, que representam as quantidades a produzir de cada produto em cada período; um segundo conjunto de variáveis binárias que assume o valor 1 sempre que se decide produzir um dado produto num determinado período, e assume o valor 0, caso contrário; e por último, um terceiro conjunto de variáveis contínuas não negativas, que representam a quantidade armazenada de um dado produto no final de um determinado período.

Existem três conjuntos de restrições no modelo compacto: as restrições de satisfação da procura de cada produto em cada período, as restrições de capacidade de cada período e as restrições que forcem a preparação de um dado produto num determinado período, quando se decide produzir esse produto nesse período.

Na função objectivo minimizam-se os custos totais de produção, de preparação e de armazenagem.

Considerem-se os seguintes conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão.

Conjuntos:

I – conjunto de produtos, indexados por $i=1, \dots, n$

J – conjunto de períodos de produção, indexados por $j=1, \dots, m$

Parâmetros:

p_j^i - custo unitário de produção do produto i no período j

q_j^i - custo fixo de preparação do produto i no período j

h_j^i - custo unitário de armazenagem do produto i no final do período j

d_j^i - procura do produto i no período j

c_j - capacidade de produção disponível no período j

a_j^i - capacidade consumida na produção de uma unidade do produto i no período j

b_j^i - capacidade consumida na preparação do produto i no período j

Variáveis de Decisão:

x_j^i - quantidade a produzir do produto i no período j

y_j^i - assume o valor 1 se o produto i é produzido no período j , e assume o valor 0 caso contrário

Variáveis de Decisão Auxiliares:

s_j^i - quantidade armazenada do produto i no final do período j

O modelo compacto de PIM para o problema LPMACC, que se designa por modelo (C), é o que se apresenta de seguida.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_j^i x_j^i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q_j^i y_j^i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m h_j^i s_j^i \quad (C)$$

Sujeito a:

$$x_j^i = d_j^i + s_j^i, \quad \forall i \in I \quad (2.1)$$

$$s_{j-1}^i + x_j^i = d_j^i + s_j^i, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \setminus \{1\} \quad (2.2)$$

$$\sum_{i=1}^n a_j^i x_j^i + \sum_{i=1}^n b_j^i y_j^i \leq c_j, \quad \forall j \in J \quad (2.3)$$

$$x_j^i \leq \min \left\{ \frac{c_j - b_j^i}{a_j^i}, \sum_{t=j}^m d_t^i \right\} y_j^i, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.4)$$

$$s_j^i, x_j^i \geq 0, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.5)$$

$$y_j^i \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J. \quad (2.6)$$

Na função objectivo a soma dos custos de produção, de armazenagem e de preparação é minimizada. As restrições (2.1) e (2.2) representam as restrições de procura, que forçam a procura de cada produto em cada período a ser satisfeita e que relacionam os níveis de inventário de um determinado período com os níveis de inventário do período anterior. O conjunto de restrições (2.3) representa as restrições de capacidade que garantem que o consumo dos recursos com a produção e com as preparações não pode exceder a capacidade disponível em cada período. O conjunto de restrições (2.4) força a ocorrência de uma preparação caso o produto i seja produzido no período j . Este conjunto de restrições poderia ser substituído pelo seguinte conjunto: $x_j^i \leq My_j^i, \forall i \in I, \forall j \in J$, onde M representa uma constante elevada. Para tornar o modelo mais forte, a constante M pode ser substituída por $\frac{c_j - b_j^i}{a_j^i}$, que representa a quantidade máxima que pode ser produzida do produto i no período j , ou por $\sum_{t=j}^m d_t^i$, que representa a soma das procuras do produto i desde o período actual (período j) até ao último período de produção. A escolha deve recair sobre o menor destes dois coeficientes, já que a produção do produto i no período j estará limitada a esse valor. As restrições (2.5) impõem as condições de não negatividade das variáveis contínuas e as restrições (2.6) forçam as variáveis de preparação a serem binárias.

O modelo (C) é composto por $2nm$ variáveis contínuas, nm variáveis binárias e $m+2nm$ restrições.

2.3 Decomposições de Dantzig-Wolfe

2.3.1 Decomposição por Produto

No modelo compacto apresentado na secção 2.2 as únicas restrições que interligam as variáveis associadas aos diferentes produtos são as restrições de capacidade (restrições (2.3)). Se não se considerarem estas restrições, o problema decompõe-se num conjunto de problemas independentes, correspondendo cada um deles ao problema de dimensionamento de lotes de artigo-único não capacitado. Por forma a tirar partido desta estrutura, nesta decomposição as restrições de capacidade ficam no problema mestre e os subproblemas são definidos pelos conjuntos de restrições (2.1), (2.2), (2.4), (2.5) e (2.6). Cada subproblema é um problema de dimensionamento de lotes de artigo-único não capacitado e existem n subproblemas diferentes (um para cada produto).

A solução de cada subproblema corresponde a um plano de produção para o produto associado a esse subproblema, que indica em que períodos se deve produzir o produto associado a esse plano de produção, bem como as quantidades a produzir em cada um desses períodos. Uma vez que os subproblemas da decomposição por produto não têm a propriedade da integralidade, os limites inferiores desta decomposição são melhores ou iguais aos que se obtêm com o modelo compacto.

2.3.1.1 Problema Mestre da Decomposição por Produto

Aplicando a decomposição de Dantzig-Wolfe ao modelo compacto (C), o modelo reformulado que se obtém é habitualmente designado por problema mestre. As variáveis de decisão do problema mestre representam o peso dos pontos extremos dos subproblemas. O problema mestre da decomposição por produto apenas tem pontos extremos (não existindo neste caso raios extremos) já que o poliedro definido por cada subproblema é um conjunto limitado. Qualquer solução do problema mestre pode portanto ser expressa através da combinação convexa dos pontos extremos dos subproblemas.

Para a definição do problema mestre da decomposição por produto, considerem-se os conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão definidos na secção 2.2. Considere-se ainda o conjunto H que representa o conjunto de planos de produção indexados por $k=1, \dots, t$ e os parâmetros β_{jk}^i , α_{jk}^i e δ_{jk}^i . β_{jk}^i assume o valor 1 se existir uma preparação do produto i no período j do plano de produção k e assume o valor 0 caso contrário e α_{jk}^i representa a quantidade do produto i que é produzida no período j do plano de produção k . Por último, δ_{jk}^i representa as quantidades armazenadas do produto i no final do período j do plano de produção k . As variáveis de decisão do problema mestre são as variáveis z_k^i que representam o peso do plano de produção k do produto i .

A solução da relaxação linear do problema mestre da decomposição por produto pode ser obtida através do modelo (PMI), que se apresenta de seguida.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^t \left[\sum_{j=1}^m (q_j^i \beta_{jk}^i + p_j^i \alpha_{jk}^i + h_j^i \delta_{jk}^i) z_k^i \right] \quad (PMI)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k=1}^t z_k^i = 1, \quad \forall i \in I \quad (2.7)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^t (b_j^i \beta_{jk}^i + a_j^i \alpha_{jk}^i) z_k^i \leq c_j, \quad \forall j \in J \quad (2.8)$$

$$z_k^i \geq 0, \quad \forall i \in I, \forall k \in H. \quad (2.9)$$

Na função objectivo a soma dos custos totais é minimizada. As restrições (2.7) representam as restrições de convexidade. Existe uma restrição de convexidade para cada produto, que força a escolha de uma combinação de planos de produção associados a esse produto. Por sua vez, as restrições (2.8) são as restrições de capacidade. Neste conjunto força-se a combinação de planos de produção escolhida a respeitar a capacidade disponível em cada período. Por fim, as restrições (2.9) impõem a condição de não-negatividade das variáveis de decisão do problema mestre.

O número de restrições do modelo (*PMI*) é igual a $n+m$ por oposição ao modelo (*C*) que tem $m+2nm$ restrições. Já em termos do número de variáveis de decisão, o modelo (*PMI*) tem um número elevado de variáveis comparativamente com o modelo (*C*). Por esse motivo, o modelo (*PMI*) é resolvido através do método de geração de colunas.

O método de geração de colunas é um método iterativo. Para iniciar o processo de geração de colunas começa-se por definir um problema mestre restrito (PMR) que considera apenas um subconjunto de planos de produção. Em cada iteração do método as colunas mais atractivas (colunas do subproblema com custo reduzido negativo) são incluídas no PMR. O algoritmo pára quando não existirem mais colunas atractivas, significando que a solução óptima da relaxação linear do problema mestre foi alcançada.

A solução do modelo compacto (*C*), em termos das variáveis originais (as variáveis do modelo (*C*)), pode ser obtida a partir da solução do problema mestre recorrendo às seguintes expressões:

$$x_j^i = \sum_{k=1}^I \alpha_{jk}^i z_k^i \quad (2.10)$$

$$y_j^i = \sum_{k=1}^I \beta_{jk}^i z_k^i \quad (2.11)$$

Os valores das variáveis auxiliares s_j^i podem ser determinados substituindo o valor das variáveis x_j^i (determinados a partir da expressão (2.10)) nas equações (2.1) e (2.2).

2.3.1.2 Subproblemas da Decomposição por Produto

Considerando que μ representa o vector de variáveis duais associadas às restrições de capacidade (2.8), indexado por j , e que π^i representa a variável dual

associada à restrição i do conjunto de restrições de convexidade (2.7), o subproblema associado a um produto i é igual a:

$$\text{Min} \sum_{j=1}^m p_j^i x_j^i + \sum_{j=1}^m q_j^i y_j^i + \sum_{j=1}^m h_j^i s_j^i - \sum_{j=1}^m (b_j^i y_j^i) \mu_j - \sum_{j=1}^m (a_j^i x_j^i) \mu_j - \pi^i \quad (SPI)$$

Sujeito a:

$$x_j^i = d_j^i + s_j^i \quad (2.12)$$

$$s_{j-1}^i + x_j^i = d_j^i + s_j^i, \quad \forall j \in J \setminus \{1\} \quad (2.13)$$

$$x_j^i \leq \min \left\{ \frac{c_j - b_j^i}{a_j^i}, \sum_{t=j}^m d_t^i \right\} y_j^i, \quad \forall j \in J \quad (2.14)$$

$$s_j^i, x_j^i \geq 0, \quad \forall j \in J \quad (2.15)$$

$$y_j^i \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J. \quad (2.16)$$

O subproblema (SPI) pode ser resolvido eficientemente recorrendo a um algoritmo de programação dinâmica (Wagner e Whitin, 1958 e Wagelmans et al., 1992). Cada subproblema tem 2^{m-1} planos de produção, estando cada plano de produção associado a um produto.

Durante o processo de geração de colunas os subproblemas são resolvidos até à optimalidade para avaliar se existem planos de produção atractivos. Para que um dado plano de produção seja atractivo o valor da função objectivo do subproblema a ele associado tem de ser negativo. Em cada iteração do método de geração de colunas são adicionadas ao problema mestre restrito novas colunas, associadas aos subproblemas que geram colunas atractivas.

2.3.2 Decomposição por Período

Nesta subsecção apresenta-se uma decomposição alternativa à apresentada na subsecção anterior. Neste caso, embora se aplique novamente a decomposição de Dantzig-Wolfe, é abordada uma decomposição diferente da anterior. Na decomposição por período as restrições de procura (restrições (2.1) e (2.2)) ficam no problema mestre e as restrições (2.3), (2.4), (2.5) e (2.6) passam para o subproblema. Os subproblemas na decomposição por período estão associados aos períodos e cada subproblema é um problema da mochila contínuo com preparações.

2.3.2.1 Problema Mestre da Decomposição por Período

No problema mestre da decomposição por período as variáveis de decisão estão associadas a padrões de produção. Cada padrão de produção indica para um dado período as quantidades a produzir do *mix* de produtos.

Considere-se o conjunto de padrões de produção P , indexado por $p=1, \dots, l$ e os parâmetros β_{jp}^i e α_{jp}^i , onde β_{jp}^i assume o valor 1 se o produto i for preparado no período j no padrão de produção p e assume o valor 0 caso contrário. Por sua vez, α_{jp}^i representa a quantidade produzida no período j do produto i no padrão de produção p . Considerem-se ainda os conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão definidos na secção 2.2. Por último, seja v_{jp} uma variável de decisão que representa o peso do padrão de produção p do período j .

A solução da relaxação linear do problema mestre da decomposição por período é dada por:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m h_j^i s_j^i + \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^l \left[\sum_{i=1}^n (q_j^i \beta_{jp}^i + p_j^i \alpha_{jp}^i) v_{jp} \right] \quad (PMJ)$$

Sujeito a:

$$\sum_{p=1}^l v_{jp} \leq 1, \quad \forall j \in J \quad (2.17)$$

$$\sum_{p=1}^I \alpha_{1p}^i v_{1p} = d_1^i + s_1^i, \quad \forall i \in I \quad (2.18)$$

$$s_{j-1}^i + \sum_{p=1}^I \alpha_{jp}^i v_{jp} = d_j^i + s_j^i, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \setminus \{1\} \quad (2.19)$$

$$s_j^i \geq 0, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.20)$$

$$v_{jp} \geq 0, \quad \forall j \in J, \forall p \in P. \quad (2.21)$$

Como os subproblemas da decomposição por período são conjuntos limitados, o problema mestre da decomposição por período apenas tem variáveis de decisão associadas ao peso dos pontos extremos (ou peso dos padrões de produção). As variáveis de decisão v_{jp} podem ser vistas como a proporção da procura do período j que é satisfeita pelo padrão de produção p .

A função objectivo do problema (*PMJ*) minimiza a soma dos custos totais. As restrições (2.17) representam as restrições de convexidade, existindo uma restrição de convexidade associada a cada período, na qual se força a escolha de uma combinação de padrões de produção. Nesta decomposição o sentido das restrições de convexidade pode ser do tipo “menor ou igual”, ao contrário da sua forma habitual, na qual estas restrições são de igualdade. Esta alteração é possível pelo facto de o espaço de soluções do subproblema da decomposição por período (que será definido na subsecção seguinte) incluir a origem (correspondendo a não existir produção no período em causa). As restrições (2.18) e (2.19) representam as restrições de procura, nas quais se força a combinação de padrões de produção escolhida a respeitar a procura de cada produto em cada período. Por último, as restrições (2.20) e (2.21) impõem a condição de não-negatividade das variáveis de decisão.

O problema mestre (*PMJ*) é constituído por $m+nm$ restrições. Tal como na decomposição por produto, na decomposição por período o número de variáveis de decisão é também elevado, pelo que também aqui se resolve a relaxação linear do problema (*PMJ*) recorrendo ao método de geração de colunas.

A solução original do problema (C), em termos das variáveis originais, pode ser obtida através das seguintes expressões:

$$x_j^i = \sum_{p=1}^l \alpha_{jp}^i v_{jp} \quad (2.22)$$

$$y_j^i = \sum_{p=1}^l \beta_{jp}^i v_{jp} \quad (2.23)$$

2.3.2.2 Subproblemas da Decomposição por Período

Seja π_j a variável dual associada à restrição de convexidade j (conjunto de restrições (2.17)) e μ_j^i o vector de variáveis duais associadas às restrições de procura (conjuntos de restrições (2.18) e (2.19)). O subproblema do período j é:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n p_j^i x_j^i + \sum_{i=1}^n q_j^i y_j^i - \sum_{i=1}^n x_j^i \mu_j^i - \pi_j \quad (SPJ)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n a_j^i x_j^i + \sum_{i=1}^n b_j^i y_j^i \leq c_j \quad (2.24)$$

$$x_j^i \leq \min \left\{ \frac{c_j - b_j^i}{a_j^i}, \sum_{t=j}^m d_t^i \right\} y_j^i, \quad \forall i \in I \quad (2.25)$$

$$x_j^i \geq 0, \quad \forall i \in I \quad (2.26)$$

$$y_j^i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I. \quad (2.27)$$

A função objectivo do subproblema (SPJ) representa o custo reduzido do padrão de produção j . Durante o processo de geração de colunas, os padrões de produção dos subproblemas são incluídos no PMR do problema (PMJ), a menos que o seu custo

reduzido seja maior ou igual a zero ou que a solução óptima do PMR tenha sido encontrada.

Tal como anteriormente referido o subproblema (*SPJ*) é um problema de mochila contínuo com preparações. O problema consiste em seleccionar os itens a colocar na mochila, assim como a quantidade (contínua) a incluir dos itens seleccionados, de modo a maximizar o lucro sem exceder a capacidade da mochila. Sempre que um dado item é seleccionado é consumida uma parte fixa da capacidade. Este problema foi recentemente estudado em Michel et al. (2009) onde para além de analisarem algumas propriedades das soluções óptimas os autores apresentam um algoritmo de partição e avaliação para o problema.

2.4 Decomposição de Dantzig-Wolfe Múltipla

Na subsecção 2.4.1 introduz-se em termos gerais os conceitos principais da decomposição de Dantzig-Wolfe múltipla. Na subsecção seguinte aplicam-se esses conceitos gerais ao problema LPMACC.

2.4.1 Conceitos Gerais

A decomposição de Dantzig-Wolfe múltipla pode em geral ser aplicada a qualquer formulação de PIM. Embora nos anos mais recentes tenham surgido diversas aplicações, a diferentes problemas, da decomposição de Dantzig-Wolfe e do método de geração de colunas (Desaulniers et al., 2005, Lübbecke e Desrosiers, 2005, Wilhelm, 2001), existem poucos trabalhos sobre aplicações da decomposição de Dantzig-Wolfe múltipla (as referências de Aragão e Uchoa (2003) e de Park et al. (2003) representam excepções).

A principal diferença entre a DDWM e a decomposição (básica) de Dantzig-Wolfe reside no facto de na primeira se considerarem diferentes tipos de subproblemas no mesmo modelo, o que leva à existência de colunas com estruturas diferentes no

problema mestre, dependendo da estrutura dos diferentes subproblemas. O potencial benefício da DDWM relaciona-se com a obtenção de melhores limites inferiores, caso mais do que um dos subproblemas não tenha a propriedade da integralidade. É com essa perspectiva que se aplica neste trabalho a DDWM.

Por motivos de clareza na exposição dos conteúdos, a DDWM será apresentada para um problema de programação inteira pura. Contudo, a extensão para modelos de PIM é directa. Considere-se então o seguinte modelo de programação inteira pura, denominado por *(PIP)*.

$$\text{Min } cx \quad (PIP)$$

Sujeito a:

$$Dx = d \quad (2.28)$$

$$Ax = b \quad (2.29)$$

$$x \geq 0 \text{ e inteiro,} \quad (2.30)$$

onde x representa um vector coluna de dimensão n , no qual cada elemento, indexado por j , está associado a uma variável de decisão, x_j , $j=1, \dots, n$; c é um vector linha com a mesma dimensão: $c = [c_1 \dots c_n]$; d é um vector coluna com dimensão g ; D é uma matriz com $g \times n$ elementos; b é um vector coluna com dimensão m e A é uma matriz com $m \times n$ elementos.

Para simplificar a notação, apenas se consideram dois subproblemas com regiões admissíveis definidas por:

$$S_{SP1} = \{ x : Dx = d, x \geq 0 \text{ e inteiro} \} \text{ e}$$

$$S_{SP2} = \{ x : Ax = b, x \geq 0 \text{ e inteiro} \}.$$

Note-se que uma variável x_j pode estar incluída nos dois subproblemas.

O modelo (*PIP*) é equivalente ao modelo reformulado, (*PIPO*), que se apresenta de seguida:

$$\text{Min } c x^1 \quad (\text{PIPO})$$

Sujeito a:

$$x^1 \in S_{SP1} \quad (2.31)$$

$$x^2 \in S_{SP2} \quad (2.32)$$

$$x^1 = x^2 \quad (2.33)$$

$$x^1 \geq 0 \text{ e inteiro.} \quad (2.34)$$

De acordo com o princípio da decomposição de Dantzig-Wolfe, uma solução no espaço do modelo original (*PIP*) pode ser expressa como uma combinação convexa dos pontos extremos mais uma combinação não negativa dos raios extremos do subproblema S_{SP1} , assim como pode ser expressa como uma combinação convexa dos pontos extremos mais uma combinação não negativa dos raios extremos do subproblema S_{SP2} :

<p>SP1</p> $x^1 = \sum_{p1 \in P^1} \lambda_{p1} y^{p1} + \sum_{r1 \in R^1} \mu_{r1} u^{r1}$ $\sum_{p1 \in P^1} \lambda_{p1} = 1$ $\lambda_{p1} \geq 0, \forall p1 \in P^1$ $\mu_{r1} \geq 0, \forall r1 \in R^1,$	<p>SP2</p> $x^2 = \sum_{p2 \in P^2} \lambda_{p2} y^{p2} + \sum_{r2 \in R^2} \mu_{r2} u^{r2}$ $\sum_{p2 \in P^2} \lambda_{p2} = 1$ $\lambda_{p2} \geq 0, \forall p2 \in P^2$ $\mu_{r2} \geq 0, \forall r2 \in R^2,$
--	--

onde y^{p1} representa um ponto extremo do conjunto de pontos extremos P^1 , λ_{p1} é uma variável de decisão que representa o peso do ponto extremo y^{p1} ($p1 \in P^1$), u^{r1} representa um raio extremo do conjunto de raios extremos R^1 e μ_{r1} é uma variável de decisão associada ao peso do raio extremo u^{r1} ($r1 \in R^1$). De modo equivalente, no subproblema (*SP2*), y^{p2} é um ponto extremo do conjunto de pontos extremos P^2 , λ_{p2} é

uma variável de decisão que representa o peso do ponto extremo y^{p2} ($p2 \in P^2$), u^{r2} é um raio extremo do conjunto de raios extremos R^2 e μ_{r2} é uma variável de decisão que representa o peso do raio extremo u^{r2} ($r2 \in R^2$).

Substituindo as expressões acima apresentadas no modelo (PIPO), obtém-se o seguinte problema mestre:

$$\text{Min} \sum_{p1 \in P^1} (c y^{p1}) \lambda_{p1} + \sum_{r1 \in R^1} (c u^{r1}) \mu_{r1} \quad (DDWM)$$

Sujeito a:

$$\sum_{p1 \in P^1} \lambda_{p1} = 1 \quad (2.35)$$

$$\sum_{p2 \in P^2} \lambda_{p2} = 1 \quad (2.36)$$

$$\sum_{p1 \in P^1} \lambda_{p1} y^{p1} + \sum_{r1 \in R^1} \mu_{r1} u^{r1} = \sum_{p2 \in P^2} \lambda_{p2} y^{p2} + \sum_{r2 \in R^2} \mu_{r2} u^{r2} \quad (2.37)$$

$$\lambda_{p1} \geq 0, \forall p1 \in P^1 \quad (2.38)$$

$$\lambda_{p2} \geq 0, \forall p2 \in P^2 \quad (2.39)$$

$$\mu_{r1} \geq 0, \forall r1 \in R^1 \quad (2.40)$$

$$\mu_{r2} \geq 0, \forall r2 \in R^2. \quad (2.41)$$

As restrições (2.35) e (2.36) asseguram a admissibilidade das restrições originais (2.28) e (2.29), respectivamente. Já as restrições (2.37) asseguram que o mesmo ponto original é considerado em ambos os subproblemas. De notar que no modelo (DDWM) não se impõem as condições de integralidade das variáveis de decisão. As condições de integralidade impõem-se antes sobre as variáveis do problema original, as quais podem ser determinadas através da seguinte expressão:

$$x = \sum_{p \in P^I} \lambda_{pI} y^{pI} + \sum_{r \in R^I} \mu_{rI} u^{rI}$$

Na subsecção 2.4.2 detalham-se estas ideias, através da sua aplicação ao problema LPMACC.

2.4.2 Aplicação da DDWM ao Problema LPMACC

Nesta subsecção os conceitos da DDWM são aplicados ao modelo compacto (C), apresentado na secção 2.2. Na aplicação da DDWM consideram-se dois tipos de subproblemas: o que resulta da decomposição por produto, e o que resulta da decomposição por período. Deste modo, obtêm-se $n+m$ subproblemas diferentes.

2.4.2.1 Problema Mestre da DDWM

Considerem-se os conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão definidos na secção 2.2 e nas subsecções 2.3.1.1 e 2.3.2.1. O problema mestre que resulta da aplicação da DDWM ao problema LPMACC, o qual se designa por (PMIJ), é:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^I \left[\sum_{j=1}^m (q_j^i \beta_{jk}^i + p_j^i \alpha_{jk}^i + h_j^i \delta_{jk}^i) z_k^i \right] \quad (PMIJ)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k=1}^I z_k^i = 1, \quad \forall i \in I \quad (2.42)$$

$$\sum_{p=1}^I v_{jp} \leq 1, \quad \forall j \in J \quad (2.43)$$

$$\sum_{k=1}^I \alpha_{jk}^i z_k^i = \sum_{p=1}^I \alpha_{jp}^i v_{jp}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.44)$$

$$\sum_{k=1}^I \beta_{jk}^i z_k^i = \sum_{p=1}^I \beta_{jp}^i v_{jp}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.45)$$

$$z_k^i \geq 0, \quad \forall i \in I, \forall k \in H \quad (2.46)$$

$$v_{jp} \geq 0, \quad \forall j \in J, \forall p \in P. \quad (2.47)$$

Tal como já referido nas subsecções 2.3.1 e 2.3.2.1, os pontos extremos da decomposição por produto estão associados a planos de produção e os pontos extremos da decomposição por período associados a padrões de produção, pelo que no problema mestre (*PMIJ*) existem estes dois tipos de variáveis de decisão.

Na função objectivo minimizam-se os custos totais. De notar que v_{jp} não aparece na função objectivo. As restrições (2.42) representam as restrições de convexidade associadas aos subproblemas da decomposição por produto, existindo uma restrição deste tipo para cada produto. As restrições (2.43) são as restrições de convexidade associadas aos subproblemas da decomposição por período e existem m restrições deste tipo. Os conjuntos de restrições (2.44) e (2.45) asseguram que os mesmos pontos originais estão a ser considerados em ambos os subproblemas. Por último, as restrições (2.46) e (2.47) forçam as variáveis de decisão a tomar valores não negativos.

A solução em termos das variáveis originais (variáveis do modelo (*C*)) pode ser recuperada a partir do problema mestre (*PMIJ*) aplicando as expressões seguintes:

$$x_j^i = \sum_{k=1}^I \alpha_{jk}^i z_k^i = \sum_{p=1}^I \alpha_{jp}^i v_{jp} \quad (2.48)$$

$$y_j^i = \sum_{k=1}^I \beta_{jk}^i z_k^i = \sum_{p=1}^I \beta_{jp}^i v_{jp} \quad (2.49)$$

O valor das variáveis originais s_j^i pode ser determinado recorrendo às equações (2.1) e (2.2) e aos valores das variáveis x_j^i , determinados na equação (2.48).

2.4.2.2 Subproblemas da DDWM

Na DDWM abordada neste capítulo existem dois tipos de subproblemas. O primeiro subproblema, que se designa por $(SP1)$, é o subproblema da decomposição por produto. A estrutura do subproblema $(SP1)$ é idêntica à do subproblema (SPI) , apresentado na subsecção 2.3.1.2. Já a função objectivo é diferente, tendo em consideração que as restrições do problema mestre $(PMIJ)$ mudaram relativamente ao problema mestre (PMI) . Assim, pela definição de custo reduzido, o subproblema $(SP1)$ é definido por:

$$\text{Min} \sum_{j=1}^m p_j^i x_j^i + \sum_{j=1}^m q_j^i y_j^i + \sum_{j=1}^m h_j^i s_j^i - \sum_{j=1}^m x_j^i \mu_j^i - \sum_{j=1}^m y_j^i \eta_j^i - \pi^i \quad (SP1)$$

Sujeito a:

(2.12), (2.13), (2.14), (2.15) e (2.16),

onde μ_j^i representa as variáveis duais associadas às restrições (2.44), η_j^i as variáveis duais associadas às restrições (2.45) e π^i a variável dual associada à restrição i do conjunto de restrições (2.42). Todos os conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão do subproblema $(SP1)$ são os que se definiram anteriormente na secção 2.2.

O segundo subproblema da DDWM, que se designa por $(SP2)$, é o subproblema da decomposição por período apresentado na subsecção 2.3.2.2. A estrutura deste subproblema também não se altera relativamente à estrutura do subproblema (SPJ) . Quanto à função objectivo, existem algumas modificações a considerar em relação à função objectivo do subproblema (SPJ) . O subproblema $(SP2)$, pela definição de custo reduzido, é então definido por:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n x_j^i \mu_j^i + \sum_{i=1}^n y_j^i \eta_j^i - \pi_j \quad (SP2)$$

Sujeito a:

(2.24), (2.25), (2.26) e (2.27).

μ_j^i representa as variáveis duais associadas às restrições (2.44), η_j^i as variáveis duais associadas às restrições (2.45) e π_j a variável dual da restrição j do conjunto de restrições (2.43). Todos os conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão do subproblema (SP2) estão definidos na secção 2.2.

2.4.2.3 Algoritmo de Geração de Colunas

O primeiro PMR do modelo (PMIJ) é definido por todas as colunas que estão presentes na solução ótima da relaxação linear do PMR da decomposição por produto e é resolvido por geração de colunas.

Quando se aplica uma decomposição de Dantzig-Wolfe a um qualquer problema e se resolve esse problema com geração de colunas, existe uma articulação entre o PMR e o subproblema, na qual vão sendo trocadas informações entre ambos, de modo iterativo, até que a solução ótima do problema seja encontrada. O PMR fornece os valores das variáveis duais ao subproblema e este fornece colunas atractivas. Este processo termina, quando no subproblema não são encontradas mais colunas atractivas, o que significa que a solução ótima do problema foi encontrada.

No caso da decomposição de Dantzig-Wolfe múltipla, para resolver o PMR com geração de colunas, passam a existir várias alternativas de articulação entre o PMR e os diferentes tipos de subproblemas. Neste trabalho foram implementadas três alternativas e escolheu-se a alternativa com melhores resultados num conjunto de testes computacionais preliminares.

A primeira alternativa implementada consiste em resolver, em cada iteração do método de geração de colunas, ambos os subproblemas (da decomposição por produto e da decomposição por período) e em incluir todas as colunas atractivas (de ambos os subproblemas) no PMR do modelo (PMIJ). O algoritmo pára quando ambos os subproblemas não fornecerem colunas atractivas. Na Figura 2.1 esquematiza-se esta alternativa.

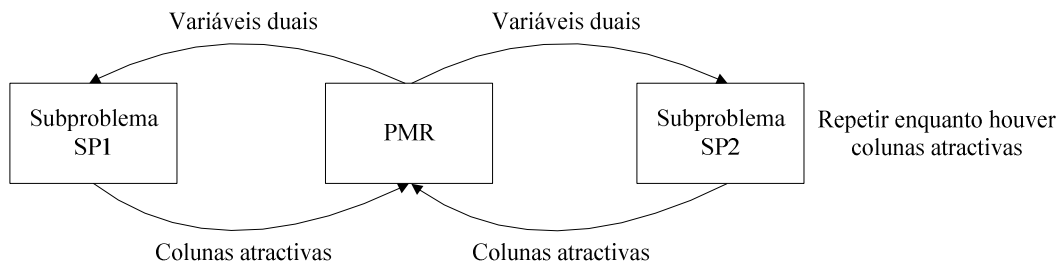


Figura 2.1 Primeira alternativa de articulação entre o PMR do modelo (*PMIJ*) e os subproblemas no método de geração de colunas

A segunda alternativa implementada resolve o PMR em dois passos. No primeiro passo, a pesquisa é feita sobre a decomposição por período (resolvendo os subproblemas (*SP2*)), adicionando-se ao PMR os padrões de produção com custo reduzido negativo. Este procedimento é repetido enquanto existirem padrões de produção atractivos. Findo este processo, passa-se para o segundo passo, no qual os subproblemas da decomposição por produto são resolvidos enquanto existirem planos de produção atractivos. Quando não existirem mais planos de produção atractivos o algoritmo volta ao passo 1. Os dois passos são repetidos até que a solução óptima do problema mestre seja encontrada. Na Figura 2.2 esquematiza-se esta alternativa.

A terceira alternativa é semelhante à anterior. A única diferença entre ambas reside no facto de no passo 2 o subproblema da decomposição por produto ser resolvido apenas uma vez. Após se resolver o subproblema (*SP1*), se existirem planos de produção atractivos, estes são incluídos no PMR e volta-se ao primeiro passo. Caso contrário o processo de geração de colunas termina.

A escolha recaiu sobre a terceira alternativa.

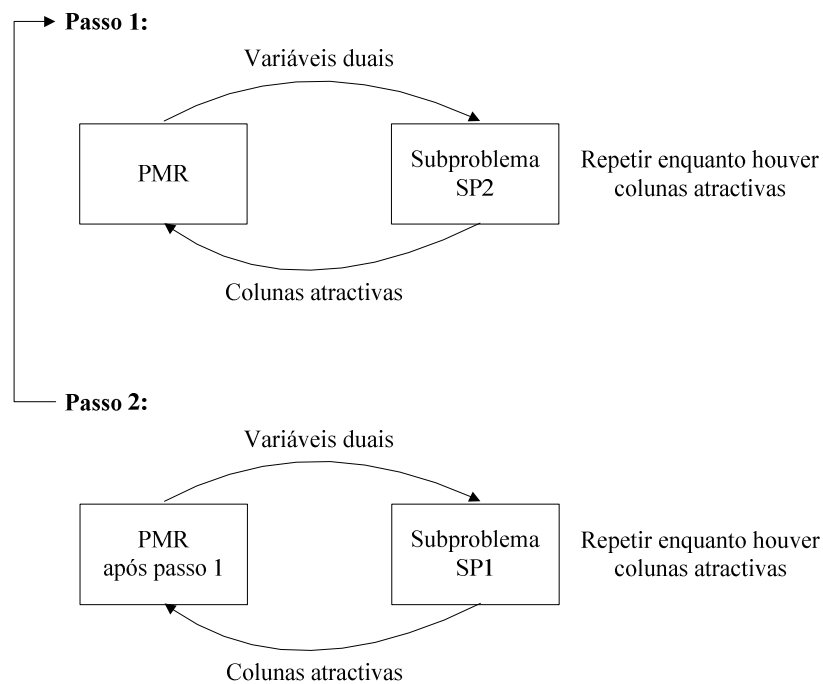


Figura 2.2 Segunda alternativa de articulação entre o PMR do modelo (*PMIJ*) e os subproblemas no método de geração de colunas

2.5 Partição e Geração de Colunas

Ao resolver os problemas mestres (*PMI*), (*PMJ*) e (*PMIJ*) por geração de colunas, não existe a garantia de que a solução ótima encontrada seja uma solução inteira. A solução encontrada representa um limite inferior relativamente ao valor da solução ótima inteira. Tal como referido anteriormente, os limites inferiores que se obtêm nas decomposições por produto e por período são melhores ou iguais aos limites inferiores do modelo compacto, porque ambos os subproblemas não têm a propriedade da integralidade (Geoffrion, 1974). Os limites inferiores do modelo (*PMIJ*), podem ser ainda melhores do que os anteriores de acordo com o teorema seguinte.

Teorema:

Em problemas de minimização, o limite inferior dado pela decomposição de Dantzig-Wolfe múltipla é maior ou igual ao limite inferior dado pela decomposição de Dantzig-Wolfe básica, quando ambos os subproblemas da decomposição de Dantzig-Wolfe múltipla não têm a propriedade da integralidade e um deles é o subproblema da decomposição básica.

Demonstração:

O limite inferior da decomposição de Dantzig-Wolfe múltipla é igual ao limite inferior da decomposição Lagrangeana quando se consideram os mesmos subproblemas nas duas abordagens. Tal deriva directamente da relação dual entre a decomposição de Dantzig-Wolfe e a relaxação Lagrangeana (Nemhauser e Wolsey, 1999). Como demonstrado em Guignard e Kim (1987), o limite inferior da decomposição Lagrangeana é maior ou igual ao limite inferior da relaxação Lagrangeana, quando ambos os subproblemas da decomposição Lagrangeana não têm a propriedade da integralidade e um deles é o subproblema da relaxação Lagrangeana.

Para determinar a solução óptima inteira dos problemas mestres (*PMI*), (*PMJ*) e (*PMIJ*) aplica-se o método de partição e geração de colunas (Barnhart et al., 1998). Neste método, cada nodo da árvore de pesquisa é resolvido por geração de colunas, já que as colunas que não foram geradas na raiz da árvore de pesquisa podem ser necessárias para se obter a solução óptima inteira do problema.

O esquema de partição que se usa é baseado nas variáveis originais. Tomando a decomposição por produto a título de exemplo, num nodo da árvore de pesquisa que não a raiz, o problema mestre (*PMI*) inclui novas restrições que forcem as variáveis originais de preparação a serem binárias. Tendo por base as restrições (2.11), as novas restrições incluídas no problema mestre (*PMI*) são do tipo $\sum_{k=1}^t \beta_{jk}^i z_k^i = 0$ e $\sum_{k=1}^t \beta_{jk}^i z_k^i = 1$ $\forall i \in I, \forall j \in J$. Para a decomposição por período e para a decomposição múltipla, o

mesmo tipo de restrições deveriam ser incluídas nos problemas mestres respectivos, tendo por base as restrições (2.23) e (2.49), respectivamente.

A partição faz-se incluindo então as restrições de partição no problema mestre restrito. Uma vez que estas restrições são baseadas nas variáveis originais, as suas variáveis duais podem ser associadas directamente a coeficientes na função objectivo das variáveis do subproblema. A principal vantagem desta estratégia de partição reside no facto de não existirem alterações na estrutura dos subproblemas após a inclusão das restrições de partição. Por outro lado, este esquema de partição é geral, podendo ser aplicado a qualquer tipo de problema.

Em sumário, quando se faz uma partição, são criados dois novos nodos na árvore de pesquisa. Cada nodo é representado pelo problema mestre restrito actual e por uma das seguintes restrições de partição:

$$\sum_{k \in \bar{H}} \beta_{jk}^i z_k^i = 0 \text{ ou } \sum_{k \in \bar{H}} \beta_{jk}^i z_k^i = 1 \quad (2.50)$$

$$\sum_{p \in \bar{P}} \beta_{jp}^i v_{jp} = 0 \text{ ou } \sum_{p \in \bar{P}} \beta_{jp}^i v_{jp} = 1 \quad (2.51)$$

As duas restrições de partição apresentadas em (2.50) devem ser usadas na decomposição por produto ou na decomposição múltipla e as restrições de partição apresentadas em (2.51) caso se trate da decomposição por período. \bar{H} representa o conjunto de planos de produção incluídos no PMR actual das decomposições por produto ou múltipla e \bar{P} representa o conjunto de padrões de produção do PMR actual da decomposição por período.

Após a inclusão da restrição de partição, as funções objectivo dos subproblemas devem passar a incluir a variável dual associada à nova restrição de partição. Nas decomposições por produto e múltipla, considerando que δ_j^i é a variável dual da restrição de partição que foi adicionada ao nodo em análise, nas funções objectivo dos subproblemas (SPI) e (SPI) deve ser subtraído o termo $\sum_{j=1}^m y_j^i \delta_j^i$. Já na decomposição por período, considerando que τ_j^i representa a variável dual associada à restrição de partição

que foi adicionada ao nodo em análise, na função objectivo dos subproblemas (*SPJ*) deve ser subtraído o termo $\sum_{i=1}^n y_j^i \tau_j^i$.

2.6 Resultados Computacionais

Com o objectivo de comparar a qualidade dos limites inferiores e a eficiência dos algoritmos de partição e geração de colunas das três decomposições entre si e de os comparar com o modelo compacto resolvido directamente, realizaram-se vários testes computacionais. Nesta secção são apresentados os resultados obtidos e a metodologia usada na sua realização.

2.6.1 Instâncias de Teste

Os resultados computacionais foram obtidos a partir da resolução de um subconjunto de 180 instâncias, de um conjunto de 540 instâncias, geradas por Trigeiro et al. (1989). Todas as instâncias do subconjunto de 180 instâncias consideram 10 produtos e 20 períodos. Existem quatro características no subconjunto das 180 instâncias que podem ser ajustadas: a variabilidade da procura, a utilização de capacidade, o tempo entre encomendas e o tempo médio de preparação. Para detalhes adicionais acerca das características das instâncias e acerca do processo de geração das mesmas, recomenda-se a leitura de Trigeiro et al. (1989).

As 180 instâncias resultaram de um desenho factorial do tipo: 1 (número de produtos) \times 2 (variabilidade da procura) \times 3 (tempo entre encomendas) \times 2 (tempo médio de preparação) \times 3 (utilização de capacidade), com cinco réplicas. O número de produtos tem apenas o nível 1; a variabilidade da procura tem dois níveis: 1 e 2; o tempo entre encomendas tem três níveis: 1, 2 e 4; o tempo médio de preparação tem dois níveis: 1 e 2; e finalmente, a utilização de capacidade tem três níveis: 75, 85 e 95. Por exemplo, o grupo X11217 representa um conjunto de cinco instâncias com 10 produtos (primeiro número do nome da instância), com o nível da variabilidade da

procura a 1 (segundo número do nome da instância), com o tempo entre encomendas no nível 2 (terceiro número do nome da instância), com o tempo médio de preparação no nível 1 (quarto número do nome da instância) e com a utilização de capacidade no nível 7 (quinto número do nome da instância).

Na análise dos resultados computacionais, formaram-se 36 grupos a partir do conjunto das 180 instâncias, tendo cada grupo associado o conjunto de 5 instâncias com todas as características ao mesmo nível. Na Tabela 2.1 apresenta-se para cada um dos 36 grupos os níveis das quatro características das instâncias que são ajustáveis.

Tabela 2.1 Características das instâncias

Nome da instância	Variabilidade da procura	Tempo entre encomendas (períodos)	Tempo médio de preparação (unidades de capacidade)	Utilização de capacidade (%)
x11117	0.35	1	11	75
x11118	0.35	1	11	85
x11119	0.35	1	11	95
x11127	0.35	1	43	75
x11128	0.35	1	43	85
x11129	0.35	1	43	95
x11217	0.35	2	11	75
x11218	0.35	2	11	85
x11219	0.35	2	11	95
x11227	0.35	2	43	75
x11228	0.35	2	43	85
x11229	0.35	2	43	95
x11417	0.35	4	11	75
x11418	0.35	4	11	85
x11419	0.35	4	11	95
x11427	0.35	4	43	75
x11428	0.35	4	43	85
x11429	0.35	4	43	95
x12117	0.59	1	11	75
x12118	0.59	1	11	85
x12119	0.59	1	11	95
x12127	0.59	1	43	75
x12128	0.59	1	43	85
x12129	0.59	1	43	95
x12217	0.59	2	11	75
x12218	0.59	2	11	85
x12219	0.59	2	11	95
x12227	0.59	2	43	75
x12228	0.59	2	43	85
x12229	0.59	2	43	95
x12417	0.59	4	11	75
x12418	0.59	4	11	85
x12419	0.59	4	11	95
x12427	0.59	4	43	75
x12428	0.59	4	43	85
x12429	0.59	4	43	95

2.6.2 Implementação

Todos os algoritmos foram implementados em C++, usando o ambiente de desenvolvimento Microsoft Visual Studio 6.0. Os algoritmos de partição e geração de colunas são resolvidos através da ferramenta ADDing – Automatic Dantzig-Wolfe Decomposition for INteger column Generation (Alvelos, 2005), também implementada em C++. Todos os resultados computacionais apresentados nesta subsecção foram realizados num computador pessoal com um processador Pentium 4, com 1 GB de memória RAM.

O primeiro problema mestre restrito da decomposição por produto é definido por um conjunto de variáveis artificiais, que garantem a sua admissibilidade e por um subconjunto de todos os planos de produção (os que se obtêm resolvendo os subproblemas (*SPI*) considerando apenas os custos originais, *i. e.*, sem considerar os valores duais). Os subproblemas da decomposição por produto são resolvidos pelo algoritmo de programação dinâmica proposto por Wagner e Whitin (1958) e na raiz da árvore de pesquisa é aplicada uma heurística ao problema mestre restrito, que determina um limite superior para o valor da solução óptima inteira. A heurística consiste em resolver de modo exacto o problema mestre restrito através do *software* Cplex 8.1 (ILOG, 2002).

Na decomposição por período, o primeiro problema mestre restrito é também definido por um conjunto de variáveis artificiais e os subproblemas são resolvidos até à optimalidade pelo *software* Cplex 8.1 (ILOG, 2002).

No caso da decomposição múltipla, como já mencionado na subsecção 2.4.2.1, o primeiro PMR é definido pelo conjunto de todas as colunas que fazem parte do PMR da solução óptima da relaxação linear da decomposição por produto e os subproblemas são resolvidos pelos métodos acima mencionados. A heurística usada na decomposição por produto é também usada na decomposição múltipla do mesmo modo.

Todos os problemas mestres restritos das três decomposições são resolvidos até à optimalidade pelo algoritmo dual do Cplex 8.1 (ILOG, 2002).

Após uma fase de testes preliminares, e tendo por base os resultados computacionais obtidos durante essa fase, as estratégias usadas na árvore de pesquisa foram as seguintes: pesquisa primeiro em profundidade, dá-se prioridade ao nodo que tem associada a restrição de partição do tipo “maior ou igual” e escolhe-se em primeiro lugar a variável de preparação com parte fraccionária mais próxima de 1.

O modelo compacto é resolvido através do *software* Cplex 8.1 (ILOG, 2002).

2.6.3 Resultados da Relaxação Linear

As três medidas de desempenho usadas para comparar os quatro métodos alternativos de resolução do problema LPMACC entre si, foram as seguintes: o tempo médio de resolução da relaxação linear, o desvio médio relativo do limite inferior e o desvio médio de integralidade relativo (*gap* relativo). O tempo médio de resolução da relaxação linear inclui apenas o tempo necessário para resolver o problema relaxado. O desvio médio relativo do limite inferior mede a diferença em termos relativos entre os limites inferiores da decomposição múltipla e os limites inferiores dos restantes três métodos (decomposição por produto, decomposição por período e modelo compacto). Note-se que quanto menor for o valor do desvio médio relativo do limite inferior melhor é o limite inferior do método em análise. Este valor é usado com o objectivo de se estabelecer uma comparação directa entre os limites inferiores. Como os limites inferiores da decomposição múltipla são sempre melhores ou iguais que os dos restantes métodos, este indicador permite medir a qualidade dos limites inferiores da decomposição múltipla, em comparação com os limites inferiores dos restantes métodos. O desvio médio relativo do limite inferior é dado por

$$\frac{Z_{LI\ Multipla} - Z_{LI\ Método}}{Z_{LI\ Multipla}} \times 100$$
, onde $Z_{LI\ Multipla}$ representa o valor do limite inferior da decomposição múltipla e $Z_{LI\ Método}$ o valor do limite inferior do método com o qual o limite inferior da decomposição múltipla será comparado. Por último, o desvio médio de integralidade relativo é dado por
$$\frac{Z_{PI} - Z_{LI}}{Z_{PI}} \times 100$$
, onde Z_{PI} representa o valor da solução óptima inteira ou o valor da melhor solução incumbente encontrada na árvore

de pesquisa, considerando os quatro métodos. Por sua vez, Z_{LI} representa o valor da solução ótima da raiz da árvore de pesquisa, *i. e.*, o valor da solução ótima da relaxação linear. Nos três métodos de decomposição o valor de Z_{LI} é obtido por geração de colunas. Já no modelo compacto, o valor de Z_{LI} representa o valor da solução que se obtém relaxando as variáveis binárias y_j^i do modelo compacto (C). O modelo relaxado é neste caso resolvido pelo *software* Cplex 8.1 (ILOG, 2002).

Na Tabela 2.2 e na Tabela 2.3 apresentam-se os valores das três medidas de desempenho acima apresentadas, para os três métodos de decomposição e para o modelo compacto. Todos os valores do tempo estão expressos em segundos e representam o tempo médio para resolver o subconjunto das cinco instâncias de cada um dos 36 grupos.

Os modelos mais eficientes em termos do tempo médio de resolução da relaxação linear são o que resulta da decomposição por produto e o compacto. Os tempos médios de resolução da relaxação linear da decomposição múltipla são significativamente mais elevados que os tempos médios dos restantes métodos. Em 24 dos 36 conjuntos, a decomposição por produto tem melhor desempenho que o modelo compacto em termos dos tempos médios de resolução. Nos restantes conjuntos, o modelo compacto é mais rápido. Os 12 conjuntos de instâncias onde o modelo compacto é mais rápido, correspondem a instâncias com utilização de capacidade igual a 95% e os 24 conjuntos de instâncias onde a decomposição por produto é mais rápida, correspondem a instâncias com utilizações de capacidade de 75% e 85%. Seguindo a análise por característica, conclui-se que em geral nos modelos de decomposição à medida que a utilização de capacidade aumenta, os tempos de resolução da relaxação linear aumentam também, sendo esse aumento mais significativo na decomposição múltipla. Já no modelo compacto, quando a utilização de capacidade passa de 75% para 85%, os tempos médios de resolução da relaxação linear diminuem, e quando a utilização de capacidade passa de 85% para 95%, os tempos médios de resolução da relaxação linear aumentam.

Tabela 2.2 Tempo médio de resolução da relaxação linear, desvio médio relativo do limite inferior e desvio médio de integralidade relativo

Nome da instância	Decomposição por produto			Decomposição por período		
	Tempo médio da relaxação linear (segundos)	Desvio médio relativo do LI (%)	Desvio médio de integralidade relativo (%)	Tempo médio da relaxação linear (segundos)	Desvio médio relativo do LI (%)	Desvio médio de integralidade relativo (%)
x11117	0.000	0.000	0.000	1.297	26.044	26.044
x11118	0.004	0.000	0.032	2.285	25.509	25.532
x11119	0.278	0.075	1.403	3.120	28.076	29.030
x11127	0.000	0.000	0.000	1.043	26.943	26.943
x11128	0.010	0.001	0.103	1.251	27.742	27.816
x11129	0.260	0.126	1.503	2.257	27.605	28.611
x11217	0.010	0.004	0.082	1.379	44.218	44.262
x11218	0.018	0.010	0.350	3.698	42.298	42.494
x11219	0.238	0.000	2.276	2.649	35.741	37.202
x11227	0.006	0.017	0.089	1.656	45.117	45.156
x11228	0.012	0.013	0.325	2.321	44.220	44.394
x11229	0.174	0.002	2.932	2.864	42.014	43.710
x11417	0.008	0.060	0.385	1.958	46.384	46.556
x11418	0.014	0.126	1.733	2.711	42.223	43.147
x11419	0.186	0.073	7.116	2.633	36.812	41.272
x11427	0.008	0.083	0.806	2.093	46.342	46.730
x11428	0.018	0.075	2.652	2.377	42.979	44.451
x11429	0.102	0.121	8.194	2.171	36.822	41.939
x12117	0.006	0.003	0.050	1.500	23.218	23.253
x12118	0.018	0.014	0.197	1.838	22.805	22.947
x12119	0.184	0.037	1.307	2.177	20.945	21.954
x12127	0.002	0.000	0.017	1.289	23.911	23.924
x12128	0.008	0.013	0.290	1.313	23.017	23.230
x12129	0.030	0.036	0.661	1.482	24.261	24.733
x12217	0.016	0.001	0.166	1.277	40.943	41.040
x12218	0.024	0.006	0.474	1.572	38.720	39.009
x12219	0.106	0.032	1.913	1.806	29.222	30.561
x12227	0.004	0.000	0.145	1.401	41.721	41.806
x12228	0.008	0.020	0.349	1.438	41.512	41.705
x12229	0.086	0.015	2.010	1.802	39.383	40.592
x12417	0.016	0.044	0.991	1.572	44.525	45.053
x12418	0.014	0.035	1.668	1.748	40.969	41.936
x12419	0.078	0.142	5.722	1.610	35.048	38.668
x12427	0.006	0.033	0.531	1.448	44.456	44.731
x12428	0.014	0.101	2.549	1.452	43.423	44.822
x12429	0.054	0.244	6.423	1.452	30.973	35.256
Média	0.056	0.043	1.540	1.887	35.448	36.403

Tabela 2.3 Tempo médio de resolução da relaxação linear, desvio médio relativo do limite inferior e desvio médio de integralidade relativo (continuação)

Nome da instância	Decomposição múltipla		Modelo compacto		
	Tempo médio da relaxação linear (segundos)	Desvio médio de integralidade relativo (%)	Tempo médio da relaxação linear (segundos)	Desvio médio relativo do LI (%)	Desvio médio de integralidade relativo (%)
x11117	0.000	0.000	0.082	26.065	26.065
x11118	2.149	0.032	0.020	25.596	25.619
x11119	41.744	1.329	0.024	28.627	29.573
x11127	0.000	0.000	0.028	26.945	26.945
x11128	8.773	0.102	0.024	27.758	27.832
x11129	37.520	1.379	0.028	27.785	28.788
x11217	10.339	0.079	0.028	44.352	44.395
x11218	15.348	0.340	0.024	42.717	42.911
x11219	25.495	2.276	0.030	37.581	38.999
x11227	12.562	0.072	0.032	45.187	45.227
x11228	14.671	0.313	0.022	44.497	44.670
x11229	24.267	2.930	0.034	43.187	44.848
x11417	6.580	0.325	0.028	47.123	47.293
x11418	13.422	1.609	0.028	44.327	45.218
x11419	27.438	7.048	0.038	39.167	43.464
x11427	7.930	0.724	0.028	47.128	47.509
x11428	11.010	2.578	0.024	45.041	46.460
x11429	21.861	8.084	0.034	40.119	44.970
x12117	3.742	0.046	0.024	23.268	23.303
x12118	11.857	0.183	0.026	23.020	23.161
x12119	22.445	1.271	0.022	21.644	22.644
x12127	1.514	0.017	0.026	23.913	23.926
x12128	6.758	0.277	0.024	23.081	23.295
x12129	20.275	0.625	0.026	24.425	24.896
x12217	3.880	0.166	0.028	41.111	41.208
x12218	9.175	0.468	0.028	39.249	39.535
x12219	17.603	1.882	0.026	30.464	31.780
x12227	4.462	0.145	0.056	41.910	41.994
x12228	6.972	0.329	0.026	41.799	41.991
x12229	15.052	1.995	0.024	40.269	41.458
x12417	2.674	0.948	0.024	45.256	45.776
x12418	6.355	1.633	0.028	42.373	43.316
x12419	15.865	5.587	0.028	37.059	40.568
x12427	2.600	0.497	0.028	44.974	45.247
x12428	6.790	2.450	0.026	44.588	45.954
x12429	13.405	6.194	0.030	33.771	37.881
Média	12.570	1.498	0.029	36.260	37.187

A variabilidade da procura não tem um impacto significativo nos tempos médios de resolução da relaxação linear, embora quando a variabilidade da procura é maior (nível 2), os tempos médios são em geral menores em qualquer um dos métodos. Não parece existir um padrão de aumento ou de diminuição nos tempos médios devido a mudanças de nível do tempo entre encomendas. Já em termos do tempo médio de preparação, existe uma tendência para os tempos médios de resolução diminuírem lentamente à medida que o tempo médio de preparação aumenta, sendo esta tendência mais notória nos métodos de decomposição.

Em 30 dos 36 grupos de instâncias, o desvio médio relativo do limite inferior, entre a decomposição múltipla e a decomposição por produto é positivo, embora não seja muito significativo. O valor deste indicador é muito maior quer para a decomposição por período quer para o modelo compacto, embora os valores da decomposição por período sejam um pouco melhores que os do modelo compacto. Quer na decomposição por período, quer no modelo compacto, à medida que a variabilidade da procura aumenta, o desvio médio relativo do limite inferior diminui. O mesmo tipo de conclusões pode ser retirado, analisando os desvios médios de integralidade relativos na Tabela 2.2 e na Tabela 2.3.

Os modelos com melhores desvios médios de integralidade relativos são a decomposição por produto e a decomposição múltipla. Em ambas as decomposições, à medida que a utilização de capacidade cresce, o desvio médio também cresce. O mesmo tipo de análise não se verifica nos restantes métodos, para os quais na maioria dos grupos de instâncias, à medida que a utilização de capacidade aumenta, o desvio médio diminui. Finalmente, quando o tempo entre encomendas aumenta, quer o desvio médio relativo do limite inferior quer o desvio médio de integralidade relativo têm um aumento significativo, especialmente na decomposição por período e no modelo compacto.

2.6.4 Resultados do Problema Inteiro

Os parâmetros usados para avaliar o desempenho dos quatro métodos na obtenção de soluções óptimas inteiras foram: o tempo médio de resolução, o número de

soluções óptimas, a diferença média relativa para a melhor incumbente e o desvio médio de integralidade relativo. O tempo de resolução foi limitado a 3600 segundos e as instâncias foram novamente agrupadas em 36 grupos de cinco instâncias. A diferença média relativa para a melhor incumbente é dada por $\frac{Z_{PIMétodo} - Z_{MI}}{Z_{MI}} \times 100$. $Z_{PIMétodo}$ é igual ao valor da solução ótima inteira ou igual ao valor de uma solução incumbente quando o tempo limite foi alcançado para aquele método em particular. Por sua vez, Z_{MI} representa o valor da melhor solução incumbente encontrada, considerando os quatro métodos. O desvio médio de integralidade relativo é igual a $\frac{Z_{PIMétodo} - Z_{LIMétodo}}{Z_{PIMétodo}} \times 100$, onde $Z_{LIMétodo}$ é igual ao valor do limite inferior de um método em particular e $Z_{PIMétodo}$ igual ao valor da solução ótima inteira ou igual ao valor de uma solução incumbente quando o tempo limite foi alcançado para o mesmo método considerado em $Z_{LIMétodo}$.

Na Tabela 2.4 e na Tabela 2.5 apresentam-se os resultados das quatro medidas de desempenho para os 36 grupos de instâncias. O símbolo “-“ significa que em pelo menos uma das instâncias do grupo de cinco instâncias, não foi encontrada nenhuma solução incumbente, e por esse motivo a diferença média relativa para a melhor incumbente e o desvio médio de integralidade relativo não foram calculados.

Analisando a Tabela 2.4 e a Tabela 2.5 pode-se concluir que em todos os conjuntos de cinco instâncias foram encontradas cinco soluções incumbentes, em todos os métodos, com exceção de três grupos de instâncias na decomposição por período, que estão assinalados com o símbolo “-“.

Analisando os tempos médios de resolução do problema inteiro verifica-se que existem poucos conjuntos nos quais as cinco instâncias são resolvidas até à optimalidade dentro do limite de uma hora. Os melhores resultados são obtidos com a decomposição por produto. Com esse método há doze conjuntos de instâncias que são resolvidos até à optimalidade. Com o modelo compacto há nove conjuntos de instâncias que são resolvidos até à optimalidade. Na decomposição múltipla o número de conjuntos resolvidos até à optimalidade é igual a sete, sendo que na decomposição por período nenhum conjunto é resolvido até à optimalidade.

Tabela 2.4 Tempos médios de resolução do problema inteiro, número de instâncias resolvidas até à optimalidade, diferenças médias relativas para a melhor incumbente e desvios médios de integralidade relativos

Nome da instância	Decomposição por produto				Decomposição por período			
	Tempo médio (segundos)	Número de soluções ótimas	Dif. média relativa para a melhor Inc. (%)	Desvio médio (%)	Tempo médio (segundos)	Número de soluções ótimas	Dif. média relativa para a melhor Inc. (%)	Desvio médio (%)
x11117	0.014	5	0.000	0.000	3601.238	0	0.050	26.081
x11118	0.154	5	0.000	0.032	3601.406	0	0.006	25.537
x11119	3601.605	0	0.137	1.538	3601.358	0	5.131	32.466
x11127	0.000	5	0.000	0.000	3601.348	0	0.016	26.955
x11128	81.864	5	0.000	0.103	3601.208	0	0.087	27.878
x11129	3603.822	0	1.052	2.525	3601.374	0	8.062	33.814
x11217	85.559	5	0.000	0.082	3601.420	0	17.019	52.350
x11218	3601.076	0	0.064	0.414	3601.238	0	-	-
x11219	3602.792	0	0.103	2.376	3601.376	0	10.967	43.402
x11227	41.519	5	0.000	0.089	3601.414	0	20.387	54.394
x11228	3601.098	0	0.002	0.328	3601.310	0	14.006	51.194
x11229	3601.895	0	0.118	3.045	3601.334	0	9.479	48.577
x11417	2884.894	2	0.084	0.468	3601.388	0	53.498	65.146
x11418	3601.434	0	0.535	2.250	3601.452	0	47.092	61.355
x11419	3604.336	0	3.755	10.367	3601.278	0	19.297	50.749
x11427	2311.956	2	0.173	0.975	3601.424	0	50.504	64.547
x11428	3601.364	0	2.280	4.777	3601.116	0	26.151	55.935
x11429	3602.640	0	1.572	9.599	3601.566	0	-	-
x12117	0.056	5	0.000	0.050	3601.218	0	1.716	24.541
x12118	342.166	5	0.000	0.197	3601.350	0	2.127	24.552
x12119	3602.163	0	0.436	1.734	3601.320	0	5.675	26.141
x12127	0.018	5	0.000	0.017	3601.348	0	1.365	24.943
x12128	11.408	5	0.000	0.290	3601.244	0	1.886	24.649
x12129	3601.426	0	0.485	1.138	3601.298	0	4.332	27.828
x12217	27.343	5	0.000	0.166	3601.362	0	17.982	50.010
x12218	2309.401	2	0.159	0.631	3601.272	0	12.652	45.805
x12219	3601.745	0	0.860	2.745	3601.208	0	9.604	36.598
x12227	13.116	5	0.000	0.145	3601.320	0	16.939	50.234
x12228	1558.793	3	0.112	0.460	3601.356	0	14.285	48.982
x12229	3602.400	0	1.276	3.236	3601.196	0	8.578	45.253
x12417	2380.058	2	0.101	1.091	3601.336	0	50.070	63.292
x12418	3601.606	0	0.155	1.819	3601.312	0	39.110	58.027
x12419	3602.314	0	0.271	5.967	3601.126	0	20.837	48.919
x12427	1660.273	4	0.058	0.588	3601.176	0	47.940	62.560
x12428	3601.380	0	1.438	3.908	3601.130	0	31.242	57.736
x12429	3602.205	0	1.756	7.999	3601.428	0	-	-
Média Total	2181.830	75	0.472	1.976	3601.312	0	17.215	43.650

Tabela 2.5 Tempos médios de resolução do problema inteiro, número de instâncias resolvidas até à optimalidade, diferenças médias relativas para a melhor incumbente e desvios médios de integralidade relativos (continuação)

Nome da instância	Decomposição múltipla				Modelo compacto			
	Tempo médio (segundos)	Número de soluções óptimas	Dif. média relativa para a melhor Inc. (%)	Desvio médio (%)	Tempo médio (segundos)	Número de soluções óptimas	Dif. média relativa para a melhor Inc. (%)	Desvio médio (%)
x11117	1.406	5	0.000	0.000	0.066	5	0.000	26.065
x11118	97.406	5	0.000	0.032	0.152	5	0.000	25.619
x11119	3614.844	0	0.378	1.700	3600.030	0	0.017	29.584
x11127	1.638	5	0.000	0.000	0.056	5	0.000	26.945
x11128	819.945	4	0.004	0.106	0.274	5	0.000	27.832
x11129	3607.904	0	1.309	2.649	3600.060	0	0.000	28.788
x11217	2082.991	4	0.016	0.094	3600.030	0	0.312	44.568
x11218	3607.315	0	1.152	1.451	3103.238	2	0.043	42.936
x11219	3610.962	0	0.922	3.163	3600.032	0	0.585	39.359
x11227	2403.102	2	0.631	0.685	3600.040	0	0.328	45.405
x11228	3602.506	0	1.077	1.365	3600.040	0	0.517	44.949
x11229	3606.650	0	1.057	3.943	3600.062	0	0.866	45.323
x11417	3601.894	0	0.319	0.641	3600.040	0	1.366	48.004
x11418	3601.429	0	1.124	2.669	3600.046	0	1.824	46.206
x11419	3604.727	0	10.073	15.533	3600.050	0	1.699	44.381
x11427	3601.122	0	0.052	0.776	3600.046	0	1.272	48.170
x11428	3653.992	0	2.300	4.680	3600.042	0	0.471	46.712
x11429	3602.971	0	4.133	11.699	3600.046	0	1.507	45.763
x12117	137.029	5	0.000	0.046	0.152	5	0.000	23.303
x12118	2157.360	3	0.015	0.199	1.624	5	0.000	23.161
x12119	3605.486	0	0.740	1.992	3600.036	0	0.000	22.644
x12127	65.803	5	0.000	0.017	0.128	5	0.000	23.926
x12128	907.521	5	0.000	0.277	0.961	5	0.000	23.295
x12129	3602.224	0	1.308	1.893	156.839	5	0.000	24.896
x12217	1360.472	4	0.000	0.166	1817.427	4	0.001	41.209
x12218	3601.625	0	0.552	1.011	2640.993	2	0.012	39.542
x12219	3607.215	0	1.013	2.860	3600.058	0	0.041	31.808
x12227	1122.017	5	0.000	0.145	1789.152	3	0.028	42.010
x12228	3603.231	0	1.655	1.927	1364.678	4	0.000	41.991
x12229	3609.260	0	2.511	4.389	2960.781	1	0.000	41.458
x12417	3198.151	1	0.152	1.099	3600.058	0	0.780	46.196
x12418	3601.567	0	0.728	2.334	3600.058	0	0.368	43.524
x12419	3611.541	0	6.136	11.040	3600.052	0	1.903	41.671
x12427	3624.480	0	0.570	1.055	3600.048	0	0.800	45.682
x12428	3604.465	0	2.048	4.227	3600.048	0	0.745	46.349
x12429	3603.443	0	3.250	9.116	3600.046	0	0.869	38.414
Média Total	2704.047	53	1.256	2.638	2484.375	61	0.454	37.436

A decomposição por produto, comparativamente com os restantes métodos tem melhor desempenho nas instâncias com utilização de capacidade de 75%. À medida que a utilização de capacidade aumenta, o desempenho do modelo compacto passa a

melhorar. Considerando apenas os grupos onde é obtida uma solução óptima em todas as instâncias do grupo, nota-se que os tempos médios da decomposição múltipla são sempre superiores aos tempos médios da decomposição por produto e do modelo compacto.

Em termos do número de soluções óptimas, na decomposição por produto há 75 instâncias que são resolvidas até à optimalidade, na decomposição múltipla, 53, no modelo compacto, 61, e na decomposição por período nenhuma. Analisando com mais detalhe, conclui-se que nos conjuntos de instâncias X11217, X11227 e X12427, cinco, cinco e quatro instâncias do grupo, respectivamente, são resolvidas até à optimalidade com a decomposição por produto, ao passo que no modelo compacto nenhuma destas instâncias é resolvida. O contrário verifica-se no conjunto X12129, no qual as cinco instâncias são resolvidas até à optimalidade com o modelo compacto e nenhuma delas é resolvida com a decomposição por produto. Na Tabela 2.6 apresenta-se o número de instâncias resolvidas até à optimalidade por característica.

Tabela 2.6 Número de instâncias resolvidas por característica

		Decomposição por produto	Decomposição por período	Decomposição múltipla	Modelo compacto
		Número de soluções óptimas	Número de soluções óptimas	Número de soluções óptimas	Número de soluções óptimas
Utilização de capacidade (%)	75	50	0	36	27
	85	25	0	17	28
	95	0	0	0	6
Tempo entre encomendas (períodos)	1	40	0	37	45
	2	25	0	15	16
	4	10	0	1	0
Variabilidade da procura	0.35	34	0	25	22
	0.59	41	0	28	39
Tempo médio de preparação (unidades de capacidade)	11	36	0	27	28
	43	39	0	26	33

A diferença média relativa para a melhor incumbente foi calculada com o objectivo de permitir comparar os modelos entre si quando não é encontrada a solução óptima, e apenas se conhecem soluções incumbentes. A diferença média relativa para a melhor incumbente é em geral baixa nas decomposições por produto e múltipla, assim como no modelo compacto, comparando com os valores obtidos na decomposição por período. Considerando apenas os grupos onde a diferença média relativa para a melhor incumbente é positiva em todos os métodos, pode-se concluir que em nove desses

grupos as incumbentes da decomposição por produto são as melhores, enquanto que nos restantes cinco grupos, as incumbentes do modelo compacto são melhores. Em três dos grupos, na decomposição por período não foi possível estimar este indicador, devido a não terem sido encontradas soluções incumbentes em algumas das instâncias do grupo.

Para a maioria dos grupos a decomposição por produto é o método com melhores desvios médios de integralidade. Embora a decomposição múltipla tenha melhores limites inferiores que os da decomposição por produto, as soluções incumbentes da decomposição por produto são em geral melhores.

2.7 Conclusões

Neste Capítulo apresentaram-se três modelos de decomposição para o problema de lotes de produção multi-artigo capacitado com tempos de preparação e desenvolveram-se três algoritmos de partição e geração de colunas para resolver de modo exacto os três modelos de decomposição. Num dos modelos de decomposição os subproblemas estão associados a produtos, no outro estão associados a períodos, e no terceiro modelo são considerados dois tipos de subproblemas: os que estão associados a produtos e os que estão associados a períodos.

O objectivo deste estudo foi o de comparar os três modelos de decomposição entre si, e de os comparar com um modelo compacto de PIM, em termos da qualidade dos limites inferiores das suas relaxações lineares e em termos da sua eficiência.

Tendo como base o conjunto de testes computacionais realizados, pôde-se concluir que o método mais eficiente é a decomposição por produto. A eficiência deste método é particularmente visível nos conjuntos de instâncias com “baixa” utilização de capacidade. O segundo método mais eficiente consiste em resolver directamente o modelo compacto através de um *software* de programação inteira mista de estado-da-arte. Quando a utilização de capacidade é alta, este método torna-se mais eficiente.

Em termos da qualidade dos limites inferiores da relaxação linear, tal como justificado teoricamente, a decomposição múltipla tem melhores limites inferiores. Contudo, comparando com a decomposição por produto a melhoria não é muito significativa.

Capítulo 3

Problema de Dimensionamento de Lotes e Escalonamento Integrados em Máquinas Paralelas: Estudo de Caso

Neste capítulo apresenta-se o problema de dimensionamento de lotes e escalonamento integrados em máquinas paralelas. Na primeira secção do capítulo, secção 3.1, apresenta-se o problema real que motivou o estudo deste problema. Na secção seguinte, secção 3.2, faz-se uma revisão da bibliografia relevante. Na terceira secção, secção 3.3, apresentam-se as instâncias de teste, assim como o procedimento usado para a geração de instâncias de teste (de forma a simular instâncias reais e a obter resultados de testes computacionais). Na secção 3.4 apresentam-se as conclusões deste capítulo.

3.1 Contextualização e Caracterização do Problema Real

O problema que se apresenta nesta secção está relacionado com o planeamento da produção de curto prazo, de uma secção de tricotagem de uma empresa têxtil, que se dedica à fabricação de peças de vestuário de malha fina. A sua produção anual estimada é de 1 300 000 peças, distribuídas entre uma média de 4 300 produtos finais. Alguns dos tipos de produtos fabricados por esta empresa são casacos, camisolas, calças, vestidos, coletes e cachecóis.

A empresa compra fio, essencialmente em cru, e transforma-o em produto final através de quatro sectores produtivos: tricotagem, remalhagem, tinturaria e acabamento. Na secção de tricotagem são produzidos os principais componentes que vão constituir o produto final, sendo cada produto final composto por um conjunto de componentes. Alguns dos tipos de componentes produzidos são: partes de corpos (frentes, costas, mangas, panos de calça, cachecóis, etc.), revesilhos e reversos (de frentes, costas, mangas, etc.) e guarnições (golas, bolsos, etc.). Na secção de remalhagem os componentes produzidos na secção de tricotagem são unidos, dando origem a uma peça em cru. A próxima etapa do processo produtivo diz respeito à tinturaria, onde as peças vindas da secção de remalhagem adquirem cor. Na etapa final, o acabamento, as peças são passadas a ferro e acabadas de acordo com uma ficha de acabamento onde estão especificadas todas as informações que digam respeito ao tipo de acabamento (por exemplo quais os componentes auxiliares, botões, fechos, etiquetas, linhas, etc., a aplicar nas peças e o tipo de embalagem).

A secção de tricotagem encontra-se dividida em três subsecções de acordo com o tipo de componente produzido e com o tipo de máquina utilizada na sua fabricação. Na subsecção 1 são produzidos os revesilhos e reversos; na subsecção 2, as partes de corpos; e na subsecção 3, as guarnições (ver Figura 3.1). Existe uma relação de precedência entre as subsecções 1 e 2, pelo facto de os revesilhos ou reversos serem incorporados nas partes de corpos.

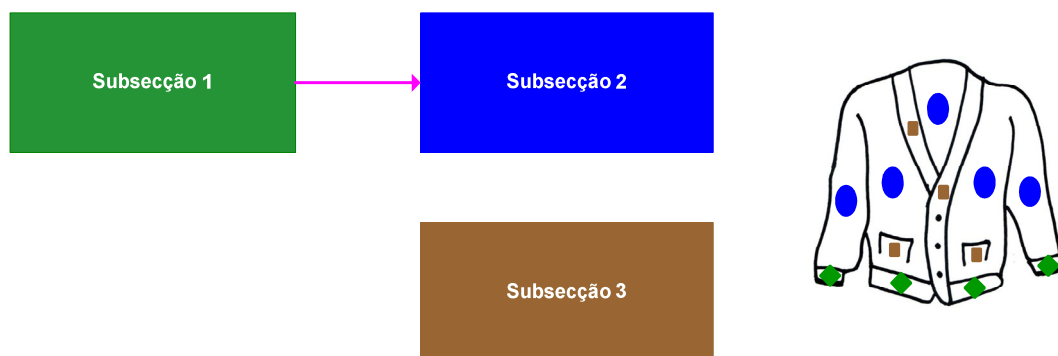


Figura 3.1 Representação das subsecções de tricotagem e tipos de componentes a elas associados

O problema abordado neste trabalho diz respeito à subsecção 2. Por esse motivo o texto que se apresenta daqui em diante tem como perspectiva a apresentação do problema dessa subsecção.

Dada a dimensão e complexidade do problema de planeamento e escalonamento da produção da secção de tricotagem, este é tratado por subsecção, sendo desenvolvidos planos para cada uma das três subsecções apresentadas na Figura 3.1. A subsecção 2, onde são tricotadas as partes de corpos, tem capacidades mais apertadas, necessitando por isso de um planeamento muito eficaz. Por esse motivo, numa primeira fase é elaborado um plano de produção para esta subsecção. Os planos de produção para as restantes subsecções são elaborados com base no plano da subsecção 2 por duas razões principais: (1) pelo facto de existirem relações de precedência entre os componentes que são produzidos nas subsecções 1 e 2 o que faz com que o plano da subsecção 1 tenha de ter em consideração o que foi estabelecido para a subsecção 2 e (2) pelo facto de existirem relações entre os componentes pertencentes ao mesmo produto final. Como anteriormente referido, após a tricotagem os componentes seguem para a remalhagem onde são agrupados. Uma vez que este processo produtivo só pode iniciar após todos os componentes associados ao mesmo produto estarem tricotados, o plano da subsecção 3 deve ser sincronizado com o plano da subsecção 2.

O sistema de produção da subsecção de tricotagem das partes de corpos, doravante designada por subsecção de tricotagem de corpos (TC), encontra-se organizado em três grupos de máquinas paralelas. A característica que define cada grupo de máquinas é o jogo. Todas as máquinas de um grupo pertencem ao mesmo jogo e existem actualmente na empresa três jogos que dão origem aos três grupos acima referidos. O jogo está associado à espessura do fio que é trabalhado na máquina e ao tipo de agulhas existentes na máquina, existindo uma relação única entre o jogo e o fio, o que faz com que exista também uma relação única entre um produto final e um jogo. O planeamento da produção é feito por jogo. Dentro de cada grupo as máquinas são idênticas, sendo que todas as máquinas do mesmo grupo demoram aproximadamente o mesmo tempo a produzir uma unidade de um determinado componente. Adicionalmente, dentro de cada grupo de máquinas, existe uma matriz de compatibilidade entre máquinas e componentes, que especifica as máquinas onde cada

componente pode ser produzido. Esta associação é necessária devido a características técnicas, quer dos componentes, quer das máquinas.

A empresa trabalha por encomenda, existindo quatro tipos de encomenda: protótipo, colecção, pré-série e produção. Cada encomenda pode ser constituída por um ou mais produtos finais e cada produto final pode ser pedido em um ou vários tamanhos e numa ou mais cores. Na fase da tricotagem, na grande maioria das encomendas, a cor é irrelevante dado que os produtos nesta fase são tricotados em cru. A excepção a esta regra ocorre caso se trate de produtos finais de risca, que neste caso são tricotados já nas cores pretendidas.

Associada à mesma encomenda pode existir uma ou mais datas de entrega. Actualmente a empresa decompõe a procura associada a cada produto final em lotes com o objectivo de acelerar o processo de produção. A dimensão dos lotes varia entre 800 e 999 peças. Cada um desses lotes é ainda dividido pelo número de tamanhos pedidos na encomenda, proporcionalmente às quantidades pedidas em cada tamanho. Cada lote é atribuído a uma máquina. Dois ou mais lotes do mesmo componente podem ser atribuídos à mesma máquina, ou a máquinas diferentes, desde que exista compatibilidade entre o componente associado ao lote e a máquina, e que a máquina esteja disponível.

Os planos de produção da subsecção de TC são elaborados semanalmente, o que envolve definir os lotes de produção associados a cada componente (dimensionamento de lotes), em que máquina cada um desses lotes vai ser tricotado (afecção de lotes) e quando deve iniciar-se a sua tricotagem (escalonamento de lotes). Em cada plano são consideradas várias ordens de fabrico. Cada ordem de fabrico contém informação sobre os produtos finais pedidos pelos clientes em cada tamanho, respectivas datas de entrega e quantidades encomendadas. São ainda especificados os componentes associados a cada produto final, bem como o seu tempo unitário de produção. Como todas as ordens de fabrico estão disponíveis para serem processadas aquando da preparação dos planos de produção, não existem datas de disponibilidade associadas aos componentes (momento a partir do qual um componente pode começar a ser processado). O mesmo não acontece em relação às máquinas. Neste caso há que considerar uma data de disponibilidade associada a cada máquina, que corresponde ao instante previsto de

paragem da referida máquina no plano de produção da semana anterior à semana para a qual se pretende definir um plano de produção.

O tempo envolvido na preparação da máquina, quando ocorre uma mudança entre dois componentes numa determinada máquina, é rápido e aproximadamente constante, sendo ainda independente da sequência de componentes (ou seja, independente do componente que está actualmente a ser produzido e do próximo componente a produzir).

Actualmente, as decisões relativas ao planeamento e escalonamento da produção da subsecção de TC são da responsabilidade do director do sector de tricotagem e são tomadas manualmente com base numa ordem de prioridades, gerada pelo departamento de planeamento da produção, que indica a ordem segundo a qual as encomendas devem ser realizadas.

Para avaliar a qualidade de uma solução de um problema de planeamento e escalonamento da produção, utilizam-se normalmente um ou mais critérios de desempenho, os quais por vezes colidem entre si. Esses critérios dividem-se em duas grandes classes: critérios motivados por custos/benefícios e critérios associados ao tempo. Dentro de cada classe, existem vários critérios considerados frequentemente na literatura, como por exemplo garantir que o plano fique concluído o mais cedo possível, garantir que os produtos são entregues atempadamente ou garantir que as máquinas estão paradas o menor tempo possível. Embora nos planos de produção actuais da subsecção de TC não sejam considerados explicitamente critérios de avaliação de desempenho, existem dois critérios que a empresa considera essenciais: (1) garantir que as datas de entrega estabelecidas nas ordens de fabrico sejam respeitadas e (2) minimizar os stocks intermédios entre a tricotagem e a remalhagem. É de salientar que, apenas quando todos os componentes pertencentes ao mesmo produto final estiverem tricotados é que, o processo na remalhagem pode ser iniciado. Quanto maiores forem os desvios entre os instantes de conclusão dos lotes de componentes na secção de tricotagem, maior será o stock em curso de fabrico entre as duas secções. Para minimizar a quantidade de trabalho em curso de fabrico entre a secção de tricotagem e a secção de remalhagem, minimizam-se os desvios entre os instantes de conclusão dos lotes de componentes que pertençam ao mesmo produto final.

Numa solução para o problema de dimensionamento de lotes e escalonamento integrados em máquinas paralelas (DLEMP) pode compensar existirem tempos de inactividade entre dois lotes consecutivos, pelo facto de se pretender minimizar os desvios totais ocorridos na produção dos produtos finais. Pelo mesmo motivo, numa solução para o problema DLEMP pode compensar produzir mais do que um lote do mesmo componente na mesma máquina. Esta característica não é comum a uma grande parte dos problemas de escalonamento tratados na literatura. No texto que se segue apresenta-se um pequeno exemplo para mostrar que numa solução para o problema DLEMP pode compensar produzir mais do que um lote do mesmo componente na mesma máquina.

Exemplo 3.1

Considere-se um pequeno exemplo do problema DLEMP com duas máquinas e dois produtos finais A e B. O produto final A tem uma data de entrega igual a 18 unidades de tempo e dois componentes associados: o componente A1 com uma duração de 12 unidades de tempo e o componente A2 com uma duração de 2 unidades de tempo. O produto final B tem uma data de entrega igual a 16 unidades de tempo e tem também associados dois componentes: o componente B1 com uma duração de 4 unidades de tempo e o componente B2 com uma duração de 6 unidades de tempo. Para além disso, os componentes A1 e B2 só podem ser realizados na máquina 1, enquanto que os componentes A2 e B1 só podem ser realizados na máquina 2.

Na Figura 3.2 e na Figura 3.3 apresentam-se duas soluções admissíveis para o Exemplo 3.1. A solução da Figura 3.2 não tem atraso total e tem um desvio total igual a 10 unidades de tempo devido ao produto final B. A solução da Figura 3.3 também não tem atraso total, mas tem um desvio total menor do que o da solução da Figura 3.2. O desvio total da solução da Figura 3.3 é devido ao produto final A e tem um valor igual a 8 unidades de tempo.

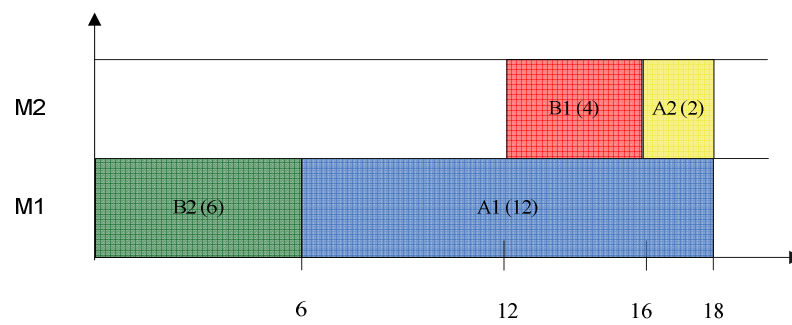


Figura 3.2 Solução admissível para o Exemplo 3.1 sem produção de mais do que um lote do mesmo componente na mesma máquina

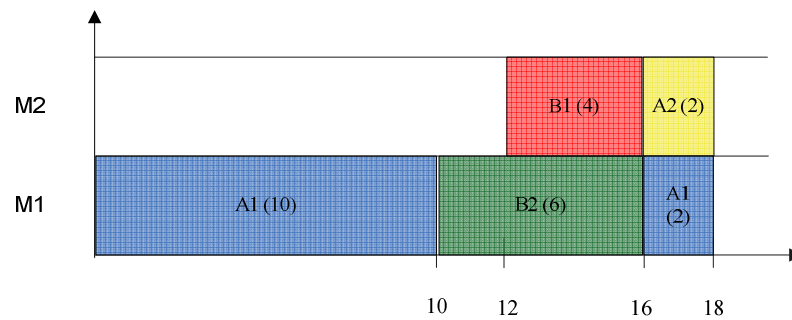


Figura 3.3 Solução admissível para o Exemplo 3.1 com produção de mais do que um lote do mesmo componente na mesma máquina

■

3.2 Revisão de Literatura

No melhor conhecimento da autora, não existem até à data publicações de trabalhos que abordem conjuntamente todas as características do problema DLEMP. Uma característica inovadora do problema está relacionada com o objectivo de minimizar os níveis de inventário em curso de fabrico entre duas etapas sucessivas do processo de fabrico, o que leva à existência de relações de dependência entre

componentes pertencentes ao mesmo produto final. Num problema de dimensionamento de lotes e/ou de escalonamento, tipicamente não existe esta relação de dependência, sendo o conjunto dos trabalhos (ou conjunto dos produtos a processar) a dimensionar e/ou escalonar independente entre si. Uma outra particularidade deste problema, ainda muito pouco abordada na literatura (sendo uma excepção os trabalhos de Yalaoui e Chu (2003) e de Shim e Kim (2008)), é a possibilidade de a quantidade total associada a um dado produto poder ser dividida em vários lotes de menor quantidade, de dimensão variável, que podem ser produzidos em simultâneo em mais do que uma máquina (esta particularidade é frequentemente denominada por *lot splitting* (Xing e Zhang, 2000) na literatura Anglo-Saxónica, ou também por *lot sizing* (Potts e Wassenhove, 1992)). Esta característica constitui uma excepção à regra relativamente à grande maioria dos trabalhos na área do escalonamento, onde não se permite a divisão da quantidade total associada a um dado produto ou apenas se permite a interrupção (*preemption*) da sua produção, *i. e.*, permite-se que a produção de um produto seja interrompida e retomada mais tarde, mas não se permite que o mesmo produto esteja a ser produzido em mais do que uma máquina ao mesmo tempo. Quando se divide a procura total associada a um dado produto em lotes de menor quantidade, e se distribui esses lotes pelas várias máquinas disponíveis, consegue-se acelerar o processo produtivo através da redução do *lead time* de fabricação do produto.

O problema de dimensionamento de lotes e escalonamento integrados em máquinas paralelas idênticas, sem tempos de preparação, com o objectivo de minimizar o atraso total (problema P/split/ ΣT_j de acordo com a classificação $\alpha/\beta/\gamma$ introduzida em Graham et al. (1979)) é NP-difícil (Xing e Zhang, 2000). Como o problema DLEMP é uma extensão do problema anterior, também ele é NP-difícil.

Embora a literatura sobre o problema de dimensionamento de lotes e sobre o problema de escalonamento em máquinas paralelas seja abundante, apenas mais recentemente começaram a surgir publicações onde as duas decisões são abordadas conjuntamente. Tipicamente na literatura sobre o escalonamento assume-se que a dimensão dos lotes foi previamente determinada e não constitui uma incógnita do problema. Por outro lado, a literatura sobre o dimensionamento de lotes raramente considera as decisões de escalonamento dos lotes (onde se determinam os instantes de

início e de conclusão do lote). Normalmente nos problemas de dimensionamento de lotes as soluções são avaliadas por objectivos associados a custos, enquanto que nos problemas de escalonamento imperam normalmente objectivos relacionados com o tempo. Por força do objectivo da minimização dos níveis de inventário, no caso do problema DLEMP é essencial que as duas decisões sejam integradas, de modo a obter soluções de maior qualidade.

Embora já em 1992 Potts e Wassenhove (1992) tenham constatado que as decisões de dimensionamento de lotes e de escalonamento desses lotes estão fortemente inter-relacionadas, só mais recentemente a visão integrada dos dois problemas começou a suscitar maior interesse. Os autores referem que é surpreendente que existam tão poucos estudos que abordem os dois tipos de decisões simultaneamente. Dauzère-Péres e Lasserre (1994) afirmam que embora a decomposição hierárquica das decisões de planeamento e de escalonamento simplifique o problema, normalmente existem restrições cruciais do escalonamento que são ignoradas ao nível do problema de dimensionamento de lotes, levantando problemas de consistência entre as decisões tomadas nos dois níveis hierárquicos. Por esse motivo, os autores defendem a integração dos dois problemas. Num artigo mais recente de revisão de literatura de problemas de dimensionamento de lotes (Jans e Degraeve, 2008), os autores reforçam esta questão, referindo que a integração das decisões de dimensionamento de lotes e de escalonamento constituem um desafio de investigação.

Xing e Zhang (2000) avaliam a complexidade computacional do problema de dimensionamento de lotes e escalonamento integrados em máquinas paralelas idênticas, sem tempos de preparação, para vários objectivos frequentemente abordados na literatura, distinguindo os casos que se resolvem em tempo polinomial dos casos cuja resolução do problema é NP-difícil. Os autores apresentam ainda uma heurística para o mesmo problema, considerando o objectivo de minimização do *makespan* e a existência de tempos de preparação independentes da sequência (significando que o tempo de preparação depende apenas do produto que será produzido após essa preparação).

Serafini (1996) aborda um problema real da indústria têxtil, associado ao dimensionamento de lotes e escalonamento do trabalho num conjunto de teares. Neste problema considera-se que existe um conjunto de máquinas paralelas uniformes, que

existem restrições de compatibilidade entre as máquinas e os trabalhos, que não existem tempos de preparação associados às mudanças de trabalho e que cada trabalho pode ser dividido em vários lotes de menor dimensão, os quais podem ser produzidos simultaneamente em várias máquinas (*lot splitting*). O objectivo é o de minimizar o atraso máximo. Os autores resolvem o problema de máquinas paralelas uniformes e o de máquinas paralelas não relacionadas (neste caso a velocidade de processamento do trabalho depende da combinação máquina/trabalho) através de modelos de fluxos em rede. Shim e Kim (2008) abordam também um problema real de dimensionamento de lotes (ou de *lot splitting*) e de escalonamento integrados em máquinas paralelas idênticas, com tempos de preparação independentes da sequência, de uma empresa que produz placas de circuito impresso. O objectivo tratado é o da minimização do atraso total. Os autores apresentam algumas propriedades de dominância e limites inferiores, que são usados no contexto de um algoritmo de partição e avaliação para resolver o problema. As principais diferenças entre os dois problemas estudados nos artigos acima referidos e o que se aborda neste trabalho são: (1) as funções objectivo; (2) ambos os artigos acima referidos consideram que os trabalhos são independentes entre si, o que difere do caso do problema estudado nesta tese, onde existe uma relação entre componentes e produtos. Para além disso, nenhum desses problemas individualmente abrange o conjunto de características do problema DLEMP.

Yalaoui e Chu (2003) e Tahar et al. (2006) estudam o problema de dimensionamento de lotes e escalonamento integrados em máquinas paralelas idênticas, com tempos de preparação dependentes da sequência (significando que o tempo de preparação depende quer do produto que será produzido após essa preparação quer do produto que foi produzido antes dessa preparação), para o objectivo de minimização do *makespan*. Os autores resolvem o problema em dois passos, usando uma heurística. No primeiro passo o problema é reduzido a um problema de dimensionamento de lotes e escalonamento integrados de máquina única com tempos de preparação dependentes da sequência e transformado num problema de caixeiro viajante que os autores resolvem usando o método de Little (Little et al., 1963). No segundo passo Yalaoui e Chu (2003) tentam melhorar passo a passo a solução obtida no passo 1, tendo em consideração os tempos de preparação e o dimensionamento de lotes, enquanto que Tahar et al. (2006) recorrem a um modelo de programação linear para dimensionar os lotes. As principais

diferenças entre o problema abordado neste trabalho e o problema de Yalaoui e Chu (2003) e Tahar et al. (2006) são as seguintes: (1) enquanto que os autores supra-citados consideram o objectivo de minimizar o *makespan* no problema abordado neste trabalho considera-se uma função pesada do atraso total e do nível de inventário (medido de duas maneiras diferentes que serão apresentadas mais tarde); (2) no problema de Yalaoui e Chu (2003) e Tahar et al. (2006) existem tempos de preparação dependentes da sequência e no problema aqui estudado não; (3) os autores acima referidos consideram que todas as máquinas disponíveis podem processar todos os trabalhos, enquanto que no problema abordado neste trabalho existem restrições de compatibilidade entre as máquinas e os trabalhos; e (4) no problema de Yalaoui e Chu (2003) e Tahar et al. (2006) os trabalhos são independentes entre si, ao passo que no problema abordado neste trabalho existem sub-trabalhos (componentes) associados aos trabalhos (produtos).

Logendran e Subur (2004) estudam um problema industrial de um centro espacial da NASA (Johnson Space Center). O problema caracteriza-se pela existência de um conjunto de máquinas paralelas não relacionadas, de datas de disponibilidade de máquinas, de datas de disponibilidade dos trabalhos, de uma matriz de compatibilidade entre os trabalhos e as máquinas e pela existência de prioridades associadas aos trabalhos a processar. O objectivo passa pela minimização do atraso total pesado. Cada trabalho pode ser dividido no máximo em dois lotes, não fazendo o dimensionamento de lotes parte das decisões a tomar. Não existe obrigatoriedade de se dividir um dado trabalho, sendo essa decisão tomada previamente, com base nos pesos atribuídos aos trabalhos. Neste problema para além de se assumir que cada trabalho pode ser dividido no máximo em dois lotes, também se assume que esses dois lotes terão associada aproximadamente a mesma quantidade e que são produzidos em máquinas diferentes. As decisões a tomar prendem-se então com o escalonamento dos trabalhos.

Uma característica interessante deste trabalho, que de algum modo se relaciona com uma característica inovadora do problema DLEMP é a consideração de limites em termos da diferença absoluta entre os instantes de conclusão dos trabalhos que são divididos em dois lotes. Os autores apresentam um modelo de programação inteira mista (PIM) para o problema e desenvolvem quatro heurísticas simples, baseadas em

regras de prioridade conhecidas para problemas de escalonamento, que são usadas como ponto de partida num algoritmo de pesquisa tabu. A diferença fundamental entre este problema e o problema DLEMP é o facto de neste problema não se considerarem as decisões de dimensionamento de lotes integradas com as decisões de escalonamento. Por outro lado, como forma de minimizar os níveis de inventário em curso de fabrico, no problema DLEMP as diferenças absolutas entre os instantes de conclusão de todos os lotes relacionados (que pertençam ao mesmo produto final) são consideradas explicitamente na função objectivo.

Sheen e Liao (2007) apresentam um modelo de fluxos em rede para um problema de escalonamento em máquinas paralelas idênticas, com a possibilidade de interrupção dos trabalhos, com restrições de disponibilidade das máquinas e com restrições de compatibilidade entre as máquinas e os trabalhos. O objectivo está associado à minimização do atraso máximo. Os autores resolvem o problema usando uma série de problemas de fluxo máximo, propondo um algoritmo de tempo polinomial para verificar a admissibilidade do problema e para o resolver de modo exacto, caso exista um plano de escalonamento admissível. Embora este problema esteja relacionado com o problema abordado neste trabalho, existem três diferenças entre eles: (1) enquanto que no problema abordado nesta tese os trabalhos podem ser divididos em vários lotes de menor dimensão, que podem ser produzidos em simultâneo em mais do que uma máquina, no problema de Sheen e Liao (2007) os trabalhos podem ser interrompidos, mas não podem ser produzidos em mais do que uma máquina ao mesmo tempo; (2) os objectivos considerados são diferentes; e (3) no trabalho destes autores os trabalhos são independentes entre si.

Em dois artigos recentes de revisão sobre problemas de escalonamento ((Zhu e Wilhelm, 2006) e (Allahverdi et al., 2008)) os autores referem que devem ser centrados esforços na investigação de problemas que considerem objectivos relacionados com a data de entrega dos trabalhos. Embora ambas as referências se centrem em problemas com custos e/ou tempos de preparação, constituem uma excelente base de informação sobre os trabalhos recentes na área, quer ao nível de métodos de optimização quer ao nível de métodos heurísticos. Ambos os autores dividem a revisão de acordo com as configurações típicas em problemas de escalonamento, considerando os casos de

máquina única, máquinas paralelas, o sistema de *flow shop* e o sistema de *job shop*. Para cada uma destas configurações Zhu e Wilhelm (2006) consideram uma secção onde abordam os trabalhos que integram as decisões de dimensionamento de lotes com as decisões de sequenciamento. Shim e Kim (2008) referem que embora existam vários artigos onde sejam estudados problemas que consideram objectivos relacionados com o cumprimento de prazos de entrega, existem ainda poucos progressos ao nível do objectivo de minimização do atraso total em problemas de máquinas paralelas, excepto para alguns casos especiais de máquinas paralelas idênticas.

Embora existam algumas semelhanças entre o problema DLEMP e o problema clássico de escalonamento de máquinas paralelas, no qual se pretende escalonar um conjunto de n trabalhos independentes num conjunto de m máquinas paralelas com o objectivo de otimizar um ou mais critérios de desempenho, estes exibem duas importantes diferenças: (1) no problema DLEMP um dado trabalho pode ser dividido em vários lotes de menor dimensão, que podem ser processados em mais do que uma máquina simultaneamente, enquanto que no problema clássico de escalonamento de máquinas paralelas os trabalhos não podem ser divididos nem interrompidos; e (2) no problema clássico de escalonamento de máquinas paralelas os trabalhos são independentes entre si, ao passo que no problema DLEMP existem sub-trabalhos associados aos trabalhos. Dois artigos de revisão, que abordam métodos heurísticos e métodos exactos para o problema clássico de escalonamento de máquinas paralelas são: Cheng e Sin (1990) e Mokotoff (2001).

O problema DLEMP relaciona-se também com o problema de escalonamento de tarefas maleáveis (Drozdowski, 2004), o qual tem aplicação no escalonamento de recursos computacionais. No problema de escalonamento de tarefas maleáveis cada tarefa a processar pode ser executada em paralelo (simultaneamente ou não), em mais do que um processador, sendo que o número de processadores atribuídos a essa tarefa pode variar ao longo da execução da tarefa (Drozdowski, 2004). Esta característica é igual à possibilidade de no problema DLEMP a procura total associada a um componente poder ser dividida em vários lotes, que podem ser afectados arbitrariamente nas máquinas (*lot splitting*). Drozdowski (2004) distingue para este problema a situação de velocidade linear da situação de velocidade não linear. Na situação de velocidade

linear o tempo de execução de uma dada tarefa decresce proporcionalmente em relação ao número de processadores atribuídos a essa tarefa, ao passo que na situação de velocidade não linear esse tempo depende de uma função contínua particular. Para a situação de velocidade linear e para o objectivo de minimizar o atraso máximo, Drozdowski (2004) apresenta uma formulação baseada numa sequência de problemas de fluxos em rede, para testar a admissibilidade do problema. Existem algumas semelhanças entre este modelo de fluxos em rede e o modelo desenvolvido para o problema DLEMP, que será apresentado na secção 5.1 desta tese, ao nível do modo como se definem as origens e os destinos da rede. Contudo, existem algumas características do problema DLEMP, que tornam o modelo de fluxos em rede desenvolvido nesta tese bastante diferente do apresentado em Drozdowski (2004), entre as quais se destacam a função objectivo (o problema apresentado em Drozdowski (2004) é formulado como um problema de fluxo máximo enquanto que o problema desenvolvido nesta tese é formulado como um problema de fluxo de custo mínimo) e a necessidade de no modelo de fluxos em rede do problema DLEMP se associar os intervalos de tempo às máquinas (processadores), pelo facto de existir uma matriz de compatibilidade entre as máquinas (processadores) e os componentes (tarefas), o que não acontece em Drozdowski (2004). Tal como se constata em Drozdowski (2004) a grande maioria dos estudos sobre tarefas maleáveis centra-se na função objectivo de minimização do *makespan*.

Para além da função objectivo tratada no problema DLEMP diferir das estudadas para o problema de escalonamento de tarefas maleáveis em Drozdowski (2004), também o facto de no problema DLEMP existirem restrições de compatibilidade entre as máquinas e os componentes, torna-o diferente do problema de tarefas maleáveis, como referido por Drozdowski (2004) citando o problema apresentado em Serafini (1996).

O dimensionamento de lotes ou a divisão da quantidade total associada a um dado trabalho em lotes de menor quantidade, como forma de acelerar o processo de produção, tem merecido alguma atenção por parte da comunidade dedicada ao estudo de problemas de escalonamento em sistemas de *flow shop*, *open shop* e *job-shop*. Aqui o dimensionamento de lotes recebe a designação de *lot streaming*. No artigo de revisão de

Chang e Chiu (2005) *lot streaming* é definido como sendo uma técnica na qual um lote de produção é dividido em vários sub-lotes de menor quantidade, de modo a permitir a sobreposição de operações em diferentes postos de trabalho (*i. e.*, em diferentes etapas ou estágios de produção). Os autores apresentam um pequeno exemplo de um *flow shop* para mostrar a influência da divisão da quantidade total associada a um trabalho em vários lotes de menor dimensão, em termos do tempo necessário para a sua conclusão. Em *lot streaming* faz-se a distinção entre três tipos de sub-lotes (Chang e Chiu, 2005): iguais, consistentes e variáveis. Os sub-lotes são variáveis quando a dimensão do sub-lote varia ao longo dos diferentes estágios de produção; são consistentes quando dois ou mais sub-lotes têm dimensão diferente, mas fixada essa dimensão, esta não varia ao longo dos diferentes estágios e são iguais quando a dimensão de todos os sub-lotes é igual e essa dimensão não varia ao longo dos diferentes estágios de produção. Chang e Chiu (2005) sugerem a aplicação dos conceitos de *lot streaming* a problemas de máquinas paralelas como tema de investigação futura.

Dois artigos recentes, onde se abordam formulações de PIM baseadas em micro-períodos (ou num número pré-determinado de sub-lotes) para *flow shops* com *lot streaming* são os de Defersha e Chen (2010) e de Feldmann e Biskup (2008). Outro artigo recente, que aborda um problema de *job shop* com dimensionamento de lotes, para uma função objectivo que minimiza a soma pesada do custo de inventário, do custo de transporte e do custo de desocupação das máquinas, é o de Huang (2010). O autor apresenta um modelo de PIM também baseado no número de sub-lotes e uma meta-heurística (*ant colony optimization*) para resolver o problema.

Na definição do modelo de PIM para o problema DLEMP, que será apresentado no capítulo seguinte, foi adoptada uma representação contínua do tempo (baseada na consideração de um número pré-determinado de micro-períodos de duração variável), por forma a determinar de modo preciso os desvios entre os instantes de conclusão dos lotes de componentes associados ao mesmo produto final. Este tipo de representação é mais realística e permite acomodar tempos de processamento variáveis contínuos (como é o caso no problema real), por oposição aos modelos discretos onde habitualmente se assumem tempos de processamento com valores inteiros de modo a evitar que a dimensão do problema fique gigantesca, já que neste caso normalmente as variáveis de

decisão estão indexadas ao tempo. Para mais detalhes sobre representações contínuas e representações discretas em modelos de PIM recomenda-se o artigo de Floudas e Lin (2004) e de Maravelias e Grossmann (2003).

O modelo de PIM apresentado no capítulo seguinte, para além dos micro-períodos de duração variável considera também um conjunto de macro-períodos. A inclusão dos macro-períodos tem por objectivo o tratamento de restrições de capacidade das máquinas (permitindo-se que o tempo disponível em cada dia de trabalho e em cada máquina seja variável). O modelo resultante pode ser visto como um modelo discreto em relação ao horizonte temporal e como um modelo contínuo em relação a cada período desse horizonte temporal. O mesmo tipo de abordagem tem sido usada em modelos de PIM para problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento integrado desses lotes em máquinas paralelas (ver por exemplo Clark e Clark (2000) e Meyr (2002)), nos quais o objectivo é a minimização de custos e os micro-períodos são usados para modelar as preparações.

Rocha et al. (2008) desenvolvem dois modelos de PIM com representação contínua do tempo para um problema de escalonamento em máquinas paralelas. Contudo nesse trabalho não se considera o problema de dimensionamento dos lotes.

Para além de neste trabalho se apresentar um modelo exacto de PIM para resolver o problema DLEMP, este problema é também abordado através de métodos heurísticos, entre eles métodos baseados em pesquisa local (Aarts e Lenstra, 2003). Em Anderson et al. (2003) a pesquisa local é explorada em detalhe no contexto de problemas de escalonamento de máquinas. Para além desta referência ser um excelente guia na aplicação de um algoritmo de pesquisa local a este tipo de problemas, nela também se revêem os principais resultados para diferentes configurações de máquina: máquina única, máquinas paralelas e sistemas de *flow shop*, *open shop* e *job shop*. A representação natural das soluções da pesquisa local em problemas de escalonamento está associada a uma permutação de números inteiros (Anderson et al., 2003), onde com base nessa permutação se consegue determinar facilmente a solução do problema (incluindo os instantes de início e de conclusão dos trabalhos). Tal como se mostrará mais tarde, esta representação não é adequada para representar as soluções do problema

DLEMP nos algoritmos de pesquisa local, sendo neste trabalho apresentada uma representação alternativa.

Uma das heurísticas dedicadas desenvolvida para o problema DLEMP, pertence a uma classe de heurísticas habitualmente designadas por *list scheduling heuristics*. Neste tipo de heurísticas, o plano de escalonamento é determinado com base numa determinada ordenação dos trabalhos (representada através de uma lista). Os trabalhos (previamente ordenados) são considerados um a um, sendo as decisões de escalonamento tomadas com base no plano de escalonamento parcial constituído pelos trabalhos já escalonados. Uma característica deste tipo de heurística é o facto de as decisões tomadas para os trabalhos já escalonados não serem alteradas posteriormente ao seu escalonamento (Hurink e Knust, 2001). Embora a heurística desenvolvida neste trabalho possa ser incluída nesta classe de heurísticas, esta tem em consideração características particulares do problema DLEMP, que a tornam específica deste problema. Referem-se os artigos de Panwalkar e Iskander (1977), de Blackstone et al. (1982) e de Cheng e Sin (1990) para uma visão geral sobre várias regras de prioridade, usadas tipicamente na construção da lista ordenada dos trabalhos, as quais estão associadas quer a funções objectivo orientadas ao cumprimento de datas de entrega, quer a outros tipos de funções objectivo.

A outra heurística dedicada desenvolvida para o problema DLEMP é baseada num modelo de fluxos em rede. Existem na literatura várias aplicações de diferentes modelos de fluxos em rede para resolver problemas de escalonamento (ver por exemplo Ahuja et al. (1993) ou Alcaide et al. (2002)).

O problema DLEMP é ainda estudado, neste trabalho, no contexto de meta-heurísticas baseadas em pesquisa local.

Uma desvantagem associada aos algoritmos de pesquisa local é a sua incapacidade em evitar as soluções óptimas locais. Quando no processo de pesquisa é encontrado um óptimo local o algoritmo pára. Para contornar essa limitação dos algoritmos de pesquisa local, nas últimas décadas surgiram novos métodos heurísticos, que incorporam mecanismos que previnem a paragem do algoritmo nos óptimos locais, fazendo uma pesquisa mais robusta do espaço de soluções. Esses métodos heurísticos

designam-se por meta-heurísticas. Em Blum e Roli (2003) e em Glover e Kochenberger (2003) as meta-heurísticas mais populares são examinadas em detalhe. O livro editado por Xhafa e Abraham (2008) apresenta várias meta-heurísticas aplicadas a problemas de escalonamento encontrados em ambiente industrial.

As meta-heurísticas desenvolvidas para o problema DLEMP são adaptações das meta-heurísticas de *variable neighborhood descent* (VND) e de *variable neighborhood search* (VNS), desenvolvidas por Hansen e Mladenovic (2001) e Mladenovic e Hansen (1997). Ambas as meta-heurísticas recorrem a mudanças sistemáticas de vizinhança para “escapar” dos mínimos locais. Como se pode constatar pelo artigo de Hansen et al. (2010) ambas as meta-heurísticas, assim como hibridações destas combinadas com outras meta-heurísticas, têm sido aplicadas com sucesso a vários problemas, entre os quais se destacam problemas de localização, problemas de escalonamento com várias configurações, problemas de rotas para veículos e problemas de mochila e de empacotamento. Hansen et al. (2010) apresentam em detalhe várias variantes da versão básica de VNS.

Existem algumas aplicações recentes com sucesso do algoritmo de VND, do algoritmo de VNS, e ainda de hibridações destes, ao problema de escalonamento em máquinas paralelas (ver por exemplo Driessel e Mönch (2010), Behnamian et al. (2009), Chen e Chen (2009) e Anghinolfi e Paolucci (2007)). Uma característica comum a todos estes trabalhos é o facto de apenas se considerar o escalonamento das tarefas (excluindo-se o dimensionamento dos lotes), sendo em todos eles usada a representação das soluções baseada na permutação de números inteiros (sequência de trabalhos em cada máquina). Como já se referiu anteriormente este tipo de representação não se adequa ao problema DLEMP.

3.3 Instâncias de Teste

Com o intuito de testar os modelos e métodos desenvolvidos nesta tese para o problema DLEMP, foi feita uma pesquisa na literatura de instâncias de teste que

considerassem as características mais importantes do problema, como por exemplo a relação de dependência entre produtos finais e componentes. Como não se encontraram na literatura instâncias com as características pretendidas, procedeu-se à geração de um conjunto de instâncias de teste. No anexo 1, apresenta-se o procedimento usado na geração dessas instâncias.

As instâncias têm características semelhantes às do problema real, correspondendo alguns dos parâmetros a valores reais. Outros parâmetros são gerados aleatoriamente com base nas informações recolhidas na empresa. Por exemplo, o número de máquinas disponíveis em cada jogo corresponde ao valor real. Já as procuras e as datas de entrega dos produtos finais são geradas aleatoriamente dentro de intervalos de valores definidos com base nos dados reais recolhidos.

O gerador de instâncias foi programado em C++ usando o ambiente de desenvolvimento Microsoft Visual Studio 2008.

O conjunto de instâncias de teste é igual a 54, das quais 18 pertencem ao jogo 21, outras 18 ao jogo 24, e as restantes 18 ao jogo 27. Deve notar-se que cada instância gerada tem associados os três jogos, pelo que dá origem a três instâncias por jogo. Para maior clareza na exposição dos conteúdos, daqui em diante, passar-se-á a designar as instâncias geradas (que têm associados os três jogos) por instâncias finais, e as instâncias por jogo apenas por instâncias. O número de produtos finais de cada instância final pode ser igual a 20, 30, 40, 50, 60 ou 70 e o horizonte temporal é igual a 168 horas. Para cada número de produtos finais, foram geradas três réplicas, o que deu origem a um total de 18 instâncias finais e a três grupos de 18 instâncias (18 instâncias de jogo 21, 18 de jogo 27 e 18 de jogo 24). Na Tabela 3.1 apresentam-se as principais características de cada instância.

No anexo 2 apresenta-se a estrutura das instâncias de teste e um exemplo de uma instância de teste.

Tabela 3.1 Características principais das instâncias de teste

Instância	Jogo	Número de produtos finais	Número de componentes	Número de máquinas	Horizonte temporal (em horas)	Medida de carga total sobre capacidade total (%)	Procura total (unidades)
Inst20T1.1.J21	21	8	18	5	168	46.2	17461
Inst20T1.2.J21	21	9	25	5	168	102.1	37657
Inst20T1.3.J21	21	9	17	5	168	80.7	21176
Inst30T1.1.J21	21	18	50	5	168	103.9	44580
Inst30T1.2.J21	21	20	56	5	168	68.6	29318
Inst30T1.3.J21	21	20	60	5	168	92.7	39064
Inst40T1.1.J21	21	20	58	5	168	99.4	28992
Inst40T1.2.J21	21	24	69	5	168	101.9	31556
Inst40T1.3.J21	21	27	74	5	168	79.1	33056
Inst50T1.1.J21	21	29	74	5	168	87.6	41442
Inst50T1.2.J21	21	30	74	5	168	104.5	35627
Inst50T1.3.J21	21	33	99	5	168	86.4	31179
Inst60T1.1.J21	21	26	70	5	168	98.0	44184
Inst60T1.2.J21	21	30	77	5	168	66.3	25090
Inst60T1.3.J21	21	29	77	5	168	96.0	34636
Inst70T1.1.J21	21	30	90	5	168	59.3	22148
Inst70T1.2.J21	21	33	83	5	168	60.1	20090
Inst70T1.3.J21	21	39	116	5	168	79.2	38825
Inst20T1.1.J27	27	31	89	11	168	88.1	83222
Inst20T1.2.J27	27	32	84	11	168	89.2	86155
Inst20T1.3.J27	27	29	84	11	168	63.9	105204
Inst30T1.1.J27	27	41	107	11	168	82.0	87472
Inst30T1.2.J27	27	38	103	11	168	105.9	112478
Inst30T1.3.J27	27	44	128	11	168	95.6	75910
Inst40T1.1.J27	27	53	142	11	168	95.7	100492
Inst40T1.2.J27	27	42	112	11	168	95.4	87812
Inst40T1.3.J27	27	47	125	11	168	75.9	86516
Inst50T1.1.J27	27	43	120	11	168	99.5	74976
Inst50T1.2.J27	27	65	174	11	168	103.6	130180
Inst50T1.3.J27	27	60	154	11	168	83.7	109518
Inst60T1.1.J27	27	71	197	11	168	99.7	83771
Inst60T1.2.J27	27	76	210	11	168	80.2	103659
Inst60T1.3.J27	27	67	181	11	168	96.9	83441
Inst70T1.1.J27	27	70	182	11	168	97.5	85377
Inst70T1.2.J27	27	81	221	11	168	98.5	96988
Inst70T1.3.J27	27	67	187	11	168	91.3	95769
Inst20T1.1.J24	24	34	94	13	168	95.6	86106
Inst20T1.2.J24	24	37	108	13	168	91.8	65978
Inst20T1.3.J24	24	34	98	13	168	96.6	47412
Inst30T1.1.J24	24	51	139	13	168	82.7	76492
Inst30T1.2.J24	24	49	135	13	168	101.8	82746
Inst30T1.3.J24	24	38	90	13	168	97.5	90426
Inst40T1.1.J24	24	57	152	13	168	91.2	79926
Inst40T1.2.J24	24	64	174	13	168	82.5	92259
Inst40T1.3.J24	24	57	157	13	168	94.8	68619
Inst50T1.1.J24	24	55	152	13	168	65.4	78441
Inst50T1.2.J24	24	70	197	13	168	114.0	76232
Inst50T1.3.J24	24	70	184	13	168	96.4	63936
Inst60T1.1.J24	24	81	216	13	168	90.4	87803
Inst60T1.2.J24	24	69	188	13	168	103.9	76132
Inst60T1.3.J24	24	81	232	13	168	100.6	90501
Inst70T1.1.J24	24	82	226	13	168	88.5	48650
Inst70T1.2.J24	24	94	254	13	168	109.8	90720
Inst70T1.3.J24	24	108	277	13	168	101.5	75588

3.4 Conclusões

Neste capítulo apresentou-se um novo problema de dimensionamento de lotes e escalonamento integrados em máquinas paralelas, baseado num problema real.

Uma característica que distingue este problema dos problemas da área abordados normalmente na literatura, é a integração das decisões de dimensionamento de lotes com as decisões de escalonamento, num único problema. Outra característica inovadora do problema é o objectivo orientado à minimização dos níveis de stock em curso de fabrico entre duas etapas sucessivas do processo produtivo.

A revisão da literatura relacionada com o problema de dimensionamento de lotes e escalonamento integrados em máquinas paralelas e com outros problemas relacionados, foi também apresentada neste capítulo.

Tendo por objectivo o teste e comparação dos vários modelos e métodos desenvolvidos no Capítulo 4, no Capítulo 5 e no Capítulo 6, desenvolveu-se um gerador de instâncias do problema, que foi também apresentado neste capítulo.

Capítulo 4

Método Exacto para o Problema de Dimensionamento de Lotes e Escalonamento Integrados em Máquinas Paralelas

O trabalho que se apresenta neste capítulo, no Capítulo 5 e no Capítulo 6 foi desenvolvido com o objectivo de apoiar as decisões de planeamento e escalonamento do trabalho na secção de tricotagem de uma empresa têxtil. O Capítulo 4 é dedicado a um método exacto para o problema de dimensionamento de lotes e escalonamento integrados em máquinas paralelas (DLEMP), apresentando-se na secção 4.1 um modelo de programação inteira mista (PIM) para o problema DLEMP. Na secção 4.2 apresentam-se resultados computacionais para o conjunto de instâncias apresentado no capítulo anterior. Na secção 4.3 sumariam-se as conclusões do capítulo.

Parte deste trabalho foi publicado em Pimentel et al. (2010c).

4.1 Modelo de Programação Inteira Mista

Nesta secção apresenta-se um modelo de PIM que permite resolver de forma exacta o problema de dimensionamento de lotes e escalonamento integrados em

máquinas paralelas, apresentado na secção 3.1. A base do modelo assenta na discretização do horizonte temporal num conjunto de macro-períodos e num conjunto de micro-períodos de duração variável. Cada macro-período corresponde a um dia do horizonte temporal e cada macro-período subdivide-se num conjunto de micro-períodos. O número de micro-períodos associados a cada macro-período é uma constante. Cada micro-período (também designado por *run*) corresponde a um lote de produção, sendo que apenas um componente pode ser produzido em cada micro-período.

Cada micro-período tem de ter associado obrigatoriamente um componente que pode ser real ou fictício. O componente fictício é introduzido no modelo por questões de modelação. Caso um componente real seja atribuído a um determinado micro-período, esse período passa a estar associado a um lote, correspondendo a duração desse micro-período à duração do lote. Caso um dado micro-período tenha associado o componente fictício, assume-se que nesse micro-período a máquina não está a produzir, embora esse micro-período possa ter uma duração positiva, a qual corresponde ao tempo durante o qual a máquina não está a produzir.

A duração dos macro-períodos pode ser diferente para cada máquina e dia. Deste modo permite-se que o tempo disponível em cada dia de trabalho e em cada máquina possa ser diferente e que parte do dia seja reservado por exemplo para a manutenção das máquinas. A duração de cada micro-período é uma variável que está associada ao tamanho do lote nele produzido. Na Figura 4.1 ilustra-se a representação do tempo no modelo de PIM, para dois macro-períodos e três micro-períodos.

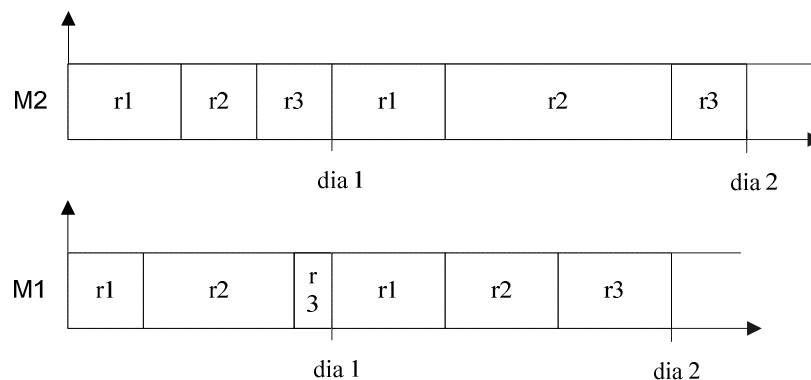


Figura 4.1 Representação do tempo no modelo de PIM

Como será detalhado posteriormente, é de salientar que a duração de cada micro-período é uma característica de uma solução e não do modelo, *i. e.*, a duração do micro-período é uma variável do modelo.

Tendo por base os objectivos de maior relevância no âmbito do problema real, a função objectivo do modelo é definida através da combinação pesada do atraso total dos produtos finais e dos desvios totais ocorridos na produção dos produtos finais. O atraso total dos produtos finais é igual ao máximo valor entre zero e a diferença entre o instante de conclusão do produto final e a sua data de entrega. O desvio total associado a um produto final é dado pela soma dos desvios entre o instante de conclusão desse produto final e os instantes de conclusão de todos os lotes de componentes associados a esse produto final. Por sua vez, o instante de conclusão do produto final corresponde ao maior instante de conclusão de todos os lotes de componentes associados a esse produto final. Embora no contexto do problema real o primeiro objectivo, associado ao cumprimento de prazos de entrega, seja prioritário, o segundo objectivo é também bastante importante para garantir um fluxo regular da produção. Uma vez que o processo produtivo que se segue à tricotagem, corresponde à junção de todos os componentes que pertencem ao mesmo produto final, idealmente todos eles deveriam terminar simultaneamente, evitando-se desse modo a criação de stocks intermédios.

As variáveis de decisão do modelo estão relacionadas com: (1) a quantidade a produzir de cada componente, em cada micro-período, em cada dia e em cada máquina, (2) o instante de conclusão de cada componente, em cada micro-período, em cada dia e em cada máquina, (3) o instante de conclusão de cada produto final, (4) o atraso de cada produto final, (5) uma variável binária que assume o valor 1 se um determinado componente for produzido num determinado micro-período, num determinado dia e numa determinada máquina, ou o valor 0 caso contrário, e (6) o desvio de cada componente, em cada micro-período, em cada dia e em cada máquina, relativamente ao produto final ao qual o componente está associado.

Existem vários conjuntos de restrições a considerar no modelo. O primeiro conjunto de restrições garante que a procura associada aos produtos finais é respeitada. No segundo conjunto de restrições, vulgarmente designado na literatura Anglo-Saxónica por *time matching constraints*, determinam-se os instantes de conclusão de

todos os micro-períodos e relacionam-se os instantes de conclusão entre dois micro-períodos consecutivos. Já no terceiro conjunto de restrições os instantes de conclusão de todos os produtos finais são determinados. O quarto conjunto de restrições estabelece os atrasos dos produtos finais. O quinto conjunto de restrições define os desvios entre lotes de componentes do mesmo produto final. No sexto conjunto garante-se que a cada micro-período tem de estar associado um e um só componente (real ou fictício). O sétimo conjunto relaciona as variáveis associadas às quantidades a produzir de cada componente, em cada micro-período, em cada dia e em cada máquina com as variáveis binárias que determinam se há produção ou não em cada micro-período, em cada dia e em cada máquina, garantindo que as primeiras apenas podem tomar valores positivos se as segundas forem iguais a um. O oitavo conjunto garante que em cada micro-período, em cada dia e em cada máquina apenas o componente (real ou fictício) atribuído a esse micro-período pode ter um instante de conclusão positivo. O oitavo conjunto de restrições garante ainda que os instantes de conclusão dos micro-períodos associados a um determinado dia numa determinada máquina respeitam o instante de paragem dessa máquina nesse dia. Por último, o nono conjunto de restrições garante que os instantes de início dos micro-períodos associados a um determinado dia e a uma determinada máquina respeitam o instante a partir do qual a máquina está disponível nesse dia.

No texto que se segue, o modelo de PIM para o problema DLEMP é formalmente apresentado. Considerem-se os seguintes conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão:

Conjuntos:

N – conjunto de produtos finais

J – conjunto de componentes (sendo que $j=0$ representa um componente fictício e os componentes reais são representados por $j=1, 2, \dots, |J|$)

M – conjunto de máquinas

K – conjunto de micro-períodos

I – conjunto de macro-períodos

$S(n)$ – conjunto de componentes que pertencem ao produto final n

Parâmetros:

D_n – procura do produto final n

r_m – data de disponibilidade da máquina m

a_j – tempo unitário de produção do componente j (onde $a_0=1$)

f_{jn} – número de unidades do componente j necessárias para obter uma unidade do produto final n ($j \in S(n)$)

d_n – data de entrega do produto final n

h_{mi} – instante a partir do qual a máquina m deixa de estar disponível no final do dia i

e_{mi} – instante a partir do qual a máquina m está disponível no dia i ($\forall i \in I: i \geq 2$)

b_{jm} – assume o valor 1 se o componente j puder ser processado na máquina m e assume o valor 0 caso contrário

k_{max} – número de micro-períodos associados a um dia

i_{max} – número de dias do horizonte temporal

M – constante de valor elevado

Parâmetros relacionados com a ponderação dos objectivos:

α_n – peso por unidade de tempo do desvio entre o instante de conclusão do produto final n e o instante de conclusão de cada lote dos seus componentes

β_n – peso do atraso do produto final n por unidade de tempo

Variáveis de Decisão:

X_{jmki} – quantidade a produzir do componente j durante o micro-período k do dia i na máquina m

T_{jmki} – instante de conclusão do componente j no micro-período k do dia i na máquina m

C_n – instante de conclusão do produto final n

L_n – atraso do produto final n

Z_{jmki} – assume o valor 1 se o componente j for produzido no micro-período k do dia i na máquina m e assume o valor 0 caso contrário

U_{jmki} – desvio do componente j no micro-período k do dia i na máquina m relativamente ao instante de conclusão do produto final $n : j \in S(n)$

O modelo de PIM para o problema DLEMP, baseado na divisão do tempo em macro e micro períodos é o que se apresenta de seguida.

$$\text{Min} \sum_{n \in N} \sum_{j \in J \setminus \{0\} \mid j \in S(n)} \sum_{m \in M \mid b_{jm} = 1} \sum_{k \in K \mid i \in I} \alpha_n U_{jmki} + \sum_{n \in N} \beta_n L_n \quad (\text{DLEMP})$$

Sujeito a:

$$\sum_{m \in M \mid b_{jm} = 1} \sum_{k \in K \mid i \in I} X_{jmki} = f_{jn} D_n, \quad \forall n \in N, \forall j \in J \setminus \{0\} \mid j \in S(n) \quad (4.1)$$

$$\sum_{j \in J \mid b_{jm} = 1} T_{jm11} \geq r_m + \sum_{j \in J \mid b_{jm} = 1} a_j X_{jm11} - h_{m1} (1 - \sum_{j \in J \mid b_{jm} = 1} Z_{jm11}), \quad \forall m \in M \quad (4.2)$$

$$\sum_{j \in J \mid b_{jm} = 1} T_{jmki} \geq \sum_{l \in J \mid b_{lm} = 1} T_{lm,k-1,i} + \sum_{j \in J \mid b_{jm} = 1} a_j X_{jmki} - h_{mi} (1 - \sum_{j \in J \mid b_{jm} = 1} Z_{jmki}) \quad (4.3)$$

$, \forall m \in M, k = 2, \dots, K_{\max}, \forall i \in I$

$$\sum_{j \in J \mid b_{jm} = 1} T_{jm1i} \geq \sum_{l \in J \mid b_{lm} = 1} T_{lm,k_{\max},i-1} + \sum_{j \in J \mid b_{jm} = 1} a_j X_{jm1i} - h_{mi} (1 - \sum_{j \in J \mid b_{jm} = 1} Z_{jm1i}) \quad (4.4)$$

$$, \forall m \in M, i \geq 2$$

$$C_n \geq T_{jmki}, \forall n \in N, \forall j \in J \setminus \{0\} \mid b_{jm} = 1 \text{ e } j \in S(n), \forall m \in M, \forall k \in K, \forall i \in I \quad (4.5)$$

$$L_n \geq C_n - d_n, \forall n \in N \quad (4.6)$$

$$U_{jmki} \geq (C_n - T_{jmki}) - h_{mi_{\max}} (1 - Z_{jmki}), \forall n \in N \quad (4.7)$$

$$, \forall j \in J \setminus \{0\} \mid b_{jm} = 1 \text{ e } j \in S(n), \forall m \in M, \forall k \in K, \forall i \in I$$

$$\sum_{j \in J \mid b_{jm}=1} Z_{jmki} = 1, \forall m \in M, \forall k \in K, \forall i \in I \quad (4.8)$$

$$X_{0mki} \leq MZ_{0mki}, \forall m \in M, \forall k \in K, \forall i \in I \quad (4.9)$$

$$X_{jmki} \leq f_{jn} D_n Z_{jmki} \quad (4.10)$$

$$, \forall n \in N, \forall j \in J \setminus \{0\} \mid b_{jm} = 1 \text{ e } j \in S(n), \forall m \in M, \forall k \in K, \forall i \in I$$

$$T_{jmki} \leq h_{mi} Z_{jmki}, \forall j \in J \mid b_{jm} = 1, \forall m \in M, \forall k \in K, \forall i \in I \quad (4.11)$$

$$\sum_{j \in J \mid b_{jm}=1} T_{jmli} - \sum_{j \in J \mid b_{jm}=1} a_j X_{jmli} \geq e_{mi}, \forall m \in M, i \geq 2 \quad (4.12)$$

$$X_{jmki}, T_{jmki}, C_n, L_n \text{ e } U_{jmki} \geq 0 \quad \forall n \in N, \forall j \in J, \forall m \in M, \forall k \in K, \forall i \in I \quad (4.13)$$

$$Z_{jmki} \in \{0, 1\}, \forall j \in J, \forall m \in M, \forall k \in K, \forall i \in I. \quad (4.14)$$

A função objectivo do modelo (*DLEMP*) minimiza o atraso total e os desvios totais ocorridos na elaboração dos produtos finais. Cada um destes termos tem associado um peso, que pode ser afinado de acordo com as prioridades atribuídas a cada um dos critérios. As restrições (4.1) representam as restrições de procura de componentes. Nestas restrições, tendo por base a procura dos produtos finais, a procura dos seus componentes é determinada. As quantidades a produzir de cada componente real (variáveis $X_{jmki} \mid j \in J \setminus \{0\}$) representam a quantidade associada a um lote que estará associado a um micro-período, a um dia e a uma máquina. Os lotes associados ao mesmo componente têm dimensão variável e podem estar a ser produzidos simultaneamente em mais de uma máquina, *i. e.*, estarem sobrepostos no tempo em máquinas diferentes. As restrições (4.2), (4.3) e (4.4) determinam o instante de

conclusão de cada componente (real ou fictício), em cada máquina, em cada micro-período e em cada dia e relacionam os instantes de conclusão dos componentes entre si ao longo do tempo. Cada micro-período tem de ter associado, obrigatoriamente, um e um só componente (real ou fictício). Através do conjunto de restrições (4.8) fica garantido que associado a cada micro-período, em cada dia e em cada máquina está apenas um e um só componente. As restrições (4.2), (4.3) e (4.4) conjugadas com o conjunto de restrições (4.11) garantem que os valores das variáveis T_{jmki} são correctamente determinados. Estas últimas garantem que em cada micro-período de um dia e de uma máquina apenas o componente que for atribuído a esse micro-período desse dia e dessa máquina pode ter um instante de conclusão positivo. No conjunto de restrições (4.5) determina-se o instante de conclusão de cada produto final, o qual corresponde ao maior instante de conclusão dos lotes de componentes associados a esse produto final. O conjunto de restrições (4.6) relaciona a data de entrega de um produto final com o seu instante de conclusão e atraso. O conjunto de restrições (4.7) está relacionado com o objectivo de minimizar os desvios ocorridos durante a produção dos produtos finais. Estas restrições determinam os valores das variáveis U_{jmki} que estão associadas ao desvio. O valor do desvio será igual a $C_n - T_{jmki}$ caso o componente j esteja atribuído à máquina m no micro-período k do dia i , *i.e.*, será igual à diferença entre o instante de conclusão do produto final ao qual esse lote está associado e o instante de conclusão desse lote. Se o componente j não estiver atribuído à máquina m no micro-período k do dia i , o valor da variável U_{jmki} fica livre, mas como a variável U_{jmki} é minimizada na função objectivo o seu valor será “puxado” a zero, garantindo-se deste modo que não há incremento no valor do desvio. As restrições dos conjuntos (4.9) e (4.10) relacionam a quantidade a produzir de um determinado componente, numa determinada máquina, micro-período e dia (variáveis X_{jmki}) com as variáveis Z_{jmki} , forçando X_{jmki} a tomar o valor zero caso a correspondente variável Z_{jmki} seja igual a zero. As restrições do conjunto (4.9) estão relacionadas com o componente fictício e as restrições do conjunto (4.10) estão relacionadas com os componentes reais. O conjunto de restrições (4.11) garante que a variável T_{jmki} , apenas toma valor positivo se a variável Z_{jmki} correspondente tomar o valor um. Adicionalmente estas restrições estabelecem que os componentes associados à máquina m e ao dia i têm de terminar até ao instante de paragem da máquina m no final do dia i . O conjunto de restrições (4.12) garante que o

instante de início do componente associado ao primeiro micro-período do dia i na máquina m é superior ou igual ao instante a partir do qual a máquina m está disponível no dia i . O conjunto de restrições (4.13) impõe as condições de não-negatividade das variáveis contínuas positivas e as restrições (4.14) forçam as variáveis Z_{jmki} a tomarem valores binários.

O modelo (DLEMP) é constituído por $2 \times N + 4 \times J \times M \times K \times I + 3 \times M \times K \times I$ variáveis. O número de restrições varia com o problema, de acordo com a matriz de compatibilidades entre os componentes e as máquinas. No caso de não existirem incompatibilidades o número de restrições é igual a $N + (J-1) + 2(J-1)MKI + 2JMKI + 2MKI + M(I-1)$.

Numa solução para o modelo acima apresentado são determinados os instantes de conclusão dos lotes de componentes. Os instantes de início dos mesmos podem determinar-se facilmente a partir dessa solução. Note-se que o modelo (DLEMP) permite a existência de tempo de inactividade entre dois micro-períodos consecutivos associados à mesma máquina. Esse tempo de inactividade pode ser determinado fazendo a diferença entre o instante de conclusão do micro-período sucessor e o instante de conclusão do micro-período predecessor, corrigida da duração do lote associado ao micro-período sucessor. Existirá tempo de inactividade se esta diferença tomar valor positivo. Por outro lado, nos micro-períodos que estejam associados ao componente fictício, o tempo de inactividade corresponderá à dimensão do “lote” fictício (valor da variável X_{0mki}).

Para terminar a secção 4.1, apresenta-se na Figura 4.2 a título de exemplo, uma solução admissível (representada através de um mapa de Gantt) para um problema com 5 produtos finais (CM1, CM2, CM3, CS1 e CS2), 13 componentes e cinco máquinas (com datas de disponibilidade iguais a 0, 1, 0, 1 e 2, por ordem crescente do número de máquinas, respectivamente). Note-se que nesta solução todos os componentes pertencentes ao mesmo produto final terminam no mesmo instante de tempo.

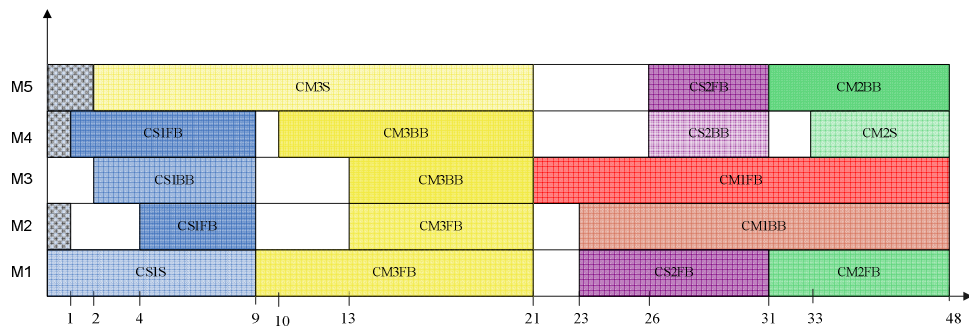


Figura 4.2 Exemplo de solução admissível para o problema DLEMP

4.2 Resultados Computacionais

O modelo (*DLEMP*) foi implementado em C++, usando o ambiente de desenvolvimento Microsoft Visual Studio 2008 e a Callable Library da versão 11.0 do CPLEX (ILOG, 2007). O processo de resolução termina caso o tempo limite de resolução de 4 horas seja atingido ou caso o desvio relativo, que mede a diferença relativa entre o valor da melhor solução inteira e o melhor limite dos nodos por pesquisar, seja menor ou igual a 1%. Os testes computacionais foram realizados num computador pessoal com um processador Core 2Duo a 2 Ghz e com 2 GB de memória.

Na fase de teste do modelo (*DLEMP*) assumiu-se que as máquinas estão disponíveis ao longo de todo o horizonte temporal, a partir da sua data de disponibilidade. Desta forma, o índice associado ao macro-período (ou dia) deixa de ser necessário e o número de micro-períodos passa a estar associado à máquina e não ao macro-período, pelo que o parâmetro K_{max} passa a designar o número de micro-períodos associados a uma máquina. Os parâmetros h_{mi} e e_{mi} deixam também de existir. Os conjuntos de restrições (4.4) e (4.12) desaparecem e o parâmetro h_{mi} , que está associado aos conjuntos de restrições (4.2), (4.3), (4.7) e (4.11) toma o valor do horizonte temporal.

Nos testes computacionais atribuiu-se o valor 1 ao parâmetro α_n (peso por unidade de tempo do desvio entre o instante de conclusão do produto final n e o instante de conclusão de cada lote dos seus componentes), o valor 1000 ao parâmetro β_n (peso do atraso do produto final n por unidade de tempo) e o valor 10000 a M (constante de valor elevado). k_{max} , que representa o número de micro-períodos associados a uma máquina é determinado através da seguinte expressão: $\left\lceil \frac{\text{Número de componentes}}{\text{Número de máquinas}} \right\rceil \times 2$.

O factor 2 usado na expressão que determina o valor de k_{max} foi definido após alguns testes preliminares. O parâmetro k_{max} é central no modelo. Note-se que quanto maior for o valor deste parâmetro mais preciso é o modelo, mas também se torna mais difícil resolvê-lo.

A solução óptima da relaxação linear do modelo (*DLEMP*) é igual a zero para todas as instâncias testadas. Quando se relaxa a condição das variáveis binárias Z_{jmki} , terem de ser binárias, passando estas a poder assumir valores contínuos positivos, cada micro-período passa a poder ter associados vários componentes. Através dos conjuntos de restrições (4.2), (4.3) e (4.4) garante-se que o somatório dos instantes de conclusão dos componentes produzidos no micro-período k têm de ser superiores ou iguais aos instantes de conclusão dos componentes associados ao micro-período $k-1$, corrigidos da carga produtiva no micro-período k . Para garantir que não há atrasos nem desvios o modelo privilegia o componente fictício, associando o instante de conclusão do micro-período a esse componente, mesmo que a carga produtiva desse micro-período esteja associada a componentes reais.

É de salientar que a solução óptima inteira do problema DLEMP pode ser igual a zero, em particular, para instâncias com pouca carga.

Na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2 apresentam-se os resultados computacionais das 54 instâncias, resolvidas através do modelo (*DLEMP*). Nas colunas 2 a 4 da Tabela 4.1 apresentam-se alguns parâmetros dos modelos (número de micro-períodos, número de variáveis e número de restrições). Na coluna 5 da Tabela 4.2 apresenta-se a percentagem média de utilização das máquinas. A percentagem de utilização de uma dada máquina m é dada por:

$$\frac{\text{Tempo total de ocupação da máquina } m}{\text{Horizonte temporal} - \text{Data de disponibilidade da máquina } m} \times 100.$$

Note-se que as percentagens médias de utilização das máquinas podem diferir ligeiramente dos valores de medida da carga total sobre a capacidade total, apresentados na Tabela 3.1, por se tratar de percentagens médias. Nas restantes colunas de ambas as tabelas apresentam-se as medidas de desempenho consideradas (número de nodos pesquisados, número de nodos por pesquisar, tempo total de resolução, valor da função objectivo, atraso total dos produtos finais, número de produtos finais com atraso, desvio total dos produtos finais, número de lotes, número médio de lotes por componente e desvio médio por produto final). O símbolo ‘*’ apresentado na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2 significa que até ter sido atingido o tempo limite de resolução de 4 horas, não foi encontrada nenhuma solução inteira admissível.

Analisando os tempos de resolução das instâncias, verifica-se que apenas uma instância (Inst20T1.1.J21) é resolvida até à optimalidade, e que existe uma instância para a qual não é encontrada nenhuma solução inteira admissível (Inst70T1.3.J24).

A instância Inst70T1.3.J24 será excluída da análise dos resultados computacionais pelo facto de não ser conhecida uma solução inteira admissível para esta instância.

Pela análise da Tabela 4.1 e da Tabela 4.2 constata-se que existe uma grande percentagem de instâncias, cerca de 42.6%, para as quais a solução incumbente pertence à raiz da árvore de pesquisa. Nessas instâncias, quando o tempo limite de resolução foi atingido o Cplex encontrava-se ainda a resolver a raiz da árvore de pesquisa. Analisando o número de restrições do problema verifica-se, como seria de esperar, que à medida que este parâmetro cresce, diminui o número de nodos pesquisados. Para valores de número de restrições superiores a 100000 geralmente apenas parte da raiz da árvore de pesquisa é resolvida.

Tabela 4.1 Resultados computacionais do modelo (DLEMP) – soluções inteiras

Instância	Número de runs	Número de variáveis	Número de restrições	Número de nodos pesquisados	Número de nodos por pesquisar	Tempo total de resolução (segundos)	Valor da função objectivo
	Inst20T1.1.J21	8	2664	2714	4040	0	523.3	5599.1
Inst20T1.2.J21	10	4448	4514	27385	13103	14400.1	3580.9
Inst20T1.3.J21	8	2442	2490	127785	99960	14400.8	40100.0
Inst30T1.1.J21	20	18496	18628	2198	1684	14400.2	81506.1
Inst30T1.2.J21	24	22960	23116	2220	1656	14400.3	6467.6
Inst30T1.3.J21	24	25936	26096	2487	1952	14400.2	50650.9
Inst40T1.1.J21	24	24208	24366	744	278	14400.2	1717.9
Inst40T1.2.J21	28	34740	34925	507	508	14400.1	136110.0
Inst40T1.3.J21	30	37944	38141	545	110	14400.4	19909.1
Inst50T1.1.J21	30	39748	39943	76	77	14400.3	3267.7
Inst50T1.2.J21	30	36990	37184	340	341	14400.2	389775.0
Inst50T1.3.J21	40	68826	69092	235	236	14400.3	47967.3
Inst60T1.1.J21	28	34744	34928	529	30	14400.2	2260.1
Inst60T1.2.J21	32	40988	41195	951	391	14400.3	62273.9
Inst60T1.3.J21	32	43034	43242	230	231	14400.4	185778.0
Inst70T1.1.J21	36	56184	56424	180	181	14400.3	339375.0
Inst70T1.2.J21	34	48856	49076	367	368	14400.3	2985.3
Inst70T1.3.J21	48	97950	98267	90	91	14400.8	603702.0
Inst20T1.1.J27	18	64808	65064	101	102	14400.8	41320.2
Inst20T1.2.J27	16	56464	56692	245	246	14422.8	556582.0
Inst20T1.3.J27	16	55754	55985	237	238	14400.5	164883.0
Inst30T1.1.J27	20	89142	89428	20	21	14400.3	5537.9
Inst30T1.2.J27	20	86256	86541	23	24	14400.3	799765.0
Inst30T1.3.J27	24	126160	126508	0	1	14400.6	859570.0
Inst40T1.1.J27	26	153012	153387	0	1	14400.9	1540150.0
Inst40T1.2.J27	22	101658	101970	6	7	14400.3	1438230.0
Inst40T1.3.J27	24	126358	126700	6	7	14400.4	1222790.0
Inst50T1.1.J27	22	110460	110779	10	11	14400.5	542737.0
Inst50T1.2.J27	32	229922	230383	0	1	14401.0	975775.0
Inst50T1.3.J27	28	175764	176166	0	1	14400.6	1054000.0
Inst60T1.1.J27	36	293794	294316	0	1	14401.0	1748390.0
Inst60T1.2.J27	40	348832	349406	0	1	14402.1	2045010.0
Inst60T1.3.J27	34	257344	257832	0	1	14401.7	1580390.0
Inst70T1.1.J27	34	253814	254300	0	1	14401.0	2939070.0
Inst70T1.2.J27	42	381732	382334	0	1	14401.6	3041720.0
Inst70T1.3.J27	34	260200	260694	0	1	14400.9	2698370.0
Inst20T1.1.J24	16	74036	74304	70	71	14400.4	635666.0
Inst20T1.2.J24	18	95240	95545	16	17	14400.4	662991.0
Inst20T1.3.J24	16	77428	77700	32	33	14400.3	723954.0
Inst30T1.1.J24	22	149416	149790	0	1	14400.4	1022810.0
Inst30T1.2.J24	22	145892	146264	0	1	14400.4	1734310.0
Inst30T1.3.J24	14	63286	63520	78	79	14400.4	684895.0
Inst40T1.1.J24	24	181050	181457	0	1	14400.6	1105300.0
Inst40T1.2.J24	28	240004	240478	0	1	14400.9	742746.0
Inst40T1.3.J24	26	201016	201454	5	6	14413.3	1246820.0
Inst50T1.1.J24	24	180470	180879	0	1	14401.1	390845.0
Inst50T1.2.J24	32	312172	312715	0	1	14401.1	3545170.0
Inst50T1.3.J24	30	270230	270734	0	1	14401.0	1787780.0
Inst60T1.1.J24	34	360256	360833	0	1	14401.1	1436580.0
Inst60T1.2.J24	30	278028	278537	0	1	14401.4	1435070.0
Inst60T1.3.J24	36	415278	415897	0	1	14402.8	6139240.0
Inst70T1.1.J24	36	401312	401924	0	1	14401.4	2444480.0
Inst70T1.2.J24	40	500788	501468	0	1	14401.5	4942620.0
Inst70T1.3.J24	44	599628	600369	0	1	14402.1	*

Tabela 4.2 Resultados Computacionais do modelo (DLEMP) – soluções inteiras (continuação)

Instância	Atraso total dos produtos finais	Número de produtos finais	Desvio total	Porcentagem média de utilização das máquinas	Número de lotes	Número médio de lotes por componente	Desvio médio por produto final
	(horas)	com atraso	(horas)				
Inst20T1.1.J21	5.60	1	0.00	46.5	18	1.00	0.00
Inst20T1.2.J21	3.38	1	203.95	102.1	34	1.36	22.66
Inst20T1.3.J21	40.09	1	12.33	80.7	27	1.59	1.37
Inst30T1.1.J21	79.78	2	1728.47	103.8	68	1.36	96.03
Inst30T1.2.J21	4.16	1	2309.38	68.5	64	1.14	115.47
Inst30T1.3.J21	48.24	3	2414.27	92.7	74	1.23	120.71
Inst40T1.1.J21	0.00	0	1717.93	99.4	66	1.14	85.90
Inst40T1.2.J21	132.95	4	3157.48	102.0	81	1.17	131.56
Inst40T1.3.J21	15.13	2	4783.45	79.2	83	1.12	177.16
Inst50T1.1.J21	0.00	0	3267.74	87.6	85	1.15	112.68
Inst50T1.2.J21	384.29	12	5485.07	104.5	81	1.09	182.84
Inst50T1.3.J21	43.19	3	4775.98	86.3	112	1.13	144.73
Inst60T1.1.J21	0.00	0	2260.09	98.0	83	1.19	86.93
Inst60T1.2.J21	60.48	3	1798.63	66.3	89	1.16	59.95
Inst60T1.3.J21	178.50	7	7277.94	96.0	87	1.13	250.96
Inst70T1.1.J21	333.21	13	6162.11	59.2	98	1.09	205.40
Inst70T1.2.J21	0.00	0	2985.33	60.1	94	1.13	90.46
Inst70T1.3.J21	593.98	18	9721.26	79.3	122	1.05	249.26
Inst20T1.1.J27	35.08	4	6241.13	88.1	108	1.21	201.33
Inst20T1.2.J27	550.00	15	6579.36	89.2	109	1.30	205.61
Inst20T1.3.J27	158.67	9	6217.12	63.9	97	1.15	214.38
Inst30T1.1.J27	0.00	0	5537.91	81.8	128	1.20	135.07
Inst30T1.2.J27	790.62	14	9141.64	105.7	116	1.13	240.57
Inst30T1.3.J27	848.23	18	11336.70	95.6	141	1.10	257.65
Inst40T1.1.J27	1530.48	26	9669.09	95.8	148	1.04	182.44
Inst40T1.2.J27	1428.62	27	9611.36	95.4	122	1.09	228.84
Inst40T1.3.J27	1216.95	23	5846.74	75.9	130	1.04	124.40
Inst50T1.1.J27	531.40	13	11333.90	99.6	133	1.11	263.58
Inst50T1.2.J27	964.10	24	11673.10	103.4	185	1.06	179.59
Inst50T1.3.J27	1045.36	26	8637.53	83.7	160	1.04	143.96
Inst60T1.1.J27	1728.82	36	19563.40	99.8	204	1.04	275.54
Inst60T1.2.J27	2034.27	42	10742.10	80.2	215	1.02	141.34
Inst60T1.3.J27	1564.03	38	16363.10	96.9	193	1.07	244.23
Inst70T1.1.J27	2928.44	50	10627.60	97.5	183	1.01	151.82
Inst70T1.2.J27	3030.01	53	11713.00	98.5	229	1.04	144.60
Inst70T1.3.J27	2687.57	47	10794.20	91.2	189	1.01	161.11
Inst20T1.1.J24	624.60	10	11071.00	95.6	111	1.18	325.62
Inst20T1.2.J24	653.80	15	9195.18	91.8	128	1.19	248.52
Inst20T1.3.J24	714.32	18	9631.28	96.5	111	1.13	283.27
Inst30T1.1.J24	1011.13	26	11677.50	82.9	150	1.08	228.97
Inst30T1.2.J24	1720.32	30	13994.00	101.8	146	1.08	285.59
Inst30T1.3.J24	677.08	15	7813.36	97.4	113	1.26	205.61
Inst40T1.1.J24	1092.47	24	12829.10	91.2	169	1.11	225.07
Inst40T1.2.J24	728.86	21	13886.20	82.5	192	1.10	216.97
Inst40T1.3.J24	1230.00	24	16827.50	94.7	175	1.11	295.22
Inst50T1.1.J24	381.83	12	9012.80	65.4	168	1.11	163.87
Inst50T1.2.J24	3524.48	56	20686.30	113.9	208	1.06	295.52
Inst50T1.3.J24	1771.87	32	15904.50	96.3	195	1.06	227.21
Inst60T1.1.J24	1424.73	34	11845.00	90.7	221	1.02	146.23
Inst60T1.2.J24	1416.57	37	18504.10	103.9	198	1.05	268.18
Inst60T1.3.J24	6117.43	57	21809.10	100.7	235	1.01	269.25
Inst70T1.1.J24	2431.98	46	12495.80	88.7	229	1.01	152.39
Inst70T1.2.J24	4924.50	61	18122.70	110.0	258	1.02	192.79
Inst70T1.3.J24	*	*	*	*	*	*	*

Tendo por base os resultados obtidos, pode-se concluir que é muito difícil obter soluções ótimas inteiras para as instâncias baseadas na situação real, através do modelo (DLEMP) e da sua resolução exacta. Ainda em relação ao número de nodos

pesquisados, pode-se concluir que existe uma relação inversa entre a dimensão do problema, medida em termos do número de componentes e do número de máquinas, e o número de nodos pesquisados.

O atraso total dos produtos finais é bastante elevado, sendo o seu valor médio igual a cerca de 1046 horas. Estes valores poderão em certa medida ser explicados pelo facto de as datas de entrega dos produtos finais, assim como as quantidades requeridas dos seus componentes, serem geradas aleatoriamente, o que pode levar a que em algumas instâncias não seja possível produzir as quantidades totais requeridas de alguns produtos finais sem ocorrerem atrasos, mesmo que todas as máquinas compatíveis fossem atribuídas a esses produtos finais, como acontece por exemplo na instância Inst20T1.1.J21.

Tal como se pode verificar pela análise da Figura 4.3 parece existir uma tendência crescente, ainda que ligeira, entre o aumento da percentagem média de utilização das máquinas e o atraso total dos produtos finais.

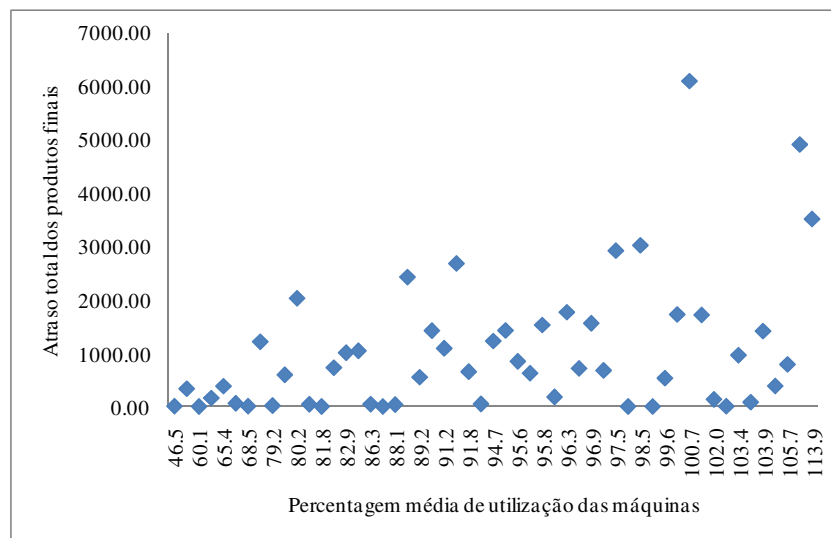


Figura 4.3 Comportamento do atraso total dos produtos finais face ao aumento da percentagem média de utilização das máquinas – modelo de PIM

O atraso total dos produtos finais tende a crescer exponencialmente com o aumento do número de componentes (ver Figura 4.4). Em relação ao desvio total dos

produtos finais já é visível uma forte associação linear positiva entre este indicador e o número de componentes (ver Figura 4.5).

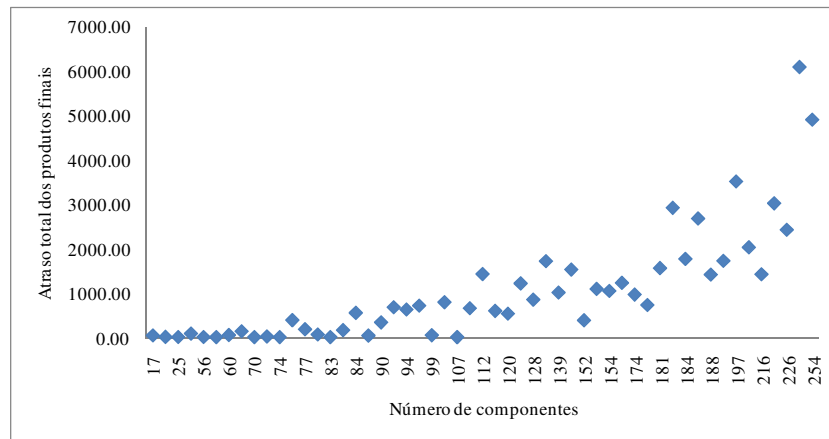


Figura 4.4 Comportamento do atraso total dos produtos finais face ao aumento do número de componentes – modelo de PIM

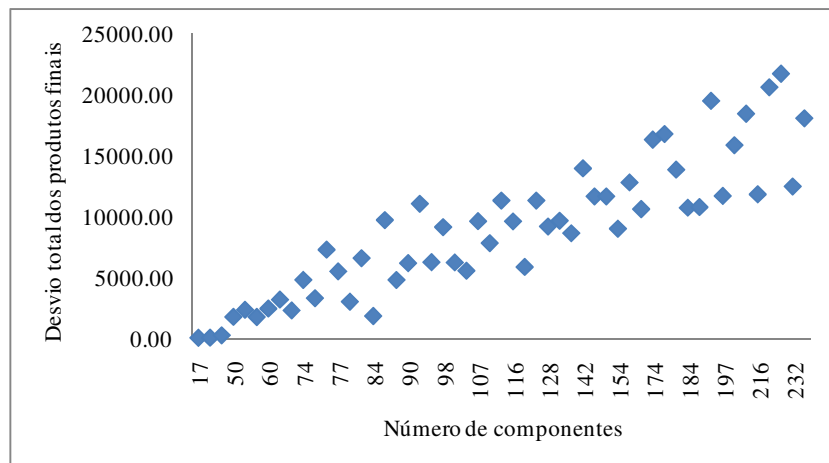


Figura 4.5 Comportamento do desvio total dos produtos finais face ao aumento do número de componentes – modelo de PIM

O desvio médio total dos produtos finais das soluções encontradas é também bastante elevado, sendo o seu valor igual a cerca de 9000 horas. Na Figura 4.6 apresenta-se o comportamento do desvio total dos produtos finais face ao aumento da

percentagem média de utilização das máquinas. Nesse comportamento verifica-se um incremento na amplitude de variação do desvio total face ao aumento da percentagem média de utilização das máquinas.

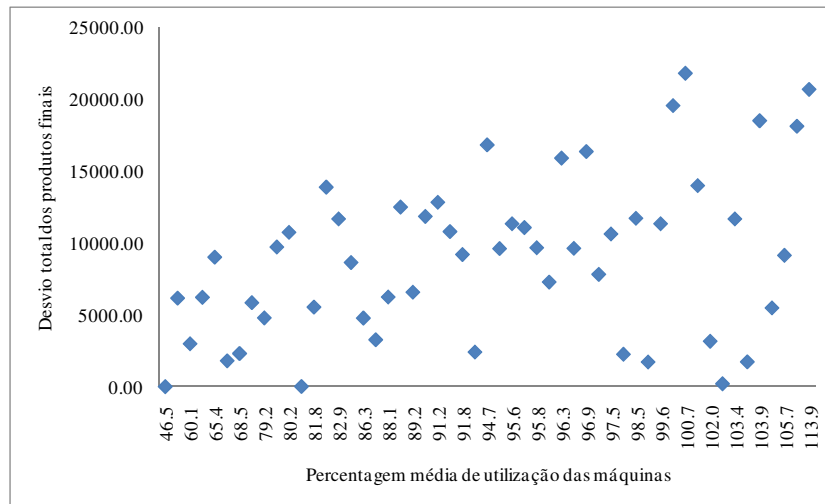


Figura 4.6 Comportamento do desvio total dos produtos finais face ao aumento da percentagem média de utilização das máquinas – modelo de PIM

Existem indícios de uma forte associação linear entre o desvio total dos produtos finais de uma solução e o número de lotes dessa solução, como se pode analisar na Figura 4.7. Em relação ao atraso total dos produtos finais e número de lotes identifica-se uma tendência crescente, como se pode verificar na Figura 4.8.

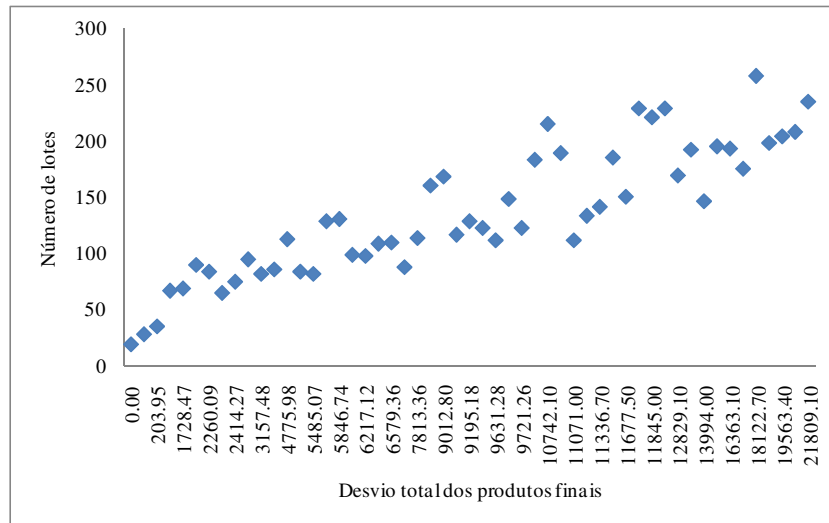


Figura 4.7 Comportamento do número de lotes face ao aumento do desvio total dos produtos finais – modelo de PIM

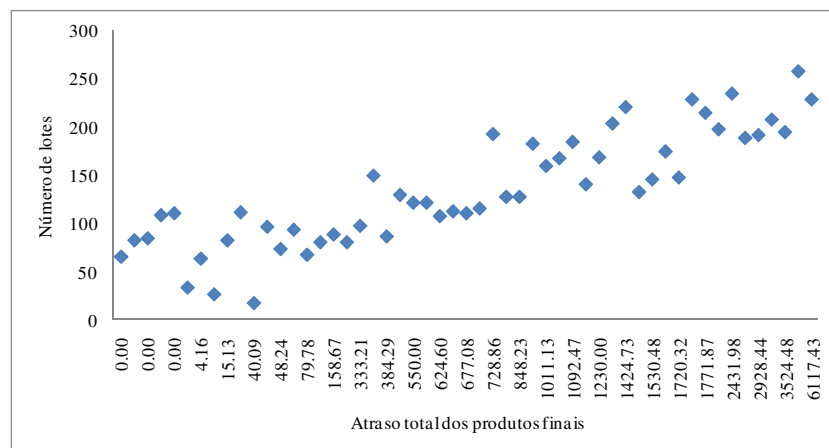


Figura 4.8 Comportamento do número de lotes face ao aumento do atraso total dos produtos finais – modelo de PIM

Na Figura 4.9 apresenta-se o comportamento do atraso total dos produtos finais face ao crescimento do desvio total dos produtos finais. Neste caso identificam-se variações significativas nos valores máximos das variáveis. Verifica-se ainda que para valores de desvio total dos produtos finais inferiores a cerca de 5000 os atrasos totais dos produtos finais são muito baixos.

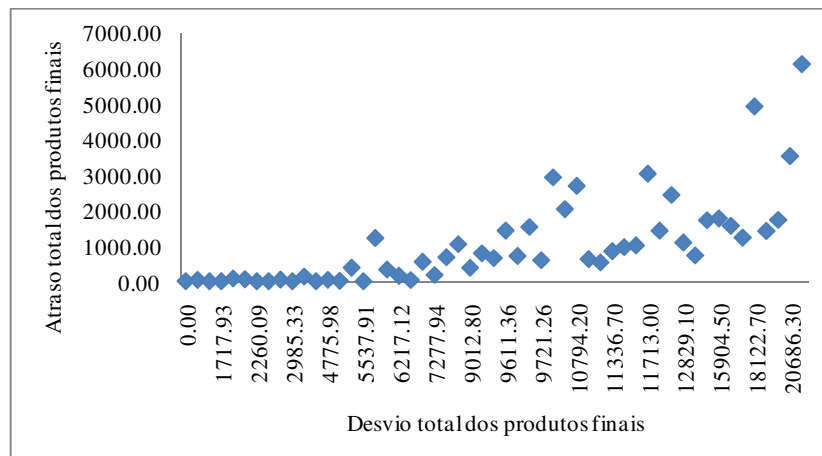


Figura 4.9 Comportamento do atraso total dos produtos finais face ao aumento do desvio total dos produtos finais – modelo de PIM

4.3 Conclusões

Neste capítulo foi apresentado um modelo de PIM para o problema DLEMP, que integra as decisões de dimensionamento de lotes com as decisões de escalonamento desses lotes. Uma característica inovadora do MIP é a modelação de desvios entre instantes de conclusão de lotes de componentes pertencentes ao mesmo produto final, com o intuito de garantir que a produção de todos os lotes relacionados termina o mais próximo possível entre si.

A integração do dimensionamento de lotes com o escalonamento de lotes neste tipo de problemas é um desafio, dado tratar-se de problemas complexos de grande dimensão. A modelação do problema integrado acarreta a consideração de um maior número de variáveis e de restrições. Para além disso a inclusão do objectivo de minimizar os desvios ocorridos na produção dos produtos finais, tornou a modelação do problema ainda mais complexa.

O modelo de PIM mostrou não ser computacionalmente eficiente na determinação de soluções óptimas para instâncias de elevada dimensão, como é o caso

das instâncias do problema real. Para além do elevado número de variáveis binárias e de restrições do modelo, a existência de restrições de grande-M no modelo (por exemplo para modelar as restrições relacionadas com as variáveis temporais) faz com que a qualidade dos limites inferiores dados pela relaxação linear não seja muito boa (Maravelias e Grossmann, 2003, Maravelias e Grossmann, 2004). Para além disso, a simetria do modelo (usual em problemas de máquinas paralelas), torna a partição (no contexto do método de partição e avaliação) menos efectiva.

Para resolver instâncias com dimensão equivalente ou superior à dimensão do problema real, propõem-se vários métodos heurísticos, que se apresentam no Capítulo 5 e no Capítulo 6. É de realçar que nas duas instâncias de menor dimensão o MIP chegou a melhores resultados que as duas heurísticas dedicadas que serão apresentadas no capítulo seguinte.

Capítulo 5

Heurísticas Dedicadas para o Problema de Dimensionamento de Lotes e Escalonamento Integrados em Máquinas Paralelas

Neste capítulo apresentam-se dois métodos heurísticos alternativos para o problema de dimensionamento de lotes e escalonamento integrados em máquinas paralelas (DLEMP), já detalhadamente apresentado no Capítulo 3, que têm como objectivo a obtenção de soluções de alguma qualidade em pouco tempo. Na secção 5.1 apresenta-se um método baseado num modelo de fluxos em rede e numa heurística de escalonamento e na secção 5.2 uma heurística construtiva. A secção 5.3 é dedicada às principais conclusões do capítulo.

Parte do trabalho descrito neste capítulo foi publicado em Pimentel et al. (2010c) e Pimentel et al. (2010d).

5.1 Heurística de Fluxos em Rede e Escalonamento

A primeira heurística dedicada baseia-se na combinação de modelos de fluxos em rede com uma heurística de escalonamento. As origens dos modelos de fluxos em rede representam os componentes a produzir e os destinos estão associados a intervalos

de tempo numa máquina. O fluxo nos arcos representa o tempo de produção que o componente associado à origem consome no intervalo de tempo e máquina associados ao destino. Cada valor de fluxo positivo define um lote de produção. A solução do problema consiste na determinação da dimensão temporal dos lotes a produzir, sendo necessário transformar essa solução num escalonamento válido. Note-se que um intervalo de uma determinada máquina pode ter associados vários lotes de componentes com fluxo positivo. Para determinar os instantes de início e de conclusão de cada um desses lotes utiliza-se uma heurística simples.

Na heurística de fluxos em rede e escalonamento o problema DLEMP é resolvido a duas etapas. Em ambas as etapas aplica-se um modelo de fluxos em rede e uma heurística de escalonamento. A primeira etapa tem como saída um plano de produção parcial onde apenas é considerado um subconjunto dos componentes a produzir. O plano da segunda etapa corresponde ao plano de produção final.

A resolução do problema é feita em duas etapas por causa do objectivo (do problema DLEMP) de se minimizarem os desvios entre os instantes de conclusão de lotes relacionados. Na etapa 1 é considerado um componente de cada produto final. No final da etapa 1 (já com um plano de produção parcial definido) o maior instante de conclusão de cada componente é retido e será usado na etapa 2 para definir as datas de entrega dos componentes considerados na etapa 2, que estão relacionados com cada componente considerado na etapa 1. Caso o problema fosse resolvido numa única etapa, não haveria forma de considerar no modelo de fluxos em rede o objectivo de minimizar os desvios entre lotes relacionados. Na Etapa 2 este ponto será explorado com maior detalhe. De seguida são apresentadas as duas etapas.

5.1.1 Etapa 1

Nesta subsecção apresenta-se o modelo de fluxos em rede da Etapa 1 e uma heurística de escalonamento, que converte a solução de fluxos num plano de produção admissível.

Modelo de Fluxos em rede

O modelo de fluxos em rede da Etapa 1 considera, como atrás referido, apenas um componente de cada produto final, sendo dada preferência ao componente com maior tempo de processamento.

A rede é definida num grafo bipartido, estando os nodos de origem associados a componentes a produzir e os nodos de destino associados a intervalos de tempo e máquinas. A oferta em cada origem corresponde ao tempo total de processamento do componente a ela associado e a procura em cada destino corresponde à duração do intervalo na máquina. Os intervalos de tempo associados aos destinos são definidos com base nas datas de disponibilidade das máquinas, nas datas de entrega dos componentes considerados nas origens e no horizonte temporal.

Para uma dada instância do problema DLEMP sejam r_1, \dots, r_m as datas de disponibilidade das máquinas, d_1, \dots, d_j as datas de entrega dos componentes e ht o valor do horizonte temporal. Ordenando por ordem crescente estes parâmetros obtém-se uma sequência de instantes de tempo I_1, \dots, I_t (onde $t = ht$), sendo os intervalos de tempo definidos por $[I_k, I_{k+1}]$, para $k=1, \dots, t$. Para além destes intervalos de tempo, considera-se um último intervalo de tempo definido por $[I_t, I_{2 \times t}]$, para permitir agendar componentes para além do horizonte temporal, caso seja necessário. No exemplo seguinte ilustra-se a definição dos intervalos de tempo.

Exemplo 5.1

Considere-se uma instância do problema DLEMP com cinco produtos finais, cujos componentes associados devem ser atribuídos e escalonados em lotes num conjunto de cinco máquinas durante as próximas 48 horas. Os dados apresentam-se na Tabela 5.1 e na Tabela 5.2.

Tabela 5.1 Dados do Exemplo 5.1

Produto Final	Data de entrega (horas)	Componente	Máquinas compatíveis	Tempo total de processamento (horas)
CM1	24	CM1F	1,2,3,4,5	25
		CM1C	1,2,3,4,5	25
CM2	48	CM2F	1,4,5	33.33
		CM2C	1,4,5	33.33
CM3	24	CM3F	1,2,3,4	8.33
		CM3C	1,2,3,4	8.33
		CM3M	1,2,3,4,5	16.67
CS1	24	CS1F	1,3,4	3.33
		CS1C	1,3,4	3.33
		CS1M	1,2,3,4,5	6.66
CS2	48	CS2F	1,2,3,4,5	5
		CS2C	1,2,3,4,5	5
		CS2M	1,2,3,4,5	10

Tabela 5.2 Datas de disponibilidade das máquinas

Máquina	Data de disponibilidade (horas)
1	0
2	1
3	0
4	1
5	2

Os componentes que definem as origens da rede são o CM1F, o CM2F, o CM3M, o CS1M e o CS2M (os componentes com maior duração total). Na Figura 5.1, apresentam-se os intervalos de tempo, considerando as datas de disponibilidade das máquinas presentes na Tabela 5.2, as datas de entrega dos componentes associados às origens e o horizonte temporal. O número total de destinos é igual a 16. Os destinos associados à máquina 1 são o I1M1 (primeiro intervalo, primeira máquina), o I2M1, o I3M1 e o I4M1. Associados à máquina 2 estão os destinos I2M2, I3M2 e I4M2. Os destinos associados à máquina 3 são iguais aos destinos da máquina 1, e os destinos da máquina 4 são iguais aos destinos da máquina 2, alterando os índices das máquinas respectivas. A máquina 5 tem associados apenas dois destinos: o destino I3M5 e o

destino I4M5. A procura de cada destino corresponde à duração do intervalo de tempo que lhe está associado. Por exemplo, a procura do intervalo I3M1 é igual a 22 horas.

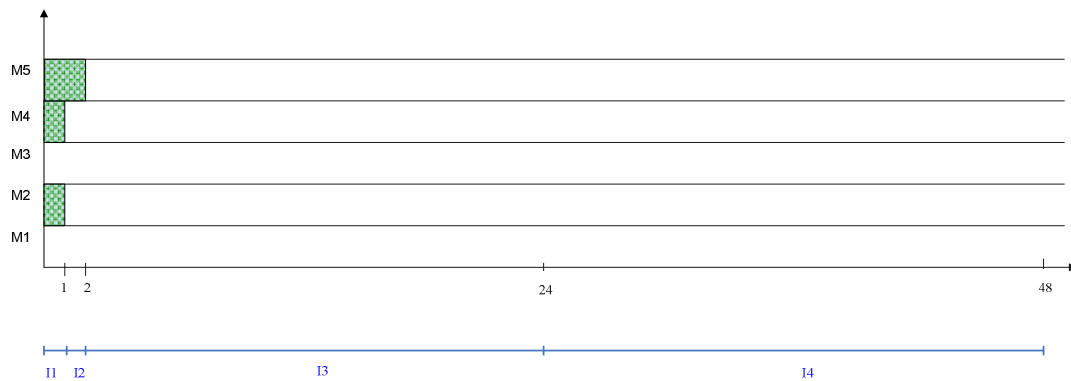


Figura 5.1 Intervalos de tempo do Exemplo 5.1

■

Entre cada origem do modelo de fluxos em rede e cada destino existe um arco se o componente associado à origem puder ser produzido no intervalo de tempo e na máquina associados ao destino. O fluxo em cada arco representa o tempo de processamento do componente no intervalo de tempo e máquina correspondente.

Cada intervalo de tempo tem de ter uma máquina associada pelo facto de existir uma matriz de compatibilidade entre componentes e máquinas. Caso todos os componentes pudessem ser produzidos em qualquer uma das máquinas disponíveis, esta associação não seria necessária e a procura de cada intervalo de tempo seria o produto da duração do intervalo de tempo pelo número de máquinas disponíveis nesse intervalo de tempo.

Se no modelo de fluxos em rede não se considerar a associação entre os intervalos de tempo e as máquinas, ao transformar a solução de fluxos, obtida resolvendo o modelo de fluxos em rede acima apresentado, numa solução de escalonamento, dependendo da ordem segundo a qual os componentes vão sendo seleccionados, a solução de escalonamento pode-se tornar impossível. Esta situação pode ocorrer caso o intervalo de tempo na máquina onde um determinado componente

em análise deveria ser produzido tenha sido entretanto ocupado por um ou mais componentes já escalonados. Esta situação é ilustrada através do Exemplo 5.2.

Exemplo 5.2

Considere-se um problema com duas máquinas nas quais se pretende escalonar os componentes CA1 e CA2. O componente CA2 pode ser processado em ambas as máquinas, mas o componente CA1 só pode ser produzido na máquina 1. Ambos os componentes têm data de entrega igual a 20 unidades de tempo. Considere-se ainda que existem três intervalos de tempo associados a cada uma das máquinas: o intervalo I1 com duração igual a uma unidade de tempo, o intervalo I2 com duração igual a uma unidade de tempo e o intervalo I3 com duração igual a 18 unidades de tempo. Na Figura 5.2 apresenta-se uma solução admissível para o modelo de fluxos em rede deste pequeno problema no qual os intervalos de tempo não são decompostos por máquina. Esta solução indica que no intervalo 3, que tem duração de 18 unidades de tempo em cada máquina, devem ser atribuídas 16 unidades de tempo ao componente CA1 e 14 unidades de tempo ao componente CA2. Esta é uma solução admissível para o modelo de fluxos em rede já que no intervalo 3 estão disponíveis 18 horas na máquina 1 e outras 18 horas na máquina 2. Se não se considerar a associação da máquina ao intervalo de tempo e se em primeiro lugar for escalonado o componente CA2 na máquina 1, a solução de escalonamento torna-se impossível (ver Figura 5.2), porque no intervalo 3 da máquina 1 deixa de existir espaço suficiente para o componente CA1, que só pode ser produzido nessa máquina. Na Figura 5.3 apresenta-se a formulação do modelo de fluxos em rede correcta, assim como a respectiva solução de escalonamento.

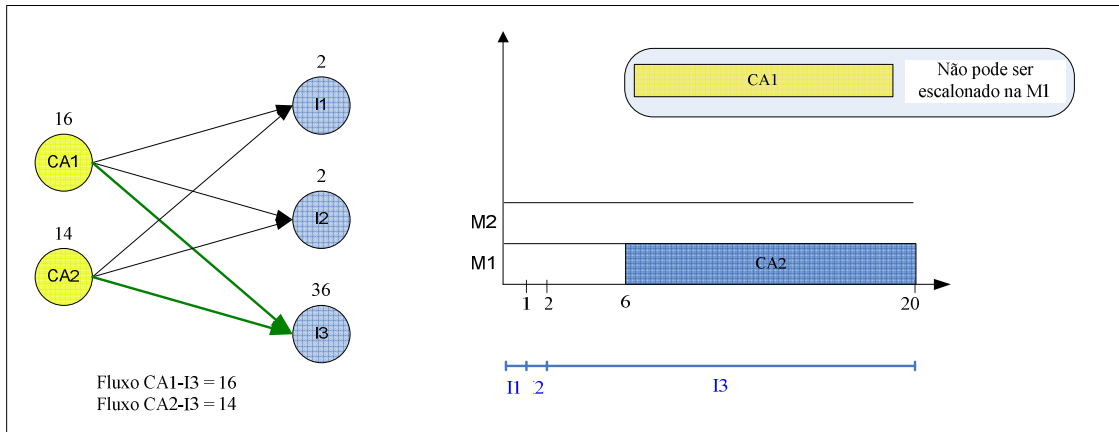


Figura 5.2 Modelo de fluxos em rede do Exemplo 5.2 – formulação errada

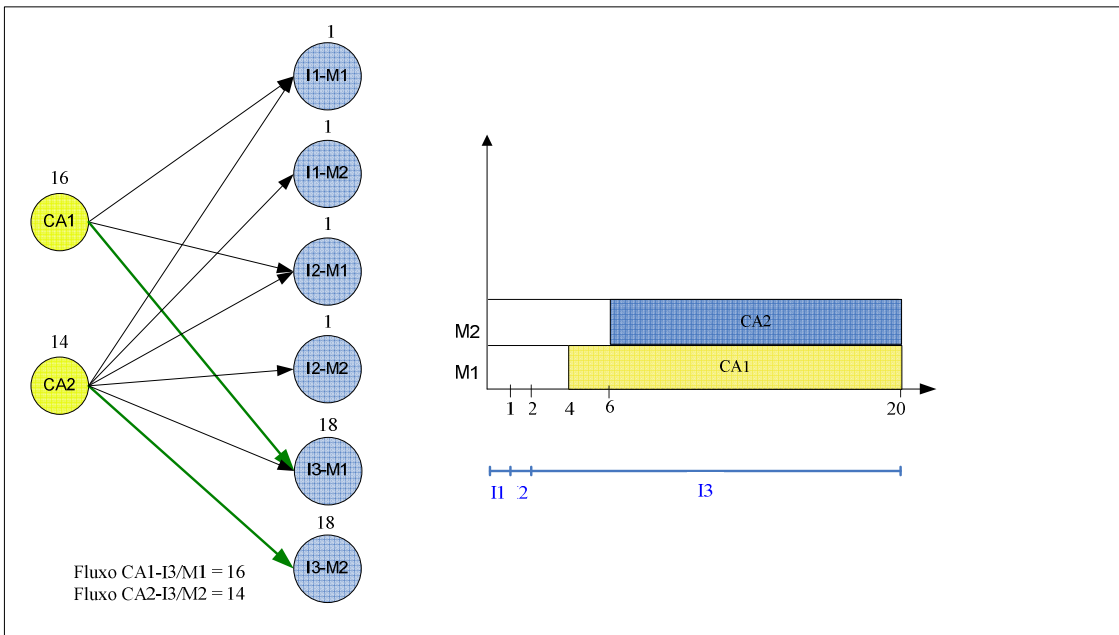


Figura 5.3 Modelo de fluxos em rede do Exemplo 5.2 – formulação correcta

■

Associado a cada arco existe um custo que considera três penalizações: (1) penalização por terminar um componente com atraso relativamente à sua data de entrega (situação de atraso), (2) penalização por terminar um componente antes da sua data de entrega (situação de avanço) e (3) penalização por prioridade de máquina. As

três penalizações têm pesos associados que dependem da importância que lhes é atribuída. Por exemplo, como regra a penalização por atraso na produção é muito maior que a penalização por avanço dado que as implicações do atraso são geralmente menos desejáveis.

O custo por atraso só é considerado nos arcos cujos intervalos de tempo sejam posteriores à data de entrega e o seu valor corresponde ao produto do peso por atraso pela diferença entre o instante de conclusão do intervalo de tempo e a data de entrega do componente associado ao arco.

O custo por avanço relativamente à data de entrega do componente está associado apenas a arcos cujos intervalos de tempo terminem antes da data de entrega do componente associado ao arco. O seu valor corresponde ao produto do peso por avanço pela diferença entre a data de entrega do componente associado ao arco e o instante de conclusão do intervalo de tempo em análise.

O estabelecimento de prioridades de máquinas, tem por objectivo a minimização dos desvios entre lotes de componentes que pertençam ao mesmo produto final. Como o desvio é calculado com base nos instantes de conclusão dos lotes de componentes, quando se pretende produzir um componente em intervalos de tempo consecutivos será preferível agendar esse componente em intervalos consecutivos na mesma máquina do que nos mesmos intervalos de tempo em máquinas diferentes, pois nesse caso o desvio será potencialmente maior. O custo por prioridade de máquina de um determinado arco obtém-se multiplicando um número de ordem associado a esse arco pelo peso por prioridade de máquina. Todos os arcos associados a uma determinada máquina terão o mesmo número de ordem. A determinação dos números de ordem é ilustrada usando o Exemplo 5.1. Numa primeira fase as máquinas são ordenadas por ordem crescente de data de disponibilidade. Considerando as datas de disponibilidade da Tabela 5.2, uma das possíveis ordenações das máquinas é: M1 – M3 – M2 – M4 – M5. De seguida, essa ordem de máquinas é usada na decomposição dos intervalos de tempo por máquina, sendo as máquinas atribuídas aos intervalos de tempo segundo essa ordem. Por exemplo, o intervalo 3 (ver Figura 5.1) será decomposto nos 5 intervalos seguintes: I3M1, I3M3, I3M2, I3M4 e I3M5. Por fim, a todos os arcos pertencentes à mesma máquina é atribuído o mesmo número de ordem. Um exemplo seria atribuir a todos os

arcos associados à máquina 1 (por exemplo os arcos que ligam o componente CM1F aos intervalos I1M1, I2M1, I3M1 e I4M1) o número de ordem 1, a todos os arcos associados à máquina 3 atribuir o número de ordem 2, a todos os arcos associados à máquina 2 atribuir o número de ordem 3 e assim sucessivamente.

O custo por prioridade de máquina só é considerado nos arcos cujos destinos (ou intervalos de tempo/máquina) terminem antes ou ao mesmo tempo da data de entrega do componente associado ao arco.

Uma estratégia que se pode adoptar para resolver o modelo de fluxos em rede quando o número de máquinas não é muito elevado consiste em resolver o modelo para todas as combinações possíveis de ordenações de máquinas e em escolher a solução que tiver o menor valor de atraso total e de desvio total. O número de combinações de ordens de máquinas caso todas as máquinas tenham a mesma data de disponibilidade é igual a $M!$, onde M representa o número de máquinas. Contudo, como cada máquina tem uma data de disponibilidade própria, este valor poderá não ser tão elevado. Por exemplo, no caso do Exemplo 5.1 se não se considerassem as datas de disponibilidade apresentadas na Tabela 5.2 o número de combinações possíveis seria igual a 120, mas considerando as datas de disponibilidade esse número reduz-se para 4.

Apresenta-se de seguida o modelo de fluxos em rede da Etapa 1. Considerem-se os conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão seguintes:

Conjuntos:

N_1 – Conjunto dos componentes seleccionados (um por cada produto final)

N_2 – conjunto de pares intervalo de tempo/máquina

A – conjunto de arcos

M_j – conjunto de componentes que podem ser produzidos na máquina j .

Parâmetros:

p_i – tempo total de produção do componente i

b_j – duração do intervalo de tempo j

c_{ij} – custo do arco (i,j) baseado em penalizações por atraso na produção, por avanço na produção e por prioridade de máquina

d_i – data de entrega do componente i

t_j – instante de conclusão do intervalo de tempo j

o_{ij} – número de ordem do arco (i,j)

Parâmetros relacionados com a ponderação dos objetivos:

α – peso por prioridade de máquina

β – peso por atraso na produção por unidade de tempo

μ – peso por avanço na produção por unidade de tempo

Variáveis de Decisão:

x_{ij} – fluxo no arco (i,j) , *i.e.*, tempo dispendido a produzir o componente associado ao nodo i no intervalo de tempo/máquina associado ao nodo j .

O modelo de fluxos em rede é o que se apresenta de seguida:

$$\text{Min } Z = \sum_{(i,j) \in A: i \in M_j} c_{ij} x_{ij}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j:(i,j) \in A \text{ e } i \in M_j} x_{ij} = p_i, \quad \forall i \in N_1 \quad (5.1)$$

$$\sum_{i:(i,j) \in A \text{ e } i \in M_j} x_{ij} \leq b_j, \quad \forall j \in N_2 \quad (5.2)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in A \quad (5.3)$$

O valor do custo do arco (i,j) , c_{ij} , é determinado através da equação (5.4).

$$c_{ij} = \sum_{(i,j) \in A: d_i < t_j} \beta(t_j - d_i) + \sum_{(i,j) \in A: d_i > t_j} \mu(d_i - t_j) + \sum_{(i,j) \in A: d_i \geq t_j \text{ and } i \in M_j} \alpha \omega_{ij} \quad (5.4)$$

Na função objectivo minimizam-se os custos de atraso e de avanço na produção relativamente à data de entrega, assim como os custos de prioridade de máquina. O conjunto de restrições (5.1) representa as restrições de oferta, que forçam a soma dos fluxos que saem de cada nodo a ser igual ao tempo total de produção do componente associado a esse nodo. O segundo conjunto de restrições, conjunto (5.2), diz respeito às restrições de procura, que garantem que o fluxo que entra em cada par intervalo de tempo/máquina não pode exceder a duração desse intervalo de tempo. O conjunto de restrições (5.3) representa a condição de não negatividade das variáveis de decisão. Para mais detalhes sobre modelos de fluxos em rede sugere-se o livro de Ahuja et al. (1993).

Exemplo 5.1 (continuação)

Na Tabela 5.3 apresenta-se uma solução óptima para o Exemplo 5.1 do modelo de fluxos em rede da Etapa 1.

Tabela 5.3 Solução óptima do modelo de fluxos em rede da Etapa 1 do Exemplo 5.1

Componente	Intervalo	Máquina	Fluxo
CM1F	I3	M1	22
CM1F	I3	M2	0.33
CM1F	I3	M3	2.67
CM2F	I4	M1	24
CM2F	I4	M4	9.33
CM3M	I3	M3	16.67
CS1M	I1	M1	1
CS1M	I2	M1	1
CS1M	I1	M3	1
CS1M	I2	M3	1
CS1M	I3	M3	2.67
CS2M	I4	M3	10

■

Heurística de Escalonamento

A solução que se obtém resolvendo o modelo de fluxos em rede determina as durações dos lotes de componentes e atribuí-os a uma máquina e a um intervalo, mas não determina quando deve iniciar-se/terminar a sua produção. Note-se que na solução do modelo de fluxos em rede podem existir vários lotes de componentes diferentes associados ao mesmo intervalo de tempo e máquina. Para decidir como escalonar os lotes (fluxos da solução do modelo de fluxos em rede), usa-se o seguinte procedimento com três passos:

Passo 1: proceder ao agendamento de todos os intervalos de tempo totalmente ocupados por um único componente e avançar para o passo 2;

Passo 2: para todos os intervalos de tempo parcialmente ocupados por um único componente:

Passo 2.1: agendar esse componente junto de uma sua parte já agendada, caso o mesmo componente seja produzido na primeira posição do próximo intervalo de tempo

e/ou na última posição do intervalo de tempo anterior, e avançar para o próximo intervalo de tempo;

Passo 2.2: agendar o componente do fim para o início do intervalo de tempo caso o instante de conclusão do intervalo de tempo seja menor ou igual à data de entrega do componente, ou agendar o componente do início para o fim do intervalo de tempo caso contrário. Avançar para o próximo intervalo de tempo;

Passo 3: para todos os intervalos de tempo com mais do que um componente com fluxo positivo:

Passo 3.1: seleccionar o(s) componente(s) que também é(são) produzido(s) na primeira posição do próximo intervalo de tempo ou na última posição do intervalo de tempo anterior ao intervalo de tempo em análise e agendá-lo(s) junto de uma sua parte já agendada. Se o componente em análise está simultaneamente já agendado na primeira posição do próximo intervalo de tempo e na última posição do intervalo de tempo anterior ao intervalo em análise, agendá-lo a partir do início do intervalo de tempo em análise. Avançar para o próximo intervalo de tempo;

Passo 3.2: agendar os restantes componentes de acordo com a regra da folga mínima (descrita abaixo), *minimum slack first rule* na literatura Anglo-Saxónica, a partir do início do intervalo de tempo em análise ou a partir do primeiro instante livre dentro do referido intervalo (este segundo caso ocorre se já estiverem agendados um ou mais lotes de componentes a partir do início do intervalo). Caso mais do que um componente tenha a mesma folga, escolhe-se arbitrariamente um deles.

A folga associada a um dado componente i num dado intervalo de tempo/máquina j é dada por $d_i - x_{ij} - t$, onde t representa o instante de início do intervalo de tempo/máquina j ou o primeiro instante livre dentro do referido intervalo, d_i representa a data de entrega do componente i e x_{ij} o fluxo no arco (i,j) .

Exemplo 5.1 (continuação)

Na Figura 5.4 apresenta-se a solução de escalonamento, representada através de um gráfico de Gantt, que resulta da aplicação da heurística de escalonamento à solução do modelo de fluxos em rede apresentada na Tabela 5.3.

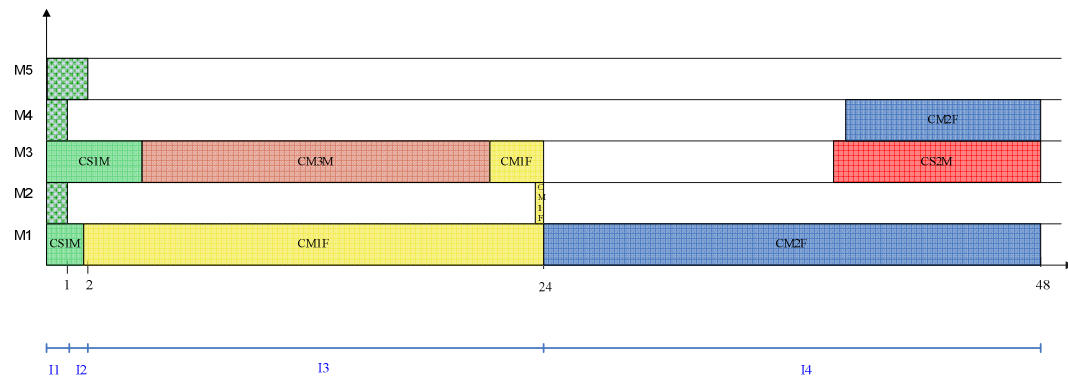


Figura 5.4 Solução do Exemplo 5.1 no final da Etapa 1

5.1.2 Etapa 2

Partindo da solução de escalonamento obtida na Etapa 1, na Etapa 2 é definido um novo modelo de fluxos em rede e aplicada novamente a heurística de escalonamento para se obter uma solução final para o problema DLEMP. De seguida apresenta-se a Etapa 2 em detalhe.

Modelo de Fluxos em rede

Nas origens do modelo de fluxos em rede da Etapa 2 consideram-se todos os componentes não incluídos no modelo da Etapa 1 e a oferta em cada origem corresponde ao tempo total de processamento do componente que lhe está associado.

Com o intuito de minimizar os desvios entre os instantes de conclusão de lotes de componentes que pertençam ao mesmo produto final, as datas de entrega dos componentes considerados nas origens do modelo de fluxos em rede da Etapa 2 são revistas, passando a estar associadas ao instante de conclusão do componente que lhes está associado na Etapa 1. A título de exemplo, considere-se o produto final CM3 do Exemplo 5.1. A data de entrega deste produto é igual a 24 como se pode verificar na Tabela 5.1, mas como CM3M na Etapa 1 termina no instante 21.33, a data de entrega dos componentes CM3F e CM3C (restantes componentes associados ao produto final CM3) passa a ser igual a 21.33.

Os destinos estão, tal como na Etapa 1, associados a intervalos de tempo e máquinas. Para definir os intervalos de tempo usam-se mais uma vez as datas de disponibilidade das máquinas e o horizonte temporal. As datas de entrega revistas são também consideradas na definição dos intervalos de tempo. Para além destas informações, as cargas de máquina da Etapa 1 também devem ser consideradas na definição dos intervalos de tempo, pois agora há períodos de tempo nos quais as máquinas já estão ocupadas. Para ilustrar a criação dos intervalos de tempo da Etapa 2 recorre-se novamente ao Exemplo 5.1. Os intervalos de tempo/máquina são os seguintes: I1-M2, I1-M4, I2-M2, I2-M4, I2-M5, I3-M2, I3-M4, I3-M5, I4-M2, I4-M4, I4-M5, I5-M4, I5-M5, I6-M4, I6-M5, I6-M2, I6-M3, I7-M4, I7-M5, I7-M2, I8-M5 e I8-M2.

Exemplo 5.1 (continuação)

Na Figura 5.5 pode-se analisar a representação dos intervalos de tempo da Etapa 2. A procura associada a cada intervalo de tempo/máquina corresponde à duração do intervalo de tempo.

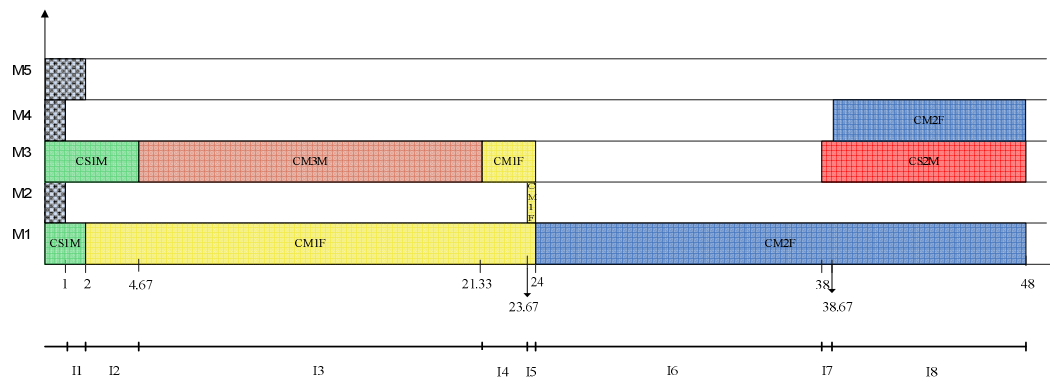


Figura 5.5 Solução do Exemplo 5.1 no final da Etapa 1 e intervalos de tempo da Etapa 2

Os arcos do modelo de fluxos em rede da Etapa 2 são definidos do mesmo modo que o apresentado na Etapa 1, assim como o custo associado aos arcos. A única diferença está relacionada com o modo como se definem os números de ordem dos arcos (associados ao custo por prioridade de máquina).

Na Etapa 1, depois de estabelecida a ordenação das máquinas, todos os intervalos de tempo associados a uma máquina têm associado o mesmo número de ordem, já que todas as máquinas estão livres em todos os intervalos de tempo. Na Etapa 2 os números de ordem têm de ser formados dinamicamente, atendendo quer às datas de disponibilidade das máquinas, quer às cargas das máquinas no final da Etapa 1. O objectivo passa por garantir que, a todos os intervalos de tempo livres na mesma máquina que sejam consecutivos, é atribuído o mesmo número de ordem. Quando nessa máquina o(s) próximo(s) intervalo(s) de tempo deixa(m) de estar livre(s) (estando ocupado(s) com carga da Etapa 1) essa máquina deixa de ser considerada nesse(s) intervalo(s) e os números de ordem das máquinas são revistos.

Exemplo 5.1 (continuação)

Na Figura 5.6 representam-se os números de ordem associados a cada intervalo de tempo/máquina livre. Note-se por exemplo, que até ao intervalo I4, a máquina M2 tem o número de ordem 1, a máquina M4 tem o número de ordem 2 e a máquina M5

tem o número de ordem 3. Como no intervalo I5 a máquina M2 deixa de estar disponível, o número de ordem da máquina M4, que até então era igual a 2, passa a ser igual a 1. O mesmo acontece com a máquina M5 no intervalo I5, cujo número de ordem passa de 3 para 2. Nos intervalos posteriores o mesmo tipo de procedimento é efectuado.

Os números de ordem dos arcos que ligam por exemplo o componente CM1C aos intervalos de tempo/máquina da Etapa 2 acima apresentados (segundo a ordem em que foram apresentados) poderiam ser representados pela seguinte série: 1, 2, 1, 2, 3, 1, 2, 3, 1, 2, 3, 1, 2, 3, 4, 1, 2, 3, 1, 2.

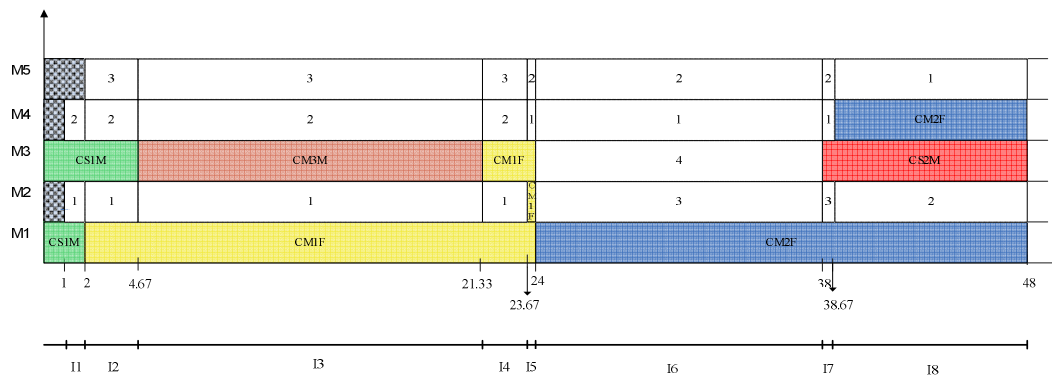


Figura 5.6 Solução do Exemplo 5.1 no final da Etapa 1, intervalos de tempo da Etapa 2 e números de ordem associados a cada intervalo de tempo na Etapa 2



Tal como na Etapa 1, o custo por prioridade de máquina só é considerado nos arcos cujos intervalos de tempo/máquina associados terminem antes ou ao mesmo tempo da data de entrega do componente associado ao arco. No modelo de fluxos em rede da Etapa 2 também se adopta a estratégia de resolver o modelo para todas as combinações possíveis de ordenações de máquinas, escolhendo-se nesse caso a solução melhor em termos do objectivo do problema, *i. e.*, a solução que tiver o menor valor cumulativo de atraso total e desvio total dos produtos finais.

Uma vez que o modelo de fluxos em rede da Etapa 2 é semelhante ao apresentado na Etapa 1, nesta subsecção não se apresenta analiticamente o modelo.

Exemplo 5.1 (continuação)

Na Tabela 5.4 apresenta-se a solução do modelo de fluxos em rede da Etapa 2.

Tabela 5.4 Solução óptima do modelo de fluxos em rede da Etapa 2 do Exemplo 5.1

Componente	Intervalo	Máquina	Fluxo
CM1C	I1	M2	1
CM1C	I2	M2	2.67
CM1C	I4	M2	2.33
CM1C	I3	M4	13.67
CM1C	I4	M4	2.33
CM1C	I5	M4	0.33
CM1C	I4	M5	2.34
CM1C	I5	M5	0.33
CM2C	I6	M4	13.33
CM2C	I7	M4	0.67
CM2C	I6	M5	9.33
CM2C	I7	M5	0.67
CM2C	I8	M5	9.33
CM3F	I3	M2	8.33
CM3C	I3	M2	8.33
CS1F	I2	M4	0.33
CS1F	I3	M4	3
CS1C	I1	M4	1
CS1C	I2	M4	2.33
CS2F	I8	M2	4.33
CS2F	I6	M4	0.67
CS2C	I8	M2	5

■

Heurística de Escalonamento

A solução do modelo de fluxos em rede da Etapa 2 é transformada numa solução de escalonamento usando a heurística de escalonamento definida na Etapa 1.

Exemplo 5.1 (continuação)

Na Figura 5.7 apresenta-se a solução final do Exemplo 5.1, obtida a partir da solução de escalonamento da Etapa 1e após aplicação da heurística de escalonamento da Etapa 2. Nesta solução todos os produtos são entregues atempadamente. O valor do desvio total é de 77 horas e a percentagem média de utilização das máquinas é igual a 77.5%. A percentagem de utilização de uma dada máquina *M* é dada por:

$$\frac{\text{Tempo total de ocupação da máquina } M}{\text{Horizonte temporal} - \text{Data de disponibilidade da máquina } M} \times 100.$$

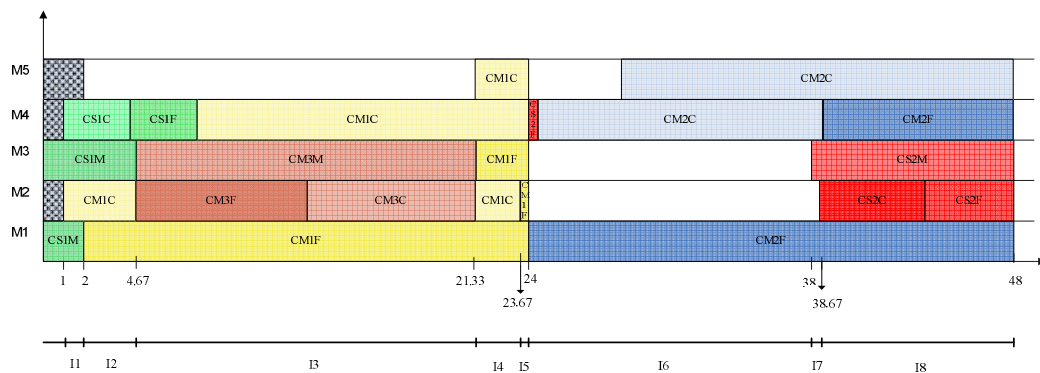


Figura 5.7 Solução final do Exemplo 5.1



5.1.3 Resultados Computacionais

Nesta subsecção apresentam-se os resultados computacionais obtidos para a heurística de fluxos em rede e escalonamento.

As instâncias de teste são as mesmas que foram usadas para resolver o modelo de programação inteira mista, apresentado na secção 4.1. As características das instâncias podem ser revistas na Tabela 3.1 da página 72.

A heurística de fluxos em rede e escalonamento foi implementada em C++, usando o ambiente de desenvolvimento Microsoft Visual Studio 2008 e a Callable

Library da versão 11.0 do CPLEX (ILOG, 2007). O modelo de fluxos em rede da Etapa 1 e o modelo de fluxos em rede da Etapa 2 são resolvidos até à optimalidade pelo solver da versão 11.0 do Cplex. Os testes computacionais foram realizados num computador pessoal com um processador Core 2Duo a 2 Ghz e com 2 GB de memória.

Na fase de implementação nas funções objectivo dos modelos de fluxos em rede, o peso por atraso na produção por unidade de tempo (β) foi fixado no valor 1000, o peso por avanço na produção por unidade de tempo (μ) foi fixado no valor 1 e o peso por prioridade de máquina (α) foi fixado no valor 100.

Na Tabela 5.5 e na Tabela 5.6 apresentam-se os resultados computacionais para as 54 instâncias de teste. Na coluna 6 apresentam-se os tempos de resolução da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a ordem de máquinas com menor valor de atraso total e de desvio total e na coluna 7 apresentam-se os tempos totais de resolução da heurística de fluxos em rede e escalonamento, incluindo o tempo para testar todas as combinações de ordens de máquinas. Na coluna 12 apresentam-se as percentagens médias de utilização das máquinas, calculadas do modo apresentado na secção 4.2. As medidas de desempenho consideradas são: o tempo total de resolução (coluna 7), o atraso total dos produtos finais (coluna 8), o número de produtos finais com atraso (coluna 9), o desvio total dos produtos finais (coluna 10), o valor da função objectivo (coluna 11), o número de lotes (coluna 13), o número médio de lotes por componente (coluna 14), e o desvio médio por produto final (coluna 15).

A função objectivo (cujos valores se apresentam na coluna 11) é a mesma que foi considerada para avaliar as soluções do modelo de programação inteira mista.

Tabela 5.5 Resultados computacionais da heurística de fluxos em rede e escalonamento

Instância	Jogo	Número de produtos finais	Número de componentes	Número de máquinas	Tempo total de resolução (segundos)		Atraso total dos produtos finais (horas)	Número de produtos finais com atraso	Desvio total dos produtos finais (horas)	Valor da função objectivo	Percentagem média de utilização das máquinas	Número de lotes	Número médio de lotes por componente	Desvio médio por produto final
					Melhor ordem de máquinas	Todas as combinações de ordens de máquinas								
Inst20T1.1.J21	21	8	18	5	0.00	0.22	5.6	1	6.3	5605.3	45.6	19	1.1	0.8
Inst20T1.2.J21	21	9	25	5	0.03	0.03	64.9	2	2260.8	67145.6	102.0	47	1.9	251.2
Inst20T1.3.J21	21	9	17	5	0.05	0.09	236.8	4	1089.7	237878.7	80.5	30	1.8	121.1
Inst30T1.1.J21	21	18	50	5	0.05	0.05	299.2	5	2841.5	302011.5	104.3	91	1.8	157.9
Inst30T1.2.J21	21	20	56	5	0.25	0.25	3.2	1	726.3	3964.8	68.4	91	1.6	36.3
Inst30T1.3.J21	21	20	60	5	0.05	0.05	148.5	10	796.8	149311.8	92.7	101	1.7	39.8
Inst40T1.1.J21	21	20	58	5	0.03	0.03	0.0	0	2779.9	2779.9	99.4	95	1.6	139.0
Inst40T1.2.J21	21	24	69	5	0.05	0.05	51.5	3	2781.9	54269.5	102.0	121	1.8	115.9
Inst40T1.3.J21	21	27	74	5	0.02	0.05	72.4	1	1272.7	73674.7	78.9	107	1.4	47.1
Inst50T1.1.J21	21	29	74	5	0.03	0.03	48.0	1	3049.8	51081.7	87.5	116	1.6	105.2
Inst50T1.2.J21	21	30	74	5	0.03	0.08	39.9	2	1800.2	41670.3	104.6	127	1.7	60.0
Inst50T1.3.J21	21	33	99	5	0.05	0.08	0.2	1	1917.3	2140.8	86.3	168	1.7	58.1
Inst60T1.1.J21	21	26	70	5	0.05	0.05	0.0	0	2989.2	2989.2	97.9	113	1.6	115.0
Inst60T1.2.J21	21	30	77	5	0.05	0.05	68.3	6	954.9	69235.9	66.4	116	1.5	31.8
Inst60T1.3.J21	21	29	77	5	0.06	0.11	31.8	3	3004.0	34846.8	96.0	131	1.7	103.6
Inst70T1.1.J21	21	30	90	5	0.05	0.17	411.6	14	1698.3	413305.3	59.3	130	1.4	56.6
Inst70T1.2.J21	21	33	83	5	0.05	0.08	0.0	0	1963.6	1963.6	59.9	133	1.6	59.5
Inst70T1.3.J21	21	39	116	5	0.05	0.05	231.8	3	3191.8	234949.8	79.1	169	1.5	81.8
Inst20T1.1.J27	27	31	89	11	0.17	2.26	0.0	0	4609.1	4609.1	87.9	253	2.8	148.7
Inst20T1.2.J27	27	32	84	11	0.13	2.68	124.7	11	1820.9	126533.9	89.2	244	2.9	56.9
Inst20T1.3.J27	27	29	84	11	0.11	15.09	6.7	3	3764.6	10490.3	63.8	221	2.6	129.8
Inst30T1.1.J27	27	41	107	11	0.23	22.70	0.0	0	4667.3	4667.3	81.7	304	2.8	113.8
Inst30T1.2.J27	27	38	103	11	0.20	53.70	268.0	11	5804.6	273853.6	105.9	263	2.6	152.8
Inst30T1.3.J27	27	44	128	11	0.20	28.07	0.7	2	6841.4	7561.5	95.5	348	2.7	155.5
Inst40T1.1.J27	27	53	142	11	0.70	74.71	0.0	0	8168.4	8168.4	95.6	370	2.6	154.1
Inst40T1.2.J27	27	42	112	11	0.36	40.53	0.3	1	5570.2	5861.1	95.3	291	2.6	132.6
Inst40T1.3.J27	27	47	125	11	0.20	4.63	94.4	8	1654.7	96099.1	75.9	301	2.4	35.2

Tabela 5.6 Resultados computacionais da heurística de fluxos em rede e escalonamento (continuação)

Instância	Jogo	Tempo total de resolução (segundos)					Atraso total dos produtos finais (horas)	Número de produtos finais com atraso	Desvio total dos produtos finais (horas)	Valor da função objectivo	Porcentagem média de utilização das máquinas	Número de lotes	Número médio de lotes por componente	Desvio médio por produto final
		Número de produtos finais	Número de componentes	Número de máquinas	Melhor ordem de máquinas	Todas as combinações de ordens de máquinas								
Inst50T1.1.J27	27	43	120	11	0.14	13.32	0.0	0	5594.3	5594.3	99.5	260	2.2	130.1
Inst50T1.2.J27	27	65	174	11	0.58	2191.96	80.4	5	6403.4	86833.8	103.6	480	2.8	98.5
Inst50T1.3.J27	27	60	154	11	0.44	36.22	1.1	3	8804.4	9934.3	83.5	451	2.9	146.7
Inst60T1.1.J27	27	71	197	11	0.44	817.53	0.0	0	4389.2	4389.2	99.7	481	2.4	61.8
Inst60T1.2.J27	27	76	210	11	0.98	26.52	1199.9	37	12866.6	1212746.6	80.2	575	2.7	169.3
Inst60T1.3.J27	27	67	181	11	0.48	1947.85	306.9	14	7602.8	314536.8	96.9	488	2.7	113.5
Inst70T1.1.J27	27	70	182	11	0.34	9.67	222.3	12	5370.2	227680.2	97.5	393	2.2	76.7
Inst70T1.2.J27	27	81	221	11	1.37	166.64	593.4	17	5582.8	599011.8	98.5	551	2.5	68.9
Inst70T1.3.J27	27	67	187	11	0.70	34.23	579.0	16	7834.7	586819.7	91.3	511	2.7	116.9
Inst20T1.1.J24	24	34	94	13	0.20	228.19	0.9	2	5501.3	6400.8	95.5	269	2.9	161.8
Inst20T1.2.J24	24	37	108	13	0.19	183.11	74.2	8	8195.8	82369.1	91.8	358	3.3	221.5
Inst20T1.3.J24	24	34	98	13	0.19	568.60	549.6	17	4848.9	554421.9	96.6	298	3.0	142.6
Inst30T1.1.J24	24	51	139	13	0.50	7013.06	0.0	0	6228.4	6228.4	82.7	370	2.7	122.1
Inst30T1.2.J24	24	49	135	13	0.41	778.97	19.4	1	10131.4	29546.3	101.8	441	3.3	206.8
Inst30T1.3.J24	24	38	90	13	0.19	11.78	137.3	9	4314.7	141644.7	97.5	313	3.5	113.5
Inst40T1.1.J24	24	57	152	13	0.59	196.14	26.4	5	5248.9	31636.9	91.1	457	3.0	92.1
Inst40T1.2.J24	24	64	174	13	0.41	117.23	0.4	2	5232.0	5599.6	82.2	474	2.7	81.7
Inst40T1.3.J24	24	57	157	13	0.75	998.90	184.4	15	5265.2	189681.2	94.8	440	2.8	92.4
Inst50T1.1.J24	24	55	152	13	0.56	60.09	1.5	6	3396.8	4898.9	65.3	424	2.8	61.8
Inst50T1.2.J24	24	70	197	13	0.62	1174.04	1260.9	26	16225.4	1277165.4	114.1	501	2.5	231.8
Inst50T1.3.J24	24	70	184	13	0.55	448.61	6.9	3	6791.8	13711.1	96.4	584	3.2	97.0
Inst60T1.1.J24	24	81	216	13	0.94	1515.88	0.0	0	10081.7	10081.7	90.2	603	2.8	124.5
Inst60T1.2.J24	24	69	188	13	0.84	1503.54	79.0	4	15931.6	94902.4	103.9	633	3.4	230.9
Inst60T1.3.J24	24	81	232	13	1.86	4255.31	14.3	8	15523.8	29806.5	100.6	685	3.0	191.7
Inst70T1.1.J24	24	82	226	13	0.77	265.68	1.0	4	13740.5	14743.8	88.4	661	2.9	167.6
Inst70T1.2.J24	24	94	254	13	1.98	2825.50	118.7	7	5362.6	124028.6	109.8	716	2.8	57.0
Inst70T1.3.J24	24	108	277	13	2.78	3582.59	70.2	10	13840.6	84015.6	101.5	903	3.3	128.2

O tempo total médio de resolução das 54 instâncias através da heurística de fluxos em rede e escalonamento é igual a 578.1 segundos. Existe uma grande variabilidade nos tempos totais de resolução, como se pode analisar na Tabela 5.5 e na Tabela 5.6, principalmente para as instâncias de maior dimensão.

O atraso médio total dos produtos finais, considerando o conjunto de 54 instâncias, é igual a 143.3 horas. Na Figura 5.8 apresenta-se o comportamento do atraso total dos produtos finais face ao aumento do número de componentes. Com base nos resultados da Figura 5.8 existem dúvidas relativamente à associação entre as duas variáveis. Ainda assim, é possível identificar que os maiores atrasos ocorrem para as instâncias de maior dimensão em termos de número de componentes, embora existam instâncias grandes sem atraso. O valor do atraso total dos produtos finais parece não ter relação com a percentagem média de utilização das máquinas, como se pode verificar pela análise visual da Figura 5.9. Identificam-se alguns valores máximos, que poderão ser considerados como “atípicos” por não se verificar repetitividade. Relativamente ao comportamento do número de lotes face ao aumento do atraso total dos produtos finais, analisando a série da Figura 5.10 verifica-se que existe uma grande variabilidade no número de lotes para valores semelhantes de atraso total dos produtos finais.

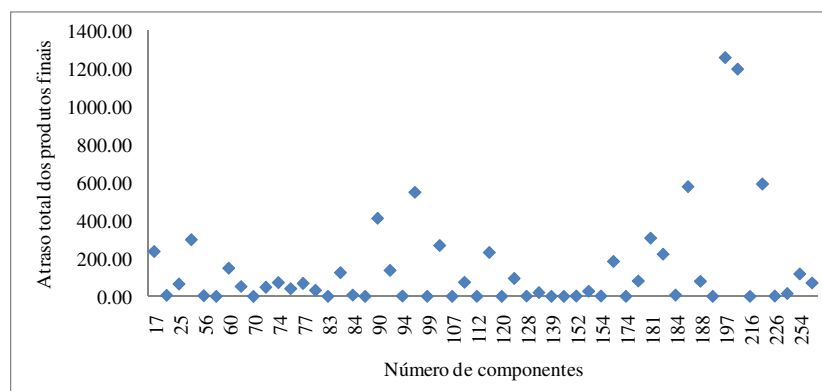


Figura 5.8 Comportamento do atraso total dos produtos finais face ao aumento do número de componentes - heurística de fluxos em rede e escalonamento

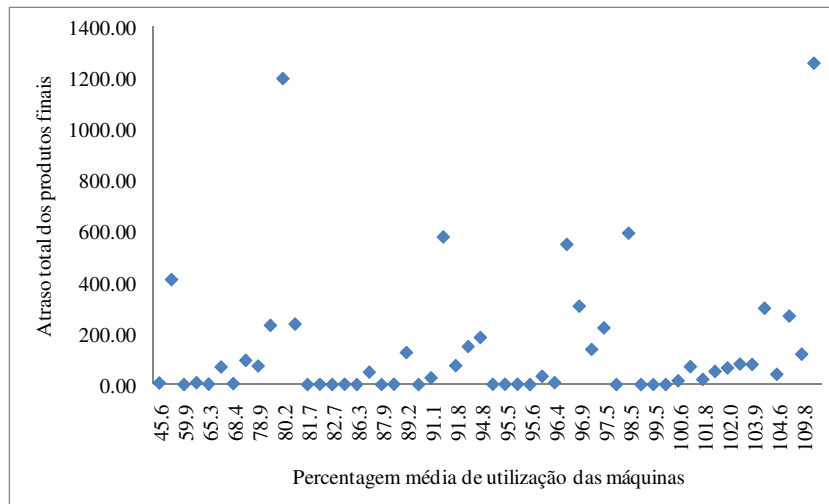


Figura 5.9 Comportamento do atraso total dos produtos finais face ao aumento da percentagem média de utilização das máquinas - heurística de fluxos em rede e escalonamento

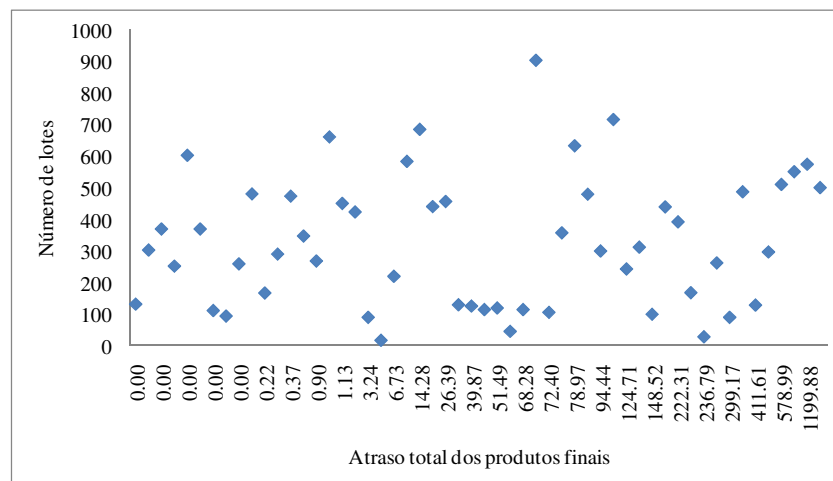


Figura 5.10 Comportamento do número de lotes face ao aumento do atraso total dos produtos finais - heurística de fluxos em rede e escalonamento

O desvio médio total dos produtos finais é igual a 5524.8 horas e a média do desvio médio por produto final é igual 114.2 horas. Ambos os valores destes dois indicadores são bastante elevados. Pela análise da Figura 5.11 verifica-se que existe uma tendência linear crescente entre o número de componentes e o desvio total dos produtos finais. A Figura 5.11 denota ainda que a amplitude de variação do desvio total dos produtos finais tende a aumentar nas instâncias com maior número de componentes.

Para percentagens médias de utilização das máquinas inferiores a 100% o desvio total dos produtos finais não parece ser muito sensível ao aumento da percentagem média de utilização das máquinas, como se pode analisar na Figura 5.12. Quando as percentagens médias de utilização das máquinas são superiores a 100%, verifica-se um aumento na amplitude de variação do desvio total dos produtos finais. Por último, o número de lotes tem tendência para aumentar à medida que o desvio total dos produtos finais aumenta (ver Figura 5.13).

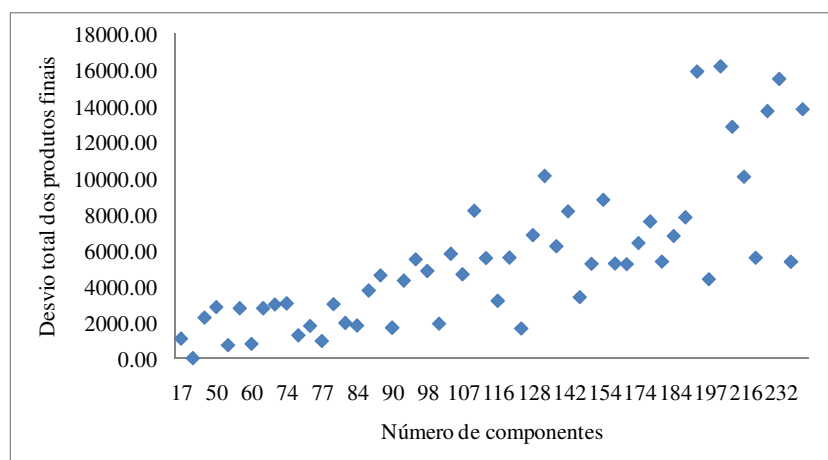


Figura 5.11 Comportamento do desvio total dos produtos finais face ao aumento do número de componentes - heurística de fluxos em rede e escalonamento

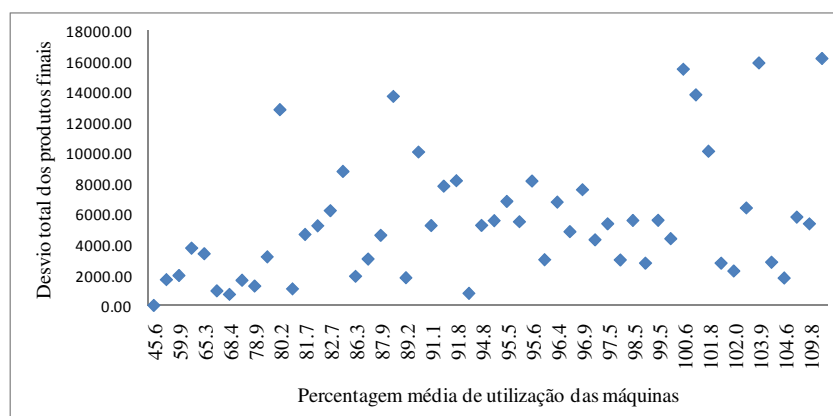


Figura 5.12 Comportamento do desvio total dos produtos finais face ao aumento da percentagem média de utilização das máquinas - heurística de fluxos em rede e escalonamento

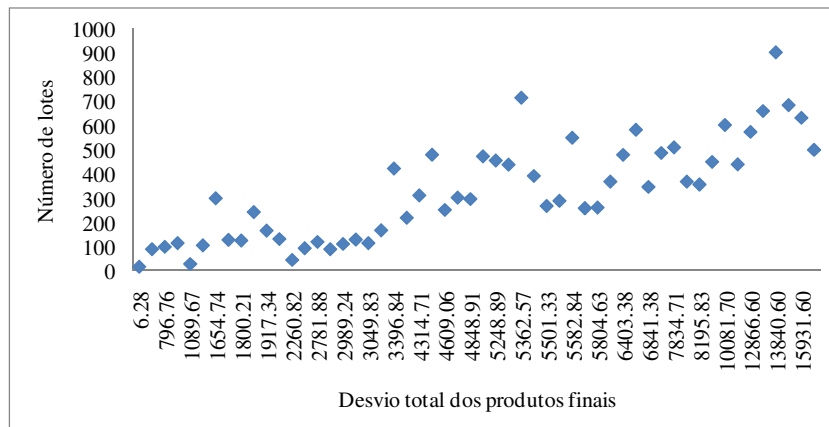


Figura 5.13 Comportamento do número de lotes face ao aumento do desvio total dos produtos finais - heurística de fluxos em rede e escalonamento

O comportamento do atraso total dos produtos finais face ao aumento do desvio total dos produtos finais é irregular. Como se pode analisar na Figura 5.14 existem instâncias com um grande desvio total e com um grande atraso total, mas também existem instâncias com desvios totais grandes com um atraso total nulo. No entanto, ainda que existam dúvidas sobre a existência de uma relação entre as duas variáveis, identificam-se atrasos totais maiores nas instâncias com maiores desvios.

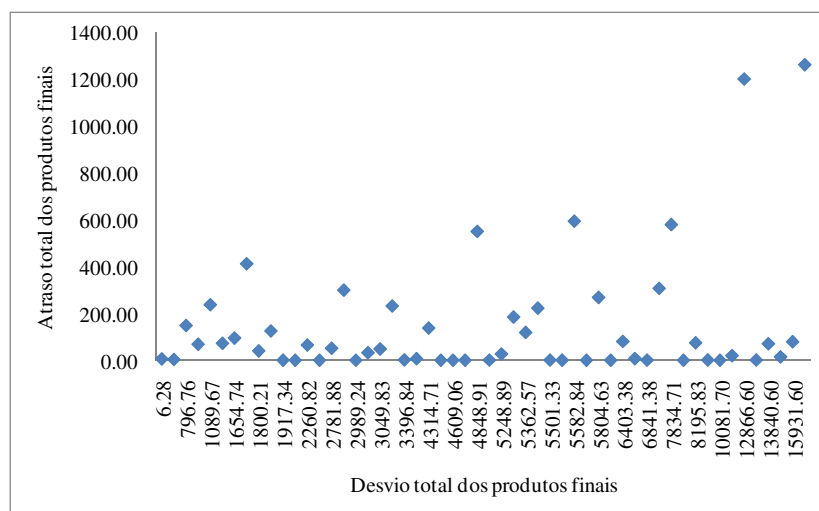


Figura 5.14 Comportamento do atraso total dos produtos finais face ao aumento do desvio total dos produtos finais – heurística de fluxos em rede e escalonamento

A média do número médio de lotes por componente é igual a cerca de 2.4. O número de lotes aumenta linearmente com o aumento do número de componentes, como se pode verificar na Figura 5.15, sendo esse aumento mais acentuado para as instâncias com maior dimensão em termos de número de componentes.

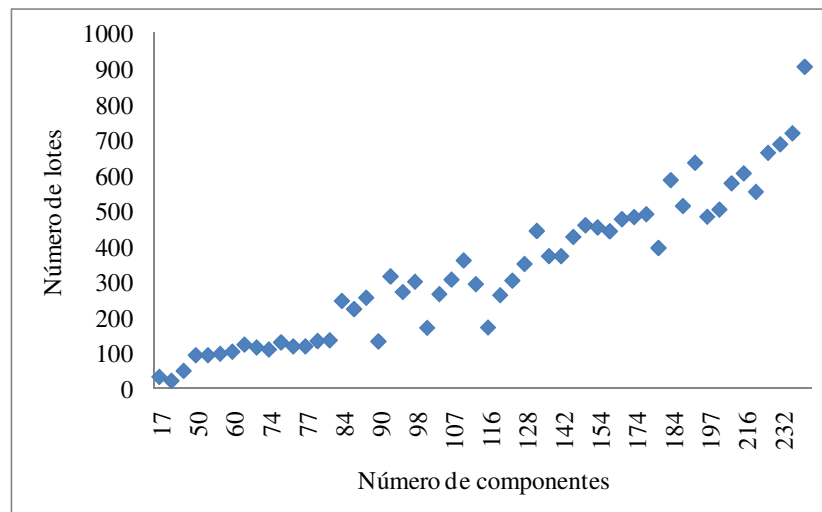


Figura 5.15 Comportamento do número de lotes face ao aumento do número de componentes – heurística de fluxos em rede e escalonamento

5.2 Heurística de Ordenação e Escalonamento

A segunda heurística dedicada é uma heurística construtiva. Nesta heurística a solução de dimensionamento e escalonamento é obtida a partir de uma ordenação prévia dos componentes.

A heurística processa-se em três passos. No primeiro passo é criada uma lista ordenada dos produtos finais. No segundo passo é criada uma lista ordenada dos componentes, a partir da lista ordenada de produtos finais. No terceiro e último passo, cada componente da lista ordenada do passo dois é atribuído e escalonado em uma ou mais máquinas. Note-se que no passo três os componentes da lista ordenada do passo dois são seleccionados um a um seguindo a ordem estabelecida nesse passo.

Este tipo de algoritmo é habitualmente designado por *list scheduling heuristic* na literatura Anglo-Saxónica (Hurink e Knust, 2001) e pertence à classe das heurísticas construtivas. Numa heurística de ordenação e escalonamento o plano de produção é definido normalmente em dois passos. Num primeiro passo é criada uma lista ordenada dos trabalhos a escalonar, seguindo uma ou mais regras de prioridade pré-definida(s). No segundo passo, os trabalhos da lista ordenada do passo 1 são iterativamente seleccionados um a um, e atribuídos e escalonados numa máquina. Para seleccionar a máquina (de entre um conjunto de máquinas a funcionar em paralelo) usam-se critérios pré-estabelecidos.

No texto que se segue, os três passos da heurística de ordenação e escalonamento são detalhados.

Passo 0: Inicialização.

Considere-se o conjunto de produtos finais N , o conjunto de componentes J , o conjunto de máquinas M e o conjunto de componentes que pertencem ao produto final n , $S(n)$. Seja D_n a procura associada ao produto final n , d_n a data de entrega do produto final n , r_m a data de disponibilidade da máquina m , a_j o tempo unitário de produção do componente j , b_{jm} um indicador de compatibilidade que assume o valor 1 se o componente j pode ser processado na máquina m e assume o valor 0 caso contrário e f_{jn} o número de unidades do componente j requeridas para produzir uma unidade do produto final n ($n \in S(n)$).

Passo 1: Criação de lista ordenada de produtos finais.

Ordenar o conjunto de produtos finais N , por ordem crescente de data de entrega d_n . Em caso de empate, escolher o produto final n com o menor número total de

máquinas compatíveis, sendo o número total de máquinas compatíveis igual à soma do número de máquinas compatíveis de cada componente j que pertence ao produto final n ($\sum_{j \in J|j \in S(n)} \sum_{m \in M} b_{jm}$). Em caso de empate, escolher o produto final n com maior tempo unitário total de produção, sendo o tempo unitário total de produção dado pelo somatório dos tempos unitários de produção dos componentes que pertencem a esse produto final n ($\sum_{j \in J|j \in S(n)} a_j$). Em caso de empate, seleccionar arbitrariamente um dos produtos finais n em análise.

Passo 2: Criação de lista ordenada de componentes.

Para cada produto final n da lista ordenada do passo 1, fazer:

Ordenar os componentes j que pertencem ao produto final n por ordem crescente do número de máquinas compatíveis. O número de máquinas compatíveis de um dado componente j é igual a $\sum_{m \in M} b_{jm}$. Em caso de empate, escolher o componente j com maior tempo unitário de produção. Em caso de empate, escolher arbitrariamente um dos componentes j em análise.

Passo 3: Afectação e escalonamento de componentes.

Para cada componente j da lista ordenada definida no passo 2, fazer:

Repetir enquanto o tempo total de produção do componente j (dado por $D_n \times a_j \times f_{jn} | j \in S(n)$) por escalonar for maior do que zero:

Afectação: seleccionar a máquina compatível com o componente j que permite escalonar j o mais próximo possível da sua data objectivo. Se o componente j for o primeiro lote de componentes do produto final n a ser escalonado, a sua data objectivo será igual à data de entrega do produto final n , ao qual o componente j pertence. Caso j seja o primeiro componente de n a ser escalonado, mas um ou mais lotes do componente j já estão escalonados ou se j não for o primeiro componente de n a ser escalonado, a sua data objectivo será igual ao maior instante de conclusão dos lotes de componentes do produto final n já escalonados. O componente j será escalonado na máquina seleccionada no intervalo de tempo livre mais próximo da data objectivo. Em caso de empate, *i. e.*, se em mais do que uma das máquinas compatíveis com j , o intervalo de tempo livre mais próximo da data objectivo termina ao mesmo tempo, escolher a máquina com mais tempo livre total. O tempo livre total de uma dada máquina corresponde à soma de todos os intervalos de tempo livres nessa máquina, desde a sua data de disponibilidade, r_m , até ao instante de conclusão do intervalo de tempo livre mais próximo da data objectivo. Em caso de empate, seleccionar arbitrariamente uma das máquinas.

Escalonamento: agendar o componente j na máquina seleccionada. Se a duração do intervalo de tempo livre mais próximo da data objectivo (na máquina seleccionada) for inferior ao tempo total de produção do componente j por escalonar, agendar o componente j nesse intervalo, ocupando-o totalmente, e actualizar o tempo total de produção do componente j por escalonar. Caso contrário, *i. e.*, se a duração do intervalo de tempo livre mais próximo da data objectivo for superior ou igual ao tempo total de produção do componente j por escalonar, agendar o componente j nesse intervalo e actualizar o tempo total de produção do componente j por escalonar para zero.

Se não for possível agendar o componente j em nenhuma das máquinas compatíveis até à sua data objectivo, significando que todas as máquinas compatíveis com o componente j estão totalmente ocupadas até à sua data objectivo, este componente será agendado com atraso. Nesse caso, dividir o tempo total de produção do componente j por escalonar pelo número de máquinas compatíveis com o componente j , obtendo-se um número de lotes igual ao número de máquinas compatíveis, e agendar cada um desses lotes em cada uma das máquinas compatíveis, o

mais próximo possível da data objectivo do componente j . Quando um componente tem de ser agendado com atraso, a sua data objectivo passa a ser igual à data de entrega do produto final n ao qual o mesmo pertence.

A complexidade computacional da heurística de ordenação e escalonamento é determinada no passo 3 e é igual a $O(JK^2M)$, onde K representa um limite superior para o número de lotes agendados numa máquina. Os passos 1 e 2 correspondem em termos de complexidade computacional à ordenação de uma lista, cuja complexidade computacional é igual a $O(n \log(n))$. No passo 1 n está associado ao número de produtos finais e no passo 2 associado ao número de componentes.

Para ilustrar a heurística de ordenação e escalonamento recorre-se ao Exemplo 5.3.

Exemplo 5.3

Considere-se um problema com cinco produtos finais, cujos componentes associados devem ser escalonados num conjunto de cinco máquinas idênticas nas próximas 48 horas. Na Tabela 5.7 e na Tabela 5.8 apresentam-se algumas informações relevantes sobre o problema.

Aplicando o passo 1 da heurística de ordenação e escalonamento ao Exemplo 5.3 obtém-se a seguinte lista ordenada de produtos finais: CM1, CS1, CM3, CM2 e CS2. Na Tabela 5.9 apresenta-se a informação do Exemplo 5.3 usada no passo 1. Logo na primeira iteração do passo 1, há um empate entre os produtos finais CM1, CM3 e CS1, já que todos têm data de entrega igual a 24. Usando o critério de menor número total de máquinas compatíveis para desempatar, em primeiro lugar na lista fica o produto final CM1 (com um número total de máquinas compatíveis igual a 10), em segundo lugar o produto final CS1 (com um número total de máquinas compatíveis igual a 11), e em terceiro lugar o produto final CM3 (com um número total de máquinas compatíveis igual a 13). A próxima data de entrega é igual a 48 e ambos os produtos finais por atribuir à lista têm essa data de entrega, o que leva a um novo empate em termos das datas de entrega. Usando mais uma vez o critério de menor número total de máquinas compatíveis para desempatar, conclui-se que o quarto produto final da lista ordenada de

produtos finais deve ser o produto CM2 e o quinto e último, deve ser o produto final CS2.

Tabela 5.7 Dados do Exemplo 5.3

Produto Final	Data de entrega (horas)	Componente	Máquinas compatíveis	Tempo unitário de processamento (minutos)	Tempo total de processamento (horas)
CM1	24	CM1F	1,2,3,4,5	1	40
		CM1C	1,2,3,4,5	0.9	36
CM2	48	CM2F	1,4,5	1	33.33
		CM2C	1,4,5	0.9	30
CM3	24	CM3F	1,2,3,4	1	8.33
		CM3C	1,2,3,4	0.9	7.5
		CM3M	1,2,3,4,5	0.6	10
CS1	24	CS1F	1,3,4	1	6.67
		CS1C	1,3,4	0.9	6
		CS1M	1,2,3,4,5	0.6	8
CS2	48	CS2F	1,2,3,4,5	1	10
		CS2C	1,2,3,4,5	0.9	9
		CS2M	1,2,3,4,5	0.6	12

Tabela 5.8 Datas de disponibilidade das máquinas do Exemplo 5.3

Máquina	Data de disponibilidade (horas)
1	0
2	1
3	0
4	1
5	2

Tabela 5.9 Informação do Exemplo 5.3 usada no passo 1

Produto final	Data de entrega	Número total de máquinas compatíveis	Tempo unitário total de produção
CM1	24	10	1.9
CM2	48	6	1.9
CM3	24	13	2.5
CS1	24	11	2.5
CS2	48	15	2.5

A lista ordenada de componentes, obtida aplicando o passo dois da heurística de ordenação e escalonamento, é: CM1F, CM1C, CS1F, CS1C, CS1M, CM3F, CM3C, CM3M, CM2F, CM2C, CS2F, CS2C, CS2M. Os componentes associados aos produtos finais CM1, CM2 e CS2 têm empate em termos do número de máquinas compatíveis. Para desempatar foi usado o critério de maior tempo unitário de produção. Relativamente aos produtos finais CM3 e CS1, há empate entre os componentes CM3F e CM3C e CS1F e CS1C, respectivamente, em termos do número de máquinas compatíveis. Usando o critério do maior tempo unitário de produção, no produto final CM3 é atribuído em primeiro lugar o componente CM3F e de seguida o componente CM3C e no produto final CS1 é atribuído em primeiro lugar o componente CS1F e de seguida o componente CS1C.

A solução que se obtém aplicando o passo 3 da heurística de ordenação e escalonamento é a que se apresenta na Figura 5.16. O valor do atraso total desta solução é de 2.63 horas, devido ao produto final CM3, e o valor do desvio total é de 78.4 horas. A percentagem média de utilização das máquinas é igual a 92%. A percentagem de utilização de uma dada máquina M é calculada do modo já apresentado anteriormente.

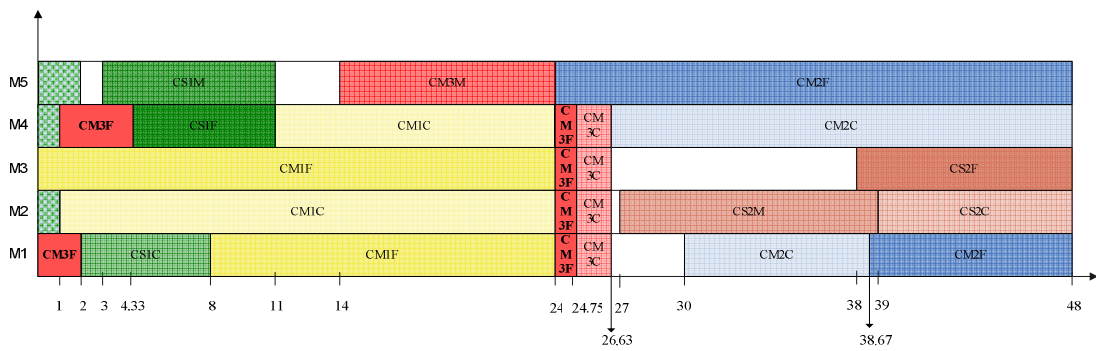


Figura 5.16 Solução do Exemplo 5.3

5.2.1 Resultados Computacionais

Nesta subsecção apresentam-se os resultados computacionais para a heurística de ordenação e escalonamento, considerando o conjunto de instâncias de teste apresentadas na secção 3.3.

A heurística de ordenação e escalonamento foi implementada em C++ usando o ambiente Microsoft Visual Studio 2008. Os testes computacionais foram realizados num computador pessoal com um processador Core 2Duo a 2 Ghz e com 2 GB de memória.

Na fase de implementação, atribuiu-se ao parâmetro K , que representa um limite superior para o número máximo de lotes agendados numa máquina, o seguinte valor: número de componentes \times horizonte temporal em dias. Na Tabela 5.10 e na Tabela 5.11 apresentam-se os resultados computacionais para o conjunto de 54 instâncias de teste. As medidas de desempenho consideradas são as mesmas que foram usadas para avaliar a qualidade das soluções da heurística de fluxos em rede e escalonamento.

Tabela 5.10 Resultados computacionais da heurística de ordenação e escalonamento

Instância	Jogo	Número de produtos finais	Número de componentes	Número de máquinas	Tempo total de resolução (segundos)	Atraso total dos produtos finais (horas)	Número de produtos finais com atraso	Desvio total dos produtos finais (horas)	Valor da função objectivo	Percentagem média de utilização das máquinas	Número de lotes	Número médio de lotes por componente	Desvio médio por produto final
Inst20T1.1.J21	21	8	18	5	0.00	5.6	1	254.4	5853.4	46.3	23	1.3	31.8
Inst20T1.2.J21	21	9	25	5	0.00	3.4	1	1094.7	4471.7	102.1	41	1.6	121.6
Inst20T1.3.J21	21	9	17	5	0.00	21.0	2	622.9	21601.4	80.7	45	2.6	69.2
Inst30T1.1.J21	21	18	50	5	0.00	77.5	5	2208.4	79729.6	103.9	117	2.3	122.7
Inst30T1.2.J21	21	20	56	5	0.00	2.3	1	533.3	2797.9	68.6	78	1.4	26.7
Inst30T1.3.J21	21	20	60	5	0.00	41.4	5	755.7	42174.3	92.7	132	2.2	37.8
Inst40T1.1.J21	21	20	58	5	0.00	0.0	0	609.2	609.2	99.4	77	1.3	30.5
Inst40T1.2.J21	21	24	69	5	0.00	5.5	2	1109.4	6606.9	101.9	112	1.6	46.2
Inst40T1.3.J21	21	27	74	5	0.00	0.0	0	268.0	268.0	79.3	101	1.4	9.9
Inst50T1.1.J21	21	29	74	5	0.00	0.0	0	395.9	395.9	87.6	94	1.3	13.7
Inst50T1.2.J21	21	30	74	5	0.00	7.6	1	1484.0	9042.0	104.5	114	1.5	49.5
Inst50T1.3.J21	21	33	99	5	0.00	0.0	0	629.0	629.0	86.4	129	1.3	19.1
Inst60T1.1.J21	21	26	70	5	0.00	0.0	0	1207.0	1207.0	98.0	99	1.4	46.4
Inst60T1.2.J21	21	30	77	5	0.00	38.9	3	977.0	39900.7	66.4	114	1.5	32.6
Inst60T1.3.J21	21	29	77	5	0.00	15.8	3	475.8	16300.2	96.0	121	1.6	16.4
Inst70T1.1.J21	21	30	90	5	0.00	114.3	14	579.0	114918.0	59.3	250	2.8	19.3
Inst70T1.2.J21	21	33	83	5	0.00	0.0	0	933.3	933.3	60.1	106	1.3	28.3
Inst70T1.3.J21	21	39	116	5	0.00	0.0	0	345.4	345.4	79.2	140	1.2	8.9
Inst20T1.1.J27	27	31	89	11	0.02	0.0	0	836.4	836.4	88.1	132	1.5	27.0
Inst20T1.2.J27	27	32	84	11	0.00	15.8	2	1247.4	17082.4	89.1	178	2.1	39.0
Inst20T1.3.J27	27	29	84	11	0.00	2.2	1	1211.5	3407.0	63.9	120	1.4	41.8
Inst30T1.1.J27	27	41	107	11	0.00	0.0	0	454.9	454.9	82.0	159	1.5	11.1
Inst30T1.2.J27	27	38	103	11	0.00	40.7	9	2461.2	43127.2	105.9	372	3.6	64.8
Inst30T1.3.J27	27	44	128	11	0.02	0.0	0	1061.7	1061.7	95.6	183	1.4	24.1
Inst40T1.1.J27	27	53	142	11	0.02	0.0	0	938.3	938.3	95.7	191	1.3	17.7
Inst40T1.2.J27	27	42	112	11	0.00	0.0	0	1077.1	1077.1	95.4	174	1.6	25.6
Inst40T1.3.J27	27	47	125	11	0.02	34.3	5	1964.5	36243.2	75.9	289	2.3	41.8

Tabela 5.11 Resultados computacionais da heurística de ordenação e escalonamento (continuação)

Instância	Jogo	Número de produtos finais	Número de componentes	Número de máquinas	Tempo total de resolução (segundos)	Atraso total dos produtos finais (horas)	Número de produtos finais com atraso	Desvio total dos produtos finais (horas)	Valor da função objectivo	Porcentagem média de utilização das máquinas	Número de lotes	Número médio de lotes por componente	Desvio médio por produto final
Inst50T1.1.J27	27	43	120	11	0.00	0.0	0	1668.8	1668.8	99.5	196	1.6	38.8
Inst50T1.2.J27	27	65	174	11	0.02	16.8	5	1595.1	18392.2	103.6	368	2.1	24.5
Inst50T1.3.J27	27	60	154	11	0.02	0.0	0	646.3	646.3	83.7	204	1.3	10.8
Inst60T1.1.J27	27	71	197	11	0.00	0.0	0	1857.1	1857.1	99.7	264	1.3	26.2
Inst60T1.2.J27	27	76	210	11	0.03	298.1	25	1727.4	299874.4	80.2	901	4.3	22.7
Inst60T1.3.J27	27	67	181	11	0.02	94.5	9	1535.0	96034.8	96.9	486	2.7	22.9
Inst70T1.1.J27	27	70	182	11	0.02	361.7	20	2239.9	363914.9	97.5	700	3.8	32.0
Inst70T1.2.J27	27	81	221	11	0.03	251.5	19	2339.1	253790.1	98.5	728	3.3	28.9
Inst70T1.3.J27	27	67	187	11	0.02	146.3	15	2363.0	148681.0	91.3	651	3.5	35.3
Inst20T1.1.J24	24	34	94	13	0.00	0.0	0	500.4	500.4	95.6	148	1.6	14.7
Inst20T1.2.J24	24	37	108	13	0.02	22.3	4	2256.6	24545.2	91.8	287	2.7	61.0
Inst20T1.3.J24	24	34	98	13	0.00	126.3	8	2206.0	128529.0	96.6	426	4.3	64.9
Inst30T1.1.J24	24	51	139	13	0.00	0.0	0	816.5	816.5	82.7	195	1.4	16.0
Inst30T1.2.J24	24	49	135	13	0.00	2.9	1	2832.3	5722.8	101.8	240	1.8	57.8
Inst30T1.3.J24	24	38	90	13	0.00	30.5	4	2082.2	32625.8	97.5	271	3.0	54.8
Inst40T1.1.J24	24	57	152	13	0.00	1.9	1	2364.7	4240.1	91.2	235	1.5	41.5
Inst40T1.2.J24	24	64	174	13	0.00	0.0	0	499.4	499.4	82.5	226	1.3	7.8
Inst40T1.3.J24	24	57	157	13	0.02	98.3	10	2008.0	100322.6	94.8	569	3.6	35.2
Inst50T1.1.J24	24	55	152	13	0.02	0.0	0	322.2	322.2	65.4	204	1.3	5.9
Inst50T1.2.J24	24	70	197	13	0.03	426.6	20	2606.1	429159.1	114.0	906	4.6	37.2
Inst50T1.3.J24	24	70	184	13	0.02	6.1	4	1403.9	7455.6	96.3	378	2.1	20.1
Inst60T1.1.J24	24	81	216	13	0.02	0.0	0	797.4	797.4	90.5	284	1.3	9.8
Inst60T1.2.J24	24	69	188	13	0.02	12.1	2	3239.3	15343.3	103.9	327	1.7	46.9
Inst60T1.3.J24	24	81	232	13	0.02	1.0	1	2476.2	3438.7	100.6	335	1.4	30.6
Inst70T1.1.J24	24	82	226	13	0.02	0.0	0	973.3	973.3	88.5	295	1.3	11.9
Inst70T1.2.J24	24	94	254	13	0.02	99.1	10	2720.7	101812.3	109.8	746	2.9	28.9
Inst70T1.3.J24	24	108	277	13	0.03	17.0	12	2342.4	19379.2	101.5	752	2.7	21.7

A heurística de ordenação e escalonamento é extremamente rápida, resolvendo todas as instâncias em menos de 0.03 segundos, tal como se pode verificar pela análise da coluna 6 da Tabela 5.10 e da Tabela 5.11.

O atraso médio total dos produtos finais, para o conjunto das 54 instâncias, é de 45.2 horas. Através da análise da Figura 5.17 existem dúvidas sobre a existência de uma relação entre o número de componentes e o atraso total dos produtos finais. Contudo é possível verificar que quando o número de componentes é superior a cerca de 160 o atraso total dos produtos finais aumenta consideravelmente. Em termos gerais a percentagem média de utilização das máquinas não parece ter um grande impacto no atraso total dos produtos finais, como se pode analisar na Figura 5.18. Como já referido anteriormente, as datas de entrega dos produtos finais, assim como as quantidades requeridas dos seus componentes são geradas aleatoriamente, o que faz com que possamos ter uma instância com uma carga total elevada, mas com datas de entrega pouco apertadas, ou ter instâncias com menor carga total mas com datas de entrega muito apertadas, que originam inevitavelmente maiores atrasos. O facto de existir uma matriz de compatibilidade entre máquinas e componentes poderá também afectar o atraso, principalmente quando as datas de entrega são apertadas. Como seria de esperar, o atraso total dos produtos finais tende a aumentar para valores de percentagem média de utilização das máquinas superiores a 100%. À medida que aumenta o atraso dos produtos finais a variabilidade do número de lotes também aumenta, como se pode verificar na Figura 5.19. Este comportamento pode em parte ser justificado por uma característica da heurística de ordenação e escalonamento, na qual quando um dado componente tem de ser escalonado com atraso, este é dividido pelo número de máquinas compatíveis, o que faz com que o número de lotes aumente.

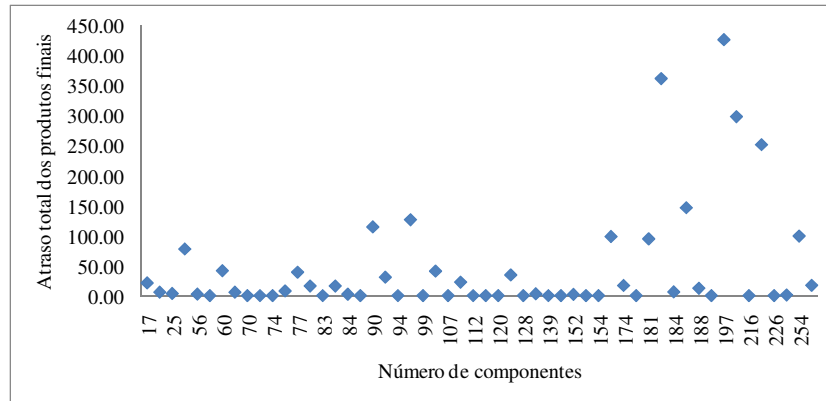


Figura 5.17 Comportamento do atraso total dos produtos finais face ao aumento do número de componentes – heurística de ordenação e escalonamento

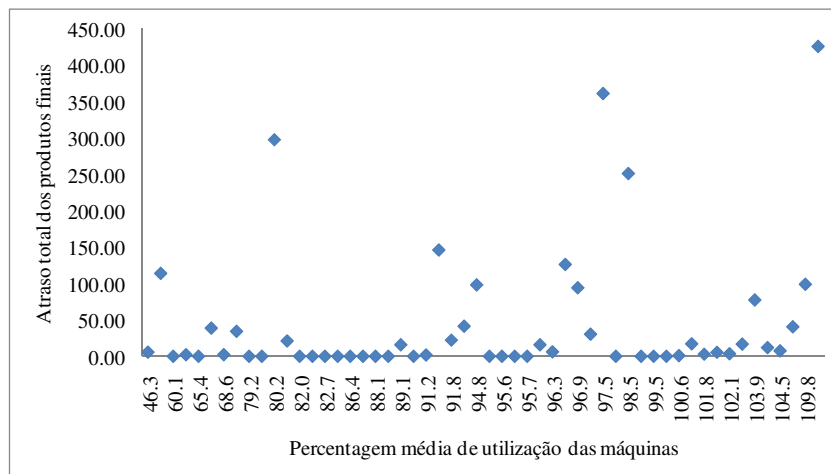


Figura 5.18 Comportamento do atraso total dos produtos finais face ao aumento da percentagem média de utilização das máquinas – heurística de ordenação e escalonamento

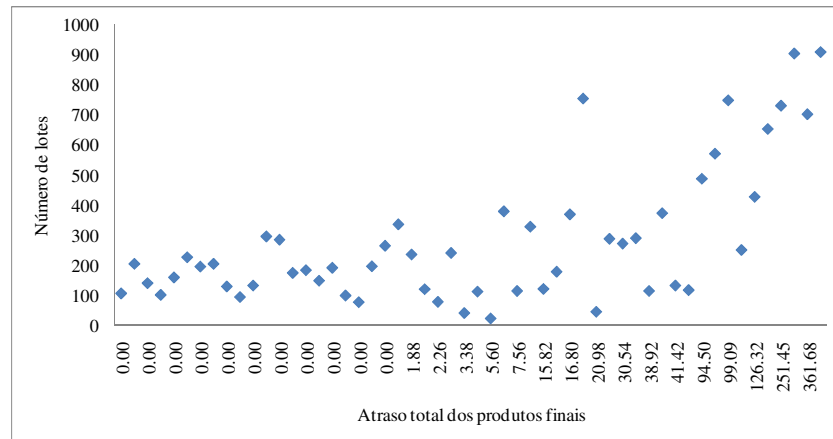


Figura 5.19 Comportamento do número de lotes face ao aumento do atraso total dos produtos finais – heurística de ordenação e escalonamento

O desvio médio total dos produtos finais é igual a 1373.2 horas e a média do desvio médio por produto final é igual a 33.9 horas. Ambos os indicadores mostram que os desvios totais dos produtos finais são elevados. Existem dúvidas em termos da associação linear entre o número de componentes e o desvio total dos produtos finais (ver Figura 5.20). Contudo identifica-se que a maiores valores do número de componentes correspondem maiores valores de desvio total dos produtos finais. Em relação ao comportamento do desvio total dos produtos finais com a percentagem média de utilização das máquinas identifica-se que existe uma relação linear algo ténue entre as duas variáveis, como se pode verificar pela análise da Figura 5.21. Contudo existem indícios de que o desvio total dos produtos finais aumenta à medida que aumenta a percentagem média de utilização das máquinas. Já para o número de lotes *versus* desvio total dos produtos finais, verifica-se que à medida que o desvio total dos produtos finais aumenta, aumenta também o número de lotes e respectiva variabilidade (ver Figura 5.22).

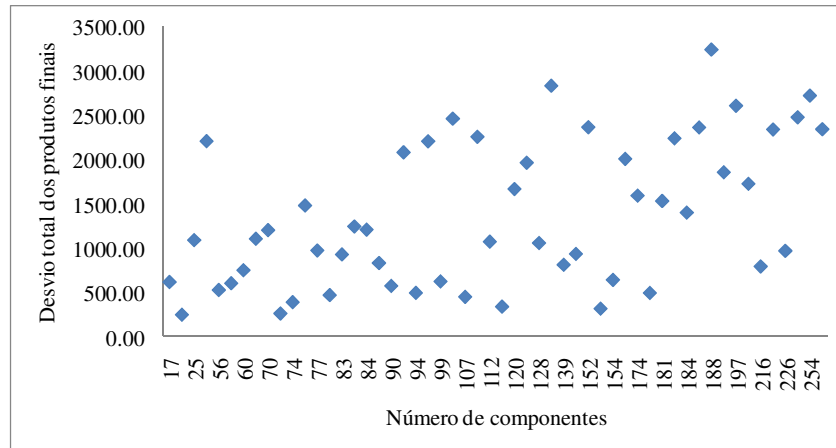


Figura 5.20 Comportamento do desvio total dos produtos finais face ao aumento do número de componentes – heurística de ordenação e escalonamento

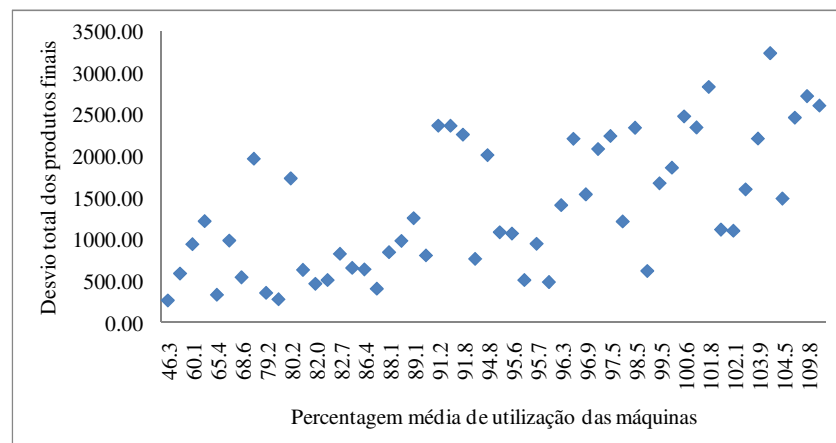


Figura 5.21 Comportamento do desvio total dos produtos finais face ao aumento da percentagem média de utilização das máquinas – heurística de ordenação e escalonamento

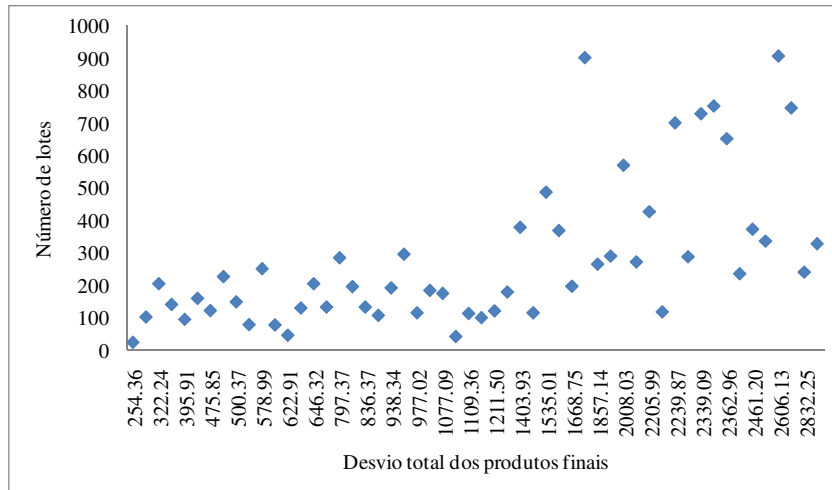


Figura 5.22 Comportamento do número de lotes face ao aumento do desvio total dos produtos finais – heurística de ordenação e escalonamento

Comparando o atraso total dos produtos finais com o desvio total dos produtos finais (Figura 5.23), verifica-se que para valores de desvios totais superiores a 2000 (sensivelmente) o atraso total aumenta ainda que de forma irregular (amplitudes significativas).

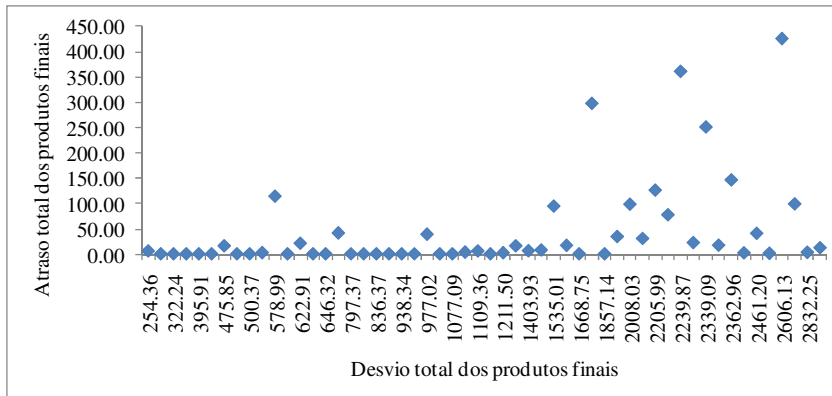


Figura 5.23 Comportamento do atraso total face ao aumento do desvio total dos produtos finais – heurística de ordenação e escalonamento

A média do número médio de lotes por componente é igual a cerca de 2. Quando o número de componentes é inferior a cerca de 155, existe uma associação linear crescente entre o número de lotes e o número de componentes da instância, como se

pode verificar na Figura 5.24. Para valores superiores, o comportamento altera-se por aumento da amplitude de variação no número de lotes. Ainda assim, pode-se afirmar que quanto maior o número de componentes, maior o número de lotes que lhe está associado.

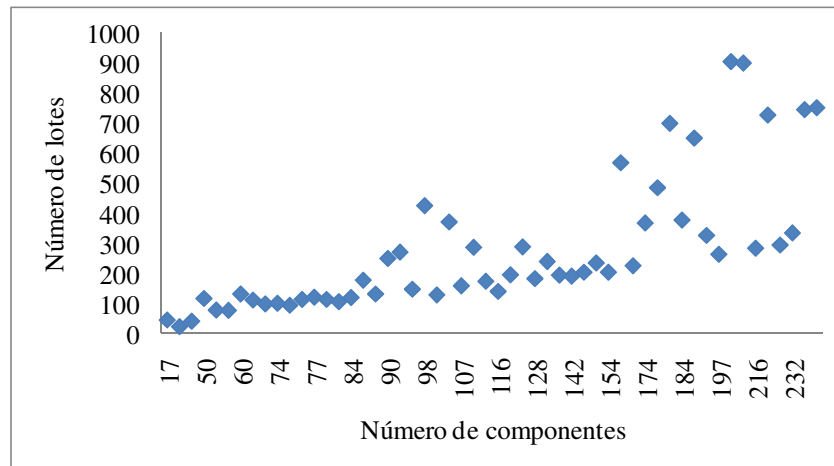


Figura 5.24 Comportamento do número de lotes face ao aumento do número de componentes – heurística de ordenação e escalonamento

5.3 Conclusões

Neste capítulo apresentaram-se duas heurísticas dedicadas para o problema DLEMP. A primeira heurística resolve o problema em duas etapas, sendo aplicado em cada etapa um modelo de fluxos em rede e uma heurística de escalonamento. Na segunda heurística o problema é também resolvido em duas etapas: na primeira etapa procede-se à ordenação do conjunto de componentes a considerar no plano de produção e na segunda etapa procede-se ao dimensionamento de cada lote de componentes, ao seu agendamento numa máquina e respectivo escalonamento.

A heurística de ordenação e escalonamento tem um desempenho muito superior ao da heurística de fluxos em rede e escalonamento, quer em termos da qualidade das soluções, quer em termos de eficiência. Tendo por base os resultados computacionais,

conclui-se que na heurística de fluxos em rede e escalonamento a média do valor da função objectivo é igual a 148 788.1 e na heurística de ordenação e escalonamento é igual a 46 543.6. Já em termos de eficiência, o tempo médio de resolução das 54 instâncias na heurística de fluxos em rede e escalonamento (considerando todas as combinações de ordens de máquinas) é de 578.1 segundos e na heurística de ordenação e escalonamento é de 0.0075 segundos.

As soluções da heurística de ordenação e escalonamento têm em termos gerais menos lotes do que as soluções da heurística de fluxos em rede e escalonamento. A média do número de lotes da heurística de ordenação e escalonamento é igual a 278, sendo a mesma média igual a 330 na heurística de fluxos em rede e escalonamento. Considerando apenas as instâncias para as quais a solução da heurística de ordenação e escalonamento não tem atraso (já que na situação de atraso uma característica desta heurística é a de usar um maior número de lotes para diminuir o tempo de atraso), verifica-se que à medida que a dimensão do problema aumenta, aumenta também a diferença entre o número de lotes da solução da heurística de ordenação e escalonamento e o número de lotes da solução da heurística de fluxos em rede e escalonamento. Em algumas das instâncias de maior dimensão o número de lotes da solução da heurística de fluxos em rede e escalonamento é mais do que duas vezes superior ao número de lotes da solução da heurística de ordenação e escalonamento.

Na heurística de ordenação e escalonamento existe um controlo rigoroso dos desvios e dos atrasos. Previamente à afectação e escalonamento de um lote de um componente numa máquina, é determinada a data de conclusão mais próxima (considerando o conjunto de máquinas compatíveis) da data de conclusão actual do produto final ao qual esse componente pertence, sendo o lote agendado na máquina associada a essa data de conclusão mais próxima. Neste caso o lote termina nessa data.

Na heurística de fluxos em rede e escalonamento esse controlo não é tão rigoroso. No modelo de fluxos em rede da etapa 1 os desvios e os atrasos dos componentes são contabilizados sobre o instante de conclusão do intervalo (previamente ao seu escalonamento). Numa dada solução do modelo de fluxos em rede mais do que um lote pode ser atribuído ao mesmo intervalo. Na prática o modelo de fluxos em rede considera que todos esses lotes terminam no instante de conclusão do intervalo. Só

posteriormente os instantes de início e de conclusão dos lotes associados a esse intervalo serão determinados e os instantes de conclusão considerados na etapa 1 corrigidos.

Comparando o modelo de programação inteira mista (PIM) com as heurísticas dedicadas, conclui-se que as soluções das heurísticas são melhores que as que se obtêm com o modelo de PIM, quer em termos da qualidade das soluções, quer em termos de eficiência. A média do valor da função objectivo, considerando as 53 instâncias para as quais é conhecida uma solução incumbente ou uma solução óptima, no modelo de PIM é igual a 1 055 067.8. Com o modelo de PIM apenas uma instância foi resolvida dentro do limite de tempo de resolução estabelecido.

Comparando os valores da função objectivo dos três métodos entre si, verifica-se que o MIP alcança a melhor solução nas duas primeiras instâncias (Inst20T1.1.J21 e Inst20T1.2.J21) e a heurística de fluxos em rede e escalonamento numa instância (Inst70T1.1.J27). Nas restantes 51 instâncias a heurística de ordenação e escalonamento alcança a melhor solução.

Nos três métodos, existe a tendência para o desvio total dos produtos finais aumentar com o aumento do número de componentes, assim como para ocorrerem maiores atrasos nas instâncias com maior número de componentes. O valor do atraso total parece ser independente da percentagem de utilização (para percentagens de utilização menores ou iguais a 100%), o que pode em parte ser explicado, como já mencionado, pelo facto de as datas de entrega e as procuras totais dos produtos finais serem geradas aleatoriamente. Quer no modelo de PIM, quer na heurística de ordenação e escalonamento existe uma tendência para o desvio total aumentar à medida que aumenta a percentagem de utilização, assim como para aumentar a amplitude de variação do desvio total. Nos três métodos, o número de lotes tem tendência para aumentar com o aumento do desvio total. Essa tendência (de aumento do número de lotes) também se verifica no modelo de PIM e na heurística de ordenação e escalonamento em relação ao atraso total. Comparando o atraso total dos produtos finais com o seu desvio total, no modelo de PIM e na heurística de ordenação e escalonamento os maiores atrasos estão associados às instâncias com maiores desvios e vice-versa. Já

na heurística de fluxos em rede e escalonamento o comportamento do atraso total relativamente ao desvio total é irregular.

Capítulo 6

Heurísticas Baseadas em Pesquisa Local para o Problema de Dimensionamento de Lotes e Escalonamento Integrados em Máquinas Paralelas

Neste capítulo, apresentam-se meta-heurísticas baseadas em pesquisa local para o problema de dimensionamento de lotes e escalonamento integrados em máquinas paralelas (DLEMP).

A secção 6.1 é dedicada a quatro algoritmos de pesquisa local que têm em consideração características particulares do problema DLEMP. Na secção 6.2 apresentam-se duas meta-heurísticas baseadas em mudanças sistemáticas das vizinhanças. Todos os algoritmos são avaliados através do conjunto de instâncias usadas nos dois capítulos anteriores, estando os resultados computacionais apresentados em ambas as secções. Na secção 6.3 sumarizam-se as conclusões deste capítulo.

Parte deste trabalho foi publicado em Pimentel et al. (2010b).

6.1 Algoritmos de Pesquisa Local

Um algoritmo de pesquisa local é um algoritmo de melhoria, que em cada iteração tenta substituir uma solução actual por uma solução melhor, solução essa obtida na sua vizinhança. Uma solução é vizinha de outra, se puder ser obtida através de uma modificação elementar, previamente estabelecida, desta última solução. Em cada iteração do algoritmo, são pesquisadas e avaliadas várias soluções na vizinhança da solução actual, podendo a solução actual ser substituída por uma dessas soluções caso uma das soluções vizinhas seja melhor do que a solução actual.

6.1.1 Representação de uma Solução

Em algoritmos de pesquisa local para problemas de escalonamento sem dimensionamento de lotes, normalmente as soluções são representadas usando permutações de produtos. Através da permutação consegue-se facilmente obter a solução completa do problema, incluindo os instantes de início e de conclusão dos produtos. No caso do problema DLEMP essa representação das soluções não é adequada, porque não se sabe à partida qual a dimensão dos lotes, nem o número de lotes associados a cada componente. Para além disso, dois ou mais lotes do mesmo componente podem ser produzidos na mesma máquina, assim como podem existir períodos de inactividade entre dois lotes consecutivos de uma dada máquina. Neste trabalho, as soluções da pesquisa local são representadas por um conjunto de lotes, guardando-se para cada lote informação relativa ao seu instante de início, à sua duração, ao componente que lhe está associado e à máquina onde este é produzido.

6.1.2 Estruturas de Vizinhança

A definição da estrutura de vizinhança é uma questão essencial em qualquer algoritmo de pesquisa local, já que esta define as soluções que se podem obter a partir de uma solução actual. Nesta secção definem-se quatro estruturas de vizinhança que têm em consideração características particulares do problema DLEMP. As quatro estruturas de vizinhança baseiam-se em inserções de lotes. Num qualquer movimento de inserção,

um lote é removido da sua posição actual na solução actual e é inserido numa nova posição, sendo a nova posição definida por uma máquina e um instante de conclusão do lote. Esse instante de conclusão é por sua vez definido através de uma data objectivo.

A principal motivação para a utilização de datas objectivo está relacionada com o propósito de se minimizarem os desvios ocorridos entre os instantes de conclusão dos lotes de componentes que pertençam ao mesmo produto final. As datas objectivo, representam assim, instantes de conclusão promissores em termos de redução dos desvios totais dos produtos finais. Assim sendo, as datas objectivo são definidas por produto final. Cada produto final tem associado um conjunto de datas objectivo definido por: data de entrega do produto final; instantes de início de todos os lotes de componentes associados ao produto final em questão na solução actual; e instantes de conclusão de todos os lotes de componentes associados ao produto final em questão na solução actual.

Em cada estrutura de vizinhança a pesquisa é levada a cabo para todos os lotes, todas as máquinas e todas as datas objectivo da solução actual. Durante a pesquisa sempre que é encontrada uma solução vizinha melhor que a solução actual, a solução vizinha passa a ser a solução actual (*first descent strategy*) e a pesquisa prossegue até que não exista nenhuma solução vizinha melhor do que a solução actual.

Em cada movimento da pesquisa local um dado lote é inserido numa dada máquina e numa dada data objectivo (que define o instante de conclusão desse lote). As quatro estruturas de vizinhança denominam-se por: inserção total para trás (ITT), inserção total para a frente (ITF), inserção parcial para trás (IPT) e inserção parcial para a frente (IPF).

Na estrutura de ITT, quando devido à inserção do novo lote um ou mais lotes da solução actual têm de ser re-escalados na máquina, esses lotes são totalmente movidos para trás. Já na IPT, apenas a parte do(s) lote(s) da solução actual que é (são) ocupada(s) por força da inserção do novo lote tem (têm) de ser movida(s) para trás. Em qualquer uma destas estruturas de vizinhança, antes de se efectuar a inserção do novo lote é necessário verificar se a soma do tempo livre na máquina em questão até ao

instante de início do lote a inserir é maior ou igual que a soma do tempo total dos lotes a mover para trás. Caso contrário a inserção do novo lote não deverá acontecer.

A principal diferença entre a estrutura de vizinhança de ITT e a estrutura de ITF, reside no facto de os lotes que têm de ser re-escalados, após o movimento de um dado lote, serem movidos totalmente para a frente e não para trás. Finalmente, a estrutura de vizinhança de IPF, funciona de modo análogo à estrutura de IPT, com a diferença de as partes dos lotes (e/ou lotes) serem movidas para a frente e não para trás. Nestas duas estruturas de vizinhança, para além de se moverem para a frente os lotes ou as partes de lotes que têm de ser re-escalados após a inserção do novo lote, todos os lotes que na solução actual iniciem após a data objectivo terão de ser totalmente movidos para a frente.

Em qualquer uma das estruturas de vizinhança, o número de lotes a mover na solução actual (para uma nova posição na máquina), devido à inserção do novo lote nessa máquina numa dada data objectivo, depende da solução actual. Se o lote a inserir ocupar um intervalo vazio, nenhum dos lotes da solução actual terá de ser movido e apenas os intervalos vazios têm de ser corrigidos face à ocupação de parte ou da totalidade desse espaço vazio. Por sua vez, se o lote a inserir ocupar parte de um lote da solução actual, a totalidade desse lote deve ser movido imediatamente para trás (na ITT) ou imediatamente para a frente (na ITF) do lote a inserir, fazendo coincidir o instante de conclusão do lote a mover com o instante de início do lote a inserir, caso se trate da ITT ou fazendo coincidir o instante de conclusão do lote a inserir com o instante de início do lote a mover caso se trate da ITF. Caso se trate da IPT ou da IPF apenas a parte do lote da solução actual que é ocupada com a inserção do novo lote é movida para trás ou para a frente, sendo essa parte do lote inserida imediatamente antes (na IPT) ou imediatamente após (na IPF) a inserção do novo lote. A Figura 6.1 esquematiza esta situação.

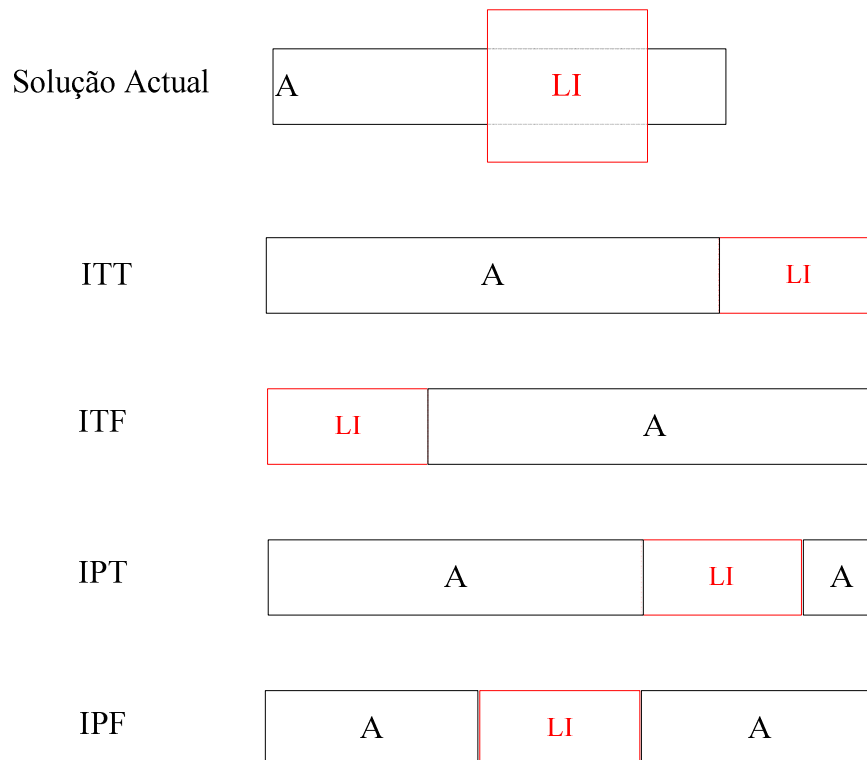


Figura 6.1 Representação das implicações da inserção de um lote na solução actual (lote LI), que ocupa parte de um lote da solução actual (lote A), na solução vizinha de cada estrutura de vizinhança

Outra situação que pode ocorrer aquando da inserção de um novo lote numa dada máquina, é esse lote ocupar vários lotes da solução actual (integral ou parcialmente, podendo um ou mais lotes ser ocupados na totalidade). Nesta situação o procedimento a adoptar é semelhante ao descrito no parágrafo anterior. Na Figura 6.2 esquematiza-se esta situação e as modificações na solução actual de acordo com a estrutura de vizinhança. Por outro lado, o lote a inserir pode ocupar parte ou a totalidade de um espaço vazio e uma ou mais partes ou a totalidade de intervalos ocupados. Neste caso, as partes de lotes ocupadas têm de ser movidas de acordo com a estrutura de vizinhança de modo semelhante ao anteriormente exposto.

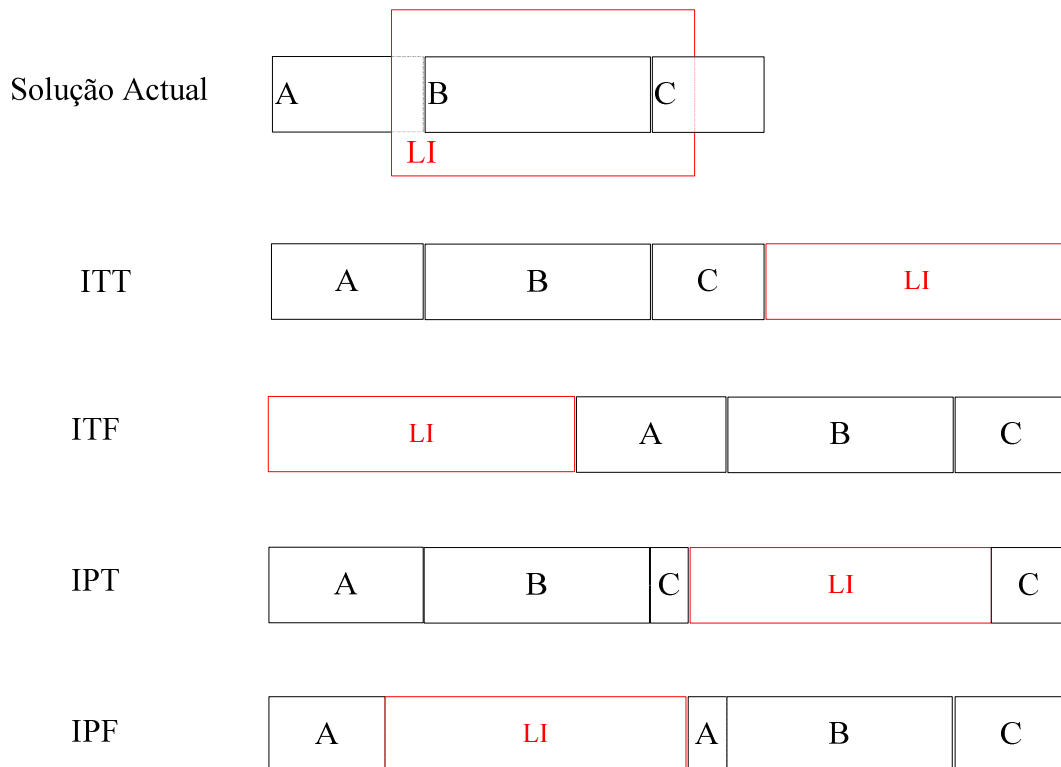


Figura 6.2 Representação das implicações da inserção de um lote na solução actual (lote LI), que ocupa parte dos lotes A e C da solução actual e a totalidade do lote B, na solução vizinha de cada estrutura de vizinhança

Sempre que ocorre uma inserção de um lote numa máquina e data objectivo específicas, após essa inserção os intervalos vazios nessa máquina e na máquina de onde foi retirado o lote têm de ser corrigidos. De notar que sempre que se faz uma inserção de um lote, o número de lotes da solução vizinha pode ser modificado relativamente ao número de lotes da solução actual, já que após a inserção do novo lote e re-escalamento dos lotes a mover, podem ocorrer junções de lotes ou divisões de lotes. De seguida, apresentam-se as quatro estruturas de vizinhança através de um pequeno exemplo.

Exemplo 6.1

Considere-se um problema com duas máquinas e dois produtos finais, A e B. O produto final A tem uma data de entrega igual a 32 unidades de tempo e tem dois componentes associados: o componente A1 com uma duração igual a 10 unidades de

tempo e o componente A2 com uma duração igual a 13 unidades de tempo. O produto final B tem também data de entrega igual a 32 unidades de tempo e dois componentes: o componente B1 com uma duração igual a 6 unidades de tempo e o componente B2 com uma duração de 9 unidades de tempo. Todos os componentes deste problema podem ser agendados em qualquer uma das duas máquinas. Considere-se ainda a solução actual apresentada na Figura 6.3.

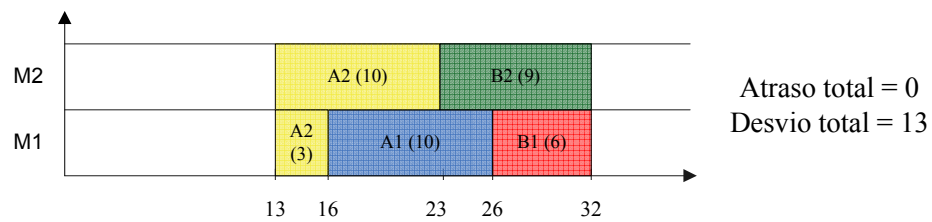


Figura 6.3 Solução actual do Exemplo 6.1

Na Figura 6.4 apresenta-se uma solução vizinha da solução actual para a estrutura de vizinhança da ITT, obtida a partir do movimento do lote A2 da máquina M1 da solução actual, para a máquina M2, pretendendo-se que na máquina M2 o lote A2 termine na data objectivo 26. A data objectivo 26 corresponde neste caso ao instante de conclusão do lote A1 na máquina M1. Como se pode verificar pela análise da Figura 6.4 a mudança do lote A2 da máquina M1, forçou os lotes A2 e B2 da máquina M2 a serem totalmente movidos para trás.

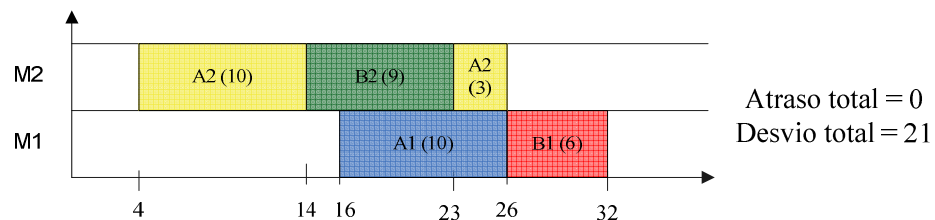


Figura 6.4 Inserção total para trás - Exemplo 6.1

Considere-se o mesmo movimento usado na ITT, *i.e.*, mover o lote A2 da máquina M1 da solução actual para a máquina M2, fazendo terminar esse lote na nova posição no instante 26. Na Figura 6.5 apresenta-se a solução vizinha obtida para a ITF. Como estamos perante a estrutura de ITF, o lote B2 da máquina M2 na solução actual tem de ser totalmente movido para a frente. Note-se que este movimento originou a junção (*batch*) dos dois lotes A2 da solução actual da Figura 6.3, passando a existir apenas um lote do componente A2.

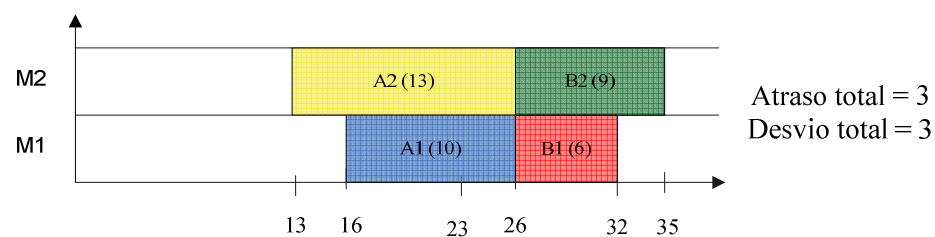


Figura 6.5 Inserção total para a frente - Exemplo 6.1

Na Figura 6.6 exemplifica-se a IPT, através do movimento do lote A2 da máquina M1 da solução actual para a máquina M2, com data objectivo igual a 26. Como apenas 3 unidades de tempo do lote B2 são ocupadas com a inserção do lote A2 na máquina M2 na data objectivo 26, nesta estrutura de vizinhança apenas essas 3 unidades de tempo do lote B2 têm de ser movidas para trás. O lote A2 da máquina M2 é também movido 3 unidades de tempo para trás. Note-se que esta inserção levou a que o lote B2 fosse separado (*split*) em dois lotes.

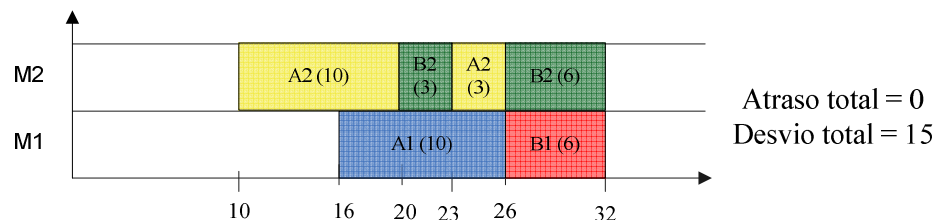


Figura 6.6 Inserção parcial para trás - Exemplo 6.1

Finalmente, na Figura 6.7 apresenta-se o exemplo da inserção do lote A2 da máquina M1 da solução actual na máquina M2, com data objectivo igual a 32 (data de entrega do produto final A) para a estrutura de IPF.

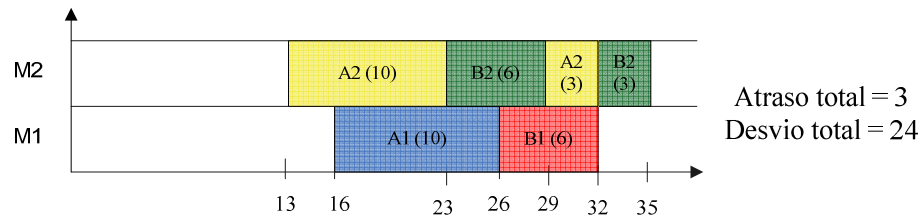


Figura 6.7 Inserção parcial para a frente - Exemplo 6.1

■

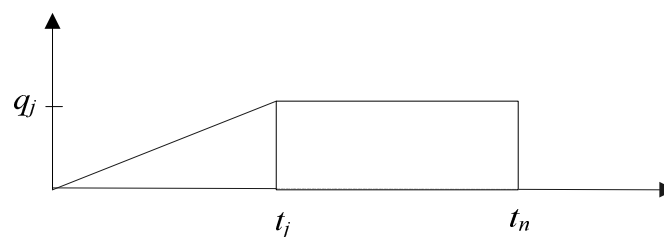
Durante o processo de pesquisa, em qualquer uma das estruturas de vizinhança, a dimensão da vizinhança vai sendo alterada, porque o número de lotes pode aumentar (devido à partição de lotes) ou diminuir (devido à junção de lotes), assim como o número de datas objectivo, não sendo possível previamente à pesquisa quantificar com rigor a dimensão da vizinhança. Considerando que L_n representa o número de lotes do produto final n (onde se incluem os lotes associados a todos os componentes que pertençam a esse produto final), que M representa o número de máquinas e que os lotes associados a um dado componente podem ser produzidos em qualquer uma das M máquinas, a dimensão da vizinhança é dada por $\sum_{i=1}^n L_n \times (2L_n + 1) \times M$. Considerando que o número total de lotes é dado por L , um limite superior para a dimensão da vizinhança é dado por $L \times (2L + 1) \times M$.

6.1.3 Funções de Avaliação

A avaliação das soluções é feita através de duas funções de avaliação alternativas, com o intuito de disponibilizar ao agente de decisão mais do que um plano de produção alternativo.

A primeira função de avaliação é semelhante à função objectivo que tem sido tratada ao longo deste trabalho (a qual foi introduzida no Capítulo 3), na qual se minimizam os atrasos totais dos produtos finais e os desvios totais dos produtos finais. Nesta função de avaliação, o desvio de um dado produto final é medido pela diferença entre os instantes de conclusão dos lotes de componentes associados a esse produto final e o instante de conclusão do produto final. Contabilizando o desvio total desta forma, está-se a minimizar a quantidade de trabalho em curso de fabrico entre duas etapas sucessivas do processo produtivo.

Uma medida mais rigorosa, dos níveis de inventário passa por garantir a minimização dos stocks quer entre as duas etapas sucessivas do processo produtivo, quer dentro da secção de tricotagem. Essa nova medida é concretizada através da segunda função de avaliação, que minimiza o stock médio, em unidades de tempo \times quantidade, durante a produção e após a produção. O stock médio durante a produção de um dado lote j é dado pela multiplicação da duração do lote j pela divisão da quantidade produzida do lote j sobre dois. O stock médio após a produção contabiliza o tempo que um dado lote j passa na secção após estar produzido (dado pela diferença entre o instante de conclusão do produto final ao qual o lote j está associado e o instante de conclusão do lote j) e multiplica esse tempo pela quantidade produzida do lote j . Na Figura 6.8 ilustra-se a expressão de cálculo do stock médio associado a um dado lote j , onde t_j representa o instante de conclusão do lote j , t_n representa o instante de conclusão do produto final ao qual o componente j pertence e q_j representa a quantidade produzida do lote j .



$$Stock_j = (t_j - 0) \times \frac{q_j}{2} + (t_n - t_j) \times q_j$$

Figura 6.8 Expressão de cálculo do stock médio associado a um lote

O valor do stock médio total durante a produção de uma dada solução é determinado pela seguinte expressão:
$$\sum_{\text{lotes } j} \text{Duração lote } j \times \frac{\text{Quantidade produzida de } j}{2}.$$

Já o valor do stock médio total após a produção de uma dada solução é dado por:

$$\sum_{\text{produtos finais } n} \sum_{\text{lotes } j \in n} (\text{Instante conclusão } n - \text{Instante conclusão } j) \times \text{Quantidade produzida de } j$$

.

No cálculo do stock médio durante a produção, quando parte ou a totalidade de um lote é produzido após a data de entrega do produto final associado, há uma penalização acrescida pelo facto de esse lote estar a ser produzido fora do prazo pretendido (parâmetro β do algoritmo da Figura 6.9). Quer o stock médio durante a produção, de lotes sem atraso, quer o stock médio após a produção, têm também pesos associados (parâmetros α e μ do algoritmo da Figura 6.9, respectivamente). Na Figura 6.9 apresenta-se o pseudo-código da segunda função de avaliação.

Na Figura 6.10 apresenta-se o pseudo-código para determinar o valor do stock médio total durante a produção com atraso, de uma dada solução.

No texto que se segue a função de avaliação que minimiza o atraso total e o desvio total dos produtos finais será designada por função de avaliação 1 e a função de avaliação baseada na minimização do stock será designada por função de avaliação 2.

Para todos os produtos finais n

Para todos os lotes de componentes j do produto final n

Se (instante de conclusão do lote j > data de entrega do produto final n) e se (instante de início do lote j < data de entrega do produto final n)

$$\text{Stock} = \alpha \times \text{duração da parte do lote j que } \acute{e} \leq \text{à data de entrega do produto final n} \times (\text{quantidade produzida da parte do lote j que } \acute{e} \leq \text{à data de entrega do produto final n} / 2)$$

$$+$$

$$\beta \times \text{duração da parte do lote j que } \acute{e} > \text{do que a data de entrega do produto final n} \times (\text{quantidade produzida da parte do lote j que } \acute{e} > \text{do que a data de entrega do produto final n} / 2)$$

$$+$$

$$\mu \times (\text{instante de conclusão do produto final n} - \text{instante de conclusão do lote j}) \times \text{quantidade produzida do lote j}$$

Senão se (instante de conclusão do lote j > data de entrega do produto final n) e se (instante de início do lote j \geq data de entrega do produto final n)

$$\text{Stock} = \beta \times \text{duração do lote j} \times (\text{quantidade produzida do lote j} / 2)$$

$$+$$

$$\mu \times (\text{instante de conclusão do produto final n} - \text{instante de conclusão do lote j}) \times \text{quantidade produzida do lote j}$$

Senão

$$\text{Stock} = \alpha \times \text{duração do lote j} \times (\text{quantidade produzida do lote j} / 2)$$

$$+$$

$$\mu \times (\text{instante de conclusão do produto final n} - \text{instante de conclusão do lote j}) \times \text{quantidade produzida do lote j}$$

Figura 6.9 Pseudo-código da segunda função de avaliação

```
Para todos os produtos finais n
  Para todos os lotes de componentes j do produto final n
    Se (parte do lote do component j é produzido com atraso)
      Stock médio com atraso += duração da parte do lote j que é produzido com atraso × (quantidade produzida do lote j com atraso / 2)
    Senão se (todo o lote do component j é produzido com atraso)
      Stock médio com atraso += duração do lote j × (quantidade produzida do lote j / 2)
```

Figura 6.10 Pseudo-código do stock médio durante a produção com atraso

6.1.4 Resultados Computacionais

Nesta subsecção apresentam-se os resultados da pesquisa local, obtidos a partir da resolução do conjunto de instâncias de teste apresentado na secção 3.3. São apresentados resultados para as quatro estruturas de vizinhança apresentadas na subsecção 6.1.2 partindo da solução obtida a partir da heurística de fluxos em rede e escalonamento (secção 5.1) e partindo da solução da heurística de ordenação e escalonamento (secção 5.2). Cada estrutura de vizinhança é ainda testada com as duas funções de avaliação apresentadas na subsecção anterior. No total obtêm-se quatro combinações de resultados de pesquisa local: (1) resultados considerando a solução da heurística de fluxos em rede e escalonamento com a função de avaliação 1; (2) resultados considerando a solução da heurística de fluxos em rede e escalonamento com a função de avaliação 2; (3) resultados considerando a solução da heurística de ordenação e escalonamento com a função de avaliação 1 e (4) resultados considerando a solução da heurística de ordenação e escalonamento com a função de avaliação 2.

Uma característica que distingue as soluções da heurística de fluxos em rede e escalonamento das soluções da heurística de ordenação e escalonamento é o número de lotes da solução, que é superior na primeira heurística. Apesar do desempenho da heurística de fluxos em rede e escalonamento ser pior do que o desempenho da heurística de ordenação e escalonamento, a primeira também foi incluída nos testes da pesquisa local, para testar a influência do número de lotes na pesquisa local.

Os resultados das quatro estruturas de vizinhança são comparados entre si e comparados com a solução inicial.

Todos os algoritmos de pesquisa local foram implementados em C++ usando o ambiente Microsoft Visual Studio 2008. Os testes computacionais foram realizados num computador pessoal com um processador Core 2Duo a 2 Ghz e com 2 GB de memória. O tempo de resolução foi limitado a 2 horas em todos os algoritmos. Na função de avaliação 1 o peso por unidade de tempo do desvio entre o instante de conclusão do produto final n e o instante de conclusão de cada lote dos seus componentes (α_n) foi fixado no valor 1 e o peso do atraso do produto final n por unidade de tempo (β_n) foi fixado no valor 1000. Na função de avaliação 2 os parâmetros α e μ assumem o valor 0.005 e o parâmetro β assume o valor 0.99.

6.1.4.1 Resultados da Pesquisa Local partindo da Heurística de Fluxos em Rede e Escalonamento e usando a Função de Avaliação 1

Na Tabela 6.1, na Tabela 6.2, na Tabela 6.3 e na Tabela 6.4 apresentam-se os resultados computacionais para os quatro algoritmos de pesquisa local, partindo da solução inicial obtida com a heurística de fluxos em rede e escalonamento e usando a função de avaliação 1. Para facilitar a comparação entre os algoritmos de pesquisa local e a solução inicial (obtida a partir da heurística de fluxos em rede e escalonamento), os resultados da solução inicial são novamente apresentados.

Na Tabela 6.1 e na Tabela 6.2 apresentam-se os tempos totais de resolução (colunas 2 a 6), o atraso total dos produtos finais (colunas 7 a 11), o número de produtos finais com atraso (colunas 12 a 16) e o desvio total dos produtos finais (colunas 17 a 21). No tempo total de resolução da heurística de fluxos em rede e escalonamento (coluna 2) está incluído o tempo de resolução de todas as combinações de ordens de máquinas. Já os tempos totais de resolução dos algoritmos de pesquisa local (colunas 3 a 6) dizem respeito ao tempo de resolução da pesquisa local.

Na Tabela 6.3 e na Tabela 6.4 apresentam-se os valores da função de avaliação (colunas 2 a 6), a percentagem média de utilização das máquinas (coluna 7), o número de lotes (colunas 8 a 12), o número médio de lotes por componente (colunas 13 a 17) e o desvio médio por produto final (colunas 18 a 22).

Tabela 6.1 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação

1

Instância	Tempo total de resolução (segundos)					Atraso total dos produtos finais (horas)					Número de produtos finais com atraso					Desvio total dos produtos finais (horas)				
	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF
	Inst20T1.1.J21	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	1	1	1	1	1	6.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Inst20T1.2.J21	0.0	0.4	0.1	1.1	0.9	64.9	64.9	64.9	10.9	12.1	2	2	2	1	1	2260.8	942.1	2170.1	869.7	577.1
Inst20T1.3.J21	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	236.8	236.8	236.8	131.7	179.7	4	4	4	4	4	1089.7	683.0	1089.7	331.1	505.1
Inst30T1.1.J21	0.0	6.3	0.5	4.8	4.2	299.2	296.6	299.2	171.1	143.5	5	4	5	4	5	2841.5	1602.0	2753.8	1527.3	1355.7
Inst30T1.2.J21	0.2	4.2	2.5	4.6	4.1	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	1	1	1	1	1	726.3	169.1	328.9	242.6	286.2
Inst30T1.3.J21	0.0	2.6	0.4	2.0	2.9	148.5	146.7	148.5	94.6	99.8	10	9	10	9	5	796.8	833.4	769.7	714.3	560.3
Inst40T1.1.J21	0.0	4.5	2.2	7.6	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	2	2779.9	605.6	1439.3	2111.1	2379.7
Inst40T1.2.J21	0.0	9.6	2.3	5.9	9.0	51.5	51.5	51.5	21.8	29.5	3	3	3	3	7	2781.9	782.2	2067.3	1376.2	2753.5
Inst40T1.3.J21	0.0	8.5	5.6	13.8	12.5	72.4	0.0	72.4	0.0	16.7	1	0	1	0	2	1272.7	218.3	323.9	194.7	249.0
Inst50T1.1.J21	0.0	11.6	9.8	29.0	21.6	48.0	0.0	48.0	0.1	4.6	1	0	1	1	2	3049.8	331.1	411.7	467.0	662.7
Inst50T1.2.J21	0.1	11.0	1.4	11.2	9.8	39.9	39.9	39.9	37.1	39.9	2	2	2	2	2	1800.2	834.2	1664.4	993.5	858.3
Inst50T1.3.J21	0.1	88.5	47.9	69.0	67.8	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	1	1	1	1	2	1917.3	204.4	284.1	510.4	501.8
Inst60T1.1.J21	0.0	8.3	1.4	28.4	23.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	1	0	2989.2	576.1	1848.1	1045.0	1039.6
Inst60T1.2.J21	0.0	4.9	1.1	9.2	8.1	68.3	68.3	68.3	66.7	68.2	6	6	6	6	6	954.9	534.8	930.3	689.2	696.0
Inst60T1.3.J21	0.1	34.8	11.1	23.0	27.9	31.8	31.8	31.8	31.9	31.9	3	3	3	5	4	3004.0	465.1	1093.8	1508.5	2015.2
Inst70T1.1.J21	0.2	6.1	3.6	45.3	18.0	411.6	409.0	411.5	271.7	275.6	14	13	13	10	12	1698.3	1275.2	1475.1	918.8	860.7
Inst70T1.2.J21	0.1	19.1	16.0	30.6	20.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0	0	0	0	1	1963.6	45.8	67.8	244.6	194.6
Inst70T1.3.J21	0.0	62.2	24.7	68.6	53.9	231.8	60.4	60.4	12.5	123.2	3	1	1	2	8	3191.8	256.3	387.8	589.3	464.5
Inst20T1.1.J27	2.3	224.9	170.2	740.4	657.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	2	4609.1	303.4	428.6	794.4	781.1
Inst20T1.2.J27	2.7	392.0	40.0	322.6	158.5	124.7	78.0	124.7	105.8	124.7	11	8	11	10	11	1820.9	1370.2	1498.4	1217.0	1389.9
Inst20T1.3.J27	15.1	432.6	48.5	175.7	215.3	6.7	6.7	6.7	5.8	6.0	3	3	3	5	4	3764.6	1135.9	3565.0	2644.6	2785.0
Inst30T1.1.J27	22.7	542.3	353.1	1182.7	1138.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	2	4667.3	276.0	163.4	1124.5	1196.9
Inst30T1.2.J27	53.7	358.0	54.6	866.5	485.1	268.0	264.1	268.0	132.3	170.3	11	10	11	8	11	5804.6	2915.6	5374.8	2516.8	3370.7
Inst30T1.3.J27	28.1	1665.9	750.6	3371.6	4335.2	0.7	0.0	0.0	0.4	0.0	2	0	0	2	2	6841.4	1014.8	917.1	2918.5	3862.0
Inst40T1.1.J27	74.7	2514.6	1159.0	3612.5	4200.8	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0	0	0	1	4	8168.4	899.6	1405.1	2774.0	3870.4
Inst40T1.2.J27	40.5	985.5	507.2	2268.5	2562.5	0.3	0.0	0.0	0.4	0.1	1	0	0	5	3	5570.2	979.9	1459.4	2448.0	3324.4
Inst40T1.3.J27	4.6	469.6	55.9	294.3	188.6	94.4	60.2	94.4	94.4	94.4	8	7	8	8	8	1654.7	1169.4	1510.7	1290.8	1564.2

Tabela 6.2 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 1 (continuação)

Instância	Tempo total de resolução (segundos)					Atraso total dos produtos finais (horas)					Número de produtos finais com atraso					Desvio total dos produtos finais (horas)				
	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF
Inst50T1.1.J27	13.3	489.1	442.8	1846.5	3126.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	2	5594.3	1664.3	3017.2	3007.7	4357.4
Inst50T1.2.J27	2192.0	5021.8	629.5	5013.5	5017.7	80.4	80.4	80.4	72.3	80.5	5	5	5	8	11	6403.4	3644.9	5634.3	3632.0	3370.0
Inst50T1.3.J27	36.2	2790.1	1702.7	7167.1	6136.0	1.1	0.0	0.0	0.4	0.1	3	0	0	4	3	8804.4	404.1	347.0	3589.2	1902.2
Inst60T1.1.J27	817.5	6008.6	2892.3	5542.9	4895.3	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0	0	0	5	8	4389.2	1685.4	3156.5	2830.0	3731.9
Inst60T1.2.J27	26.5	6771.4	2699.3	7176.1	7178.2	1199.9	1187.8	1187.0	1009.6	970.9	37	37	37	31	31	12866.6	10334.7	11086.5	9821.4	10523.4
Inst60T1.3.J27	1947.9	4239.6	1402.0	5182.1	5212.9	306.9	306.5	306.4	218.8	280.2	14	14	14	13	19	7602.8	3918.6	6979.8	3636.4	5190.7
Inst70T1.1.J27	9.7	1146.6	209.2	1232.7	142.5	222.3	222.3	222.3	201.8	222.5	12	12	12	13	13	5370.2	2739.9	5083.4	3947.7	5164.5
Inst70T1.2.J27	166.6	4208.2	1767.0	7036.9	7046.8	593.4	578.6	586.0	483.5	488.1	17	16	16	15	17	5582.8	4190.4	4972.5	4607.5	4236.7
Inst70T1.3.J27	34.2	2581.4	1137.3	7056.5	6116.2	579.0	511.7	563.4	344.3	407.0	16	14	15	16	16	7834.7	6754.9	6974.0	4010.6	3455.0
Inst20T1.1.J24	228.2	1489.7	600.9	613.5	653.2	0.9	0.0	0.0	0.1	0.3	2	0	0	3	2	5501.3	909.7	1315.7	2909.2	3078.0
Inst20T1.2.J24	183.1	2364.6	231.5	1264.4	1225.6	74.2	74.2	74.2	67.6	73.7	8	8	8	8	11	8195.8	2971.5	7582.7	5115.5	7176.3
Inst20T1.3.J24	568.6	1036.4	53.6	1571.2	836.0	549.6	508.2	546.4	342.7	398.4	17	16	17	12	11	4848.9	4471.9	4691.1	3121.1	2572.3
Inst30T1.1.J24	7013.1	182.5	320.0	208.3	221.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	3	6228.4	5808.3	5603.9	5831.8	5487.5
Inst30T1.2.J24	779.0	4834.0	521.0	6424.0	6430.3	19.4	19.4	19.4	19.5	19.6	1	1	1	4	9	10131.4	3062.6	8669.5	3633.4	5232.6
Inst30T1.3.J24	11.8	564.9	90.3	1427.7	1357.9	137.3	137.3	137.3	120.3	124.1	9	9	9	8	9	4314.7	2336.4	3915.9	2126.7	3146.3
Inst40T1.1.J24	196.1	5266.5	731.7	7015.9	7014.6	26.4	25.8	26.4	19.4	17.2	5	4	5	5	5	5248.9	2405.8	4800.8	1800.0	1796.1
Inst40T1.2.J24	117.2	3349.1	2389.1	3883.4	3457.5	0.4	0.3	0.0	0.4	0.4	2	2	0	3	3	5232.0	445.1	471.8	854.1	992.2
Inst40T1.3.J24	998.9	1728.1	255.9	2662.2	3168.4	184.4	184.4	184.4	166.3	174.1	15	15	15	12	16	5265.2	2568.1	4893.4	3748.9	4704.6
Inst50T1.1.J24	60.1	4911.8	3008.4	5411.6	5478.9	1.5	0.4	0.3	0.5	1.1	6	2	1	3	6	3396.8	652.1	586.1	1051.9	1132.8
Inst50T1.2.J24	1174.0	3257.5	201.3	6039.7	6032.0	1260.9	1199.7	1260.9	819.6	832.6	26	26	26	20	23	16225.4	13825.9	15924.0	7665.1	5672.1
Inst50T1.3.J24	448.6	6744.7	5381.2	6757.0	6752.6	6.9	6.9	6.9	5.5	5.7	3	3	3	4	4	6791.8	2318.8	3935.0	3361.5	4880.8
Inst60T1.1.J24	1515.9	5687.5	5710.4	5675.4	5676.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0	0	0	0	1	10081.7	4995.1	2522.7	6249.6	7246.4
Inst60T1.2.J24	1503.5	5711.4	3602.0	5690.5	5744.4	79.0	79.0	79.0	67.4	68.1	4	4	4	7	8	15931.6	9191.7	14964.8	11138.2	11624.2
Inst60T1.3.J24	4255.3	2866.6	2983.5	2730.9	2792.3	14.3	14.0	14.3	13.5	14.2	8	8	8	7	8	15523.8	13642.8	13652.7	14124.6	14542.6
Inst70T1.1.J24	265.7	6942.8	6909.2	6939.1	6938.2	1.0	0.0	0.0	1.1	1.3	4	0	0	11	12	13740.5	8549.3	6528.3	8945.0	9065.3
Inst70T1.2.J24	2825.5	4429.6	3434.2	4354.1	4161.2	118.7	117.6	118.7	118.2	117.9	7	6	7	6	7	5362.6	4290.4	4965.4	4412.4	4696.5
Inst70T1.3.J24	3582.6	3610.4	3593.5	3568.8	3595.6	70.2	70.2	70.2	70.3	69.7	10	10	10	13	13	13840.6	11265.1	13107.0	12150.8	12551.9

Tabela 6.3 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação

1

Instância	Valor da função de avaliação				Porcentagem média de utilização das máquinas	Número de lotes				Número médio de lotes por componente				Desvio médio por produto final							
	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF		ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF
Inst20T1.1.J21	5605	5599	5599	5599	5599	45.6	19	18	19	19	1.1	1.0	1.1	1.1	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0		
Inst20T1.2.J21	67146	65827	67055	11779	12667	102.0	47	45	46	44	35	1.9	1.8	1.8	1.4	251.2	104.7	241.1	96.6	64.1	
Inst20T1.3.J21	237879	237472	237879	132020	180243	80.5	30	29	30	26	26	1.8	1.7	1.8	1.5	121.1	75.9	121.1	36.8	56.1	
Inst30T1.1.J21	302012	298247	301924	172638	144844	104.3	91	84	86	77	70	1.8	1.7	1.7	1.5	157.9	89.0	153.0	84.8	75.3	
Inst30T1.2.J21	3965	3408	3567	3481	3525	68.4	91	86	84	81	80	1.6	1.5	1.5	1.4	36.3	8.5	16.4	12.1	14.3	
Inst30T1.3.J21	149312	147506	149285	95307	100325	92.7	101	98	99	103	89	1.7	1.6	1.7	1.5	39.8	41.7	38.5	35.7	28.0	
Inst40T1.1.J21	2780	606	1439	2111	2383	99.4	95	77	81	87	89	1.6	1.3	1.4	1.5	139.0	30.3	72.0	105.6	119.0	
Inst40T1.2.J21	54269	52270	53555	23157	32215	102.0	121	101	109	104	115	1.8	1.5	1.6	1.5	115.9	32.6	86.1	57.3	114.7	
Inst40T1.3.J21	73675	218	72726	195	16939	78.9	107	93	82	91	91	1.4	1.3	1.1	1.2	47.1	8.1	12.0	7.2	9.2	
Inst50T1.1.J21	51082	331	48444	538	5293	87.5	116	84	81	84	87	1.6	1.1	1.1	1.1	105.2	11.4	14.2	16.1	22.9	
Inst50T1.2.J21	41670	40704	41535	38142	40728	104.6	127	115	123	112	107	1.7	1.6	1.7	1.5	60.0	27.8	55.5	33.1	28.6	
Inst50T1.3.J21	2141	428	508	734	775	86.3	168	134	124	125	130	1.7	1.4	1.3	1.3	58.1	6.2	8.6	15.5	15.2	
Inst60T1.1.J21	2989	576	1848	1067	1040	97.9	113	91	98	98	92	1.6	1.3	1.4	1.4	115.0	22.2	71.1	40.2	40.0	
Inst60T1.2.J21	69236	68816	69211	67423	68873	66.4	116	109	114	109	107	1.5	1.4	1.5	1.4	31.8	17.8	31.0	23.0	23.2	
Inst60T1.3.J21	34847	32258	32937	33399	33872	96.0	131	107	112	109	118	1.7	1.4	1.5	1.4	103.6	16.0	37.7	52.0	69.5	
Inst70T1.1.J21	413305	410263	412991	272632	276480	59.3	130	114	118	123	118	1.4	1.3	1.3	1.4	56.6	42.5	49.2	30.6	28.7	
Inst70T1.2.J21	1964	46	68	245	252	59.9	133	96	91	97	90	1.6	1.2	1.1	1.2	59.5	1.4	2.1	7.4	5.9	
Inst70T1.3.J21	234950	60649	60780	13058	123630	79.1	169	126	124	136	128	1.5	1.1	1.1	1.2	81.8	6.6	9.9	15.1	11.9	
Inst20T1.1.J27	4609	303	429	794	788	87.9	253	156	155	179	176	2.8	1.8	1.7	2.0	148.7	9.8	13.8	25.6	25.2	
Inst20T1.2.J27	126534	79373	126211	106979	126103	89.2	244	216	224	209	227	2.9	2.6	2.7	2.5	56.9	42.8	46.8	38.0	43.4	
Inst20T1.3.J27	10490	7862	10291	8450	8743	63.8	221	198	214	189	189	2.6	2.4	2.5	2.3	129.8	39.2	122.9	91.2	96.0	
Inst30T1.1.J27	4667	276	163	1125	1230	81.7	304	165	140	173	180	2.8	1.5	1.3	1.6	113.8	6.7	4.0	27.4	29.2	
Inst30T1.2.J27	273854	267017	273424	134786	173650	105.9	263	238	250	201	209	2.6	2.3	2.4	2.0	152.8	76.7	141.4	66.2	88.7	
Inst30T1.3.J27	7562	1015	917	3319	3905	95.5	348	198	182	237	262	2.7	1.5	1.4	1.9	155.5	23.1	20.8	66.3	87.8	
Inst40T1.1.J27	8168	900	1405	2836	3995	95.6	370	225	208	250	280	2.6	1.6	1.5	1.8	154.1	17.0	26.5	52.3	73.0	
Inst40T1.2.J27	5861	980	1459	2848	3385	95.3	291	196	187	212	216	2.6	1.8	1.7	1.9	132.6	23.3	34.7	58.3	79.2	
Inst40T1.3.J27	96099	61377	95955	95735	96009	75.9	301	291	288	282	290	2.4	2.3	2.3	2.3	35.2	24.9	32.1	27.5	33.3	

Tabela 6.4 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 1 (continuação)

Instância	Valor da função de avaliação				Porcentagem média de utilização das máquinas	Número de lotes				Número médio de lotes por componente				Desvio médio por produto final							
	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF		ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF
Inst50T1.1.J27	5594	1664	3017	3008	4364	99.5	260	226	203	224	2.2	1.7	1.9	1.7	1.9	130.1	38.7	70.2	69.9	101.3	
Inst50T1.2.J27	86834	84075	86065	75900	83888	103.6	480	413	438	335	328	2.8	2.4	2.5	1.9	1.9	98.5	56.1	86.7	55.9	51.8
Inst50T1.3.J27	9934	404	347	3973	1984	83.5	451	192	186	302	229	2.9	1.2	1.2	2.0	1.5	146.7	6.7	5.8	59.8	31.7
Inst60T1.1.J27	4389	1685	3156	2919	3803	99.7	481	351	357	352	405	2.4	1.8	1.8	1.8	2.1	61.8	23.7	44.5	39.9	52.6
Inst60T1.2.J27	1212747	1198180	1198070	1019380	981415	80.2	575	549	531	520	493	2.7	2.6	2.5	2.5	2.3	169.3	136.0	145.9	129.2	138.5
Inst60T1.3.J27	314537	310455	313394	222451	285370	96.9	488	419	469	367	413	2.7	2.3	2.6	2.0	2.3	113.5	58.5	104.2	54.3	77.5
Inst70T1.1.J27	227680	225050	227393	205791	227620	97.5	393	359	379	345	389	2.2	2.0	2.1	1.9	2.1	76.7	39.1	72.6	56.4	73.8
Inst70T1.2.J27	599012	582836	590953	488112	492380	98.5	551	532	526	505	503	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	68.9	51.7	61.4	56.9	52.3
Inst70T1.3.J27	586820	518477	570380	348327	410479	91.3	511	477	471	412	379	2.7	2.6	2.5	2.2	2.0	116.9	100.8	104.1	59.9	51.6
Inst20T1.1.J24	6401	910	1316	3028	3382	95.5	269	165	150	182	201	2.9	1.8	1.6	1.9	2.1	161.8	26.8	38.7	85.6	90.5
Inst20T1.2.J24	82369	77145	81756	72698	80914	91.8	358	288	335	288	336	3.3	2.7	3.1	2.7	3.1	221.5	80.3	204.9	138.3	194.0
Inst20T1.3.J24	554422	512688	551041	345828	400988	96.6	298	285	288	231	210	3.0	2.9	2.9	2.4	2.1	142.6	131.5	138.0	91.8	75.7
Inst30T1.1.J24	6228	5808	5604	5832	5502	82.7	370	343	326	344	346	2.7	2.5	2.3	2.5	2.5	122.1	113.9	109.9	114.3	107.6
Inst30T1.2.J24	29546	22477	28084	23103	24833	101.8	441	358	408	283	313	3.3	2.7	3.0	2.1	2.3	206.8	62.5	176.9	74.2	106.8
Inst30T1.3.J24	141645	139667	141246	122475	127276	97.5	313	268	290	242	275	3.5	3.0	3.2	2.7	3.1	113.5	61.5	103.0	56.0	82.8
Inst40T1.1.J24	31637	28157	31189	21157	18977	91.1	457	413	426	325	335	3.0	2.7	2.8	2.1	2.2	92.1	42.2	84.2	31.6	31.5
Inst40T1.2.J24	5600	736	472	1249	1440	82.2	474	263	264	265	288	2.7	1.5	1.5	1.5	1.7	81.7	7.0	7.4	13.3	15.5
Inst40T1.3.J24	189681	186984	189309	170060	178813	94.8	440	397	424	392	408	2.8	2.5	2.7	2.5	2.6	92.4	45.1	85.8	65.8	82.5
Inst50T1.1.J24	4899	1086	923	1567	2212	65.3	424	259	229	252	276	2.8	1.7	1.5	1.7	1.8	61.8	11.9	10.7	19.1	20.6
Inst50T1.2.J24	1277165	1213490	1276860	827266	838243	114.1	501	479	491	422	365	2.5	2.4	2.5	2.1	1.9	231.8	197.5	227.5	109.5	81.0
Inst50T1.3.J24	13711	9238	10854	8906	10557	96.4	584	433	405	435	482	3.2	2.4	2.2	2.4	2.6	97.0	33.1	56.2	48.0	69.7
Inst60T1.1.J24	10082	4995	2523	6250	7320	90.2	603	419	319	474	489	2.8	1.9	1.5	2.2	2.3	124.5	61.7	31.1	77.2	89.5
Inst60T1.2.J24	94902	88163	93936	78489	79760	103.9	633	570	585	557	555	3.4	3.0	3.1	3.0	3.0	230.9	133.2	216.9	161.4	168.5
Inst60T1.3.J24	29807	27664	27935	27581	28791	100.6	685	636	631	603	621	3.0	2.7	2.7	2.6	2.7	191.7	168.4	168.6	174.4	179.5
Inst70T1.1.J24	14744	8549	6528	10076	10394	88.4	661	491	428	537	503	2.9	2.2	1.9	2.4	2.2	167.6	104.3	79.6	109.1	110.6
Inst70T1.2.J24	124029	121894	123631	122652	122571	109.8	716	702	674	672	657	2.8	2.8	2.7	2.6	2.6	57.0	45.6	52.8	46.9	50.0
Inst70T1.3.J24	84016	81440	83282	82453	82280	101.5	903	859	860	885	862	3.3	3.1	3.1	3.2	3.1	128.2	104.3	121.4	112.5	116.2

Os tempos médios de resolução da IPT, ITT, IPF e ITF são iguais a 1 965 segundos, 1 040 segundos, 2 457 segundos e 2 419 segundos, respectivamente.

Analisando os valores da função de avaliação pode-se concluir que os algoritmos de pesquisa local melhoram sempre (com exceção da instância Inst20T1.3.J21 na ITT) o valor da solução inicial encontrado. A melhor solução encontrada com os algoritmos de pesquisa local está assinalada na Tabela 6.3 e na Tabela 6.4 a cor amarela. Há uma instância (Inst20T1.1.J21) para a qual todos os algoritmos de pesquisa local alcançam a mesma solução. Nas restantes 53 instâncias a IPT, a ITT, a IPF e a ITF encontra a melhor solução em 19, 7, 23 e 4 instâncias, respectivamente, como se pode analisar na Tabela 6.5. Na Tabela 6.5 apresentam-se ainda as percentagens médias de melhoria da função de avaliação 1, após a aplicação dos algoritmos de pesquisa local.

Relativamente ao atraso total dos produtos finais, existem 44 instâncias com atraso total positivo na solução inicial, sendo a média do atraso total igual a 143.3 horas. A média do atraso total reduz-se para 132.4 horas, 139.3 horas, 99.3 horas e 107.4 horas, com a IPT, ITT, IPF e ITF, respectivamente. Na Tabela 6.5 apresenta-se o número de instâncias em que cada algoritmo de pesquisa local consegue reduzir o atraso total da solução inicial. Na Tabela 6.5 apresenta-se também o número de instâncias em que os algoritmos de pesquisa local conseguem melhorar o desvio total dos produtos finais da solução inicial. Tal como se pode verificar pela análise da tabela, dois dos algoritmos, a IPF e a ITF, conseguem melhorar o desvio total de todas as instâncias. Na IPT e na ITT há apenas uma instância para a qual estes algoritmos não conseguem melhorar o desvio total.

Em termos médios todos os algoritmos de pesquisa local reduzem em cerca de 20% o número de lotes da solução, comparando com o número de lotes da solução inicial. O número de lotes da solução de qualquer um dos algoritmos de pesquisa local é sempre menor ou igual ao número de lotes da solução inicial, com exceção do número de lotes da solução da instância Inst30T1.3.J21 na IPF, não sendo contudo o aumento significativo.

Tabela 6.5 Comparação dos valores da função de avaliação 1 da solução inicial da heurística de fluxos em rede e escalonamento com os valores da função de avaliação 1 dos algoritmos de pesquisa local, e número de instâncias com melhoria do atraso total e com melhoria do desvio total

	IPT	ITT	IPF	ITF
Número de melhores soluções	19	7	23	4
Porcentagem média de melhoria da função de avaliação 1	35.1	25.9	37.9	31.5
Número de instâncias com melhoria do atraso total	26	14	34	32
Número de instâncias com melhoria do desvio total	53	53	54	54

A média do desvio médio por produto final da solução inicial é igual a 114.2 horas. Esse valor diminui para 50.9 horas, 75.4 horas, 59.9 horas e 66.4 horas com a IPT, a ITT, a IPF e a ITF, respectivamente.

Comparando os quatro algoritmos de pesquisa local com a solução inicial obtida a partir da heurística de fluxos em rede e escalonamento pode-se dizer que todos os algoritmos de pesquisa local têm capacidade para melhorar as soluções iniciais, com melhorias significativas nas várias medidas de desempenho consideradas.

Comparando os algoritmos de pesquisa local entre si, pode-se concluir que a IPF é a estrutura de vizinhança que consegue melhorar mais as soluções iniciais, pese embora o facto de os seus tempos de resolução serem mais elevados. De notar que é também a IPF que melhora em mais instâncias o atraso total dos produtos finais. Em termos globais a ITF e a ITT são os algoritmos com o pior desempenho.

6.1.4.2 Resultados da Pesquisa Local partindo da Heurística de Fluxos em Rede e Escalonamento e usando a Função de Avaliação 2

Na Tabela 6.6, na Tabela 6.7, na Tabela 6.8 e na Tabela 6.9 apresentam-se os resultados computacionais dos quatro algoritmos de pesquisa local partindo da solução inicial obtida com a heurística de fluxos em rede e escalonamento, usando a função de avaliação 2. Para facilitar a comparação dos resultados da pesquisa local com os resultados da solução inicial, os resultados obtidos com a heurística de fluxos em rede e

escalonamento são também incluídos nas tabelas. De seguida, as medidas de desempenho consideradas são detalhadas.

Na Tabela 6.6 e na Tabela 6.7 apresentam-se os tempos totais de resolução (colunas 2 a 6), os valores da função de avaliação (colunas 7 a 11), os valores do stock médio durante a produção (colunas 12 a 16) e os valores do stock médio após a produção (colunas 17 a 21). Os valores do stock médio durante a produção e do stock médio após a produção são calculados através das expressões apresentadas na subsecção 6.1.3.

Na Tabela 6.8 e na Tabela 6.9 são apresentados os valores do stock médio durante a produção com atraso (colunas 2 a 6), o número de lotes (colunas 7 a 11), o número médio de lotes por componente (colunas 12 a 16) e o número de unidades em stock (colunas 17 a 21).

Os valores do stock médio durante a produção com atraso são calculados do modo já apresentado na subsecção 6.1.3. O número de unidades em stock representa a quantidade que está armazenada em termos médios ao longo do horizonte temporal. O seu valor é dado por: $(\text{valor do stock médio durante a produção da instância} / (\text{número de máquinas} \times \text{horizonte temporal})) + (\text{valor do stock médio após a produção da instância} / (\text{número de máquinas} \times \text{horizonte temporal}))$.

Analisando e comparando os valores da função de avaliação dos algoritmos de pesquisa local com os valores da função de avaliação da heurística de fluxos em rede e escalonamento (ver Tabela 6.6 e Tabela 6.7) conclui-se que as soluções iniciais são sempre melhoradas, com excepção da instância Inst20T1.3.J21, na inserção total para trás. Na Tabela 6.10 pode-se ler a percentagem média de melhoria da função de avaliação e o número de instâncias em que cada estrutura de vizinhança encontra a melhor solução. A melhor solução encontrada na pesquisa local em cada instância está assinalada a cor amarela na Tabela 6.6 e na Tabela 6.7.

Tabela 6.6 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação

2

Instância	Tempo total de resolução (segundos)				Valor da função de avaliação				Valor do stock durante a produção				Valor do stock médio após a produção							
	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF
Inst20T1.1.J21	0.2	0.0	0.0	0.3	0.0	2168	2166	2166	1809	2166	338648	338672	338672	336397	338648	477	0	0	7062	0
Inst20T1.2.J21	0.0	1.3	0.2	54.5	0.3	11631	10560	11610	9250	11416	692548	652364	692548	657851	693531	906547	740057	902357	755868	858023
Inst20T1.3.J21	0.1	0.1	0.0	7.4	0.0	38189	37976	38189	12376	37582	558982	479653	558982	439533	558982	406787	443602	406787	788575	285404
Inst30T1.1.J21	0.0	12.7	0.8	420.4	3.7	96517	95614	96488	50894	92328	470452	452824	470457	379809	471489	1402470	1239580	1396740	1463540	995623
Inst30T1.2.J21	0.2	11.1	3.3	104.3	4.7	2496	2005	2066	1697	2101	174512	166582	179267	172966	177601	164400	74047	73483	100258	82303
Inst30T1.3.J21	0.0	6.1	1.0	1873.3	1.6	28081	27862	28038	9216	27040	427335	410001	435679	377853	427730	445708	423963	432900	548825	482873
Inst40T1.1.J21	0.0	44.7	2.2	233.6	7.4	6503	4195	6057	5729	6467	433871	431264	436579	430749	449730	866639	407801	774737	696553	841983
Inst40T1.2.J21	0.0	14.5	2.4	7203.0	4.6	11983	10308	11332	6901	11344	266073	296372	269364	238376	267351	876839	511617	743376	804168	868422
Inst40T1.3.J21	0.0	27.0	12.5	96.0	26.7	3682	2081	2359	2604	2740	329874	294832	348520	326627	343718	405762	121368	122663	190351	188554
Inst50T1.1.J21	0.0	244.5	7.9	2410.0	51.5	8793	4800	4803	6265	7138	503775	474038	605534	477217	510506	1254860	486055	355148	730126	902569
Inst50T1.2.J21	0.1	82.1	2.5	1141.8	9.8	18195	16914	18065	7648	9696	243868	211625	245253	208490	245800	529690	307010	502293	458505	490834
Inst50T1.3.J21	0.1	1311.9	68.7	4554.2	369.7	2800	1857	1924	1999	2037	247861	213815	270694	230693	255277	311520	157679	114086	167732	148721
Inst60T1.1.J21	0.0	102.6	5.6	5014.1	36.5	8714	6157	8034	7629	8091	742200	640369	872677	786485	775022	1000640	591129	734146	739142	812186
Inst60T1.2.J21	0.0	14.0	1.4	7206.3	42.1	27229	27160	27216	12980	26518	222385	213241	222385	221135	222400	329263	324788	326686	554494	317606
Inst60T1.3.J21	0.1	729.1	17.5	7207.5	201.6	14149	11907	13515	9307	12719	257439	225930	271397	240729	260284	695669	290444	555017	684248	584503
Inst70T1.1.J21	0.2	11.9	5.3	7203.4	24.3	40132	39558	40126	26826	29501	106932	110571	112166	78348	108576	462867	456098	456488	585772	445342
Inst70T1.2.J21	0.1	520.9	18.6	1706.8	50.1	2416	847	1101	1525	1015	113917	103798	161284	123651	141642	369283	65602	58839	175281	60124
Inst70T1.3.J21	0.0	329.2	70.1	7019.5	249.6	9407	6817	7600	3465	8227	281625	280400	311269	256355	299848	648223	202255	328021	205012	363142
Inst20T1.1.J27	2.3	4365.3	436.8	7212.4	3424.9	14359	9275	9483	11363	10955	856299	877971	1010170	842602	958385	2015580	977086	886376	1384000	1221920
Inst20T1.2.J27	2.7	1110.5	87.1	7199.6	714.9	48274	30400	47679	26809	28164	516315	485819	522837	424990	538619	533814	561305	409133	1202950	564273
Inst20T1.3.J27	15.1	1767.6	122.1	7187.3	294.5	6659	5584	6530	5879	6467	370700	333210	375522	346583	378901	642789	465573	612409	695225	629438
Inst30T1.1.J27	22.7	7181.0	516.5	7180.4	3854.2	7641	4070	4163	6236	5697	543327	486733	635600	526846	575011	984903	327273	197009	708424	547597
Inst30T1.2.J27	53.7	1129.0	140.2	7150.0	1534.6	90382	88175	90223	39997	31385	871591	828509	874956	755003	889713	1821100	1561840	1786030	2121400	1803790
Inst30T1.3.J27	28.1	7181.2	2057.2	7170.0	7183.0	11138	9811	8146	10136	9926	747244	712879	857446	735202	775429	1478300	1249220	771838	1290880	1122470
Inst40T1.1.J27	74.7	7125.2	1990.3	7126.3	6147.6	9962	8417	6287	9279	8915	566145	503656	653649	555782	577018	1426230	1179670	603787	1295830	1152950
Inst40T1.2.J27	40.5	7172.3	1030.1	7177.8	4810.9	13831	11232	11009	11601	13102	751226	711505	947226	757601	820540	2013030	1534820	1254640	1562950	1781310
Inst40T1.3.J27	4.6	372.9	74.5	7216.5	889.8	46474	34105	46340	24525	35739	629254	630757	632111	541094	630919	839559	803667	810379	1480240	1157050

Tabela 6.7 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 2 (continuação)

Instância	Tempo total de resolução (segundos)					Valor da função de avaliação					Valor do stock médio durante a produção					Valor do stock médio após a produção				
	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF
Inst50T1.1.J27	13.3	7189.1	1015.2	7188.5	2849.2	16147	15476	15895	14361	16018	987881	1062960	1097050	1095520	1029850	2241500	2032190	2081840	1766570	2173140
Inst50T1.2.J27	2192.0	4791.4	1524.9	4808.0	4801.2	39413	38920	39233	21007	22205	527085	523728	561324	481430	538344	908326	813150	846479	947222	935565
Inst50T1.3.J27	36.2	7169.5	3825.9	7160.3	7159.5	6949	5740	3279	6624	5659	424816	371184	489014	406957	431370	963309	776896	166706	903577	693259
Inst60T1.1.J27	817.5	6388.6	3220.9	6398.4	6409.5	14219	12991	13904	13111	13172	768102	704190	894541	724727	771197	2075730	1893980	1886240	1896930	1838560
Inst60T1.2.J27	26.5	7178.8	3802.0	7178.8	7173.9	85583	83209	85474	66970	72690	458824	451129	467894	399638	475285	2986150	2926490	2955290	3207020	2842040
Inst60T1.3.J27	1947.9	4820.7	1922.7	4878.0	4818.5	87117	86410	87034	47380	48582	720568	714548	731917	691877	739286	1674350	1539150	1646310	2079440	1993280
Inst70T1.1.J27	9.7	7192.3	317.5	7199.5	1757.9	55026	54711	54968	34479	49194	421039	407199	439675	381300	429351	990709	954141	960616	1256460	1283090
Inst70T1.2.J27	166.6	7033.8	546.4	7030.6	7019.9	67266	65901	66995	34027	53065	532871	479306	535529	467479	550429	1419860	1399870	1362960	2056340	2044550
Inst70T1.3.J27	34.2	7191.2	1332.7	7189.3	7184.9	84659	79227	83499	69404	46974	627694	611049	654670	563453	651899	1143440	947397	951797	1572360	1117170
Inst20T1.1.J24	228.2	6990.5	729.5	6982.3	1674.7	9972	8388	8617	9680	9472	971673	935282	1016780	886586	991468	1017910	741839	706553	1044630	884920
Inst20T1.2.J24	183.1	7003.7	596.5	7005.6	4240.1	40452	38301	40093	34847	29177	609642	643817	639959	577269	678952	1561730	1099180	1459720	1672840	1781580
Inst20T1.3.J24	568.6	1677.2	135.5	6593.5	1492.1	214709	212075	214616	186157	85887	1125270	1107390	1129430	1044040	1139430	2558470	2551590	2535870	2743030	3844140
Inst30T1.1.J24	7013.1	422.1	424.4	594.5	306.8	10116	9930	9896	9945	9860	802370	789313	813810	797386	809479	1220910	1196700	1165400	1191660	1158270
Inst30T1.2.J24	779.0	6330.5	1675.3	6331.6	6300.3	26853	26375	26545	26530	25388	1113480	1121050	1126210	1112470	1285390	2332140	2228950	2257850	2266840	2066510
Inst30T1.3.J24	11.8	3834.7	120.2	7193.2	486.9	44957	33914	44852	31266	44030	874579	864795	884972	850466	875182	996673	1146640	965422	1120020	988657
Inst40T1.1.J24	196.1	7013.7	1545.2	7001.1	6998.3	14961	14071	14753	13052	13178	869370	860590	880838	840274	873222	1269540	1100250	1216370	1538920	1060210
Inst40T1.2.J24	117.2	7073.1	6382.7	7075.9	7083.4	6568	5855	4818	6489	5771	712549	711170	767597	710800	726736	600861	459767	196030	585333	424875
Inst40T1.3.J24	998.9	6142.4	814.8	6140.2	6129.0	82185	59809	82014	81495	73764	658771	646998	693190	621829	661466	1337430	1214030	1268790	1381560	1626980
Inst50T1.1.J24	60.1	7137.8	7134.0	7132.5	7135.2	5571	4927	4068	5151	5085	538412	527565	592186	493184	546846	570889	455703	221510	533057	463605
Inst50T1.2.J24	1174.0	6133.5	895.4	6091.2	6099.0	410076	388294	409814	390856	346703	1237930	1110650	1253920	1170310	1261390	7031320	7132520	6962990	6522910	5748710
Inst50T1.3.J24	448.6	6591.3	6596.9	6595.7	6590.3	12165	11478	11784	11635	11783	852091	840788	885115	838172	856583	1222830	1101080	1116360	1235370	1135200
Inst60T1.1.J24	1515.9	5410.8	5399.0	5448.8	5412.3	11019	10030	6861	10445	10134	499778	464987	545791	473889	516644	1703970	1540950	826413	1614290	1506040
Inst60T1.2.J24	1503.5	5871.0	4598.5	5893.4	5861.2	48037	47117	47824	47649	37385	854035	925180	914390	835317	904905	2719790	2470570	2616960	2660900	2749080
Inst60T1.3.J24	4255.3	6594.0	6684.8	6613.4	6605.9	14217	13607	13599	14166	13874	615621	536593	616578	585622	618765	1733600	1691030	1609210	1751770	1646830
Inst70T1.1.J24	265.7	6955.3	6903.1	6911.8	6900.1	11443	11141	10610	11265	10692	741702	700782	779958	740838	793281	1546210	1527320	1342060	1512790	1302580
Inst70T1.2.J24	2825.5	3482.2	3462.3	3540.7	3479.2	152894	149787	152840	152712	120035	804166	787609	810123	775364	811696	1502950	1889020	1486110	1491930	2231000
Inst70T1.3.J24	3582.6	3597.2	3650.5	3655.6	3627.3	16427	16090	16403	16402	16085	605631	600444	617928	601461	605640	1470220	1407990	1453130	1466340	1450690

Tabela 6.8 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação

2

Instância	Valor do stock médio durante a produção com atraso					Número de lotes					Número médio de lotes por componente					Número de unidades em stock				
	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF
Inst20T1.1.J21	494.2	494.2	494.2	98.4	494.2	19	18	18	27	19	1.1	1.0	1.0	1.5	1.1	404	403	403	409	403
Inst20T1.2.J21	3690.6	3690.6	3690.6	2280.6	3736.0	47	50	47	70	46	1.9	2.0	1.9	2.8	1.8	1904	1658	1899	1683	1847
Inst20T1.3.J21	33867.7	33867.7	33867.7	6362.0	33867.9	30	36	30	69	30	1.8	2.1	1.8	4.1	1.8	1150	1099	1150	1462	1005
Inst30T1.1.J21	88479.8	88479.8	88479.8	42412.4	86458.5	91	102	90	176	82	1.8	2.0	1.8	3.5	1.6	2230	2015	2223	2194	1747
Inst30T1.2.J21	815.0	815.0	815.0	338.8	815.5	91	99	82	118	87	1.6	1.8	1.5	2.1	1.6	403	286	301	325	309
Inst30T1.3.J21	24076.5	24076.5	24076.5	4674.9	22851.8	101	110	99	328	92	1.7	1.8	1.7	5.5	1.5	1039	993	1034	1103	1084
Inst40T1.1.J21	0.0	0.0	0.0	106.4	22.0	95	115	84	142	87	1.6	2.0	1.4	2.4	1.5	1548	999	1442	1342	1538
Inst40T1.2.J21	6364.0	6364.0	6364.0	1725.9	5759.6	121	121	117	329	118	1.8	1.8	1.7	4.8	1.7	1361	962	1206	1241	1352
Inst40T1.3.J21	3.6	0.0	3.6	23.9	87.6	107	109	91	130	95	1.4	1.5	1.2	1.8	1.3	876	495	561	615	634
Inst50T1.1.J21	0.0	0.0	0.0	268.0	99.8	116	137	88	160	103	1.6	1.9	1.2	2.2	1.4	2094	1143	1144	1437	1682
Inst50T1.2.J21	14545.4	14545.4	14545.4	4402.8	6171.6	127	158	124	197	123	1.7	2.1	1.7	2.7	1.7	921	617	890	794	877
Inst50T1.3.J21	3.1	0.0	0.0	17.1	26.8	168	206	126	253	139	1.7	2.1	1.3	2.6	1.4	666	442	458	474	481
Inst60T1.1.J21	0.0	0.0	0.0	38.8	265.4	113	119	100	229	104	1.6	1.7	1.4	3.3	1.5	2075	1466	1913	1816	1890
Inst60T1.2.J21	24854.9	24854.4	24854.9	9294.1	24201.6	116	124	116	284	113	1.5	1.6	1.5	3.7	1.5	657	641	654	923	643
Inst60T1.3.J21	9526.1	9467.7	9526.1	4822.9	8681.1	131	196	117	413	123	1.7	2.5	1.5	5.4	1.6	1135	615	984	1101	1006
Inst70T1.1.J21	37853.4	37287.7	37853.1	23867.5	27176.6	130	130	119	366	114	1.4	1.4	1.3	4.1	1.3	678	675	677	791	659
Inst70T1.2.J21	0.0	0.0	0.0	40.1	7.9	133	184	91	186	100	1.6	2.2	1.1	2.2	1.2	575	202	262	356	240
Inst70T1.3.J21	4829.8	4470.9	4471.1	1211.7	5026.5	169	192	136	277	146	1.5	1.7	1.2	2.4	1.3	1107	575	761	549	789
Inst20T1.1.J27	0.0	0.0	0.0	276.3	96.0	253	267	197	349	202	2.8	3.0	2.2	3.9	2.3	1554	1004	1026	1205	1180
Inst20T1.2.J27	43702.9	25563.4	43702.9	19031.8	23153.7	244	270	233	592	195	2.9	3.2	2.8	7.0	2.3	568	567	504	881	597
Inst20T1.3.J27	1616.1	1616.1	1616.1	687.6	1462.0	221	239	222	358	211	2.6	2.8	2.6	4.3	2.5	548	432	535	564	546
Inst30T1.1.J27	0.0	0.0	0.0	87.0	111.5	304	395	183	412	235	2.8	3.7	1.7	3.9	2.2	827	440	451	668	607
Inst30T1.2.J27	78090.0	77391.2	78090.0	26043.0	18460.8	263	291	282	511	238	2.6	2.8	2.7	5.0	2.3	1457	1293	1440	1556	1458
Inst30T1.3.J27	10.4	1.0	0.0	10.8	501.8	348	437	220	445	307	2.7	3.4	1.7	3.5	2.4	1204	1062	882	1096	1027
Inst40T1.1.J27	0.0	0.0	0.0	33.6	315.6	370	448	223	406	317	2.6	3.2	1.6	2.9	2.2	1078	911	680	1002	936
Inst40T1.2.J27	10.2	0.0	0.0	1.9	139.0	291	385	206	387	249	2.6	3.4	1.8	3.5	2.2	1496	1216	1191	1256	1408
Inst40T1.3.J27	39726.4	27372.4	39726.4	14732.5	27379.5	301	311	289	446	264	2.4	2.5	2.3	3.6	2.1	795	776	781	1094	968

Tabela 6.9 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 2 (continuação)

Instância	Valor do stock médio durante a produção com atraso					Número de lotes					Número médio de lotes por componente					Número de unidades em stock				
	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de fluxos em rede e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF
Inst50T1.1.J27	0.0	0.0	0.0	82.9	8.5	260	287	234	329	242	2.2	2.4	2.0	2.7	2.0	1748	1675	1720	1549	1733
Inst50T1.2.J27	32726.7	32726.7	32726.7	14101.5	15159.6	480	545	460	626	414	2.8	3.1	2.6	3.6	2.4	777	723	762	773	798
Inst50T1.3.J27	8.3	0.0	0.0	78.0	52.8	451	475	233	527	378	2.9	3.1	1.5	3.4	2.5	751	621	355	709	609
Inst60T1.1.J27	0.0	0.0	0.0	18.7	168.8	481	611	389	600	433	2.4	3.1	2.0	3.0	2.2	1539	1406	1505	1419	1412
Inst60T1.2.J27	69402.7	67338.2	69402.7	49714.0	57069.1	575	605	511	791	437	2.7	2.9	2.4	3.8	2.1	1864	1828	1852	1952	1795
Inst60T1.3.J27	76309.4	76308.6	76309.4	34109.9	35624.4	488	534	462	609	441	2.7	3.0	2.6	3.4	2.4	1296	1220	1287	1500	1479
Inst70T1.1.J27	48765.1	48705.3	48765.1	26700.1	41360.4	393	460	396	698	364	2.2	2.5	2.2	3.8	2.0	764	737	758	886	927
Inst70T1.2.J27	58387.1	57375.0	58387.1	21780.4	40789.7	551	588	515	707	499	2.5	2.7	2.3	3.2	2.3	1057	1017	1027	1366	1404
Inst70T1.3.J27	76959.0	72524.4	76618.1	59666.2	38848.6	511	648	513	783	467	2.7	3.5	2.7	4.2	2.5	958	843	869	1156	957
Inst20T1.1.J24	25.9	3.0	0.0	42.3	123.2	269	336	193	367	225	2.9	3.6	2.1	3.9	2.4	911	768	789	884	859
Inst20T1.2.J24	30046.3	30046.3	30046.3	24002.1	17255.4	358	363	333	482	291	3.3	3.4	3.1	4.5	2.7	994	798	961	1030	1127
Inst20T1.3.J24	199285.0	196739.0	199285.0	169955.0	62178.9	298	320	296	411	266	3.0	3.3	3.0	4.2	2.7	1687	1675	1678	1734	2282
Inst30T1.1.J24	0.0	0.0	0.0	0.0	34.5	370	392	342	407	363	2.7	2.8	2.5	2.9	2.6	926	909	906	911	901
Inst30T1.2.J24	9788.6	9788.6	9788.6	9812.4	8886.6	441	478	415	494	397	3.3	3.5	3.1	3.7	2.9	1578	1534	1549	1547	1535
Inst30T1.3.J24	36144.8	24239.9	36144.8	21838.0	35327.9	313	300	273	491	283	3.5	3.3	3.0	5.5	3.1	857	921	847	902	853
Inst40T1.1.J24	4332.2	4332.2	4332.2	1205.9	3672.8	457	490	435	548	422	3.0	3.2	2.9	3.6	2.8	979	898	960	1089	885
Inst40T1.2.J24	1.1	1.1	0.0	15.5	28.4	474	511	308	545	396	2.7	2.9	1.8	3.1	2.3	601	536	441	593	527
Inst40T1.3.J24	73307.0	51285.2	73307.0	72589.2	63296.9	440	558	458	651	444	2.8	3.6	2.9	4.1	2.8	914	852	898	917	1048
Inst50T1.1.J24	25.1	10.7	0.0	30.4	44.5	424	502	278	586	416	2.8	3.3	1.8	3.9	2.7	508	450	373	470	463
Inst50T1.2.J24	374345.0	352381.0	374345.0	357979.0	316793.0	501	610	534	707	458	2.5	3.1	2.7	3.6	2.3	3786	3774	3762	3523	3210
Inst50T1.3.J24	1817.1	1806.9	1814.8	1332.5	1870.2	584	607	495	641	536	3.2	3.3	2.7	3.5	2.9	950	889	916	949	912
Inst60T1.1.J24	0.0	0.0	0.0	9.2	29.3	603	727	508	732	596	2.8	3.4	2.4	3.4	2.8	1009	918	628	956	926
Inst60T1.2.J24	30626.8	30626.8	30626.8	30642.2	19600.5	633	673	564	684	551	3.4	3.6	3.0	3.6	2.9	1636	1555	1617	1601	1673
Inst60T1.3.J24	2508.6	2506.1	2507.9	2529.5	2610.0	685	762	691	804	663	3.0	3.3	3.0	3.5	2.9	1076	1020	1019	1070	1037
Inst70T1.1.J24	3.5	0.0	0.0	13.6	276.9	661	814	480	800	565	2.9	3.6	2.1	3.5	2.5	1048	1020	972	1032	960
Inst70T1.2.J24	143511.0	138482.0	143511.0	143547.0	106482.0	716	746	677	808	674	2.8	2.9	2.7	3.2	2.7	1056	1226	1051	1038	1393
Inst70T1.3.J24	6140.5	6140.5	6140.5	6162.7	5904.2	903	941	904	988	904	3.3	3.4	3.3	3.6	3.3	950	920	948	947	942

Tabela 6.10 Comparação dos valores da função de avaliação 2 da solução inicial da heurística de fluxos em rede e escalonamento com os valores da função de avaliação 2 dos algoritmos de pesquisa local

	IPT	ITT	IPF	ITF
Número de melhores soluções	13	9	22	10
Percentagem média de melhoria da função de avaliação 2	13.8	10.8	23.3	16.9

Os tempos totais de resolução apresentados na Tabela 6.6 e na Tabela 6.7 dizem respeito apenas ao tempo da pesquisa local, não incluindo o tempo de obtenção da solução inicial. O tempo médio de resolução da IPT é igual a 3 668 segundos, da ITT é igual a 1 517 segundos, da IPF é igual a 5 258 segundos e da ITF é igual a 3 066 segundos.

As estruturas de vizinhança de IPT e de IPF melhoram os valores do stock médio durante a produção na maioria das instâncias relativamente aos valores do stock médio durante a produção da solução inicial. O mesmo não se verifica na ITT e na ITF, nas quais o nível de stock médio durante a produção piora na maioria das instâncias. Relativamente ao valor do stock médio após a produção, a estrutura de ITT melhora sempre este indicador. A IPT melhora este indicador em 49 das 54 instâncias, a ITF melhora o stock médio após a produção em 42 instâncias e por último, a IPF melhora o stock médio após a produção em 30 instâncias. O valor do stock médio durante a produção com atraso na IPT e na ITT é para todas as instâncias melhor ou igual ao valor do stock médio durante a produção com atraso da solução inicial. Nas estruturas de vizinhança de IPF e de ITF, este indicador melhora em 30 e 27 instâncias, e piora em 24 e 26 instâncias, respectivamente.

A média do número médio de lotes por componente na heurística de fluxos em rede e escalonamento é igual a 2.4. Na IPT o seu valor aumenta para 2.7, na ITT diminui para 2.1, na IPF aumenta para 3.6 e na ITF diminui para 2.2.

O número médio de unidades em stock na heurística de fluxos em rede e escalonamento é igual a 1 159, na IPT é igual a 995, na ITT é igual a 1 035, na IPF é igual a 1 119 e na ITF é igual a 1 103.

Embora a estrutura de IPF tenha uma redução mais significativa da função de avaliação, em comparação com a estrutura de IPT, em termos médios a IPT tem menos unidades em stock. A IPF tem maior capacidade para reduzir o nível de stock durante a produção com atraso (daí a redução na função de avaliação ser mais significativa, já que este tem um peso mais elevado na função de avaliação), mas a IPT consegue reduzir muito mais o nível de stock médio após a produção, em comparação com a IPF, o que leva a que o número médio de unidades em stock na IPF seja mais elevado do que esse mesmo valor na IPT.

6.1.4.3 Resultados da Pesquisa Local partindo da Heurística de Ordenação e Escalonamento e usando a Função de Avaliação 1

Na Tabela 6.11, na Tabela 6.12, na Tabela 6.13 e na Tabela 6.14 apresentam-se os resultados computacionais dos quatro algoritmos de pesquisa local, para a solução inicial obtida a partir da heurística de ordenação e escalonamento, usando a função de avaliação 1. Os resultados da solução inicial também são apresentados para facilitar a comparação entre os algoritmos de pesquisa local e a solução inicial.

Na Tabela 6.11 e na Tabela 6.12 apresentam-se os tempos totais de resolução (colunas 2 a 6), o atraso total dos produtos finais (colunas 7 a 11), o número de produtos finais com atraso (colunas 12 a 16) e o desvio total dos produtos finais (coluna 17 a 21), para o conjunto de 54 instâncias testadas. No tempo total de resolução dos algoritmos de pesquisa local (colunas 3 a 6) apenas se inclui o tempo de resolução da pesquisa local.

Na Tabela 6.13 e na Tabela 6.14 apresentam-se os valores da função de avaliação (colunas 2 a 6), os valores da percentagem média de utilização das máquinas (coluna 7), o número de lotes (colunas 8 a 12), o número médio de lotes por componente (colunas 13 a 17) e o desvio médio por produto final (colunas 18 a 22).

Tabela 6.11 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 1

Instância	Tempo total de resolução (segundos)					Atraso total dos produtos finais (horas)					Número de produtos finais com atraso				Desvio total dos produtos finais (horas)					
	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF
Inst20T1.1.J21	0.00	0.3	0.1	0.0	0.0	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	1	1	1	1	1	254.4	7.8	11.1	50.9	53.2
Inst20T1.2.J21	0.00	0.1	0.1	0.0	0.0	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	1	1	1	1	1	1094.7	696.0	1089.0	1094.7	1094.7
Inst20T1.3.J21	0.00	0.1	0.0	0.1	0.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	2	2	2	2	2	622.9	456.3	622.9	592.2	622.9
Inst30T1.1.J21	0.00	3.9	0.2	0.4	0.2	77.5	77.5	77.5	77.6	77.5	5	5	5	6	5	2208.4	1091.4	2193.0	2148.6	2208.4
Inst30T1.2.J21	0.00	1.4	1.0	0.6	0.5	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	1	1	1	1	1	533.3	328.2	421.4	406.5	481.9
Inst30T1.3.J21	0.00	2.7	0.5	0.3	0.3	41.4	41.4	41.4	41.4	41.4	5	5	5	5	5	755.7	412.2	754.0	755.4	755.4
Inst40T1.1.J21	0.00	1.7	1.3	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	609.2	360.5	448.7	563.7	606.7
Inst40T1.2.J21	0.00	4.0	0.5	2.2	0.3	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	2	2	2	4	2	1109.4	850.2	1106.1	1061.3	1109.4
Inst40T1.3.J21	0.00	4.9	5.5	0.9	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	268.0	157.3	159.8	231.9	237.5
Inst50T1.1.J21	0.00	20.3	11.0	0.7	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	395.9	173.6	208.8	327.2	371.6
Inst50T1.2.J21	0.00	8.6	0.6	0.6	0.3	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	1	1	1	1	1	1484.0	592.6	1476.7	1440.3	1484.0
Inst50T1.3.J21	0.00	28.3	105.4	4.4	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	629.0	276.1	275.6	516.1	516.1
Inst60T1.1.J21	0.00	20.4	11.0	2.4	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	1207.0	760.6	887.3	1138.0	1138.3
Inst60T1.2.J21	0.00	3.3	0.5	0.6	0.6	38.9	38.9	38.9	38.9	38.9	3	3	3	3	3	977.0	632.0	976.0	976.8	843.4
Inst60T1.3.J21	0.00	16.3	12.1	0.9	0.3	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	3	3	3	3	3	475.8	207.6	292.0	475.5	475.8
Inst70T1.1.J21	0.00	9.6	3.4	3.3	0.8	114.3	114.3	114.3	114.3	114.3	14	14	14	14	14	579.0	423.7	576.4	564.4	578.8
Inst70T1.2.J21	0.00	33.9	11.6	2.8	1.9	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0	0	0	3	4	933.3	113.1	395.1	343.9	483.7
Inst70T1.3.J21	0.00	25.0	23.3	3.0	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	345.4	207.7	160.5	255.3	339.6
Inst20T1.1.J27	0.02	70.8	75.9	4.4	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	836.4	262.2	299.3	585.0	591.9
Inst20T1.2.J27	0.00	43.1	4.1	29.7	1.6	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	2	2	2	4	2	1247.4	519.9	1195.7	1098.9	1247.4
Inst20T1.3.J27	0.00	11.5	2.2	1.5	1.5	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	1	1	1	1	1	1211.5	397.3	1211.5	1211.5	1211.5
Inst30T1.1.J27	0.00	60.2	66.5	8.3	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	454.9	284.9	215.2	412.4	412.4
Inst30T1.2.J27	0.00	103.9	5.6	5.7	5.6	40.7	40.7	40.7	40.7	40.7	9	9	9	9	9	2461.2	1585.0	2461.2	2461.2	2461.2
Inst30T1.3.J27	0.02	209.7	143.5	14.5	17.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	1061.7	572.5	511.7	928.1	926.9
Inst40T1.1.J27	0.02	103.8	71.9	7.4	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	938.3	369.1	434.0	929.1	934.1
Inst40T1.2.J27	0.00	125.3	123.6	8.4	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	1077.1	761.5	700.6	1047.4	1050.5
Inst40T1.3.J27	0.02	90.4	8.5	4.6	4.5	34.3	34.3	34.3	34.3	34.3	5	5	5	5	5	1964.5	585.0	1964.2	1964.5	1964.5

Tabela 6.12 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 1
(continuação)

Instância	Tempo total de resolução (segundos)					Atraso total dos produtos finais (horas)					Número de produtos finais com atraso					Desvio total dos produtos finais (horas)				
	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF
Inst50T1.1.J27	0.00	201.1	116.8	5.3	5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	1668.8	1101.9	1282.3	1666.1	1666.1
Inst50T1.2.J27	0.02	144.8	15.8	26.1	9.0	16.8	16.8	16.8	16.9	16.8	5	5	5	6	5	1595.1	921.9	1580.1	1452.2	1595.1
Inst50T1.3.J27	0.02	323.9	280.4	13.9	11.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	646.3	356.4	286.7	626.3	628.8
Inst60T1.1.J27	0.00	868.1	153.1	8.1	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	1857.1	720.1	1478.4	1727.7	1847.0
Inst60T1.2.J27	0.03	1376.9	487.0	249.2	201.9	298.1	298.1	298.1	298.1	298.1	25	25	25	25	25	1727.4	1399.8	1727.0	1727.1	1727.1
Inst60T1.3.J27	0.02	171.2	59.8	97.6	28.9	94.5	94.5	94.5	94.5	94.5	9	9	9	9	9	1535.0	1250.1	1526.1	1510.5	1534.8
Inst70T1.1.J27	0.02	219.9	39.5	21.9	21.7	361.7	361.7	361.7	361.7	361.7	20	20	20	20	20	2239.9	1969.3	2227.3	2239.9	2239.9
Inst70T1.2.J27	0.03	440.0	172.2	117.4	225.8	251.5	251.5	251.5	251.5	251.5	19	19	19	19	19	2339.1	2082.8	2331.4	2335.0	2311.7
Inst70T1.3.J27	0.02	1100.7	357.7	97.2	182.4	146.3	146.3	146.3	146.6	146.4	15	15	15	18	16	2363.0	1235.9	1847.6	1717.3	1803.2
Inst20T1.1.J24	0.00	50.1	45.7	3.8	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	500.4	318.6	297.4	499.7	500.4
Inst20T1.2.J24	0.02	153.2	11.8	10.2	5.4	22.3	22.3	22.3	22.3	22.3	4	4	4	4	4	2256.6	1032.6	2233.6	2235.3	2256.6
Inst20T1.3.J24	0.00	185.5	20.5	10.0	7.9	126.3	126.3	126.3	126.3	126.3	8	8	8	8	8	2206.0	1361.8	2187.4	2116.0	2206.0
Inst30T1.1.J24	0.00	173.1	95.3	19.8	14.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	816.5	488.3	519.5	771.9	773.3
Inst30T1.2.J24	0.00	143.1	6.3	61.5	5.5	2.9	2.9	2.9	3.0	2.9	1	1	1	2	1	2832.3	1172.8	2822.5	2670.3	2832.3
Inst30T1.3.J24	0.00	110.0	12.9	5.2	4.1	30.5	30.5	30.5	30.5	30.5	4	4	4	4	4	2082.2	799.0	2004.5	2081.7	2082.2
Inst40T1.1.J24	0.00	175.3	5.7	17.4	5.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1	1	1	1	1	2364.7	1586.7	2364.7	2361.2	2364.7
Inst40T1.2.J24	0.00	163.0	164.1	45.1	37.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	499.4	218.3	187.8	369.5	371.7
Inst40T1.3.J24	0.02	419.4	52.2	70.1	30.1	98.3	98.3	98.3	98.3	98.3	10	10	10	10	10	2008.0	1281.2	1972.8	2004.1	2007.9
Inst50T1.1.J24	0.02	309.1	288.3	22.7	16.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	322.2	198.0	169.2	263.9	279.6
Inst50T1.2.J24	0.03	630.3	33.2	209.5	43.6	426.6	426.6	426.6	426.6	426.6	20	20	20	20	20	2606.1	2233.0	2606.1	2557.3	2606.1
Inst50T1.3.J24	0.02	473.2	268.6	63.5	16.3	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	4	4	4	5	4	1403.9	899.6	1356.2	1383.2	1396.0
Inst60T1.1.J24	0.02	1073.4	1296.7	15.8	12.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	797.4	498.8	537.7	767.7	786.8
Inst60T1.2.J24	0.02	197.5	23.0	16.4	10.6	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	2	2	2	2	2	3239.3	2246.5	3152.1	3239.3	3239.3
Inst60T1.3.J24	0.02	259.3	13.2	86.9	13.4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1	1	1	2	1	2476.2	1921.2	2476.2	2438.0	2476.2
Inst70T1.1.J24	0.02	859.5	684.5	57.2	33.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	973.3	802.1	813.7	961.7	963.1
Inst70T1.2.J24	0.02	1273.1	53.7	125.3	35.6	99.1	99.1	99.1	99.1	99.1	10	10	10	10	10	2720.7	1894.2	2694.0	2700.5	2720.7
Inst70T1.3.J24	0.03	981.6	69.7	4536.1	38.2	17.0	17.0	17.0	14.5	17.0	12	12	12	14	12	2342.4	1506.1	2332.7	1177.1	2342.4

Tabela 6.13 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 1

Instância	Valor da função de avaliação				Porcentagem média de utilização das máquinas	Número de lotes					Número médio de lotes por componente				Desvio médio por produto final						
	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF		ITF	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF
Inst20T1.1.J21	5853	5607	5610	5650	5652	46.3	23	20	20	20	20	1.3	1.1	1.1	1.1	1.1	31.8	1.0	1.4	6.4	6.6
Inst20T1.2.J21	4472	4073	4466	4472	4472	102.1	41	40	40	41	41	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	121.6	77.3	121.0	121.6	121.6
Inst20T1.3.J21	21601	21435	21601	21571	21601	80.7	45	44	45	44	45	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	69.2	50.7	69.2	65.8	69.2
Inst30T1.1.J21	79730	78613	79714	79712	79730	103.9	117	117	116	116	117	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	122.7	60.6	121.8	119.4	122.7
Inst30T1.2.J21	2798	2593	2686	2671	2746	68.6	78	74	71	73	75	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	26.7	16.4	21.1	20.3	24.1
Inst30T1.3.J21	42174	41831	42173	42174	42174	92.7	132	128	132	132	132	2.2	2.1	2.2	2.2	2.2	37.8	20.6	37.7	37.8	37.8
Inst40T1.1.J21	609	360	449	564	607	99.4	77	74	75	76	77	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	30.5	18.0	22.4	28.2	30.3
Inst40T1.2.J21	6607	6348	6604	6583	6607	101.9	112	114	111	111	112	1.6	1.7	1.6	1.6	1.6	46.2	35.4	46.1	44.2	46.2
Inst40T1.3.J21	268	157	160	232	238	79.3	101	93	94	97	98	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	9.9	5.8	5.9	8.6	8.8
Inst50T1.1.J21	396	174	209	327	372	87.6	94	88	86	95	94	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3	13.7	6.0	7.2	11.3	12.8
Inst50T1.2.J21	9042	8151	9035	8998	9042	104.5	114	106	113	113	114	1.5	1.4	1.5	1.5	1.5	49.5	19.8	49.2	48.0	49.5
Inst50T1.3.J21	629	276	276	516	516	86.4	129	116	113	123	123	1.3	1.2	1.1	1.2	1.2	19.1	8.4	8.4	15.6	15.6
Inst60T1.1.J21	1207	761	887	1138	1138	98.0	99	95	90	97	96	1.4	1.4	1.3	1.4	1.4	46.4	29.3	34.1	43.8	43.8
Inst60T1.2.J21	39901	39556	39900	39900	39767	66.4	114	110	114	114	112	1.5	1.4	1.5	1.5	1.5	32.6	21.1	32.5	32.6	28.1
Inst60T1.3.J21	16300	16032	16116	16300	16300	96.0	121	114	111	120	121	1.6	1.5	1.4	1.6	1.6	16.4	7.2	10.1	16.4	16.4
Inst70T1.1.J21	114918	114763	114915	114903	114918	59.3	250	247	247	247	249	2.8	2.7	2.7	2.7	2.8	19.3	14.1	19.2	18.8	19.3
Inst70T1.2.J21	933	113	395	498	690	60.1	106	96	99	102	102	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	28.3	3.4	12.0	10.4	14.7
Inst70T1.3.J21	345	208	161	255	340	79.2	140	138	132	137	139	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	8.9	5.3	4.1	6.5	8.7
Inst20T1.1.J27	836	262	299	585	592	88.1	132	120	117	128	128	1.5	1.3	1.3	1.4	1.4	27.0	8.5	9.7	18.9	19.1
Inst20T1.2.J27	17082	16355	17031	16946	17082	89.1	178	178	176	178	178	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	39.0	16.2	37.4	34.3	39.0
Inst20T1.3.J27	3407	2593	3407	3407	3407	63.9	120	120	120	120	120	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	41.8	13.7	41.8	41.8	41.8
Inst30T1.1.J27	455	285	215	412	412	82.0	159	159	144	155	155	1.5	1.5	1.3	1.4	1.4	11.1	6.9	5.2	10.1	10.1
Inst30T1.2.J27	43127	42251	43127	43127	43127	105.9	372	368	372	372	372	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	64.8	41.7	64.8	64.8	64.8
Inst30T1.3.J27	1062	572	512	928	927	95.6	183	187	166	180	180	1.4	1.5	1.3	1.4	1.4	24.1	13.0	11.6	21.1	21.1
Inst40T1.1.J27	938	369	434	929	934	95.7	191	185	178	194	191	1.3	1.3	1.3	1.4	1.3	17.7	7.0	8.2	17.5	17.6
Inst40T1.2.J27	1077	762	701	1047	1051	95.4	174	168	163	173	172	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5	25.6	18.1	16.7	24.9	25.0
Inst40T1.3.J27	36243	34864	36243	36243	36243	75.9	289	283	289	289	289	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	41.8	12.4	41.8	41.8	41.8

Tabela 6.14 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 1
(continuação)

Instância	Valor da função de avaliação				Porcentagem média de utilização das máquinas	Número de lotes				Número médio de lotes por componente				Desvio médio por produto final							
	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF		ITF	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF
Inst50T1.1.J27	1669	1102	1282	1666	1666	99.5	196	193	188	196	196	1.6	1.6	1.6	1.6	38.8	25.6	29.8	38.7	38.7	
Inst50T1.2.J27	18392	17719	18377	18352	18392	103.6	368	363	367	368	368	2.1	2.1	2.1	2.1	24.5	14.2	24.3	22.3	24.5	
Inst50T1.3.J27	646	356	287	626	629	83.7	204	199	187	204	203	1.3	1.3	1.2	1.3	10.8	5.9	4.8	10.4	10.5	
Inst60T1.1.J27	1857	720	1478	1728	1847	99.7	264	274	262	264	263	1.3	1.4	1.3	1.3	26.2	10.1	20.8	24.3	26.0	
Inst60T1.2.J27	299874	299547	299874	299874	299874	80.2	901	904	900	901	900	4.3	4.3	4.3	4.3	22.7	18.4	22.7	22.7	22.7	
Inst60T1.3.J27	96035	95750	96026	96010	96035	96.9	486	485	484	488	485	2.7	2.7	2.7	2.7	22.9	18.7	22.8	22.5	22.9	
Inst70T1.1.J27	363915	363644	363902	363915	363915	97.5	700	698	699	700	700	3.8	3.8	3.8	3.8	32.0	28.1	31.8	32.0	32.0	
Inst70T1.2.J27	253790	253534	253782	253786	253763	98.5	728	723	728	729	728	3.3	3.3	3.3	3.3	28.9	25.7	28.8	28.8	28.5	
Inst70T1.3.J27	148681	147554	148166	148365	148207	91.3	651	649	637	650	634	3.5	3.5	3.4	3.5	35.3	18.4	27.6	25.6	26.9	
Inst20T1.1.J24	500	319	297	500	500	95.6	148	144	142	148	148	1.6	1.5	1.5	1.6	14.7	9.4	8.7	14.7	14.7	
Inst20T1.2.J24	24545	23321	24522	24524	24545	91.8	287	291	285	286	287	2.7	2.7	2.6	2.6	61.0	27.9	60.4	60.4	61.0	
Inst20T1.3.J24	128529	127685	128510	128439	128529	96.6	426	417	424	428	426	4.3	4.3	4.3	4.4	64.9	40.1	64.3	62.2	64.9	
Inst30T1.1.J24	816	488	520	772	773	82.7	195	192	184	192	192	1.4	1.4	1.3	1.4	16.0	9.6	10.2	15.1	15.2	
Inst30T1.2.J24	5723	4063	5713	5715	5723	101.8	240	246	239	241	240	1.8	1.8	1.8	1.8	57.8	23.9	57.6	54.5	57.8	
Inst30T1.3.J24	32626	31343	32548	32625	32626	97.5	271	275	268	272	271	3.0	3.1	3.0	3.0	54.8	21.0	52.7	54.8	54.8	
Inst40T1.1.J24	4240	3462	4240	4236	4240	91.2	235	237	235	237	235	1.5	1.6	1.5	1.6	41.5	27.8	41.5	41.4	41.5	
Inst40T1.2.J24	499	218	188	369	372	82.5	226	215	209	220	219	1.3	1.2	1.2	1.3	7.8	3.4	2.9	5.8	5.8	
Inst40T1.3.J24	100323	99596	100287	100319	100323	94.8	569	573	568	569	569	3.6	3.6	3.6	3.6	35.2	22.5	34.6	35.2	35.2	
Inst50T1.1.J24	322	198	169	264	280	65.4	204	209	188	200	199	1.3	1.4	1.2	1.3	5.9	3.6	3.1	4.8	5.1	
Inst50T1.2.J24	429159	428786	429159	429110	429159	114.0	906	911	906	906	906	4.6	4.6	4.6	4.6	37.2	31.9	37.2	36.5	37.2	
Inst50T1.3.J24	7456	6951	7408	7445	7448	96.3	378	377	373	380	378	2.1	2.0	2.0	2.1	20.1	12.9	19.4	19.8	19.9	
Inst60T1.1.J24	797	499	538	768	787	90.5	284	283	271	284	282	1.3	1.3	1.3	1.3	9.8	6.2	6.6	9.5	9.7	
Inst60T1.2.J24	15343	14351	15256	15343	15343	103.9	327	328	326	328	327	1.7	1.7	1.7	1.7	46.9	32.6	45.7	46.9	46.9	
Inst60T1.3.J24	3439	2884	3439	3421	3439	100.6	335	338	335	335	335	1.4	1.5	1.4	1.4	30.6	23.7	30.6	30.1	30.6	
Inst70T1.1.J24	973	802	814	962	963	88.5	295	293	281	294	294	1.3	1.3	1.2	1.3	11.9	9.8	9.9	11.7	11.7	
Inst70T1.2.J24	101812	100986	101786	101792	101812	109.8	746	749	745	748	746	2.9	2.9	2.9	2.9	28.9	20.2	28.7	28.7	28.9	
Inst70T1.3.J24	19379	18543	19370	15726	19379	101.5	752	753	751	683	752	2.7	2.7	2.7	2.5	21.7	13.9	21.6	10.9	21.7	

Como seria de esperar, os algoritmos de pesquisa local conseguem em geral melhorar a qualidade das soluções obtidas com a heurística de ordenação e escalonamento. A IPT consegue melhorar a solução inicial da totalidade das instâncias de teste, embora seja a estrutura de vizinhança com maior tempo médio de resolução (250 segundos). Os tempos médios de resolução da ITT, da IPF e da ITF são de 102 segundos, 113 segundos e 20 segundos, respectivamente. A ITT consegue melhorar a solução inicial em 49 instâncias, a IPF em 51 instâncias e a ITF em 33 instâncias.

A melhor solução encontrada com os quatro algoritmos de pesquisa local está assinalada a amarelo, na Tabela 6.13 e na Tabela 6.14. Na Tabela 6.15 apresenta-se o número de instâncias em que cada algoritmo de pesquisa local chega à melhor solução encontrada, assim como a percentagem média de melhoria da função de avaliação 1, após a aplicação dos algoritmos de pesquisa local. Na Tabela 6.15 apresenta-se ainda o desempenho dos algoritmos de pesquisa local em termos do número de instâncias com melhoria do desvio total dos produtos finais (face ao desvio total da solução inicial). A IPT é a estrutura de vizinhança que dá melhores resultados. Por sua vez, a ITF é a estrutura de vizinhança com pior desempenho.

Tabela 6.15 Comparação dos valores da função de avaliação 1 da solução inicial da heurística de ordenação e escalonamento com os valores da função de avaliação 1 dos algoritmos de pesquisa local e número de instâncias com melhoria do desvio total da solução inicial

	IPT	ITT	IPF	ITF
Número de melhores soluções	44	9	1	0
Percentagem média de melhoria da função de avaliação 1	21.1	16.9	5.3	3.3
Número de instâncias com melhoria do desvio total	54	47	48	31

Os quatro algoritmos de pesquisa local não conseguem em geral melhorar o atraso total da solução inicial, como se pode verificar analisando a Tabela 6.11 e a Tabela 6.12. Apenas na instância Inst70T1.3.J24 a IPF consegue reduzir o atraso total em 2.5 horas.

De um modo geral todos os algoritmos de pesquisa local reduzem o número de lotes da solução comparando com o número de lotes da solução inicial, embora essa redução não seja significativa.

A média do desvio médio por produto final da solução inicial é igual a 33.9 horas. Todos os algoritmos de pesquisa local conseguem reduzir esse valor para 19.1 horas, 29.8 horas, 31.5 horas e 32.5 horas usando a IPT, a ITT, a IPF e a ITF, respectivamente.

Comparando os quatro algoritmos de pesquisa local entre si, é notório que a IPT é a estrutura de vizinhança que mais melhora a qualidade das soluções iniciais, embora seja o algoritmo com maiores tempos médios de resolução. A ITF é a estrutura de vizinhança mais rápida, mas é também a estrutura de vizinhança que menos melhora a qualidade das soluções iniciais.

Todos os algoritmos de pesquisa local conseguem em geral melhorar a qualidade das soluções iniciais em termos do desvio total dos produtos finais, mas não conseguem reduzir o atraso total da solução inicial.

6.1.4.4 Resultados da Pesquisa Local partindo da Heurística de Ordenação e Escalonamento e usando a Função de Avaliação 2

Na Tabela 6.16, na Tabela 6.17, na Tabela 6.18 e na Tabela 6.19 são apresentados os resultados computacionais dos quatros algoritmos de pesquisa local partindo da solução inicial obtida com a heurística de ordenação e escalonamento, usando a função de avaliação 2. Os resultados da solução inicial são mais uma vez incluídos de forma a facilitar a sua comparação com os resultados da pesquisa local.

Na Tabela 6.16 e na Tabela 6.17 apresentam-se os tempos totais de resolução (colunas 2 a 6), os valores da função de avaliação (colunas 7 a 11), os valores do stock médio durante a produção (colunas 12 a 16) e os valores do stock médio após a produção (colunas 17 a 21). Os valores do stock médio durante a produção e os valores do stock médio após a produção são calculados do modo apresentado na subsecção 6.1.3.

Por sua vez, na Tabela 6.18 e na Tabela 6.19, apresentam-se os valores do stock médio durante a produção com atraso (colunas 2 a 6), o número de lotes (colunas 7 a 11), o número médio de lotes por componente (colunas 12 a 16) e o número de unidades em stock (colunas 17 a 21). Os valores do stock médio durante a produção com atraso calculam-se do modo apresentado na subsecção 6.1.3 e o número de unidades em stock do modo já apresentado na subsecção 6.1.4.2.

Comparando os valores da função de avaliação da heurística de ordenação e escalonamento com os valores da função de avaliação dos algoritmos de pesquisa local conclui-se que em geral a pesquisa local melhora a qualidade das soluções. As estruturas de vizinhança de inserção parcial para trás e de inserção parcial para a frente melhoram sempre a qualidade das soluções iniciais. A inserção total para trás melhora a solução inicial em 52 das 54 instâncias de teste e a inserção total para a frente em 46 das 54 instâncias. A percentagem média de melhoria da função de avaliação para o conjunto das 54 instâncias é apresentada na Tabela 6.20. Na Tabela 6.16 e na Tabela 6.17 assinala-se a cor amarela a melhor solução encontrada com os algoritmos de pesquisa local. A IPT encontra a melhor solução em 28 instâncias, seguida pela IPF, que encontra a melhor solução em 20 instâncias. A ITT encontra a melhor solução em 4 instâncias e a ITF em 2 instâncias, como se pode analisar na Tabela 6.20.

Tabela 6.16 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 2

Instância	Tempo total de resolução (segundos)				Valor da função de avaliação				Valor do stock médio durante a produção				Valor do stock médio após a produção							
	Heurística de ordenação e escalonamento	IP T	IT T	IP F	IT F	Heurística de ordenação e escalonamento	IP T	IT T	IP F	IT F	Heurística de ordenação e escalonamento	IP T	IT T	IP F	IT F	Heurística de ordenação e escalonamento	IP T	IT T	IP F	IT F
Inst20T1.1.J21	0.0	0.3	0.1	0.8	0.1	2417	1982	2088	2105	2222	301189	286881	306471	281450	301750	87757	14925	16550	45116	48225
Inst20T1.2.J21	0.0	1.1	0.1	678.0	0.1	10431	8594	10418	8023	10420	695467	676691	695467	662931	695467	1017700	670907	1015270	683243	1015740
Inst20T1.3.J21	0.0	0.1	0.1	0.3	0.0	10167	10159	10167	9685	10167	311610	311610	311610	308387	311610	394535	392816	394535	433140	394535
Inst30T1.1.J21	0.0	21.0	0.6	999.6	1.6	26367	22755	26350	22545	26177	432634	338403	433721	352381	433009	1226580	600079	1222140	1363680	1110680
Inst30T1.2.J21	0.0	6.5	2.5	5.2	0.4	2478	2120	2385	2115	2396	162763	150836	165162	156968	163449	187780	129139	166842	153523	153694
Inst30T1.3.J21	0.0	11.4	0.3	7203.5	0.2	27278	26854	27278	7148	27278	327514	320456	327514	307179	327514	426157	348901	426145	488578	426131
Inst40T1.1.J21	0.0	23.8	1.9	785.0	8.6	4294	3624	4273	4074	4289	476422	423402	476422	441258	476422	382315	301307	378185	369370	379298
Inst40T1.2.J21	0.0	4.1	1.0	7202.1	0.3	4275	4245	4268	4007	4275	248637	241714	249754	246028	248637	433068	434024	430644	450277	433068
Inst40T1.3.J21	0.0	39.8	8.8	7204.6	2.9	2576	2267	2024	2342	2525	332484	317690	353717	314770	332484	182636	135696	51054	152626	172843
Inst50T1.1.J21	0.0	258.3	18.4	7208.5	3.9	4861	3739	3859	4157	4403	579262	537678	597017	471287	579276	392890	210042	174834	357211	300317
Inst50T1.2.J21	0.0	40.6	1.7	238.6	3.0	5509	4473	5354	4844	5435	234218	220147	234730	214909	234226	418317	225424	386626	264832	383545
Inst50T1.3.J21	0.0	7207.8	46.4	7210.5	23.7	2266	1790	1784	2202	2229	248187	230553	281737	233698	248188	205095	127512	75145	206739	197797
Inst60T1.1.J21	0.0	327.2	22.8	7204.5	6.3	7479	4199	7190	6912	7182	436421	395715	515777	391422	467429	1059350	444023	922197	990352	964323
Inst60T1.2.J21	0.0	37.0	1.4	3515.1	0.7	15901	15151	15867	9963	15891	183287	182098	183287	173964	183563	404187	261981	397324	587949	402479
Inst60T1.3.J21	0.0	1325.6	11.8	1540.5	4.0	6446	6057	5995	5104	6331	280950	260491	283131	258143	280950	184367	127898	91922	250824	137404
Inst70T1.1.J21	0.0	20.1	2.8	7212.5	0.8	11007	10940	11007	8793	11007	77490	75043	77490	61839	77490	76050	65331	76036	149339	76050
Inst70T1.2.J21	0.0	1571.3	34.8	7214.7	2.7	2507	1002	876	2439	1667	139907	135497	153247	112160	139961	361541	64907	21924	368630	173569
Inst70T1.3.J21	0.0	1227.6	30.9	6172.0	19.3	2466	2026	2187	2251	2357	316291	250356	319174	298717	316430	176952	154869	118152	148602	143832
Inst20T1.1.J27	0.0	5690.2	73.8	7214.0	3.4	8267	7319	7614	8003	8267	1182570	1052030	1190900	1176460	1182570	470806	411705	331909	391285	470899
Inst20T1.2.J27	0.0	14.8	5.7	1536.2	6.2	11146	11102	11095	6667	11116	604142	589584	604142	591643	604339	219363	225124	209027	248516	198089
Inst20T1.3.J27	0.0	85.0	3.4	7201.7	5.0	6636	5284	6632	5413	6572	503753	446597	503753	435847	504087	461558	250221	460770	497645	471475
Inst30T1.1.J27	0.0	7203.4	67.3	7202.6	4.4	4472	3619	3981	4163	4286	656484	583793	657573	599563	656484	237971	139937	138670	229026	196895
Inst30T1.2.J27	0.0	153.9	27.7	7208.3	5.6	18527	18180	18510	17969	18527	817830	772340	817830	813492	817830	813390	791510	809949	825253	813390
Inst30T1.3.J27	0.0	7214.4	103.8	7202.5	85.4	9526	7691	7395	9325	8323	1030780	892726	1039060	977143	1031180	874433	645376	439910	886107	565373
Inst40T1.1.J27	0.0	7201.1	139.8	7207.2	41.2	7415	4917	5179	5916	5786	735118	585500	744580	685344	735118	747941	397935	291193	438187	376003
Inst40T1.2.J27	0.0	7209.4	120.3	7202.6	77.2	9218	6302	8630	8704	9033	824463	678044	835108	787691	824463	1019170	582381	890834	953040	981346
Inst40T1.3.J27	0.0	450.7	32.5	7228.9	84.5	32555	30253	32544	21176	32540	662725	581668	665717	549883	662773	729724	352316	724566	1199800	729530

Tabela 6.17 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 2 (continuação)

Instância	Tempo total de resolução (segundos)				Valor da função de avaliação				Valor do stock médio durante a produção				Valor do stock médio após a produção							
	Heurística de ordenação e escalonamento	IP T	IT T	IP F	IT F	Heurística de ordenação e escalonamento	IP T	IT T	IP F	IT F	Heurística de ordenação e escalonamento	IP T	IT T	IP F	IT F	Heurística de ordenação e escalonamento	IP T	IT T	IP F	IT F
Inst50T1.1.J27	0.0	2349.4	346.4	7217.1	256.9	8762	8150	8599	8434	8632	759039	771152	809914	738439	759174	993267	858903	909880	947288	959358
Inst50T1.2.J27	0.0	555.3	33.9	7205.8	8.6	6923	6790	6918	6788	6923	601728	577059	601728	592234	601728	329760	327843	328770	331502	329760
Inst50T1.3.J27	0.0	7210.6	119.7	7209.7	31.5	4108	3757	3909	4091	4012	587632	508260	592808	531338	587632	233978	243107	188943	287023	214773
Inst60T1.1.J27	0.0	7223.9	108.0	7202.5	92.8	6697	5759	6650	6637	6689	748695	674772	748695	732700	748695	590615	476937	581296	586083	581542
Inst60T1.2.J27	0.0	3860.9	895.4	7208.5	840.7	19573	19463	19551	19438	19002	416258	375906	416501	415383	416745	312612	331790	308203	322060	341852
Inst60T1.3.J27	0.0	1299.0	180.2	7205.0	668.6	18274	18177	18262	15193	18187	611544	594019	612431	603141	611544	506478	504957	503343	581427	486038
Inst70T1.1.J27	0.0	5592.2	81.8	7205.5	624.2	36146	34551	36141	18606	36021	411951	341553	411951	389477	411951	674026	427127	673009	738033	647424
Inst70T1.2.J27	0.0	7209.0	397.6	7211.4	2041.9	39420	38996	39402	27961	35559	452801	404952	453040	439421	459412	515449	480813	511852	619268	628819
Inst70T1.3.J27	0.0	7209.4	460.6	7220.4	4095.1	18781	17563	17617	18517	17350	484650	425909	509346	482765	485336	538062	354422	280597	538742	330563
Inst20T1.1.J24	0.0	299.5	10.6	443.4	2.6	6666	6439	6663	6642	6666	1078360	1039180	1078360	1060830	1078360	254871	248582	254176	267575	254823
Inst20T1.2.J24	0.0	325.7	30.7	7217.4	5.2	14680	13405	14564	12599	14680	754745	691114	754745	723725	754745	795714	604424	772553	904410	795714
Inst20T1.3.J24	0.0	817.7	47.4	7218.9	41.9	60000	58583	59953	48416	59717	747861	659382	760488	680219	747861	853948	659901	831850	1299800	797565
Inst30T1.1.J24	0.0	7203.0	118.4	7201.6	147.6	7357	5606	7148	7204	7344	871901	751966	877363	795322	872111	599535	369297	552319	642250	597109
Inst30T1.2.J24	0.0	1765.1	37.8	4743.3	71.2	12828	10453	12421	12197	12815	1092170	962171	1096300	1052580	1092170	1162460	819155	1076970	1075950	1160590
Inst30T1.3.J24	0.0	248.4	16.8	7204.3	154.1	16067	14422	15993	15024	15827	960862	947391	980330	944396	968688	710195	394956	675869	567665	682158
Inst40T1.1.J24	0.0	2237.7	73.6	7219.6	178.5	12687	9174	12643	12384	12616	974668	859339	974668	931337	974967	1230490	643426	1221700	1237340	1210820
Inst40T1.2.J24	0.0	7209.1	312.4	7203.1	222.0	5521	5027	5133	5311	5337	876330	806416	879673	856252	876349	227941	198905	146972	205560	186081
Inst40T1.3.J24	0.0	1450.6	71.5	7206.9	28.5	18181	17397	18178	17874	18181	675362	632041	676346	655766	675362	682441	570786	680681	738752	682441
Inst50T1.1.J24	0.0	7203.9	131.1	7212.6	96.1	3742	3535	3635	3628	3692	639417	572767	656983	577527	639417	109042	134251	69983	144016	98422
Inst50T1.2.J24	0.0	1638.5	151.7	7216.7	57.7	76064	75803	75999	75019	76063	808726	773090	808726	804163	808726	742652	726003	729740	738588	742435
Inst50T1.3.J24	0.0	7226.5	683.3	7206.8	146.5	8458	7900	8222	7947	8432	903777	817579	906660	887284	904492	645932	620409	595789	645095	639677
Inst60T1.1.J24	0.0	7207.0	1663.3	7216.4	127.3	5784	4621	4631	5528	5661	705971	595747	713025	659566	705971	450920	328420	213243	438710	407642
Inst60T1.2.J24	0.0	7211.0	88.5	7204.5	10.1	21428	19635	21395	21178	21428	894390	782523	894390	855475	894390	1494540	1249850	1487780	1586360	1494540
Inst60T1.3.J24	0.0	7203.2	158.3	7203.1	547.0	8719	6836	8680	8486	8558	709172	618593	709188	698664	709185	961232	675457	953523	936430	927777
Inst70T1.1.J24	0.0	7218.0	324.3	7210.0	361.8	6897	6702	6846	6856	6887	880039	808481	882067	845593	880039	499341	531931	487225	525542	497406
Inst70T1.2.J24	0.0	7201.2	416.2	7204.1	2308.7	17423	15375	17399	16773	16205	730163	629528	731162	703125	732195	1064540	757707	1058700	1033530	1112480
Inst70T1.3.J24	0.0	7217.8	384.2	7206.0	919.5	8127	7251	7933	6039	6063	735167	657335	735840	725019	735171	848110	750766	808658	440378	428003

Tabela 6.18 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 2

Instância	Valor do stock médio durante a produção com atraso					Número de lotes					Número médio de lotes por componente					Número de unidades em stock				
	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF
Inst20T1.1.J21	494.2	494.2	494.2	494.9	494.2	23	23	21	25	22	1.3	1.3	1.2	1.4	1.2	463	359	385	389	417
Inst20T1.2.J21	1893.1	1893.1	1893.1	1400.5	1893.3	41	44	41	68	41	1.6	1.8	1.6	2.7	1.6	2039	1604	2037	1603	2037
Inst20T1.3.J21	6737.5	6737.5	6737.5	6117.1	6737.5	45	45	45	48	45	2.6	2.6	2.6	2.8	2.6	841	839	841	883	841
Inst30T1.1.J21	18346.3	18346.3	18346.3	14212.0	18775.3	117	143	116	169	115	2.3	2.9	2.3	3.4	2.3	1975	1117	1971	2043	1838
Inst30T1.2.J21	736.1	736.1	736.1	575.5	828.0	78	90	74	93	76	1.4	1.6	1.3	1.7	1.4	417	333	395	370	378
Inst30T1.3.J21	23867.5	23867.5	23867.5	3217.1	23867.5	132	143	132	509	132	2.2	2.4	2.2	8.5	2.2	897	797	897	947	897
Inst40T1.1.J21	0.0	0.0	0.0	33.5	15.3	77	97	77	153	76	1.3	1.7	1.3	2.6	1.3	1022	863	1017	965	1019
Inst40T1.2.J21	879.3	879.3	879.3	543.6	879.3	112	127	111	406	112	1.6	1.8	1.6	5.9	1.6	812	804	810	829	812
Inst40T1.3.J21	0.0	0.0	0.0	24.5	1.2	101	117	86	204	101	1.4	1.6	1.2	2.8	1.4	613	540	482	556	602
Inst50T1.1.J21	0.0	0.0	0.0	26.3	10.1	94	156	85	248	93	1.3	2.1	1.1	3.4	1.3	1157	890	919	986	1047
Inst50T1.2.J21	2281.0	2281.0	2281.0	2494.2	2397.4	114	139	113	157	113	1.5	1.9	1.5	2.1	1.5	777	530	740	571	735
Inst50T1.3.J21	0.0	0.0	0.0	10.5	2.7	129	266	110	334	127	1.3	2.7	1.1	3.4	1.3	540	426	425	524	531
Inst60T1.1.J21	0.0	0.0	0.0	9.9	32.9	99	148	90	208	98	1.4	2.1	1.3	3.0	1.4	1781	1000	1712	1645	1704
Inst60T1.2.J21	13161.0	13161.0	13161.0	6259.0	13165.6	114	133	114	249	112	1.5	1.7	1.5	3.2	1.5	699	529	691	907	698
Inst60T1.3.J21	4182.2	4182.2	4182.2	2620.8	4323.8	121	300	115	352	120	1.6	3.9	1.5	4.6	1.6	554	462	446	606	498
Inst70T1.1.J21	10395.6	10395.6	10395.6	7864.4	10395.6	250	260	249	468	250	2.8	2.9	2.8	5.2	2.8	183	167	183	251	183
Inst70T1.2.J21	0.0	0.0	0.0	42.5	107.7	106	241	95	416	105	1.3	2.9	1.1	5.0	1.3	597	239	209	572	373
Inst70T1.3.J21	0.0	0.0	0.0	25.2	64.3	140	217	132	363	137	1.2	1.9	1.1	3.1	1.2	587	482	521	533	548
Inst20T1.1.J27	0.0	0.0	0.0	225.8	0.6	132	255	129	287	132	1.5	2.9	1.4	3.2	1.5	895	792	824	848	895
Inst20T1.2.J27	7135.7	7135.7	7135.7	2531.6	7217.0	178	189	178	303	177	2.1	2.3	2.1	3.6	2.1	446	441	440	455	434
Inst20T1.3.J27	1837.2	1837.2	1837.2	779.3	1732.4	120	157	120	328	119	1.4	1.9	1.4	3.9	1.4	522	377	522	505	528
Inst30T1.1.J27	0.0	0.0	0.0	33.9	19.7	159	353	157	311	159	1.5	3.3	1.5	2.9	1.5	484	392	431	448	462
Inst30T1.2.J27	10529.2	10529.2	10529.2	9949.6	10529.2	372	387	372	488	372	3.6	3.8	3.6	4.7	3.6	883	846	881	887	883
Inst30T1.3.J27	0.0	0.0	0.0	28.5	377.1	183	328	171	258	181	1.4	2.6	1.3	2.0	1.4	1031	832	800	1008	864
Inst40T1.1.J27	0.0	0.0	0.0	322.5	252.5	191	368	187	319	191	1.3	2.6	1.3	2.2	1.3	803	532	560	608	601
Inst40T1.2.J27	0.0	0.0	0.0	10.9	10.5	174	348	168	368	174	1.6	3.1	1.5	3.3	1.6	998	682	934	942	977
Inst40T1.3.J27	25982.5	25982.5	25982.5	12644.9	25967.9	289	314	288	427	280	2.3	2.5	2.3	3.4	2.2	753	505	752	947	753

Tabela 6.19 Resultados computacionais dos algoritmos de pesquisa local, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 2 (continuação)

Instância	Valor do stock médio durante a produção com atraso					Número de lotes				Número médio de lotes por componente				Número de unidades em stock						
	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF	Heurística de ordenação e escalonamento	IPT	ITT	IPF	ITF
Inst50T1.1.J27	0.0	0.0	0.0	9.9	64.9	196	269	193	361	195	1.6	2.2	1.6	3.0	1.6	948	882	931	912	930
Inst50T1.2.J27	2300.0	2300.0	2300.0	2206.5	2300.0	368	412	368	426	368	2.1	2.4	2.1	2.4	2.1	504	490	504	500	504
Inst50T1.3.J27	0.0	0.0	0.0	6.1	0.7	204	361	200	396	204	1.3	2.3	1.3	2.6	1.3	445	407	423	443	434
Inst60T1.1.J27	0.0	0.0	0.0	52.8	43.1	264	486	264	454	264	1.3	2.5	1.3	2.3	1.3	725	623	720	714	720
Inst60T1.2.J27	16182.3	16182.3	16182.3	16001.2	15455.5	901	941	895	1061	892	4.3	4.5	4.3	5.1	4.2	394	383	392	399	410
Inst60T1.3.J27	12876.8	12876.8	12876.8	9500.1	12907.8	486	553	483	568	484	2.7	3.1	2.7	3.1	2.7	605	595	604	641	594
Inst70T1.1.J27	31183.9	31183.9	31183.9	13176.4	31198.4	700	761	700	821	700	3.8	4.2	3.8	4.5	3.8	588	416	587	610	573
Inst70T1.2.J27	35105.8	35105.8	35105.8	23081.5	30646.0	728	813	726	893	670	3.3	3.7	3.3	4.0	3.0	524	479	522	573	589
Inst70T1.3.J27	13875.1	13875.1	13875.1	13618.2	13529.7	651	732	643	804	627	3.5	3.9	3.4	4.3	3.4	553	422	427	553	442
Inst20T1.1.J24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	148	205	148	160	148	1.6	2.2	1.6	1.7	1.6	610	590	610	608	610
Inst20T1.2.J24	7033.3	7033.3	7033.3	4606.1	7033.3	287	310	287	420	287	2.7	2.9	2.7	3.9	2.7	710	593	699	745	710
Inst20T1.3.J24	52783.0	52783.0	52783.0	39225.7	52785.8	426	465	424	582	426	4.3	4.7	4.3	5.9	4.3	733	604	729	907	708
Inst30T1.1.J24	0.0	0.0	0.0	52.3	0.4	195	377	192	327	194	1.4	2.7	1.4	2.4	1.4	674	513	655	658	673
Inst30T1.2.J24	1578.5	1578.5	1578.5	1578.5	1586.8	240	303	239	308	240	1.8	2.2	1.8	2.3	1.8	1032	816	995	975	1031
Inst30T1.3.J24	7829.2	7829.2	7829.2	7588.0	7722.3	271	286	269	452	267	3.0	3.2	3.0	5.0	3.0	765	615	758	692	756
Inst40T1.1.J24	1686.5	1686.5	1686.5	1577.5	1725.5	235	306	235	314	232	1.5	2.0	1.5	2.1	1.5	1010	688	1006	993	1001
Inst40T1.2.J24	0.0	0.0	0.0	10.2	36.2	226	366	218	391	224	1.3	2.1	1.3	2.2	1.3	506	460	470	486	486
Inst40T1.3.J24	11565.9	11565.9	11565.9	11070.4	11565.9	569	615	568	794	569	3.6	3.9	3.6	5.1	3.6	622	551	621	639	622
Inst50T1.1.J24	0.0	0.0	0.0	29.8	7.2	204	364	199	368	204	1.3	2.4	1.3	2.4	1.3	343	324	333	330	338
Inst50T1.2.J24	69351.0	69351.0	69351.0	68334.2	69351.4	906	946	906	969	906	4.6	4.8	4.6	4.9	4.6	710	686	704	706	710
Inst50T1.3.J24	720.4	720.4	720.4	295.6	722.8	378	527	372	489	376	2.1	2.9	2.0	2.7	2.0	710	658	688	702	707
Inst60T1.1.J24	0.0	0.0	0.0	53.9	112.6	284	446	273	406	284	1.3	2.1	1.3	1.9	1.3	530	423	424	503	510
Inst60T1.2.J24	9628.1	9628.1	9628.1	9111.5	9628.1	327	460	327	457	327	1.7	2.4	1.7	2.4	1.7	1094	931	1091	1118	1094
Inst60T1.3.J24	372.2	372.2	372.2	320.1	382.5	335	476	334	517	333	1.4	2.1	1.4	2.2	1.4	765	593	761	749	750
Inst70T1.1.J24	0.0	0.0	0.0	1.4	4.0	295	482	291	429	292	1.3	2.1	1.3	1.9	1.3	632	614	627	628	631
Inst70T1.2.J24	8578.5	8578.5	8578.5	8219.4	7119.2	746	871	745	851	741	2.9	3.4	2.9	3.4	2.9	822	635	820	795	845
Inst70T1.3.J24	214.0	214.0	214.0	217.8	267.9	752	838	749	828	751	2.7	3.0	2.7	3.0	2.7	725	645	707	534	533

Tabela 6.20 Comparação dos valores da função de avaliação 2 da solução inicial da heurística de ordenação e escalonamento com os valores da função de avaliação 2 dos algoritmos de pesquisa local

	IPT	ITT	IPF	ITF
Número de melhores soluções	28	4	20	2
Percentagem média de melhoria da função de avaliação 2	12.5	5.7	11.7	3.4

Os tempos totais de resolução dos algoritmos de pesquisa local apresentados na Tabela 6.16 e na Tabela 6.17 dizem respeito apenas ao tempo gasto durante a pesquisa local. Os tempos médios de resolução do conjunto de instâncias de teste são iguais a 3 162 segundos, 150 segundos, 5 856 segundos e 268 segundos, para as estruturas de vizinhança de IPT, de ITT, de IPF e de ITF, respectivamente.

Pela análise da Tabela 6.16 e da Tabela 6.17 pode-se concluir que as estruturas de vizinhança de IPT e de IPF têm em geral capacidade para reduzir o valor do stock médio durante a produção face ao valor do stock médio durante a produção da solução inicial. A IPT melhora esse valor em 52 instâncias e a IPF melhora-o na totalidade das instâncias. Já a ITT e a ITF nunca melhoram o valor deste indicador, face ao valor obtido na solução inicial. Quanto ao nível do stock médio após a produção, analisando mais uma vez os resultados da Tabela 6.16 e da Tabela 6.17, pode-se dizer que todas as estruturas de vizinhança melhoram em geral esse indicador. Na IPT, na ITT, na IPF e na ITF existe melhoria do nível do stock médio após a produção em 48, 53, 24 e 42 instâncias, respectivamente. Relativamente ao valor do stock médio durante a produção com atraso, tal como se pode observar na Tabela 6.18 e na Tabela 6.19 quer a IPT, quer a ITT nunca melhoram este indicador. Já a IPF melhora este indicador em 48 das instâncias, com melhorias significativas (superiores a 50% em algumas das instâncias). Com a ITF existem algumas instâncias nas quais há melhoria do valor do stock médio durante a produção com atraso, mas em outras este indicador piora.

A média do número médio de lotes por componente na heurística de ordenação e escalonamento é igual a 2.1. Nos algoritmos de pesquisa local esse indicador assume os

valores 2.7, 2.0, 3.4 e 2.0 para a IPT, para a ITT, para a IPF e para a ITF, respectivamente.

Relativamente ao número de unidades em stock, em termos médios na solução inicial existem 760 unidades em stock, na IPT existem 611 unidades, na ITT existem 715 unidades, na IPF existem 740 unidades e na ITF existem 731 unidades.

A estrutura de vizinhança de inserção parcial para trás é na generalidade o algoritmo com melhor desempenho nas várias medidas de desempenho consideradas. De notar que os resultados da IPT são relativamente melhores que os obtidos com a IPF, sendo o tempo médio total de resolução da IPT bastante melhor que o tempo médio total de resolução da IPF (cerca de 46% melhor).

6.2 Meta-heurísticas

6.2.1 VND e VNS

Nos quatro algoritmos de pesquisa local apresentados na secção 6.1, quando na pesquisa é encontrada uma solução óptima local o algoritmo pára nessa solução. Nesta secção apresentam-se dois algoritmos (duas meta-heurísticas) baseados em pesquisa local, que incorporam mecanismos que contornam esta desvantagem dos algoritmos de pesquisa local.

A primeira meta-heurística é normalmente designada por algoritmo de descida em vizinhanças variáveis (*variable neighborhood descent* – VND) e a segunda, por algoritmo de pesquisa em vizinhanças variáveis (*variable neighborhood search* – VNS). Ambas as meta-heurísticas fazem mudanças sistemáticas de vizinhança para “escapar” dos mínimos locais. Quando na pesquisa de uma dada estrutura de vizinhança é encontrado um mínimo local, o algoritmo muda para uma estrutura de vizinhança diferente da actual e reinicia o processo de pesquisa.

O algoritmo de descida em vizinhanças variáveis é um algoritmo determinístico, no qual a solução actual é usada para iniciar o processo de pesquisa quando existe mudança da estrutura de vizinhança. A ideia base por detrás deste algoritmo assenta na observação de que um óptimo local de uma dada estrutura de vizinhança não é necessariamente um óptimo local de uma outra estrutura de vizinhança, podendo ser vantajoso combinar várias heurísticas de descida (Hansen et al., 2006). Por sua vez, o algoritmo de pesquisa em vizinhanças variáveis combina um processo estocástico (durante a fase de perturbação da solução incumbente) com um processo determinístico (durante a fase de pesquisa local). Neste caso, quando há mudança da estrutura de vizinhança o algoritmo inicia a pesquisa local a partir de uma solução gerada aleatoriamente, a qual pertence à vizinhança da solução incumbente. No fim do processo de pesquisa local, *i. e.*, quando é encontrado um óptimo local, esse óptimo local é comparado com a solução incumbente, podendo ocorrer uma das duas situações seguintes: (1) o valor da solução associada ao óptimo local é igual ou pior do que o valor da solução incumbente, significando que a estrutura de vizinhança actual conduziu a um óptimo local que não é melhor do que o já conhecido, devendo neste caso ser escolhida uma nova estrutura de vizinhança; e (2) o valor da solução associada ao óptimo local é melhor do que o valor da solução incumbente, significando que a estrutura de vizinhança actual conduziu a um óptimo local que é melhor do que o já conhecido. Neste caso deve reiniciar-se a pesquisa a partir do novo óptimo local (que passa a ser a solução incumbente) e a partir da primeira estrutura de vizinhança.

No algoritmo de VNS considera-se que o algoritmo deverá terminar quando após um determinado número de iterações não houver melhoria da solução incumbente. Na Figura 6.11 e na Figura 6.12 apresenta-se o pseudo-código de ambas as meta-heurísticas, onde $N_k(x)$ representa o conjunto de soluções na vizinhança da solução x .

Quer o algoritmo de VND quer o algoritmo de VNS apresentados neste trabalho incorporam as quatro estruturas de vizinhança apresentadas na secção 6.1, mudando sequencialmente de estrutura de vizinhança sempre que é alcançado um mínimo local. A pesquisa para cada estrutura de vizinhança é realizada do modo já definido na secção 6.1.

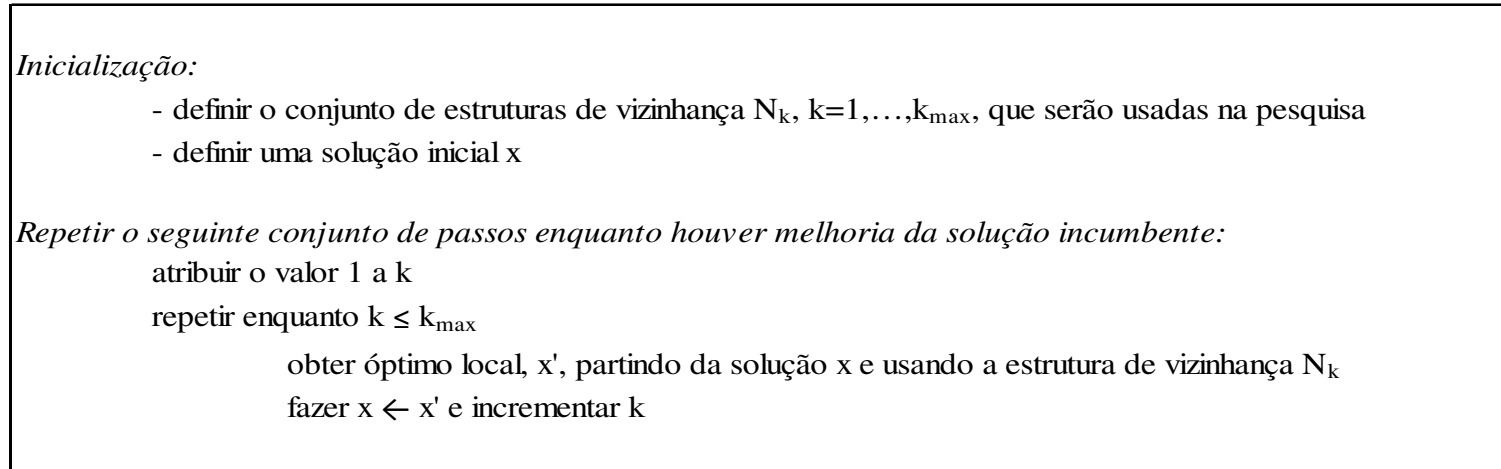


Figura 6.11 Pseudo-código do algoritmo VND

Inicialização:

- definir o conjunto de estruturas de vizinhança N_k , $k=1, \dots, k_{\max}$, que serão usadas na pesquisa
- definir uma solução inicial x
- escolher um critério de paragem

Repetir o seguinte conjunto de passos enquanto o critério de paragem não for atingido:

atribuir o valor 1 a k

repetir enquanto $k \leq k_{\max}$

gerar aleatoriamente uma solução x' na k vizinhança de x ($x' \in N_k(x)$)

obter óptimo local, x'' , partindo da solução x' e usando a estrutura de vizinhança N_k

se o valor da solução x'' for melhor do que o valor da solução x , fazer $x \leftarrow x''$ e $k \leftarrow 1$

senão incrementar k

Figura 6.12 Pseudo-código do algoritmo VNS

No algoritmo de VNS as estruturas de vizinhança que são usadas na pesquisa local são as mesmas que são usadas para gerar aleatoriamente as soluções a partir das quais é iniciado o processo de pesquisa. Se na fase de perturbação se usar por exemplo a estrutura de vizinhança de inserção parcial para trás, a pesquisa local incidirá sobre a mesma estrutura de vizinhança.

Em Blum e Roli (2003) sugere-se que as estruturas de vizinhança escolhidas quer no algoritmo de VNS quer no algoritmo de VND devem permitir explorar diferentes propriedades e características do espaço de pesquisa. Os autores sugerem ainda que embora a ordem de chamada das estruturas de vizinhança possa ser escolhida aleatoriamente, frequentemente será mais vantajoso estabelecer uma estrutura hierárquica entre as diferentes estruturas de vizinhança, devendo estas ser chamadas por ordem crescente de cardinalidade ($|N_1| < |N_2| < \dots < |N_{\max}|$) por forma a garantir uma diversificação progressiva. As estruturas de vizinhança usadas neste trabalho têm em consideração a exploração das diferentes propriedades e características do espaço de pesquisa. Contudo as quatro estruturas de vizinhança não seguem a habitual estrutura hierárquica dos algoritmos de VND e de VNS. As estruturas de vizinhança abordadas neste trabalho foram definidas tendo em consideração algumas características fundamentais do problema DLEMP, nomeadamente o objectivo do problema. Em termos teóricos não é fácil determinar a cardinalidade das estruturas de vizinhança desenvolvidas. Em todas as estruturas definidas (IPT, IPF, ITT e ITF) durante o processo de pesquisa podem existir junções de lotes ou partições de lotes (como já referido anteriormente) o que faz com que a dimensão da vizinhança vá variando à medida que a pesquisa prossegue. Por esse motivo, quer no algoritmo de VND quer no algoritmo de VNS, a ordem de chamada das estruturas de vizinhança é determinada com base nos resultados computacionais da pesquisa local, tendo-se optado por usar primeiro as estruturas de vizinhança que conduziram a melhores resultados na pesquisa local.

6.2.2 Resultados Computacionais

Nesta subsecção apresentam-se os resultados computacionais para os algoritmos de VND e de VNS apresentados na subsecção anterior, para o conjunto de 54 instâncias de teste apresentadas na secção 3.3, partindo das duas soluções iniciais (heurística de fluxos em rede e escalonamento e heurística de ordenação e escalonamento) apresentadas nas secções 5.1 e 5.2, para as duas funções de avaliação apresentadas na secção 6.1, onde os algoritmos de pesquisa local foram apresentados em detalhe.

Os resultados das duas meta-heurísticas são comparados entre si e com a melhor solução obtida na pesquisa local. As meta-heurísticas foram implementadas em C++ usando o ambiente Microsoft Visual Studio 2008. Os testes computacionais foram realizados num computador pessoal com um processador Core 2Duo a 2 Ghz e com 2 GB de memória. O tempo de resolução foi limitado a 2 horas em ambos os algoritmos.

As medidas de desempenho consideradas para avaliar as meta-heurísticas são as mesmas que se usaram para avaliar as soluções da pesquisa local.

O algoritmo de VNS foi executado três vezes para cada instância, por se tratar de um processo com uma parte estocástica. A solução de cada uma das corridas do algoritmo VNS é denominada por VNS1, VNS2 e VNS3. A média dos resultados obtidos nas três corridas do algoritmo está representada na coluna denominada por VNS. O processo de pesquisa no algoritmo de VNS pára se após se terem pesquisado as quatro estruturas de vizinhança duas vezes não for encontrada uma solução vizinha melhor do que a solução incumbente.

6.2.2.1 Resultados das Meta-Heurísticas partindo da Heurística de Fluxos em Rede e Escalonamento e usando a Função de Avaliação 1

Tendo por base os resultados da pesquisa local apresentados na subsecção 6.1.4.1, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento e usando a função de avaliação 1, para testar os algoritmos de VND e de VNS foi escolhida a seguinte ordem de pesquisa das vizinhanças: IPF – IPT – ITT – ITF.

Na Tabela 6.21, na Tabela 6.22, na Tabela 6.23 e na Tabela 6.24 apresentam-se os resultados computacionais das meta-heurísticas, assim como o resultado da melhor solução obtida com os algoritmos de pesquisa local para o conjunto de instâncias de teste. De notar que a melhor solução da pesquisa local nem sempre foi obtida com o mesmo algoritmo de pesquisa local.

Pela análise dos resultados computacionais apresentados na Tabela 6.23 e na Tabela 6.24 pode-se concluir que as meta-heurísticas melhoram a melhor solução obtida com os algoritmos de pesquisa local em 47 das 54 instâncias. Especificamente, com o VND consegue-se melhorar a melhor solução dos algoritmos de pesquisa local em 38 das 54 instâncias de teste. Com o VNS o número de soluções melhores comparando com a melhor solução da pesquisa local diminui para 32. Em ambas as meta-heurísticas à medida que a dimensão do problema aumenta diminui a sua capacidade para melhorar a melhor solução encontrada com a pesquisa local e o tempo limite de resolução é regra geral alcançado (como se pode verificar pela análise da Tabela 6.21 e da Tabela 6.22). O valor médio da função de avaliação é igual a 99 428 para a melhor solução da pesquisa local. O mesmo valor baixa para 93 296 e para 95 480 no algoritmo de VND e no algoritmo de VNS, respectivamente.

Na Tabela 6.23 e na Tabela 6.24 assinala-se a cor amarela o algoritmo que consegue obter a melhor solução em cada instância, comparando apenas as meta-heurísticas entre si. O algoritmo de VND encontra a melhor solução em 15 das 54 instâncias, o VNS1 em 14 instâncias, o VNS2 em 11 instâncias e o VNS3 em 13 instâncias. Comparando o VND com o VNS, verifica-se que o VND obtém a melhor solução em 29 instâncias e o VNS em 24.

O tempo médio de resolução das instâncias usando os algoritmos de VND e de VNS é cerca de 1.3 e 1.6 vezes superior ao tempo médio necessário para encontrar a melhor solução da pesquisa local.

Tabela 6.21 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 1

Instância	Tempo total de resolução (segundos)						Atraso total dos produtos finais (horas)						Número de produtos finais com atraso						Desvio total dos produtos finais (horas)					
	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS
Inst20T1.1.J21	0.0	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	1	1	1	1	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Inst20T1.2.J21	1.1	2.8	2.9	3.9	4.7	3.8	10.9	10.5	36.1	10.9	18.1	21.7	1	1	2	1	1.3	869.7	366.7	399.6	537.1	120.2	352.3	
Inst20T1.3.J21	0.1	0.5	0.6	0.8	0.6	0.7	131.7	70.1	84.0	102.5	77.6	88.0	4	3	2	4	2.7	331.1	143.0	398.5	138.6	426.3	321.1	
Inst30T1.1.J21	4.2	16.3	22.8	22.8	22.3	22.6	143.5	114.2	105.4	134.3	102.3	114.0	5	3	3	3	2.7	1355.7	475.6	741.9	630.1	380.8	584.2	
Inst30T1.2.J21	4.2	6.9	25.9	30.8	23.4	26.7	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	1	1	1	1	1.0	169.1	155.4	167.3	142.6	141.5	150.5	
Inst30T1.3.J21	2.0	4.1	84.6	17.9	12.8	38.4	94.6	92.8	67.2	80.3	84.1	77.2	9	8	5	4	6.0	714.3	809.6	620.6	778.5	692.8	697.3	
Inst40T1.1.J21	4.5	14.0	24.3	31.5	22.6	26.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.0	605.6	409.1	405.6	602.3	447.9	485.3	
Inst40T1.2.J21	5.9	12.9	62.2	26.6	55.4	48.0	21.8	21.7	19.3	22.4	20.8	20.8	3	3	4	3	3.3	1376.2	620.5	713.9	699.7	637.2	683.6	
Inst40T1.3.J21	13.8	16.7	55.1	50.0	63.6	56.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.0	194.7	168.1	168.8	65.0	100.5	111.4	
Inst50T1.1.J21	11.6	32.2	54.3	37.9	42.9	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.0	331.1	219.4	198.9	342.4	118.2	219.8	
Inst50T1.2.J21	11.2	34.5	48.4	50.8	115.3	71.5	37.1	36.8	36.8	34.7	38.6	36.7	2	2	2	1	1.7	993.5	472.1	462.2	477.5	430.9	456.9	
Inst50T1.3.J21	88.5	100.2	163.1	497.9	310.6	323.9	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1	1	0	0	0.0	204.4	176.3	142.2	181.8	110.4	144.8	
Inst60T1.1.J21	8.3	36.0	79.5	81.8	82.6	81.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.0	576.1	466.8	456.5	441.5	458.4	452.1	
Inst60T1.2.J21	9.2	25.1	44.9	118.8	101.4	88.4	66.7	65.2	65.0	64.8	64.6	64.8	6	4	4	4	4.0	689.2	393.2	379.2	375.7	352.3	369.1	
Inst60T1.3.J21	34.8	50.8	219.9	192.8	113.2	175.3	31.8	31.2	21.3	31.8	31.1	28.1	3	3	2	3	2.7	465.1	457.1	278.2	401.8	384.5	354.9	
Inst70T1.1.J21	45.3	65.7	99.1	126.9	118.0	114.7	271.7	249.8	251.0	202.2	191.3	214.8	10	9	9	8	8.7	918.8	555.3	601.0	401.9	372.8	458.6	
Inst70T1.2.J21	19.1	33.7	58.3	45.1	40.9	48.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.0	45.8	91.9	3.3	47.9	52.3	34.5	
Inst70T1.3.J21	68.6	122.5	206.5	176.6	315.8	233.0	12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2	0	0	0	0.0	589.3	238.9	233.3	156.9	246.7	212.3	
Inst20T1.1.J27	224.9	893.9	1755.2	1232.5	887.3	1291.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.0	303.4	563.8	508.2	262.4	582.0	450.9	
Inst20T1.2.J27	392.0	966.8	2687.2	1486.4	1624.8	1932.8	78.0	52.0	52.2	53.1	49.7	51.7	8	6	7	6	4.5	1370.2	1094.5	1090.0	1043.5	969.4	1034.3	
Inst20T1.3.J27	432.6	1294.1	1054.7	825.9	1854.1	1244.9	6.7	4.6	5.5	4.7	6.4	5.5	3	3	3	3	2.7	1135.9	886.5	817.5	942.7	687.3	815.8	
Inst30T1.1.J27	353.1	1271.2	2682.4	2104.0	2360.2	2382.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.0	163.4	140.9	91.0	196.9	78.3	122.1	
Inst30T1.2.J27	866.5	1618.8	2243.7	1922.8	3977.2	2714.6	132.3	111.3	99.8	92.2	117.3	103.1	8	7	6	6	6.7	2516.8	1249.4	1437.7	1569.2	1638.9	1548.6	
Inst30T1.3.J27	750.6	3958.0	7174.2	5220.3	4764.1	5719.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.0	917.1	699.0	655.0	704.1	846.1	735.1	
Inst40T1.1.J27	2514.6	4712.2	7127.3	7128.2	6601.6	6952.3	0.0	0.0	2.6	0.0	2.9	1.8	0	0	1	0	0.7	899.6	950.1	754.4	733.0	642.1	709.8	
Inst40T1.2.J27	985.5	2982.5	4092.9	4162.2	4514.9	4256.7	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0	0	0	1	0.3	979.9	808.2	841.2	862.7	917.3	873.8	
Inst40T1.3.J27	469.6	1114.1	6844.5	7196.8	7199.1	7080.1	60.2	57.1	60.2	57.5	57.1	58.3	7	7	7	8	6.0	1169.4	1070.9	1169.4	984.5	1041.5	1065.1	

Tabela 6.22 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 1 (continuação)

Instância	Tempo total de resolução (segundos)					Atraso total dos produtos finais (horas)							Número de produtos finais com atraso					Desvio total dos produtos finais (horas)						
	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS
Inst50T1.1.J27	489.1	2643.0	4350.0	6080.1	6555.2	5661.8	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.3	0	0	1	1	1	1.0	1664.3	1615.5	1515.8	1545.9	1620.4	1560.7
Inst50T1.2.J27	5013.5	5080.2	5096.9	5044.6	5000.7	5047.4	72.3	72.2	78.9	72.9	72.4	74.7	8	7	9	9	7	8.3	3632.0	3327.5	2817.4	3661.9	3243.7	3241.0
Inst50T1.3.J27	1702.7	7166.5	7168.1	7165.5	7167.8	7167.1	0.0	0.4	0.1	0.1	0.5	0.2	0	4	3	3	5	3.7	347.0	3412.0	2343.7	2936.9	3228.3	2836.3
Inst60T1.1.J27	6008.6	6403.1	6399.8	6390.8	6370.4	6387.0	0.0	0.0	0.4	0.1	0.0	0.2	0	0	6	6	0	4.0	1685.4	2422.7	2936.8	2845.6	4389.2	3390.5
Inst60T1.2.J27	7178.2	7184.5	7174.9	7183.2	7181.1	7179.8	970.9	1009.5	1009.5	1009.6	969.3	996.1	31	32	32	31	31	31.3	10523.4	9556.8	9556.8	9546.9	11474.7	10192.8
Inst60T1.3.J27	5182.1	5243.6	5242.0	5167.3	5171.6	5193.6	218.8	218.8	272.2	278.7	273.0	274.7	13	13	14	13	14	13.7	3636.4	3614.3	4112.4	4436.1	4300.2	4282.9
Inst70T1.1.J27	1232.7	2991.6	6291.4	5552.3	7191.4	6345.1	201.8	187.0	182.5	193.6	199.3	191.8	13	9	10	9	10	9.7	3947.7	2314.8	2448.0	2468.4	2604.3	2506.9
Inst70T1.2.J27	7036.9	7052.6	7043.6	7034.2	7032.2	7036.7	483.5	483.5	506.7	450.6	449.6	468.9	15	14	16	17	15	16.0	4607.5	4577.8	4916.0	3909.1	4310.4	4378.5
Inst70T1.3.J27	7056.5	7168.0	7168.9	7173.8	7166.0	7169.6	344.3	310.7	410.1	399.3	408.3	405.9	16	12	18	18	16	17.3	4010.6	4412.5	3718.8	3648.3	4037.6	3801.6
Inst20T1.1.J24	1489.7	1248.2	1948.8	1888.6	3504.8	2447.4	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.1	0	0	0	1	0	0.3	909.7	1087.8	1054.3	755.2	871.2	893.5
Inst20T1.2.J24	1264.4	2903.3	4861.6	6965.4	3685.1	5170.7	67.6	61.7	57.2	66.6	64.2	62.7	8	7	6	8	8	7.3	5115.5	1919.3	2075.7	2294.4	2445.7	2271.9
Inst20T1.3.J24	1571.2	2516.6	4361.2	5192.1	4543.0	4698.8	342.7	234.4	277.3	252.4	262.5	264.1	12	8	9	8	7	8.0	3121.1	1485.6	2453.9	1825.2	2018.9	2099.3
Inst30T1.1.J24	221.1	355.3	156.2	438.8	189.0	261.3	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.1	3	1	0	4	0	1.3	5487.5	5292.9	6228.4	5165.8	6228.4	5874.2
Inst30T1.2.J24	4834.0	6449.4	6424.4	6453.3	6420.0	6432.6	19.4	19.5	19.5	22.9	19.5	20.6	1	4	3	6	2	3.7	3062.6	3618.0	5214.8	4109.0	4214.4	4512.7
Inst30T1.3.J24	1427.7	2473.5	7192.9	5639.2	7192.1	6674.7	120.3	97.4	97.2	98.6	137.3	111.0	8	7	7	8	9	8.0	2126.7	1653.8	1860.3	2048.4	4314.7	2741.2
Inst40T1.1.J24	7014.6	7017.2	7012.4	7021.3	7016.7	7016.8	17.2	19.4	19.8	18.8	18.3	18.9	5	5	3	2	6	3.7	1796.1	1773.7	2265.0	2345.6	2086.2	2232.2
Inst40T1.2.J24	2389.1	4668.9	7073.2	7087.3	7085.1	7081.9	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0	1	0	1	0	0.3	471.8	460.6	386.9	350.2	418.5	385.2
Inst40T1.3.J24	2662.2	6244.8	6255.0	6242.1	6210.8	6236.0	166.3	164.8	184.4	145.5	163.0	164.3	12	11	15	13	12	13.3	3748.9	2340.4	3782.6	3413.1	2525.6	3240.5
Inst50T1.1.J24	3008.4	6449.1	7005.4	7149.0	7149.4	7101.3	0.3	0.0	0.0	0.4	0.4	0.3	1	0	0	2	2	1.3	586.1	662.3	579.5	1545.4	1292.9	1139.3
Inst50T1.2.J24	6039.7	6074.4	6090.6	6065.9	6025.5	6060.6	819.6	819.6	763.2	753.7	825.3	780.8	20	20	19	19	18	18.7	7665.1	7664.5	6443.8	6099.2	7500.6	6681.2
Inst50T1.3.J24	6757.0	6763.0	6765.7	6775.3	6748.8	6763.3	5.5	5.5	6.9	9.3	5.5	7.2	4	4	3	7	3	4.3	3361.5	3326.5	6791.8	3153.4	3337.3	4427.5
Inst60T1.1.J24	5710.4	5724.4	5712.2	5669.0	5667.7	5683.0	0.0	0.0	1.7	0.0	1.8	1.1	0	0	5	2	4	3.7	2522.7	6237.9	6595.7	6021.5	6263.0	6293.4
Inst60T1.2.J24	5690.5	5718.8	5727.5	5720.9	5686.1	5711.5	67.4	67.4	60.9	70.5	67.5	66.3	7	7	6	8	8	7.3	11138.2	11041.3	11730.8	12309.1	12157.4	12065.8
Inst60T1.3.J24	2730.9	2890.5	2809.2	2727.0	2770.3	2768.8	13.5	13.5	14.3	14.3	13.3	14.0	7	7	8	8	7	7.7	14124.6	14123.0	15523.8	15523.8	14266.8	15104.8
Inst70T1.1.J24	6909.2	6949.1	6947.4	6951.2	6931.7	6943.4	0.0	1.2	1.7	1.2	3.1	2.0	0	11	11	11	11	11.0	6528.3	8542.1	8402.1	8720.3	8411.9	8511.4
Inst70T1.2.J24	4429.6	4455.6	4445.6	4332.4	4332.4	4370.1	117.6	118.2	117.6	118.5	118.7	118.3	6	6	7	7	7	7.0	4290.4	4412.1	4238.6	4393.9	5362.6	4665.0
Inst70T1.3.J24	3610.4	3659.7	3672.0	3571.8	3557.8	3600.5	70.2	70.3	70.4	70.6	70.2	70.4	10	13	12	14	10	12.0	11265.1	12106.6	12130.8	12071.1	13840.6	12680.8

Tabela 6.23 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 1

Instância	Valor da função de avaliação						Porcentagem média de utilização das máquinas	Número de lotes					Número médio de lotes por componente					Desvio médio por produto final							
	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS		Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS
Inst20T1.1.J21	5599	5599	5599	5599	5599	5599	45.6	19	19	20	19	19.3	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Inst20T1.2.J21	11779	10820	36548	11446	18195	22063	102.0	44	34	31	41	31	34.3	1.8	1.4	1.2	1.6	1.2	1.4	96.6	40.7	44.4	59.7	13.4	39.1
Inst20T1.3.J21	132020	70234	84361	102683	77985	88343	80.5	26	27	24	24	26	24.7	1.5	1.6	1.4	1.4	1.5	1.5	36.8	15.9	44.3	15.4	47.4	35.7
Inst30T1.1.J21	144844	114641	106094	134930	102706	114577	104.3	70	66	62	67	62	63.7	1.4	1.3	1.2	1.3	1.2	1.3	75.3	26.4	41.2	35.0	21.2	32.5
Inst30T1.2.J21	3408	3394	3406	3381	3380	3389	68.4	86	82	86	80	76	80.7	1.5	1.5	1.5	1.4	1.4	1.4	8.5	7.8	8.4	7.1	7.1	7.5
Inst30T1.3.J21	95307	93560	67869	81120	84753	77914	92.7	103	102	93	98	93	94.7	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	35.7	40.5	31.0	38.9	34.6	34.9
Inst40T1.1.J21	606	409	406	602	448	485	99.4	77	73	73	75	74	74.0	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	30.3	20.5	20.3	30.1	22.4	24.3
Inst40T1.2.J21	23157	22294	20054	23080	21409	21514	102.0	104	90	93	92	87	90.7	1.5	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	57.3	25.9	29.7	29.2	26.6	28.5
Inst40T1.3.J21	195	168	169	65	100	111	78.9	91	91	83	84	88	85.0	1.2	1.2	1.1	1.1	1.2	1.1	7.2	6.2	6.3	2.4	3.7	4.1
Inst50T1.1.J21	331	219	199	342	118	220	87.5	84	80	79	82	77	79.3	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.1	11.4	7.6	6.9	11.8	4.1	7.6
Inst50T1.2.J21	38142	37301	37291	35225	39010	37175	104.6	112	97	96	105	98	99.7	1.5	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	33.1	15.7	15.4	15.9	14.4	15.2
Inst50T1.3.J21	428	400	142	182	110	145	86.3	134	116	110	113	115	112.7	1.4	1.2	1.1	1.1	1.2	1.1	6.2	5.3	4.3	5.5	3.3	4.4
Inst60T1.1.J21	576	467	456	441	458	452	97.9	91	89	85	83	86	84.7	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	22.2	18.0	17.6	17.0	17.6	17.4
Inst60T1.2.J21	67423	65573	65425	65205	64987	65205	66.4	109	96	98	98	100	98.7	1.4	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	23.0	13.1	12.6	12.5	11.7	12.3
Inst60T1.3.J21	32258	31616	21587	32195	31471	28417	96.0	107	99	97	99	103	99.7	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	16.0	15.8	9.6	13.9	13.3	12.2
Inst70T1.1.J21	272632	250342	251562	202596	191625	215261	59.3	123	110	111	108	102	107.0	1.4	1.2	1.2	1.2	1.1	1.2	30.6	18.5	20.0	13.4	12.4	15.3
Inst70T1.2.J21	46	92	3	48	52	35	59.9	96	93	88	89	90	89.0	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.4	2.8	0.1	1.5	1.6	1.0
Inst70T1.3.J21	13058	239	233	157	247	212	79.1	136	125	125	127	135	129.0	1.2	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1	15.1	6.1	6.0	4.0	6.3	5.4
Inst20T1.1.J27	303	564	508	262	582	451	87.9	156	166	139	148	163	150.0	1.8	1.9	1.6	1.7	1.8	1.7	9.8	18.2	16.4	8.5	18.8	14.5
Inst20T1.2.J27	79373	53084	53274	54139	50699	52704	89.2	216	193	186	200	181	189.0	2.6	2.3	2.2	2.4	2.2	2.3	42.8	34.2	34.1	32.6	30.3	32.3
Inst20T1.3.J27	7862	5460	6323	5692	7060	6358	63.8	198	173	174	176	151	167.0	2.4	2.1	2.1	2.1	1.8	2.0	39.2	30.6	28.2	32.5	23.7	28.1
Inst30T1.1.J27	163	141	91	197	78	122	81.7	140	147	149	154	137	146.7	1.3	1.4	1.4	1.4	1.3	1.4	4.0	3.4	2.2	4.8	1.9	3.0
Inst30T1.2.J27	134786	112572	101222	93762	118928	104637	105.9	201	179	183	185	193	187.0	2.0	1.7	1.8	1.8	1.9	1.8	66.2	32.9	37.8	41.3	43.1	40.8
Inst30T1.3.J27	917	699	655	704	846	735	95.5	182	184	177	189	188	184.7	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.4	20.8	15.9	14.9	16.0	19.2	16.7
Inst40T1.1.J27	900	950	3311	733	3512	2519	95.6	225	220	210	207	195	204.0	1.6	1.5	1.5	1.5	1.4	1.4	17.0	17.9	14.2	13.8	12.1	13.4
Inst40T1.2.J27	980	808	841	917	917	892	95.3	196	168	179	164	188	177.0	1.8	1.5	1.6	1.5	1.7	1.6	23.3	19.2	20.0	20.5	21.8	20.8
Inst40T1.3.J27	61377	58168	61377	58491	58095	59321	75.9	291	274	291	255	266	270.7	2.3	2.2	2.3	2.0	2.1	2.2	24.9	22.8	24.9	20.9	22.2	22.7

Tabela 6.24 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 1 (continuação)

Instância	Valor da função de avaliação						Porcentagem média de utilização das máquinas	Número de lotes					Número médio de lotes por componente					Desvio médio por produto final						
	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS		Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS
Inst50T1.1.J27	1664	1615	2393	1555	1632	1860	99.5	204	194	193	190	198	193.7	1.7	1.6	1.6	1.7	1.6	38.7	37.6	35.3	36.0	37.7	36.3
Inst50T1.2.J27	75900	75565	81719	76562	75623	77968	103.6	335	326	292	345	320	319.0	1.9	1.9	1.7	2.0	1.8	55.9	51.2	43.3	56.3	49.9	49.9
Inst50T1.3.J27	347	3796	2414	2996	3684	3031	83.5	186	291	249	259	274	260.7	1.2	1.9	1.6	1.7	1.8	5.8	56.9	39.1	48.9	53.8	47.3
Inst60T1.1.J27	1685	2423	3331	2995	4389	3572	99.7	351	341	366	362	481	403.0	1.8	1.7	1.9	1.8	2.4	23.7	34.1	41.4	40.1	61.8	47.8
Inst60T1.2.J27	981415	1019090	1019090	1019110	980779	1006326	80.2	493	513	513	512	576	533.7	2.3	2.4	2.4	2.4	2.7	138.5	125.7	125.7	125.6	151.0	134.1
Inst60T1.3.J27	222451	222429	276340	283161	277301	278934	96.9	367	366	381	385	357	374.3	2.0	2.0	2.1	2.1	2.0	54.3	53.9	61.4	66.2	64.2	63.9
Inst70T1.1.J27	205791	189346	184969	196062	201872	194301	97.5	345	330	330	326	322	326.0	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	56.4	33.1	35.0	35.3	37.2	35.8
Inst70T1.2.J27	488112	488059	511593	454494	453877	473321	98.5	505	502	521	500	505	508.7	2.3	2.3	2.4	2.3	2.3	56.9	56.5	60.7	48.3	53.2	54.1
Inst70T1.3.J27	348327	315106	413777	402918	412353	409683	91.3	412	425	419	427	423	423.0	2.2	2.3	2.2	2.3	2.3	59.9	65.9	55.5	54.5	60.3	56.7
Inst20T1.1.J24	910	1088	1054	1025	871	984	95.5	165	155	161	155	153	156.3	1.8	1.6	1.7	1.6	1.7	26.8	32.0	31.0	22.2	25.6	26.3
Inst20T1.2.J24	72698	63653	59305	68858	66651	64938	91.8	288	226	224	239	249	237.3	2.7	2.1	2.1	2.2	2.3	138.3	51.9	56.1	62.0	66.1	61.4
Inst20T1.3.J24	345828	235840	279764	254247	264488	266166	96.6	231	176	220	210	206	212.0	2.4	1.8	2.2	2.1	2.1	91.8	43.7	72.2	53.7	59.4	61.7
Inst30T1.1.J24	5502	5299	6228	5583	6228	6013	82.7	346	321	370	320	370	353.3	2.5	2.3	2.7	2.3	2.7	107.6	103.8	122.1	101.3	122.1	115.2
Inst30T1.2.J24	22477	23087	24742	27009	23678	25143	101.8	358	281	333	294	313	313.3	2.7	2.1	2.5	2.2	2.3	62.5	73.8	106.4	83.9	86.0	92.1
Inst30T1.3.J24	122475	99066	99027	100691	141645	113788	97.5	242	235	232	228	313	257.7	2.7	2.6	2.6	2.5	3.5	56.0	43.5	49.0	53.9	113.5	72.1
Inst40T1.1.J24	18977	21131	22046	21135	20364	21182	91.1	335	320	349	348	335	344.0	2.2	2.1	2.3	2.3	2.2	31.5	31.1	39.7	41.2	36.6	39.2
Inst40T1.2.J24	472	644	387	433	419	413	82.2	264	247	230	231	246	235.7	1.5	1.4	1.3	1.3	1.4	7.4	7.2	6.0	5.5	6.5	6.0
Inst40T1.3.J24	170060	167103	188198	148937	165537	167557	94.8	392	352	425	385	363	391.0	2.5	2.2	2.7	2.5	2.3	65.8	41.1	66.4	59.9	44.3	56.9
Inst50T1.1.J24	923	662	579	1979	1727	1428	65.3	229	226	219	336	316	290.3	1.5	1.5	1.4	2.2	2.1	10.7	12.0	10.5	28.1	23.5	20.7
Inst50T1.2.J24	827266	827266	769676	759829	832794	787433	114.1	422	421	417	397	435	416.3	2.1	2.1	2.1	2.0	2.2	109.5	109.5	92.1	87.1	107.2	95.4
Inst50T1.3.J24	8906	8871	13711	12444	8872	11676	96.4	435	434	584	450	437	490.3	2.4	2.4	3.2	2.4	2.4	48.0	47.5	97.0	45.0	47.7	63.3
Inst60T1.1.J24	2523	6238	8248	6023	8034	7435	90.2	319	474	480	456	461	465.7	1.5	2.2	2.2	2.1	2.1	31.1	77.0	81.4	74.3	77.3	77.7
Inst60T1.2.J24	78489	78392	72645	82788	79652	78361	103.9	557	560	580	589	585	584.7	3.0	3.0	3.1	3.1	3.1	161.4	160.0	170.0	178.4	176.2	174.9
Inst60T1.3.J24	27581	27580	29807	29807	27599	29071	100.6	603	603	685	685	611	660.3	2.6	2.6	3.0	3.0	2.6	174.4	174.4	191.7	191.7	176.1	186.5
Inst70T1.1.J24	6528	9737	10085	9931	11465	10494	88.4	428	528	525	530	507	520.7	1.9	2.3	2.3	2.3	2.2	79.6	104.2	102.5	106.3	102.6	103.8
Inst70T1.2.J24	121894	122652	121876	122922	124029	122942	109.8	702	672	667	672	716	685.0	2.8	2.6	2.6	2.6	2.8	45.6	46.9	45.1	46.7	57.0	49.6
Inst70T1.3.J24	81440	82409	82513	82648	84016	83059	101.5	859	888	891	882	903	892.0	3.1	3.2	3.2	3.2	3.3	104.3	112.1	112.3	111.8	128.2	117.4

Existem 37 instâncias com atraso total positivo na melhor solução da pesquisa local. Na Tabela 6.25 apresenta-se o número de instâncias com melhoria do atraso total para cada meta-heurística, por comparação com o atraso total da melhor solução da pesquisa local, assim como o número de instâncias com melhoria do desvio total (apenas uma das melhores soluções da pesquisa local não tem desvio total positivo). A média do atraso total da melhor solução da pesquisa local é igual a 96.8 horas. Essa média baixa para 90.8 horas e para 92.8 horas, com o VND e com o VNS, respectivamente.

Tabela 6.25 Número de instâncias com melhoria do atraso total e do desvio total da melhor solução da pesquisa local

	VND	VNS1	VNS2	VNS3
Número de instâncias com melhoria do atraso total	23	21	19	22
Número de instâncias com melhoria do desvio total	39	35	36	34

Não existem diferenças significativas no número de lotes da solução das meta-heurísticas, comparando com o número de lotes da melhor solução da pesquisa local. Quanto à média do desvio médio por produto final, o seu valor para a melhor solução da pesquisa local é igual a 48 horas. O valor deste indicador baixa para 42 horas com o VND e para 45 horas com o VNS.

Comparando as duas meta-heurísticas com a melhor solução da pesquisa local, pode-se dizer que o potencial das meta-heurísticas é mais expressivo nas instâncias de menor dimensão. À medida que a dimensão do problema cresce ambas as meta-heurísticas começam a ter dificuldades para melhorar as melhores soluções da pesquisa local, no tempo limite pré-estabelecido. Por outro lado, não existem diferenças significativas entre os resultados obtidos com o VND e os resultados obtidos com o VNS, embora o desempenho do VND seja um pouco melhor na generalidade dos indicadores.

6.2.2.2 Resultados das Meta-Heurísticas partindo da Heurística de Fluxos em Rede e Escalonamento e usando a Função de Avaliação 2

Tal como se procedeu na subsecção anterior, para decidir a ordem de chamada das estruturas de vizinhança nos algoritmos de VND e de VNS, foram usados os resultados da pesquisa local apresentados na subsecção 6.1.4.2. Para a situação em que a solução inicial é obtida através da heurística de fluxos em rede e escalonamento e a função de avaliação escolhida é a 2, a ordem de chamada das estruturas de vizinhança é a seguinte: IPF – IPT – ITF – ITT.

Uma vez que numa grande percentagem de instâncias, na pesquisa local o tempo limite de resolução de 2 horas é atingido na estrutura de vizinhança de IPF, o potencial de melhoria das meta-heurísticas, considerando o mesmo limite de tempo fica de algum modo comprometido. Por uma questão de coerência do trabalho, realizaram-se mesmo assim os testes computacionais para a situação em que a solução inicial é obtida com a heurística de fluxos em rede e escalonamento e as soluções são avaliadas através da função de avaliação 2. No algoritmo de VND, todas as instâncias para as quais o tempo limite de 2 horas foi atingido com a estrutura de vizinhança de IPF não foram testadas, sendo considerada como solução do algoritmo de VND a solução obtida na IPF.

Os valores da Tabela 6.26, da Tabela 6.27, da Tabela 6.28 e da Tabela 6.29 dizem respeito aos resultados computacionais das meta-heurísticas e da melhor solução da pesquisa local, quando a solução inicial é obtida com a heurística de fluxos em rede e escalonamento e as soluções são avaliadas através da função de avaliação 2.

Tabela 6.26 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 2

Instância	Tempo total de resolução (segundos)						Valor da função de avaliação						Valor do stock médio durante a produção						Valor do stock médio após a produção					
	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS
Inst20TI.1.J21	0.3	0.4	1.9	1.2	18.0	7.0	1809	1807	1602	1650	1427	1560	336307	336372	296222	246755	252451	265143	7062	6776	6913	63691	16905	29170
Inst20TI.2.J21	54.5	199.3	114.6	2390.0	204.4	903.0	9250	7898	8159	8663	7681	8168	657851	678671	662519	654121	693028	669889	755868	666570	667925	979344	643100	763456
Inst20TI.3.J21	7.4	13.3	3280.2	66.2	25.3	1123.9	12376	12246	6885	14243	15448	12192	439533	334981	395073	400784	425495	407117	788575	905765	623575	324258	310488	419440
Inst30TI.1.J21	420.4	2101.9	7202.0	7201.0	7203.3	7202.1	50894	43429	23697	33830	20517	26015	379809	343596	327044	242181	279146	282790	1463540	1269390	1196260	2386080	1543850	1708730
Inst30TI.2.J21	104.3	130.5	681.0	261.0	572.8	504.9	1697	1550	1372	1550	1430	1450	172966	166484	149314	166488	155750	157184	100258	84300	86372	83422	87589	85794
Inst30TI.3.J21	1873.3	7210.7	7215.5	7206.8	7206.2	7209.5	9216	8399	10981	9048	10981	10336	377853	376776	409313	365167	409313	394598	548825	525424	522849	567998	522849	537899
Inst40TI.1.J21	44.7	330.8	7201.0	930.5	1218.3	3116.6	4195	3975	6503	3946	3868	4772	431264	414846	433871	417829	362564	404755	407801	379987	866639	371224	410661	549508
Inst40TI.2.J21	7203.0	7203.0	7213.3	7204.2	7200.9	7206.1	6901	6901	6401	7162	9862	7808	238376	238376	242624	231827	228155	234202	804168	804168	847308	906218	878144	877223
Inst40TI.3.J21	27.0	152.4	507.9	895.5	459.6	621.0	2081	2010	2012	1968	1868	1950	294832	297727	290099	287438	266440	281326	121368	104192	112471	106390	107242	108701
Inst50TI.1.J21	244.5	3187.9	7202.8	7201.0	7202.6	7202.1	4800	5378	5822	6943	4909	5891	474038	445119	397484	490136	430511	439377	486055	624596	693461	891786	551347	712198
Inst50TI.2.J21	1141.8	2414.6	7201.2	7201.2	7066.6	7156.6	7648	7085	7093	7849	7469	7470	208490	187833	183456	182916	179695	182022	458505	368231	386612	400089	341661	376121
Inst50TI.3.J21	1311.9	5589.9	7202.2	7201.2	7201.2	7201.5	1857	1825	2119	2148	2077	2115	213815	224578	240226	235958	242445	239543	157679	139431	181170	185795	162738	176568
Inst60TI.1.J21	102.6	7203.2	7201.4	7200.9	7202.4	7201.6	6157	6206	7663	7473	8714	7950	640369	604294	768148	817670	742200	776006	591129	636132	762166	667387	1000640	810064
Inst60TI.2.J21	7206.3	7206.3	7210.8	7203.7	7204.2	7206.2	12980	12980	12197	12980	12976	12718	221135	221135	220342	221135	221134	220870	554494	554494	554874	554791	554386	
Inst60TI.3.J21	7207.5	7207.5	7201.7	7205.1	7204.6	7203.8	9307	9307	9407	10402	7014	8941	240729	240729	246592	249892	236662	244382	684248	684248	695732	722361	679957	699350
Inst70TI.1.J21	7203.4	7203.4	7201.9	7210.8	7207.1	7206.6	26826	26826	26274	31381	26491	28049	78348	78348	75061	82278	71102	76147	585772	585772	575100	573279	532717	560365
Inst70TI.2.J21	520.9	2913.0	1124.7	7204.9	3937.4	4089.0	847	1080	977	1434	979	1130	103798	117502	110073	133059	121404	121512	65602	98557	85243	147392	74250	102295
Inst70TI.3.J21	7019.5	7202.2	7201.6	7201.2	7201.5	7201.4	3465	1807	1859	1786	2971	2205	256355	243790	248387	228143	276757	251096	205012	117703	123473	129056	224446	158992
Inst20TI.1.J27	4365.3	7212.4	7201.5	7199.7	7212.9	7204.7	9275	11363	12100	11323	11424	11616	877971	842602	798580	799301	795905	797929	977086	1384000	1544720	1400150	1455230	1466700
Inst20TI.2.J27	7199.6	7199.6	7204.9	7206.0	7199.1	7203.3	26809	26809	26431	18920	22062	22471	424990	424990	398900	436107	446300	427102	1202950	1202950	1134870	1092760	1187880	1138503
Inst20TI.3.J27	1767.6	7187.3	7192.0	7192.8	7189.0	7191.3	5584	5879	5894	5894	5878	5889	333210	346583	345171	345173	345178	345174	465573	695225	699596	699595	696511	698567
Inst30TI.1.J27	7181.0	7180.4	7190.3	7190.4	7177.9	7186.2	4070	6236	6149	6313	6251	6238	486733	526846	504989	489326	505159	499825	327273	708424	700264	747042	700170	715825
Inst30TI.2.J27	1534.6	7150.0	7146.0	7152.7	7169.9	7156.2	31385	39997	30852	29788	26428	29022	889713	755003	742873	749437	763384	751898	1803790	2121400	2378050	2136540	2048310	2187633
Inst30TI.3.J27	2057.2	7170.0	7185.4	7169.0	7179.8	7178.0	8146	10136	10042	10188	10229	10153	857446	735202	681656	705058	687836	691517	771838	1290880	1323700	1326370	1356180	1335417
Inst40TI.1.J27	1990.3	7126.3	7125.2	7125.1	7124.9	7125.1	6287	9279	9962	9316	9295	9524	653649	555782	566145	560889	551601	559545	603787	1295830	1426230	1300310	1303720	1343240
Inst40TI.2.J27	1030.1	7177.8	7170.0	7163.3	7169.8	7167.7	11009	11601	12065	13831	12669	12855	947226	757601	758016	751226	745063	751435	1254640	1562950	1655570	2013030	1765400	1811333
Inst40TI.3.J27	7216.5	7216.5	7216.3	7213.3	7211.6	7213.7	24525	24525	28592	24525	26987	26701	541094	541094	545125	541096	544046	543422	1480240	1480240	1760490	1480250	1305210	1515317

Tabela 6.27 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 2
(continuação)

Instância	Tempo total de resolução (segundos)						Valor da função de avaliação					Valor do stock médio durante a produção					Valor do stock médio após a produção							
	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS
Inst50T1.1.J27	7188.5	7188.5	7198.7	7187.9	7191.1	7192.6	14361	14361	14618	14456	14307	14460	1095520	1095520	1084350	1118480	1011890	1071573	1766570	1766570	1813650	1772810	1832280	1806247
Inst50T1.2.J27	4808.0	4808.0	4807.7	4808.2	4819.7	4811.9	21007	21007	23282	21008	20177	21489	481430	481430	487895	480841	487296	485344	947222	947222	1006590	948031	955047	969889
Inst50T1.3.J27	3825.9	7160.3	7161.7	7162.3	7162.2	7162.1	3279	6624	6587	6667	6513	6589	489014	406957	403218	414804	386095	401372	166706	903577	897449	899863	900156	899156
Inst60T1.1.J27	6388.6	6398.4	6390.7	6394.5	6386.8	6390.7	12991	13111	13917	13706	14219	13947	704190	724727	711371	730051	768102	736508	1893980	1896930	2071910	2008390	2075730	2052010
Inst60T1.2.J27	7178.8	7178.8	7180.2	7171.5	7171.5	7174.4	66970	66970	64930	68296	66970	66732	399638	399638	428041	407918	399638	411866	3207020	3207020	3147520	3133750	3207020	3162763
Inst60T1.3.J27	4878.0	4878.0	4847.1	4866.1	4840.3	4851.2	47380	47380	47380	45488	45250	46039	691877	691877	691877	681284	655767	676309	2079440	2079440	2079440	2101840	2440650	2207310
Inst70T1.1.J27	7199.5	7199.5	7203.5	7200.5	7198.6	7200.8	34479	34479	32186	34912	32611	33237	381300	381300	375396	377297	374975	375889	1256460	1256460	1206650	1209010	1193160	1202940
Inst70T1.2.J27	7030.6	7030.6	7024.0	7033.0	7033.2	7030.1	34027	34027	34494	54507	40795	43266	467479	467479	467168	508438	468974	481527	2056340	2056340	2096360	1616290	2124990	1945880
Inst70T1.3.J27	7184.9	7189.3	7186.6	7186.2	7186.2	7186.3	46974	69404	72755	69570	68190	70172	651899	563453	600532	589323	587841	592565	1117170	1572360	1449980	1640320	1765190	1618497
Inst20T1.1.J24	6990.5	6982.3	6983.7	6985.1	6983.0	6983.9	8388	9680	9972	9972	9681	9875	935282	886586	971673	971673	884924	942757	741839	1044630	1017910	1017910	1046330	1027383
Inst20T1.2.J24	4240.1	7005.6	7009.6	7011.2	7002.7	7007.9	29177	34847	36836	34850	34528	35405	678952	577269	570457	576501	569407	572122	1781580	1672840	1656960	1678600	1685430	1673663
Inst20T1.3.J24	1492.1	6593.5	6572.5	6572.5	6574.6	6573.2	85887	186157	194804	210712	191511	199009	1139430	1044040	1014410	1071020	1045250	1043560	3844140	2743030	2697620	2569280	2642450	2636450
Inst30T1.1.J24	306.8	594.5	357.1	389.2	397.3	381.2	9860	9945	9986	9960	9948	9965	809479	797386	740646	789427	790824	773632	1158270	1191660	1257190	1202660	1199020	1219623
Inst30T1.2.J24	6300.3	6331.6	6304.7	6313.8	6317.8	6312.1	25388	26530	26570	26769	26343	26561	1285390	1112470	1117020	1110750	1113980	1113917	2066510	2266840	2250130	2287670	2214820	2250873
Inst30T1.3.J24	7193.2	7193.2	7205.2	7197.6	7194.8	7199.2	31266	31266	33757	31266	31530	32184	850466	850466	851533	850466	860105	854035	1120020	1120020	11166710	1120020	1159330	1148687
Inst40T1.1.J24	7001.1	7001.1	6992.2	6992.9	6996.2	6993.8	13052	13052	13256	13301	12767	13108	840274	840274	851843	840914	814862	835873	1538920	1538920	1532140	1547110	1519520	1532923
Inst40T1.2.J24	6382.7	7075.9	7078.0	7072.2	7080.5	7076.9	4818	6489	6232	6412	6484	6376	767597	710800	685500	695527	710458	697162	196030	585333	549412	579081	584745	571079
Inst40T1.3.J24	6142.4	6140.2	6155.3	6134.3	6125.2	6138.3	59809	81495	82185	80761	80691	81212	646998	621829	658771	623092	611615	631159	1214030	1381560	1337430	1415210	1461600	1404747
Inst50T1.1.J24	7134.0	7132.5	7132.7	7131.2	7133.1	7132.4	4068	5151	5571	5116	5011	5233	592186	493184	538412	479373	479119	498968	221510	533057	570889	538532	519073	542831
Inst50T1.2.J24	6099.0	6091.2	6082.5	6092.2	6089.1	6087.9	346703	390856	390195	392001	390768	390988	1261390	1170310	1202970	1190060	1174410	1189147	5748710	6522910	6418290	6330050	6401490	6383277
Inst50T1.3.J24	6591.3	6595.7	6596.9	6602.8	6580.2	6593.3	11478	11635	11675	11717	12165	11852	840788	838172	814870	830195	852091	832385	1101080	1235370	1267160	1248890	1222830	1246293
Inst60T1.1.J24	5399.0	5448.8	5435.6	5416.7	5428.2	5426.8	6861	10445	10341	10406	10473	10407	545791	473889	476080	478760	466491	473777	826413	1614290	1587320	1596000	1622910	1602077
Inst60T1.2.J24	5861.2	5893.4	5874.7	5864.8	5883.5	5874.3	37385	47649	47978	47869	48037	47961	904905	835317	826142	832659	854035	837612	2749080	2660900	2736370	2706790	2719790	2720983
Inst60T1.3.J24	6684.8	6613.4	6579.4	6595.2	6583.6	6586.1	13599	14166	14177	14161	14217	14185	616578	585622	566218	577703	615621	586514	1609210	1751770	1774280	1758530	1733600	1755470
Inst70T1.1.J24	6903.1	6911.8	6908.2	6905.9	6911.6	6908.6	10610	11265	11227	11274	11443	11315	779958	740838	741676	742641	741702	742006	1342060	1512790	1494030	1512510	1546210	1517583
Inst70T1.2.J24	3479.2	3540.7	3479.6	3483.6	3484.1	3482.5	120035	152712	152719	152894	152728	152780	811696	775364	760064	804166	785775	783335	2231000	1491930	1502640	1502950	1479360	1494983
Inst70T1.3.J24	3627.3	3655.6	3697.8	3586.7	3696.0	3660.2	16085	16402	16403	16404	16427	16411	605640	601461	600042	600504	605631	602059	1450690	1466340	1468180	1467580	1470220	1468660

Tabela 6.28 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 2

Instância	Valor do stock médio durante a produção com atraso						Número de lotes						Número médio de lotes por componente						Número de unidades em stock					
	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS
Inst20T1.1.J21	98.4	97.8	92.4	100.5	86.6	93.1	27	28	32	30	38	33.3	1.5	1.6	1.8	1.7	2.1	1.9	409	409	361	370	321	350
Inst20T1.2.J21	2280.6	1281.8	1626.9	530.9	1093.6	1083.8	70	65	64	83	58	68.3	2.8	2.6	2.6	3.3	2.3	2.7	1683	1601	1584	1945	1591	1706
Inst20T1.3.J21	6362.0	6161.2	1838.5	10862.3	12078.0	8259.6	69	67	182	52	48	94.0	4.1	3.9	10.7	3.1	2.8	5.5	1462	1477	1213	863	876	984
Inst30T1.1.J21	42412.4	35963.1	16375.9	21010.0	11589.2	16325.0	176	164	201	278	333	270.7	3.5	3.3	4.0	5.6	6.7	5.4	2194	1920	1813	3129	2170	2371
Inst30T1.2.J21	338.8	303.3	198.3	307.5	219.3	241.7	118	112	124	111	123	119.3	2.1	2.0	2.2	2.0	2.2	2.1	325	299	281	298	290	289
Inst30T1.3.J21	4674.9	3965.6	6416.2	4478.3	6416.2	5770.2	328	454	1023	425	1023	823.7	5.5	7.6	17.1	7.1	17.1	13.7	1103	1074	1110	1111	1110	1110
Inst40T1.1.J21	0.0	1.7	0.0	2.1	5.8	2.6	115	121	95	133	142	123.3	2.0	2.1	1.6	2.3	2.4	2.1	999	946	1548	939	921	1136
Inst40T1.2.J21	1725.9	1725.9	976.7	1527.7	4456.2	2320.2	329	329	426	356	326	369.3	4.8	4.8	6.2	5.2	4.7	5.4	1241	1241	1298	1355	1317	1323
Inst40T1.3.J21	0.0	0.3	1.1	2.9	0.0	1.3	109	136	136	141	126	134.3	1.5	1.8	1.8	1.9	1.7	1.8	495	478	479	469	445	464
Inst50T1.1.J21	0.0	44.3	416.2	53.9	4.5	158.2	137	158	230	166	155	183.7	1.9	2.1	3.1	2.2	2.1	2.5	1143	1273	1299	1645	1169	1371
Inst50T1.2.J21	4402.8	4378.7	4311.0	5015.5	4939.2	4755.2	197	226	241	237	220	232.7	2.7	3.1	3.3	3.2	3.0	3.1	794	662	679	694	621	664
Inst50T1.3.J21	0.0	14.2	21.8	56.8	69.5	49.4	206	232	321	278	272	290.3	2.1	2.3	3.2	2.8	2.7	2.9	442	433	502	502	482	495
Inst60T1.1.J21	0.0	37.3	58.5	107.9	0.0	55.4	119	207	386	163	113	220.7	1.7	3.0	5.5	2.3	1.6	3.2	1466	1477	1822	1768	2075	1888
Inst60T1.2.J21	9294.1	9294.1	8501.6	9294.4	9293.8	9029.9	284	284	279	284	284	282.3	3.7	3.7	3.6	3.7	3.7	3.7	923	923	923	923	923	923
Inst60T1.3.J21	4822.9	4822.9	4835.1	5692.2	2520.0	4349.1	413	413	421	515	441	459.0	5.4	5.4	5.5	6.7	5.7	6.0	1101	1101	1122	1157	1091	1123
Inst70T1.1.J21	23867.5	23867.5	23393.1	28541.1	23845.5	25259.9	366	366	457	372	487	438.7	4.1	4.1	5.1	4.1	5.4	4.9	791	791	774	780	719	758
Inst70T1.2.J21	0.0	0.8	2.9	34.9	2.6	13.5	184	196	155	241	191	195.7	2.2	2.4	1.9	2.9	2.3	2.4	202	257	233	334	233	266
Inst70T1.3.J21	1211.7	1.4	0.1	0.0	523.9	174.7	277	247	239	266	278	261.0	2.4	2.1	2.1	2.3	2.4	2.3	549	430	443	425	597	488
Inst20T1.1.J27	0.0	276.3	447.8	385.9	203.1	345.6	267	349	419	321	394	378.0	3.0	3.9	4.7	3.6	4.4	4.2	1004	1205	1268	1190	1218	1225
Inst20T1.2.J27	19031.8	19031.8	19108.9	11525.2	14216.5	14950.2	592	592	534	657	546	579.0	7.0	7.0	6.4	7.8	6.5	6.9	881	881	830	827	884	847
Inst20T1.3.J27	1616.1	687.6	687.6	687.6	687.6	687.6	239	358	360	361	359	360.0	2.8	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	432	564	565	565	564	565
Inst30T1.1.J27	0.0	87.0	154.0	159.8	262.4	192.0	395	412	439	406	397	414.0	3.7	3.9	4.1	3.8	3.7	3.9	440	668	652	669	652	658
Inst30T1.2.J27	18460.8	26043.0	15568.6	15686.8	12690.2	14648.5	238	511	476	523	445	481.3	2.3	5.0	4.6	5.1	4.3	4.7	1458	1556	1689	1562	1521	1591
Inst30T1.3.J27	0.0	10.8	31.9	51.3	16.2	33.1	220	445	468	449	422	446.3	1.7	3.5	3.7	3.5	3.3	3.5	882	1096	1085	1099	1106	1097
Inst40T1.1.J27	0.0	33.6	0.0	19.1	33.7	17.6	223	406	357	399	453	403.0	1.6	2.9	2.5	2.8	3.2	2.8	680	1002	1078	1007	1004	1030
Inst40T1.2.J27	0.0	1.9	6.5	10.2	153.2	56.7	206	387	393	298	445	378.7	1.8	3.5	3.5	2.7	4.0	3.4	1191	1256	1306	1496	1358	1387
Inst40T1.3.J27	14732.5	14732.5	17508.6	14732.5	18065.6	16768.9	446	446	489	445	463	465.7	3.6	3.6	3.9	3.6	3.7	3.7	1094	1094	1248	1094	1001	1114

Tabela 6.29 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento para a função de avaliação 2
(continuação)

Instância	Valor do stock médio durante a produção com atraso						Número de lotes						Número médio de lotes por componente						Número de unidades em stock					
	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS
Inst50T1.1.J27	82.9	82.9	179.0	14.5	127.1	106.8	329	329	312	323	326	320.3	2.7	2.7	2.6	2.7	2.7	2.7	1549	1549	1568	1565	1539	1557
Inst50T1.2.J27	14101.5	14101.5	16081.2	14101.0	13203.8	14462.0	626	626	616	627	600	614.3	3.6	3.6	3.5	3.6	3.4	3.5	773	773	809	773	780	787
Inst50T1.3.J27	0.0	78.0	92.6	106.1	91.3	96.7	233	527	541	502	547	530.0	1.5	3.4	3.5	3.3	3.6	3.4	355	709	704	711	696	704
Inst60T1.1.J27	0.0	18.7	10.6	31.6	0.0	14.1	611	600	528	589	483	533.3	3.1	3.0	2.7	3.0	2.5	2.7	1406	1419	1506	1482	1539	1509
Inst60T1.2.J27	49714.0	49714.0	47807.5	51383.6	49714.0	49635.0	791	791	848	764	791	801.0	3.8	3.8	4.0	3.6	3.8	3.8	1952	1952	1935	1916	1952	1934
Inst60T1.3.J27	34109.9	34109.9	34109.9	32117.5	30293.4	32173.6	609	609	611	607	576	598.0	3.4	3.4	3.4	3.4	3.2	3.3	1500	1500	1500	1506	1676	1560
Inst70T1.1.J27	26700.1	26700.1	24667.5	27409.2	25160.2	25745.6	698	698	678	765	707	716.7	3.8	3.8	3.7	4.2	3.9	3.9	886	886	856	858	849	854
Inst70T1.2.J27	21780.4	21780.4	22052.9	44651.9	28362.9	31689.2	707	707	701	701	766	722.7	3.2	3.2	3.2	3.2	3.5	3.3	1366	1366	1387	1150	1404	1314
Inst70T1.3.J27	38848.6	59666.2	63546.7	59382.4	57345.8	60091.6	467	783	674	657	740	690.3	2.5	4.2	3.6	3.5	4.0	3.7	957	1156	1110	1207	1273	1196
Inst20T1.1.J24	3.0	42.3	25.9	25.9	42.5	31.4	336	367	277	277	366	306.7	3.6	3.9	2.9	2.9	3.9	3.3	768	884	911	911	884	902
Inst20T1.2.J24	17255.4	24002.1	26139.4	23979.7	23651.7	24590.3	291	482	461	486	491	479.3	2.7	4.5	4.3	4.5	4.5	4.4	1127	1030	1020	1033	1032	1028
Inst20T1.3.J24	62178.9	169955.0	179124.0	195536.0	175865.0	183508.3	266	411	465	386	424	425.0	2.7	4.2	4.7	3.9	4.3	4.3	2282	1734	1700	1667	1689	1685
Inst30T1.1.J24	34.5	0.0	5.0	0.0	0.3	1.8	363	407	406	403	406	405.0	2.6	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	901	911	915	912	911	913
Inst30T1.2.J24	8886.6	9812.4	9927.4	9965.3	9890.4	9927.7	397	494	488	486	518	497.3	2.9	3.7	3.6	3.6	3.8	3.7	1535	1547	1542	1556	1524	1541
Inst30T1.3.J24	21838.0	21838.0	24160.1	21838.0	21866.5	22621.5	491	491	588	491	486	521.7	5.5	5.5	6.5	5.5	5.4	5.8	902	902	924	902	925	917
Inst40T1.1.J24	1205.9	1205.9	1387.7	1431.0	1141.1	1319.9	548	548	576	563	576	571.7	3.6	3.6	3.8	3.7	3.8	3.8	1089	1089	1092	1093	1069	1085
Inst40T1.2.J24	0.0	15.5	74.7	48.7	14.4	45.9	308	545	596	549	551	565.3	1.8	3.1	3.4	3.2	3.2	3.2	441	593	565	584	593	581
Inst40T1.3.J24	51285.2	72589.2	73307.0	71663.7	71419.4	72130.0	558	651	481	636	629	582.0	3.6	4.1	3.1	4.1	4.0	3.7	852	917	914	933	949	932
Inst50T1.1.J24	0.0	30.4	25.1	44.1	32.1	33.8	278	586	458	568	585	537.0	1.8	3.9	3.0	3.7	3.8	3.5	373	470	508	466	457	477
Inst50T1.2.J24	316793.0	357979.0	357648.0	360044.0	358483.0	358725.0	458	707	682	687	718	695.7	2.3	3.6	3.5	3.5	3.6	3.5	3210	3523	3490	3443	3469	3467
Inst50T1.3.J24	1806.9	1332.5	1330.6	1407.6	1817.1	1518.4	607	641	665	651	570	628.7	3.3	3.5	3.6	3.5	3.1	3.4	889	949	953	952	950	952
Inst60T1.1.J24	0.0	9.2	29.8	48.9	32.3	37.0	508	732	736	721	726	727.7	2.4	3.4	3.4	3.3	3.4	3.4	628	956	945	950	957	950
Inst60T1.2.J24	19600.5	30642.2	30635.8	30638.8	30626.8	30633.8	551	684	694	683	597	658.0	2.9	3.6	3.7	3.6	3.2	3.5	1673	1601	1631	1621	1636	1629
Inst60T1.3.J24	2507.9	2529.5	2520.6	2531.8	2508.6	2520.3	691	804	798	780	704	760.7	3.0	3.5	3.4	3.4	3.0	3.3	1019	1070	1072	1070	1076	1072
Inst70T1.1.J24	0.0	13.6	74.0	13.1	3.5	30.2	480	800	792	749	605	715.3	2.1	3.5	3.5	3.3	2.7	3.2	972	1032	1024	1033	1048	1035
Inst70T1.2.J24	106482.0	143547.0	143580.0	143511.0	143577.0	143556.0	674	808	807	698	771	758.7	2.7	3.2	3.2	2.7	3.0	3.0	1393	1038	1036	1056	1037	1043
Inst70T1.3.J24	5904.2	6162.7	6162.5	6163.8	6140.5	6155.6	904	988	1012	1000	917	976.3	3.3	3.6	3.7	3.6	3.3	3.5	942	947	947	947	950	948

O número de instâncias com melhoria da solução, comparando com as melhores soluções da pesquisa local, no algoritmo de VND é igual a 11 e é igual a 15 no algoritmo de VNS. A média dos valores da função de avaliação das melhores soluções da pesquisa local é igual a 26 210. Com o algoritmo de VND esse valor aumenta para 30 993 e com o algoritmo de VNS para 31 036. Note-se que o facto de a média do valor da função de avaliação das meta-heurísticas ser pior que a média do valor da função de avaliação das melhores soluções da pesquisa local pode ser justificado por as melhores soluções da pesquisa local nem sempre terem sido obtidas com a IPF, que é a estrutura de vizinhança chamada em primeiro lugar nas meta-heurísticas. Como num número significativo de instâncias a IPF atinge o tempo limite de resolução do algoritmo, o potencial de melhoria das meta-heurísticas torna-se reduzido.

Comparando as soluções das meta-heurísticas entre si (melhor solução está assinalada a cor amarela na Tabela 6.26 e na Tabela 6.27), pode-se concluir que o algoritmo de VND alcança a melhor solução em 17 instâncias, o algoritmo VNS1 em 13 instâncias, o algoritmo VNS2 em 5 instâncias, e por fim, o algoritmo VNS3 em 19 instâncias. Comparando as soluções do algoritmo de VND com a média das soluções do algoritmo de VNS, conclui-se que o primeiro alcança a melhor solução em 38 instâncias, e o segundo, nas restantes 16.

O tempo médio de resolução das melhores soluções da pesquisa local para o conjunto de 54 instâncias é igual a 4 250.9 segundos. Já no algoritmo de VND o tempo médio de resolução das 54 instâncias é de 5 517.1 e no algoritmo de VNS é de 5 918.7. Como se pode constatar na Tabela 6.26 e na Tabela 6.27, em ambas as meta-heurísticas o tempo limite de resolução de 2 horas é alcançado para a maioria das instâncias.

A média do número médio de lotes por componente das melhores soluções da pesquisa local é igual a 3. O valor deste indicador sobe para 3.6 e 3.8, com o algoritmo de VND e com o algoritmo de VNS, respectivamente.

Em relação ao número médio de unidades em stock, nas meta-heurísticas denota-se uma pequena deterioração deste indicador, em relação ao seu valor nas melhores soluções da pesquisa local.

Analisando globalmente os resultados computacionais desta subsecção, pode-se concluir que ambas as meta-heurísticas têm um desempenho pior que o desempenho das melhores soluções da pesquisa local, o que pode ser justificado pelos elevados tempos de resolução dos algoritmos de pesquisa local, que impossibilitam as meta-heurísticas de melhorarem a qualidade da solução no tempo limite estabelecido.

6.2.2.3 Resultados das Meta-Heurísticas partindo da Heurística de Ordenação e Escalonamento e usando a Função de Avaliação 1

A ordem de chamada das quatro estruturas de vizinhança nos algoritmos de VND e de VNS, partindo da heurística de ordenação e escalonamento e usando a função de avaliação 1 foi: IPT – ITT – IPF – ITF. Tal como já referido anteriormente a ordem de pesquisa das vizinhanças nas meta-heurísticas é decidida com base nos resultados da pesquisa local (apresentados na subsecção 6.1.4.3).

Na Tabela 6.30, na Tabela 6.31, na Tabela 6.32 e na Tabela 6.33 apresentam-se os resultados computacionais das meta-heurísticas, assim como o resultado da melhor solução obtida com os algoritmos de pesquisa local para o conjunto de instâncias de teste.

Tendo por base os resultados computacionais apresentados na Tabela 6.32 e na Tabela 6.33 pode-se concluir que as meta-heurísticas melhoram a melhor solução obtida com os algoritmos de pesquisa local em quase todas as instâncias. Apenas nas instâncias Inst30T1.3.J27 e Inst70T1.3.J24 a solução obtida pelas meta-heurísticas é pior do que a melhor solução da pesquisa local. O algoritmo de VND melhora a melhor solução da pesquisa local em 45 instâncias e o algoritmo de VNS em 39 instâncias. O valor médio da função de avaliação da melhor solução da pesquisa local é igual a 45 937. Com o algoritmo de VND o valor deste indicador baixa para 45 819 e com o algoritmo de VNS para 45 705.

Tabela 6.30 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 1

Instância	Tempo total de resolução (segundos)						Atraso total dos produtos finais (horas)						Número de produtos finais com atraso						Desvio total dos produtos finais (horas)					
	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS
Inst20T1.1.J21	0.3	0.4	0.7	0.7	0.5	0.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	1	1	1	1	1	1	7.8	6.1	1.2	0.0	6.1	2.4
Inst20T1.2.J21	0.1	0.5	1.7	1.1	1.5	1.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	1	1	1	1	1	1	696.0	683.8	696.0	683.8	683.8	687.8
Inst20T1.3.J21	0.1	0.2	1.0	1.0	0.8	0.9	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	2	2	2	2	2	2	456.3	456.3	456.3	456.3	456.3	456.3
Inst30T1.1.J21	3.9	10.1	20.5	13.6	26.0	20.0	77.5	77.5	77.5	77.5	77.5	77.5	5	5	5	5	5	5	1091.4	908.0	886.5	1091.4	887.5	955.1
Inst30T1.2.J21	1.4	4.1	9.4	25.8	9.5	14.9	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	1	1	1	1	1	1	328.2	181.2	278.4	127.8	129.5	178.6
Inst30T1.3.J21	2.7	4.1	16.6	8.5	8.0	11.0	41.4	41.4	41.4	41.4	41.4	41.4	5	5	5	5	5	5	412.2	410.3	412.2	412.2	412.2	412.2
Inst40T1.1.J21	1.7	2.9	10.1	10.5	13.3	11.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	360.5	360.1	355.8	360.5	360.5	358.9
Inst40T1.2.J21	4.0	7.4	39.9	30.5	20.9	30.4	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	2	2	2	2	2	2	850.2	844.1	844.1	850.2	850.2	848.1
Inst40T1.3.J21	4.9	6.4	27.4	32.3	24.4	28.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	157.3	154.1	115.4	153.1	91.8	120.1
Inst50T1.1.J21	20.3	22.4	25.5	36.8	36.2	32.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	173.6	173.2	169.9	167.1	173.3	170.1
Inst50T1.2.J21	8.6	12.6	26.6	29.8	26.0	27.5	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	1	1	1	1	1	1	592.6	506.8	506.8	506.8	592.6	535.4
Inst50T1.3.J21	105.4	34.1	108.4	129.9	68.9	102.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	275.6	267.1	187.3	267.4	285.9	246.9
Inst60T1.1.J21	20.4	25.3	65.3	56.2	30.3	50.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	760.6	712.0	759.4	725.6	757.8	747.6
Inst60T1.2.J21	3.3	9.2	56.1	21.3	18.3	31.9	38.9	38.0	37.9	38.9	38.0	38.3	3	3	5	3	3	3.7	632.0	503.0	489.9	632.0	505.5	542.5
Inst60T1.3.J21	16.3	19.9	53.4	42.8	58.6	51.6	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	3	3	3	3	3	3	207.6	174.0	165.4	175.3	211.3	184.0
Inst70T1.1.J21	9.6	17.1	33.7	33.0	95.4	54.0	114.3	114.3	114.3	114.3	114.3	114.3	14	14	14	14	14	14	423.7	408.9	423.7	423.7	408.9	418.7
Inst70T1.2.J21	33.9	37.2	69.6	60.4	111.5	80.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	113.1	97.3	44.8	139.3	34.0	72.7
Inst70T1.3.J21	23.3	52.2	62.7	74.0	387.6	174.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	160.5	143.3	203.6	145.8	130.3	159.9
Inst20T1.1.J27	70.8	93.3	208.9	497.2	545.8	417.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	262.2	248.7	169.0	219.6	231.3	206.7
Inst20T1.2.J27	43.1	57.2	180.8	363.4	342.6	295.6	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	2	2	2	2	2	2	519.9	516.0	519.9	519.9	519.9	519.9
Inst20T1.3.J27	11.5	18.7	87.5	78.1	123.2	96.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	1	1	1	1	1	1	397.3	392.0	391.1	391.6	390.9	391.2
Inst30T1.1.J27	66.5	81.5	679.9	572.6	915.8	722.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	215.2	282.7	218.6	104.0	129.4	150.7
Inst30T1.2.J27	103.9	146.3	672.9	658.8	1014.8	782.1	40.7	40.7	40.7	40.7	40.7	40.7	9	9	9	9	9	9	1585.0	1576.1	1572.2	1585.0	1585.0	1580.7
Inst30T1.3.J27	143.5	232.9	809.3	574.9	739.9	708.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	511.7	571.8	563.2	572.5	558.0	564.6
Inst40T1.1.J27	103.8	151.5	828.5	994.3	1004.2	942.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	369.1	360.6	438.5	380.4	361.5	393.4
Inst40T1.2.J27	123.6	170.6	1590.9	2051.2	1441.0	1694.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	700.6	742.4	729.7	738.9	699.4	722.6
Inst40T1.3.J27	90.4	244.4	1598.6	2640.1	2158.3	2132.3	34.3	34.3	34.3	34.3	34.3	34.3	5	5	5	5	5	5	585.0	542.1	553.6	542.1	553.6	549.8

Tabela 6.31 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 1 (continuação)

Instância	Tempo total de resolução (segundos)						Atraso total dos produtos finais (horas)						Número de produtos finais com atraso						Desvio total dos produtos finais (horas)					
	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS
Inst50T1.1.J27	201.1	252.3	1824.8	1319.2	1839.0	1661.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	1101.9	1089.5	1101.9	1101.9	1101.9	1101.9
Inst50T1.2.J27	144.8	210.9	1825.5	1115.5	1557.3	1499.5	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	5	5	5	5	5	5	921.9	919.6	921.9	921.9	921.9	921.2
Inst50T1.3.J27	280.4	401.7	1152.8	745.0	1878.3	1258.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	286.7	335.0	248.1	315.7	291.8	285.2
Inst60T1.1.J27	868.1	1613.6	2961.1	2772.0	5863.9	3865.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	720.1	626.1	637.6	704.0	635.4	659.0
Inst60T1.2.J27	1376.9	1936.9	7201.4	7214.8	6746.3	7054.2	298.1	298.1	298.1	298.1	298.1	298.1	25	25	25	25	25	25	1399.8	1383.1	1399.7	1399.2	1383.1	1394.0
Inst60T1.3.J27	171.2	435.2	7203.6	1773.7	1214.3	3397.2	94.5	94.5	94.5	94.5	94.5	94.5	9	9	9	9	9	9	1250.1	1203.4	1203.4	1250.1	1203.4	1219.0
Inst70T1.1.J27	219.9	377.8	3772.8	1314.0	3504.4	2863.7	361.7	361.7	361.0	361.7	361.7	361.5	20	20	20	20	20	20	1969.3	1954.4	2014.6	1969.3	1954.3	1979.4
Inst70T1.2.J27	440.0	2277.1	5541.4	7205.2	7205.6	6650.7	251.5	251.5	251.5	251.5	251.5	251.5	19	19	19	19	19	19	2082.8	1910.6	2056.2	2092.6	2082.8	2077.2
Inst70T1.3.J27	1100.7	1731.8	7201.8	7203.7	7202.2	7202.5	146.3	139.7	113.0	146.3	139.8	133.0	15	14	10	15	14	13	1235.9	1042.4	934.5	1124.8	1056.5	1038.6
Inst20T1.1.J24	45.7	76.3	322.4	606.9	433.2	454.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	297.4	310.0	312.2	298.9	285.8	299.0
Inst20T1.2.J24	153.2	219.1	1329.1	1220.6	1716.6	1422.1	22.3	22.3	22.3	22.3	22.3	22.3	4	4	4	4	4	4	1032.6	970.5	978.7	1032.6	970.5	993.9
Inst20T1.3.J24	185.5	299.6	2113.7	1941.2	1817.1	1957.3	126.3	126.3	126.3	126.3	126.3	126.3	8	8	8	8	8	8	1361.8	1320.8	1361.8	1361.8	1361.8	1361.8
Inst30T1.1.J24	173.1	226.3	3030.8	985.1	808.4	1608.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	488.3	475.3	470.8	478.4	479.9	476.4
Inst30T1.2.J24	143.1	240.1	1450.8	1727.2	2437.4	1871.8	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	1	1	1	1	1	1	1172.8	1131.3	1172.8	1172.8	1172.8	1172.8
Inst30T1.3.J24	110.0	159.7	596.8	731.6	753.3	693.9	30.5	30.5	30.5	30.5	30.5	30.5	4	4	4	4	4	4	799.0	781.6	799.0	799.0	799.0	799.0
Inst40T1.1.J24	175.3	279.9	2503.3	2832.7	1637.9	2324.6	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1	1	1	1	1	1	1586.7	1526.0	1480.5	1526.0	1586.7	1531.1
Inst40T1.2.J24	164.1	238.9	863.2	968.4	980.9	937.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	187.8	208.7	186.7	227.5	166.7	193.6
Inst40T1.3.J24	419.4	594.8	3242.6	4644.2	4258.7	4048.5	98.3	98.3	98.3	98.3	98.3	98.3	10	10	10	10	10	10	1281.2	1250.8	1250.7	1250.8	1281.2	1260.9
Inst50T1.1.J24	288.3	422.4	2133.1	1340.3	735.0	1402.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	169.2	180.9	184.9	193.7	151.1	176.6
Inst50T1.2.J24	630.3	1411.2	7206.3	7203.7	7219.1	7209.7	426.6	426.6	426.6	426.6	426.6	426.6	20	20	20	20	20	20	2233.0	2127.9	2141.5	2147.6	2233.0	2174.1
Inst50T1.3.J24	473.2	655.6	1441.7	2478.5	1740.6	1886.9	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	4	4	4	4	4	4	899.6	893.2	907.6	893.2	900.3	900.3
Inst60T1.1.J24	1073.4	1556.6	5464.0	4683.7	6758.7	5635.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	498.8	457.9	470.7	440.8	494.8	468.8
Inst60T1.2.J24	197.5	396.0	3303.1	4909.9	1886.4	3366.5	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	2	2	2	2	2	2	2246.5	2211.7	2246.5	2246.5	2246.5	2246.5
Inst60T1.3.J24	259.3	565.5	3310.6	3382.6	5169.4	3954.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1	1	1	1	1	1	1921.2	1866.6	1921.2	1866.6	1921.2	1903.0
Inst70T1.1.J24	859.5	1164.5	4172.7	3686.0	3433.5	3764.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	802.1	799.0	781.0	796.7	805.5	794.4
Inst70T1.2.J24	1273.1	1779.3	7209.3	5042.1	7211.5	6487.6	99.1	99.1	99.1	99.1	99.1	99.1	10	10	10	10	10	10	1894.2	1855.6	1894.2	1894.2	1894.2	1894.2
Inst70T1.3.J24	4536.1	1516.3	7202.0	7202.1	7203.7	7202.6	14.5	17.0	17.0	16.9	17.0	17.0	14	12	12	21	12	15	1177.1	1471.5	1506.1	1470.5	1506.1	1494.2

Tabela 6.32 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 1

Instância	Valor da função de avaliação						Porcentagem média de utilização das máquinas	Número de lotes					Número médio de lotes por componente					Desvio médio por produto final							
	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS		Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS
Inst20T1.1.J21	5607	5605	5600	5599	5605	5601	46.3	20	19	18	20	19	1.1	1.1	1.1	1.0	1.1	1.1	1.0	0.8	0.1	0.0	0.8	0.3	
Inst20T1.2.J21	4073	4061	4073	4061	4061	4065	102.1	40	38	40	38	38	38.7	1.6	1.5	1.6	1.5	1.5	1.5	77.3	76.0	77.3	76.0	76.4	
Inst20T1.3.J21	21435	21435	21435	21435	21435	21435	80.7	44	44	44	44	44	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	50.7	50.7	50.7	50.7	50.7		
Inst30T1.1.J21	78613	78429	78408	78613	78409	78476	103.9	117	112	111	117	111	113	2.3	2.2	2.2	2.3	2.2	2.3	60.6	50.4	49.3	60.6	49.3	
Inst30T1.2.J21	2593	2446	2543	2392	2394	2443	68.6	74	72	70	68	68	68.7	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	16.4	9.1	13.9	6.4	6.5	
Inst30T1.3.J21	41831	41829	41831	41831	41831	41831	92.7	128	127	128	128	128	128	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	20.6	20.5	20.6	20.6	20.6	
Inst40T1.1.J21	360	360	356	360	360	359	99.4	74	74	75	74	74	74.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	18.0	18.0	17.8	18.0	17.9	
Inst40T1.2.J21	6348	6342	6342	6348	6348	6346	101.9	114	112	112	114	114	113	1.7	1.6	1.6	1.7	1.7	1.6	35.4	35.2	35.2	35.4	35.4	
Inst40T1.3.J21	157	154	115	153	92	120	79.3	93	92	87	93	81	87	1.3	1.2	1.2	1.3	1.1	1.2	5.8	5.7	4.3	5.7	3.4	
Inst50T1.1.J21	174	173	170	167	173	170	87.6	88	88	85	86	88	86.3	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	6.0	6.0	5.9	5.8	6.0	
Inst50T1.2.J21	8151	8065	8065	8065	8151	8093	104.5	106	105	105	105	106	105	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	19.8	16.9	16.9	16.9	19.8	
Inst50T1.3.J21	276	267	187	267	286	247	86.4	113	115	108	115	118	114	1.1	1.2	1.1	1.2	1.2	1.1	8.4	8.1	5.7	8.1	8.7	
Inst60T1.1.J21	761	712	759	726	758	748	98.0	95	92	94	90	95	93	1.4	1.3	1.3	1.3	1.4	1.3	29.3	27.4	29.2	27.9	29.1	
Inst60T1.2.J21	39556	38547	38408	39556	38550	38838	66.4	110	110	109	110	110	110	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	21.1	16.8	16.3	21.1	16.9	
Inst60T1.3.J21	16032	15998	15990	16000	16036	16008	96.0	114	113	111	114	113	113	1.5	1.5	1.4	1.5	1.5	1.5	7.2	6.0	5.7	6.0	7.3	
Inst70T1.1.J21	114763	114748	114763	114763	114748	114758	59.3	247	243	247	247	240	245	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	14.1	13.6	14.1	14.1	13.6	
Inst70T1.2.J21	113	97	45	139	34	73	60.1	96	96	87	92	92	90.3	1.2	1.2	1.0	1.1	1.1	1.1	3.4	2.9	1.4	4.2	1.0	
Inst70T1.3.J21	161	143	204	146	130	160	79.2	132	135	135	135	139	136	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	4.1	3.7	5.2	3.7	3.3	
Inst20T1.1.J27	262	249	169	220	231	207	88.1	120	118	116	117	116	116	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	8.5	8.0	5.5	7.1	7.5	
Inst20T1.2.J27	16355	16351	16355	16355	16355	16355	89.1	178	176	178	178	178	178	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	16.2	16.1	16.2	16.2	16.2	
Inst20T1.3.J27	2593	2588	2587	2587	2586	2587	63.9	120	119	119	122	120	120	1.4	1.4	1.4	1.5	1.4	1.4	13.7	13.5	13.5	13.5	13.5	
Inst30T1.1.J27	215	283	219	104	129	151	82.0	144	159	153	135	129	139	1.3	1.5	1.4	1.3	1.2	1.3	5.2	6.9	5.3	2.5	3.2	
Inst30T1.2.J27	42251	42242	42238	42251	42251	42247	105.9	368	366	366	368	368	367	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	41.7	41.5	41.4	41.7	41.7	
Inst30T1.3.J27	512	572	563	572	558	565	95.6	166	186	183	187	182	184	1.3	1.5	1.4	1.5	1.4	1.4	11.6	13.0	12.8	13.0	12.7	
Inst40T1.1.J27	369	361	438	380	361	393	95.7	185	185	196	198	184	193	1.3	1.3	1.4	1.4	1.3	1.4	7.0	6.8	8.3	7.2	6.8	
Inst40T1.2.J27	701	742	730	739	699	723	95.4	163	166	163	165	165	164	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	16.7	17.7	17.4	17.6	16.7	
Inst40T1.3.J27	34864	34821	34832	34821	34832	34828	75.9	283	281	281	281	281	281	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	12.4	11.5	11.8	11.5	11.8	

Tabela 6.33 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 1 (continuação)

Instância	Valor da função de avaliação						Porcentagem média de utilização das máquinas	Número de lotes					Número médio de lotes por componente					Desvio médio por produto final							
	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS		Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS
Inst50T1.1.J27	1102	1089	1102	1102	1102	1102	99.5	193	192	193	193	193	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	25.6	25.3	25.6	25.6	25.6	25.6	
Inst50T1.2.J27	17719	17717	17719	17719	17717	17718	103.6	363	364	363	363	364	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	14.2	14.1	14.2	14.2	14.1	14.2	
Inst50T1.3.J27	287	335	248	316	292	285	83.7	187	197	188	193	191	1.2	1.3	1.2	1.3	1.2	1.2	4.8	5.6	4.1	5.3	4.9	4.8	
Inst60T1.1.J27	720	626	638	704	635	659	99.7	274	270	271	274	272	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	10.1	8.8	9.0	9.9	8.9	9.3	
Inst60T1.2.J27	299547	299530	299547	299546	299530	299541	80.2	904	898	904	904	898	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	18.4	18.2	18.4	18.4	18.2	18.3	
Inst60T1.3.J27	95750	95703	95703	95750	95703	95719	96.9	485	489	489	485	489	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	18.7	18.0	18.0	18.7	18.0	18.2	
Inst70T1.1.J27	363644	363629	363035	363644	363629	363436	97.5	698	699	685	698	699	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	28.1	27.9	28.8	28.1	27.9	28.3	
Inst70T1.2.J27	253534	253361	253522	253543	253533	253533	98.5	723	729	726	726	723	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	25.7	23.6	25.4	25.8	25.7	25.6	
Inst70T1.3.J27	147554	140713	113894	147443	140856	134064	91.3	649	613	507	647	578	3.5	3.3	2.7	3.5	3.1	3.1	18.4	15.6	13.9	16.8	15.8	15.5	
Inst20T1.1.J24	297	310	312	299	286	299	95.6	142	142	143	143	146	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	1.5	8.7	9.1	9.2	8.8	8.4	8.8	
Inst20T1.2.J24	23321	23259	23267	23321	23259	23283	91.8	291	284	283	291	284	2.7	2.6	2.6	2.7	2.6	2.6	27.9	26.2	26.5	27.9	26.2	26.9	
Inst20T1.3.J24	127685	127644	127684	127684	127684	127684	96.6	417	417	417	417	417	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	40.1	38.8	40.1	40.1	40.1	40.1	
Inst30T1.1.J24	488	475	471	478	480	476	82.7	192	189	187	189	192	1.4	1.4	1.3	1.4	1.4	1.4	9.6	9.3	9.2	9.4	9.4	9.3	
Inst30T1.2.J24	4063	4022	4063	4063	4063	4063	101.8	246	237	246	246	246	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	23.9	23.1	23.9	23.9	23.9	23.9	
Inst30T1.3.J24	31343	31325	31343	31343	31343	31343	97.5	275	274	275	275	275	3.1	3.0	3.1	3.1	3.1	3.1	21.0	20.6	21.0	21.0	21.0	21.0	
Inst40T1.1.J24	3462	3401	3427	3401	3462	3430	91.2	237	236	234	236	237	1.6	1.6	1.5	1.6	1.6	1.6	27.8	26.8	26.0	26.8	27.8	26.9	
Inst40T1.2.J24	188	209	187	227	167	194	82.5	209	214	213	219	211	1.2	1.2	1.2	1.3	1.2	1.2	2.9	3.3	2.9	3.6	2.6	3.0	
Inst40T1.3.J24	99596	99565	99565	99565	99596	99576	94.8	573	569	570	569	573	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	22.5	21.9	21.9	21.9	22.5	22.1	
Inst50T1.1.J24	169	181	185	194	151	177	65.4	188	201	203	206	187	1.2	1.3	1.3	1.4	1.2	1.3	3.1	3.3	3.4	3.5	2.7	3.2	
Inst50T1.2.J24	428786	428681	428725	428748	428786	428753	114.0	911	912	912	912	911	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	31.9	30.4	30.6	30.7	31.9	31.1	
Inst50T1.3.J24	6951	6945	6959	6945	6952	6952	96.3	377	374	373	374	378	2.0	2.0	2.0	2.0	2.1	2.0	12.9	12.8	13.0	12.8	12.9	12.9	
Inst60T1.1.J24	499	458	471	441	495	469	90.5	283	267	280	271	272	1.3	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	6.2	5.7	5.8	5.4	6.1	5.8	
Inst60T1.2.J24	14351	14316	14351	14351	14351	14351	103.9	328	330	328	328	328	1.7	1.8	1.7	1.7	1.7	1.7	32.6	32.1	32.6	32.6	32.6	32.6	
Inst60T1.3.J24	2884	2829	2884	2884	2829	2866	100.6	338	338	338	338	339	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	23.7	23.0	23.7	23.7	23.0	23.5	
Inst70T1.1.J24	802	799	781	797	806	794	88.5	293	292	283	290	289	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	9.8	9.7	9.5	9.7	9.8	9.7	
Inst70T1.2.J24	100986	100947	100986	100986	100986	100986	109.8	749	750	749	749	749	2.9	3.0	2.9	2.9	2.9	2.9	20.2	19.7	20.2	20.2	20.2	20.2	
Inst70T1.3.J24	15726	18508	18543	18378	18543	18488	101.5	683	752	753	708	753	2.5	2.7	2.7	2.6	2.7	2.7	10.9	13.6	13.9	13.6	13.9	13.8	

Existem 11 instâncias para as quais quer o VND, quer o VNS1, o VNS2 ou o VNS3 chegam à mesma solução. Nas restantes instâncias, o VND chega à melhor solução em 15 instâncias, o VNS1 em 13 instâncias, o VNS2 em 6 instâncias e o VNS3 em 9 instâncias. Comparando o VND como o VNS, existe uma instância para a qual os dois algoritmos chegam à mesma solução, existem 33 instâncias em que o VND dá a melhor solução, sendo que nas restantes 20 instâncias é o VNS que chega à melhor solução.

O tempo médio de resolução das instâncias no algoritmo de VND é igual a 417 segundos e o tempo médio de resolução no algoritmo de VNS igual a 1 856 segundos. Por sua vez, o tempo médio de resolução da melhor solução da pesquisa local é igual a 315 segundos.

Na generalidade das instâncias ambas as meta-heurísticas não têm capacidade para melhorar o atraso total. O algoritmo de VND melhora o atraso total de 2 instâncias (melhoria de 0.9 horas na instância Inst60T1.2.J21 e de 6.7 horas na instância Inst70T1.3.J27). Já o algoritmo de VNS melhora o atraso total de 3 instâncias, em 0.6 horas, 0.2 horas e 13.3 horas nas instâncias Inst60T1.2.J21, Inst70T1.1.J27 e Inst70T1.3.J27, respectivamente. Na Tabela 6.34 apresenta-se o número de instâncias com melhoria do desvio total para cada meta-heurística, face ao desvio total da melhor solução obtida com os algoritmos de pesquisa local. Note-se que na melhor solução obtida com os algoritmos de pesquisa local todas as instâncias têm desvio total positivo.

Tabela 6.34 Número de instâncias com melhoria do desvio total da melhor solução da pesquisa local

	VND	VNS1	VNS2	VNS3
Número de instâncias com melhoria do desvio total	45	32	26	31

Tal como se pode verificar na Tabela 6.32 e na Tabela 6.33 não existem grandes variações no número de lotes e no número médio de lotes por componente, da melhor solução da pesquisa local por comparação com as soluções das meta-heurísticas.

Relativamente ao desvio médio por produto final, a média deste indicador na melhor solução da pesquisa local é igual a 19.1 horas. O algoritmo de VND reduz em média o valor deste indicador em cerca de 47 minutos quando comparado com o valor obtido na melhor solução da pesquisa local. Com o algoritmo de VNS a redução média do desvio médio por produto final é de cerca de 38 minutos.

Em termos gerais pode-se dizer que embora as meta-heurísticas melhorem as melhores soluções obtidas com os algoritmos de pesquisa local, as melhorias não são muito significativas. O algoritmo de VNS dá em termos globais melhores soluções, mas o seu tempo médio de resolução é bastante mais elevado que o tempo médio de resolução do algoritmo de VND.

6.2.2.4 Resultados das Meta-Heurísticas partindo da Heurística de Ordenação e Escalonamento e usando a Função de Avaliação 2

A ordem de chamada das estruturas de vizinhança, em ambas as meta-heurísticas, partindo da solução inicial obtida com a heurística de ordenação e escalonamento, para a função de avaliação 2 é a seguinte: IPT – IPF – ITT – ITF. Mais uma vez, esta ordem foi decidida após a análise dos resultados computacionais da pesquisa local apresentados na subsecção 6.1.4.4.

Na Tabela 6.35, na Tabela 6.36, na Tabela 6.37 e na Tabela 6.38 apresentam-se os resultados computacionais obtidos, quer para as meta-heurísticas, quer para as melhores soluções dos algoritmos de pesquisa local (já apresentados na subsecção 6.1.4.4).

Tabela 6.35 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 2

Instância	Tempo total de resolução (segundos)						Valor da função de avaliação					Valor do stock médio durante a produção					Valor do stock médio após a produção							
	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS
Inst20T1.1.J21	0.3	0.4	54.7	665.2	320.9	347.0	1982	1982	1808	1802	1652	1754	286881	286881	249397	214831	209616	224615	14925	14924	17727	50967	26158	31617
Inst20T1.2.J21	678.0	5.8	28.8	83.8	27.4	46.6	8023	7335	8242	7480	8420	8047	662931	668832	674297	673461	666354	671371	683243	586739	586420	582989	730094	633168
Inst20T1.3.J21	0.3	0.8	11.9	31.6	136.4	60.0	9685	8996	9516	8699	9010	9075	308387	302959	296024	303850	280939	293604	433140	482732	475406	506142	489499	490349
Inst30T1.1.J21	999.6	95.2	137.8	1448.7	1375.6	987.4	22545	21683	18609	17438	18273	18107	352381	330957	318771	317782	318543	318365	1363680	814113	863194	945566	702145	836968
Inst30T1.2.J21	5.2	17.2	164.0	694.2	321.9	393.4	2115	1979	1924	1908	1908	1913	156968	150017	140443	136174	135099	137239	153523	135041	133333	134365	135559	134419
Inst30T1.3.J21	7203.5	7203.1	7204.5	7208.2	7205.7	7206.1	7148	6775	6983	7791	6786	7187	307179	299721	299072	269859	299729	289553	488578	410852	393118	477029	410879	427009
Inst40T1.1.J21	23.8	162.5	7203.2	7202.6	7202.5	7202.8	3624	3478	3624	3603	3503	3576	423402	433254	423402	385424	421704	410177	301307	261331	301307	316577	278093	298659
Inst40T1.2.J21	7202.1	3546.2	7203.4	7203.1	7203.9	7203.5	4007	4006	3976	4004	3815	3932	246028	240095	235629	240134	213847	229870	450277	446293	453283	443727	433034	443348
Inst40T1.3.J21	8.8	53.5	155.8	237.9	1500.2	631.3	2024	2243	2186	1722	1612	1840	353717	321757	308070	245934	250811	268272	51054	126938	129040	98511	71613	99721
Inst50T1.1.J21	258.3	519.0	7204.5	7201.2	7201.7	7202.4	3739	3739	3104	3467	3583	3385	537678	537684	431962	426330	483647	447313	210042	210017	189112	267254	232978	229781
Inst50T1.2.J21	40.6	48.2	188.2	566.4	1619.8	791.5	4473	4468	4470	4473	4470	4471	220147	221452	221468	220147	220590	220735	225424	223754	224077	225424	224939	224813
Inst50T1.3.J21	46.4	7207.8	7202.0	7203.6	7202.5	7202.7	1784	1790	1764	1791	1790	1782	281737	230553	217651	230547	230553	226250	75145	127512	135242	127568	127508	130106
Inst60T1.1.J21	327.2	408.0	7201.1	1532.4	1945.1	3559.5	4199	4198	4272	4142	4197	4203	395715	395727	409293	394472	394683	399483	444023	443842	445277	434123	444897	441432
Inst60T1.2.J21	3515.1	317.2	7232.2	1697.3	7205.3	5378.3	9963	10955	10247	10420	9471	10046	173964	179185	179052	182660	160340	174017	587949	365706	414635	341084	404598	386772
Inst60T1.3.J21	1540.5	7201.4	7201.3	7212.1	7204.3	7205.9	5104	4909	4583	6061	6087	5577	258143	243589	245851	260372	269165	258463	250824	226216	245669	128861	125146	166559
Inst70T1.1.J21	7212.5	7206.0	7209.2	7201.9	7202.5	7204.6	8793	8111	7515	7064	7551	7377	61839	62721	67598	57004	62019	62207	149339	159500	179159	222416	189488	197021
Inst70T1.2.J21	34.8	1993.3	7208.7	7201.8	7202.8	7204.4	876	1002	851	896	1069	939	153247	134327	109334	124423	110036	114598	21924	65979	60945	54692	103835	73157
Inst70T1.3.J21	1227.6	2414.3	7202.8	6532.7	7201.8	6979.1	2026	2021	1753	2001	2017	1924	250356	247852	262599	246628	242721	250649	154869	156261	88062	153406	160689	134052
Inst20T1.1.J27	5690.2	7203.5	7207.6	7208.3	7205.6	7207.2	7319	7309	7384	7247	7286	7306	1052030	1049960	1087620	1045750	1050080	1061150	411705	411813	389135	403706	407216	400019
Inst20T1.2.J27	1536.2	7217.2	7206.8	7205.3	7203.1	7205.0	6667	5887	6234	7215	6406	6618	591643	578432	538170	576656	579609	564812	248516	231465	293207	450982	297814	347334
Inst20T1.3.J27	85.0	1880.7	7201.1	7203.1	7208.7	7204.3	5284	4699	4634	5067	5211	4971	446597	437626	436024	393799	383034	404286	250221	300163	322757	304924	406172	344618
Inst30T1.1.J27	7203.4	7203.4	7202.4	7201.0	7204.0	7202.5	3619	3619	3679	3689	3624	3664	583793	583793	580928	581494	584451	582291	139937	139937	154963	156405	140418	150595
Inst30T1.2.J27	7208.3	7202.4	7225.8	7204.8	7221.7	7217.4	17969	17404	17036	17793	16079	16969	813492	769540	754552	768167	743253	755324	825253	809015	900371	801414	989390	897058
Inst30T1.3.J27	103.8	7214.4	7204.0	7207.0	7205.8	7205.6	7395	7691	7767	7691	7690	7716	1039060	892726	928953	892686	892312	904650	439910	645376	624493	645428	645707	638543
Inst40T1.1.J27	7201.1	7201.1	7203.0	7202.9	7213.7	7206.5	4917	4917	4817	4917	4917	4884	585500	585500	577335	585562	585371	582756	397935	397935	386073	397873	398063	394003
Inst40T1.2.J27	7209.4	7209.4	7205.8	7201.3	7206.5	7204.5	6302	6302	6443	6303	6302	6349	678044	678044	685957	678644	678023	680875	582381	582381	602675	581948	582336	588986
Inst40T1.3.J27	7228.9	7217.1	7217.2	7201.4	7202.6	7207.1	21176	20345	19371	22497	17393	19754	549883	501435	512540	509307	495923	505923	1199800	700432	705358	1098790	756155	853434

Tabela 6.36 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 2 (continuação)

Instância	Tempo total de resolução (segundos)					Valor da função de avaliação					Valor do stock médio durante a produção					Valor do stock médio após a produção								
	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS
	Inst50T1.1.J27	2349.4	7216.6	7217.2	7212.4	7204.8	7211.5	8150	8146	8147	8150	8147	8148	771152	753785	751690	771152	748317	757053	858903	875508	877737	858903	880747	872462
Inst50T1.2.J27	7205.8	2532.7	7225.7	7208.0	7208.3	7214.0	6788	6614	6662	6620	6790	6691	592234	575868	575752	568760	577059	573857	331502	335694	336522	342874	327843	335746
Inst50T1.3.J27	7210.6	7210.6	7209.7	7206.1	7207.3	7207.7	3757	3757	3723	3835	3890	3816	508260	508260	527515	485313	503797	505542	243107	243107	217003	281634	274196	257611
Inst60T1.1.J27	7223.9	7223.9	7205.7	7203.2	7206.8	7205.2	5759	5759	5759	5759	5759	5759	674772	674772	674772	674759	674772	674768	476937	476937	476937	476937	476937	476943
Inst60T1.2.J27	840.7	7204.8	7208.0	7201.2	7207.1	7205.4	19002	19054	19302	19088	19463	19284	416745	374989	374577	374744	375906	375076	341852	357975	347860	355237	331790	344962
Inst60T1.3.J27	7205.0	7221.1	7227.3	7201.2	7258.4	7229.0	15193	15076	15076	18177	14719	15991	603141	581130	581183	594019	572338	582513	581427	576991	576937	504957	583772	555222
Inst70T1.1.J27	7205.5	7201.0	7212.7	7210.8	7203.7	7209.1	18606	16316	16091	16269	16281	16213	389477	322701	322471	322576	322932	322660	738033	494720	495307	500858	491214	495793
Inst70T1.2.J27	7211.4	7209.0	7220.9	7227.6	7201.8	7216.8	27961	38996	38996	38996	38996	38996	439421	404952	404952	404942	404958	404951	619268	480813	480814	480824	480807	480815
Inst70T1.3.J27	4095.1	7209.4	7227.5	7218.6	7210.6	7218.9	17350	17563	17563	17564	17563	17564	485336	425909	425909	425909	425909	425909	330563	354422	354422	354594	354422	354479
Inst20T1.1.J24	299.5	420.6	7202.8	7217.0	7201.4	7207.1	6439	6437	6445	6442	6436	6441	1039180	1038900	1038490	1016400	1033410	1029433	248582	248567	250447	272324	253791	258854
Inst20T1.2.J24	7217.4	7202.1	7212.9	7239.8	7218.1	7223.6	12599	11281	11815	11546	11594	11652	723725	677303	677838	677803	666209	673950	904410	740179	774344	733274	786003	764540
Inst20T1.3.J24	7218.9	7219.5	7213.3	7213.7	7230.2	7219.0	48416	53401	49656	53434	58583	53891	680219	664749	625134	667327	659382	650614	1299800	803995	1136120	793067	659901	863029
Inst30T1.1.J24	7203.0	7203.0	7204.5	7209.3	7203.7	7205.8	5606	5606	5606	5812	5606	5675	751966	751966	752011	747649	751974	750545	369297	369297	369271	414801	369286	384453
Inst30T1.2.J24	1765.1	3653.2	7204.6	7204.9	7214.0	7207.8	10453	10434	10453	10453	10453	10453	962171	963661	962171	962171	962171	962171	819155	815802	819155	819155	819155	819155
Inst30T1.3.J24	248.4	7220.5	7214.6	7208.2	7225.0	7215.9	14422	12250	12247	13101	12289	12546	947391	903142	891826	921900	898829	904185	394956	569090	608995	527818	572939	569917
Inst40T1.1.J24	2237.7	7210.6	7210.5	7202.9	7211.5	7208.3	9174	8747	8819	9174	9038	9010	859339	819075	850500	859339	724790	811543	643426	698861	677240	643426	761987	694218
Inst40T1.2.J24	7209.1	7209.1	7208.5	7203.1	7206.6	7206.1	5027	5027	5028	5076	5038	5047	806416	806416	806416	806050	803991	805486	198905	198905	199201	209213	203564	203993
Inst40T1.3.J24	1450.6	7201.2	7204.4	7212.6	7213.4	7210.1	17397	14862	17283	16672	17397	17117	632041	616132	628320	588906	632041	616422	570786	610811	592506	746821	570786	636704
Inst50T1.1.J24	7203.9	7203.9	7205.6	7209.0	7213.2	7209.2	3535	3535	3517	3535	3507	3520	572767	572767	578785	572743	586935	579488	134251	134251	124515	134278	114498	124430
Inst50T1.2.J24	7216.7	7221.1	7218.4	7213.7	7225.9	7219.3	75019	74799	74780	70200	74807	73262	804163	772179	772158	675767	772167	740031	738588	727254	727351	1568340	727378	1007690
Inst50T1.3.J24	7226.5	7226.5	7201.6	7217.1	7218.7	7212.5	7900	7900	7726	7909	7902	7846	817579	817579	795194	813001	815981	808059	620409	620409	608156	626790	622456	619134
Inst60T1.1.J24	7207.0	7207.0	7220.3	7203.3	7201.7	7208.4	4621	4621	4558	4780	4661	4666	595747	595747	601942	609300	615181	608808	328420	328420	309712	346733	316947	324464
Inst60T1.2.J24	7211.0	7211.0	7203.4	7210.3	7223.0	7212.2	19635	19635	19641	19644	19631	19638	782523	782523	781824	781680	781683	781729	1249850	1249850	1251750	1252540	1249910	1251400
Inst60T1.3.J24	7203.2	7203.2	7225.4	7212.2	7201.4	7213.0	6836	6836	6915	6915	6805	6878	618593	618593	625330	625330	618582	623081	675457	675457	684509	684509	669351	679456
Inst70T1.1.J24	7218.0	7218.0	7225.3	7217.3	7233.6	7225.4	6702	6702	6702	6702	6702	6702	808481	808481	807409	807409	813385	809401	531931	531931	533012	533012	527018	531014
Inst70T1.2.J24	7201.2	7201.2	7204.2	7232.5	7225.7	7220.8	15375	15375	15375	15375	15374	15375	629528	629528	629528	629526	629895	629649	757707	757707	757710	757710	757179	757533
Inst70T1.3.J24	7206.0	7217.8	7249.0	7204.2	7224.2	7225.8	6039	7251	7251	7254	7248	7251	725019	657335	657335	655744	657615	656898	440378	750766	750766	752839	749918	751174

Tabela 6.37 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 2

Instância	Valor do stock médio durante a produção com atraso						Número de lotes						Número médio de lotes por componente						Número de unidades em stock					
	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS
Inst20T1.1.J21	494.2	494.2	494.2	494.2	494.2	494.2	23	23	28	35	33	32.0	1.3	1.3	1.6	1.9	1.8	1.8	359	359	318	316	281	305
Inst20T1.2.J21	1400.5	1159.1	2073.7	1316.2	1512.2	1634.0	68	52	43	48	49	46.7	2.7	2.1	1.7	1.9	2.0	1.9	1603	1495	1501	1496	1662	1553
Inst20T1.3.J21	6117.1	5187.2	5795.8	4763.6	5278.7	5279.4	48	52	48	54	53	51.7	2.8	3.1	2.8	3.2	3.1	3.0	883	935	918	964	917	933
Inst30T1.1.J21	14212.0	16257.2	12940.8	11339.5	13388.3	12556.2	169	143	155	157	161	157.7	3.4	2.9	3.1	3.1	3.2	3.2	2043	1363	1407	1504	1215	1375
Inst30T1.2.J21	575.5	570.0	572.5	572.1	570.4	571.7	93	94	109	108	106	107.7	1.7	1.7	1.9	1.9	1.9	1.9	370	339	326	322	322	323
Inst30T1.3.J21	3217.1	3271.4	3576.3	4127.7	3283.3	3662.5	509	548	662	457	541	553.3	8.5	9.1	11.0	7.6	9.0	9.2	947	846	824	889	846	853
Inst40T1.1.J21	0.0	12.2	0.0	116.5	10.3	42.3	97	109	97	304	162	187.7	1.7	1.9	1.7	5.2	2.8	3.2	863	827	863	836	833	844
Inst40T1.2.J21	543.6	590.1	542.8	601.1	598.6	580.8	406	204	315	192	255	254.0	5.9	3.0	4.6	2.8	3.7	3.7	829	817	820	814	770	801
Inst40T1.3.J21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	86	115	130	121	132	127.7	1.2	1.6	1.8	1.6	1.8	1.7	482	534	520	410	384	438
Inst50T1.1.J21	0.0	0.0	0.5	0.6	2.9	1.3	156	155	205	186	163	184.7	2.1	2.1	2.8	2.5	2.2	2.5	890	890	739	826	853	806
Inst50T1.2.J21	2281.0	2278.2	2280.5	2281.0	2278.3	2280.0	139	138	139	139	141	139.7	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	530	530	530	530	530	530
Inst50T1.3.J21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	110	266	252	267	266	261.7	1.1	2.7	2.5	2.7	2.7	2.6	425	426	420	426	426	424
Inst60T1.1.J21	0.0	0.0	1.4	0.8	0.5	0.9	148	144	164	186	151	167.0	2.1	2.1	2.3	2.7	2.2	2.4	1000	999	1017	986	1000	1001
Inst60T1.2.J21	6259.0	8393.7	7423.6	7943.7	6774.5	7380.6	249	193	432	178	276	295.3	3.2	2.5	5.6	2.3	3.6	3.8	907	649	707	624	673	668
Inst60T1.3.J21	2620.8	2630.2	2187.9	4182.2	4182.2	3517.4	352	435	394	414	227	345.0	4.6	5.6	5.1	5.4	2.9	4.5	606	559	585	463	469	506
Inst70T1.1.J21	7864.4	7115.7	6388.6	5759.9	6396.2	6181.6	468	735	451	516	518	495.0	5.2	8.2	5.0	5.7	5.8	5.5	251	265	294	333	299	309
Inst70T1.2.J21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95	260	302	299	351	317.3	1.1	3.1	3.6	3.6	4.2	3.8	209	238	203	213	255	224
Inst70T1.3.J21	0.0	0.1	0.0	1.1	0.1	0.4	217	253	219	244	287	250.0	1.9	2.2	1.9	2.1	2.5	2.2	482	481	417	476	480	458
Inst20T1.1.J27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	255	282	335	331	241	302.3	2.9	3.2	3.8	3.7	2.7	3.4	792	791	799	784	789	791
Inst20T1.2.J27	2531.6	1898.4	2131.3	2172.6	2073.5	2125.8	303	429	447	559	445	483.7	3.6	5.1	5.3	6.7	5.3	5.8	455	438	450	556	475	494
Inst20T1.3.J27	1837.2	1050.2	902.5	1640.8	1303.9	1282.4	157	187	199	275	310	261.3	1.9	2.2	2.4	3.3	3.7	3.1	377	399	411	378	427	405
Inst30T1.1.J27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	353	353	347	343	377	355.7	3.3	3.3	3.2	3.2	3.5	3.3	392	392	398	399	392	397
Inst30T1.2.J27	9949.6	9707.9	8953.0	10146.2	7569.8	8889.7	488	563	541	515	540	532.0	4.7	5.5	5.3	5.0	5.2	5.2	887	854	896	849	938	894
Inst30T1.3.J27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	171	328	297	331	331	319.7	1.3	2.6	2.3	2.6	2.6	2.5	800	832	841	832	832	835
Inst40T1.1.J27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	368	368	380	368	368	372.0	2.6	2.6	2.7	2.6	2.6	2.6	532	532	521	532	532	529
Inst40T1.2.J27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	348	348	351	340	345	345.3	3.1	3.1	3.1	3.0	3.1	3.1	682	682	697	682	682	687
Inst40T1.3.J27	12644.9	14625.6	13562.5	14723.7	11384.5	13223.6	427	441	432	429	430	430.3	3.4	3.5	3.5	3.4	3.4	3.4	947	650	659	870	678	736

Tabela 6.38 Resultados computacionais das meta-heurísticas, partindo da heurística de ordenação e escalonamento para a função de avaliação 2 (continuação)

Instância	Valor do stock médio durante a produção com atraso						Número de lotes					Número médio de lotes por componente					Número de unidades em stock							
	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS	Melhor solução da pesquisa local	VND	VNS1	VNS2	VNS3	VNS
Inst50T1.1.J27	0.0	0.3	1.0	0.0	3.1	1.4	269	293	312	269	291	290.7	2.2	2.4	2.6	2.2	2.4	2.4	882	882	882	882	882	882
Inst50T1.2.J27	2206.5	2101.2	2145.3	2108.5	2300.0	2184.6	426	442	435	457	412	434.7	2.4	2.5	2.5	2.6	2.4	2.5	500	493	494	493	490	492
Inst50T1.3.J27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	361	361	344	355	379	359.3	2.3	2.3	2.2	2.3	2.5	2.3	407	407	403	415	421	413
Inst60T1.1.J27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	486	486	485	485	486	485.3	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	623	623	623	623	623	623
Inst60T1.2.J27	15455.5	15639.6	15943.3	15688.9	16182.3	15938.2	892	1021	1078	1016	941	1011.7	4.2	4.9	5.1	4.8	4.5	4.8	410	397	391	395	383	390
Inst60T1.3.J27	9500.1	9506.9	9506.9	12876.8	9161.8	10515.2	568	635	637	553	642	610.7	3.1	3.5	3.5	3.1	3.5	3.4	641	627	627	595	626	616
Inst70T1.1.J27	13176.4	12420.3	12189.2	12341.0	12398.0	12309.4	821	876	879	878	894	883.7	4.5	4.8	4.8	4.8	4.9	4.9	610	442	443	446	441	443
Inst70T1.2.J27	23081.5	35105.8	35105.8	35105.8	35105.8	35105.8	893	813	814	812	813	813.0	4.0	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	573	479	479	479	479	479
Inst70T1.3.J27	13529.7	13875.1	13875.1	13875.1	13875.1	13875.1	627	732	732	732	732	732.0	3.4	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	442	422	422	422	422	422
Inst20T1.1.J24	0.0	0.0	0.0	2.7	0.0	0.9	205	205	215	358	255	276.0	2.2	2.2	2.3	3.8	2.7	2.9	590	589	590	590	589	590
Inst20T1.2.J24	4606.1	4311.6	4687.9	4616.3	4446.6	4583.6	420	452	471	438	465	458.0	3.9	4.2	4.4	4.1	4.3	4.2	745	649	665	646	665	659
Inst20T1.3.J24	39225.7	46917.6	41536.6	46981.6	52783.0	47100.4	582	545	593	569	465	542.3	5.9	5.6	6.1	5.8	4.7	5.5	907	673	806	669	604	693
Inst30T1.1.J24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	377	377	373	382	375	376.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	513	513	513	532	513	520
Inst30T1.2.J24	1578.5	1570.5	1578.5	1578.5	1578.5	1578.5	303	299	303	303	303	303.0	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	816	815	816	816	816	816
Inst30T1.3.J24	7829.2	4971.0	4828.0	5952.7	5011.1	5263.9	286	486	450	420	479	449.7	3.2	5.4	5.0	4.7	5.3	5.0	615	674	687	664	674	675
Inst40T1.1.J24	1686.5	1258.4	1281.6	1686.5	1657.2	1541.8	306	322	331	306	331	322.7	2.0	2.1	2.2	2.0	2.2	2.1	688	695	700	688	681	689
Inst40T1.2.J24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	366	366	366	368	370	368.0	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	460	460	460	465	461	462
Inst40T1.3.J24	11565.9	8902.2	11371.9	10185.9	11565.9	11041.2	615	820	714	769	615	699.3	3.9	5.2	4.5	4.9	3.9	4.5	551	562	559	612	551	574
Inst50T1.1.J24	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.2	364	364	372	365	375	370.7	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5	2.4	324	324	322	324	321	322
Inst50T1.2.J24	68334.2	68330.2	68311.1	59963.1	68338.2	65537.5	969	1003	975	1037	993	1001.7	4.9	5.1	4.9	5.3	5.0	5.1	706	687	687	1028	687	800
Inst50T1.3.J24	720.4	720.4	720.4	720.4	720.4	720.4	527	527	502	525	526	517.7	2.9	2.9	2.7	2.9	2.9	2.8	658	658	643	659	659	653
Inst60T1.1.J24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	446	446	473	464	414	450.3	2.1	2.1	2.2	2.1	1.9	2.1	423	423	417	438	427	427
Inst60T1.2.J24	9628.1	9628.1	9628.1	9628.1	9628.1	9628.1	460	460	459	459	460	459.3	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	931	931	931	931	930	931
Inst60T1.3.J24	372.2	372.2	372.2	372.2	372.2	372.2	476	476	474	474	476	474.7	2.1	2.1	2.0	2.0	2.1	2.0	593	593	600	600	590	596
Inst70T1.1.J24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	482	482	481	481	480	480.7	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	614	614	614	614	614	614
Inst70T1.2.J24	8578.5	8578.5	8578.5	8578.5	8578.5	8578.5	871	871	871	871	871	871.0	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	635	635	635	635	635	635
Inst70T1.3.J24	217.8	214.0	214.0	214.0	214.0	214.0	828	838	838	839	839	838.7	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	534	645	645	645	644	645

Ambas as meta-heurísticas melhoram a melhor solução da pesquisa local em 29 instâncias do conjunto de 54. O valor médio da função de avaliação das melhores soluções da pesquisa local, considerando as 54 instâncias, é igual 10 750. Com o algoritmo de VND o seu valor é igual a 10 812 e com o algoritmo de VNS é igual 10 793. Tal como sublinhado na subsecção 6.2.2.2, o sucesso das meta-heurísticas depende em parte dos resultados obtidos na pesquisa local. Como na pesquisa local a estrutura de vizinhança com melhores resultados (IPT) atinge o tempo limite de execução das meta-heurísticas (de duas horas) em 19 das instâncias de teste e como os seus tempos de execução são em geral elevados, torna-se difícil para as meta-heurísticas melhorar as melhores soluções da pesquisa local (quer nessas 19 instâncias, quer nas instâncias em que a melhor solução não é obtida com a IPT).

O tempo médio de resolução das melhores soluções da pesquisa local, do algoritmo de VND e do algoritmo de VNS é igual a 4 150 segundos, 5 141 segundos e 6 230 segundos, respectivamente.

Analisando apenas as soluções das meta-heurísticas entre si, verifica-se que em 6 das instâncias é atingido o mesmo valor com o algoritmo de VND e com o algoritmo de VNS (em uma ou mais das três execuções do algoritmo). Nas restantes instâncias o VND atinge a melhor solução em 14 instâncias, o VNS1 em 13 instâncias, o VNS2 em 6 instâncias e o VNS3 em 15 instâncias. Comparando o VND com a média dos valores de VNS obtidos nas três corridas do algoritmo, verifica-se que o VND obtém a melhor solução em 29 instâncias e o VNS em 19 instâncias, existindo seis instâncias para as quais ambos os algoritmos atingem o mesmo valor.

A média do número médio de lotes por componente é de 3 para as melhores soluções da pesquisa local e é de 3.3 em ambas as meta-heurísticas. Por último, a média do número de unidades em stock das melhores soluções da pesquisa local é igual a 665 unidades. Ambas as meta-heurísticas (VND e VNS) reduzem o seu valor para 630 unidades e 633 unidades, respectivamente.

Analisando a média do número de unidades em stock, verifica-se que o seu valor nas meta-heurísticas é mais baixo do que o valor obtido nas melhores soluções da

pesquisa local. Analisando os valores médios da função de avaliação das meta-heurísticas e comparando-os com o valor médio da função de avaliação das melhores soluções da pesquisa local conclui-se que existe uma pequena deterioração nos valores médios das meta-heurísticas. Tal como se referiu anteriormente, na segunda função de avaliação, o potencial de melhoria das meta-heurísticas está de algum modo comprometido com o limite do tempo de resolução a duas horas, já que em várias instâncias na melhor solução da pesquisa local o algoritmo atingiu esse tempo limite.

6.3 Conclusões

Neste capítulo, apresentaram-se quatro algoritmos de pesquisa local baseados em inserções de lotes e duas meta-heurísticas baseadas em pesquisa local (VND e VNS) para o problema DLEMP. Todos os algoritmos de pesquisa local foram testados partindo de duas soluções iniciais alternativas (obtidas com as heurísticas dedicadas propostas no Capítulo 5) e de duas funções de avaliação alternativas, baseadas na minimização dos atrasos e na minimização dos níveis de inventário.

Os quatro algoritmos de pesquisa local desenvolvidos conseguem em geral melhorar a qualidade das soluções, obtidas quer com a heurística de fluxos em rede e escalonamento quer com a heurística de ordenação e escalonamento, em ambas as funções de avaliação. A estrutura de IPT consegue melhorar sempre a qualidade das soluções iniciais, em ambas as funções de avaliação. A IPF também, com excepção do caso em que o algoritmo parte da solução da heurística de ordenação e escalonamento, para a função de avaliação 1, onde não consegue melhorar a qualidade da solução inicial em 3 das 54 instâncias de teste. Embora a ITT e a ITF não consigam melhorar sempre a qualidade das soluções iniciais em todos os métodos, melhoram-nas num número muito significativo de instâncias.

Os melhores tempos médios de resolução dos algoritmos de pesquisa local estão associados à situação em que se parte da solução inicial obtida com a heurística de ordenação e escalonamento, para a função de avaliação 1, sendo esses tempos bastante

melhores que os tempos médios de resolução dos algoritmos de pesquisa local associados às restantes combinações de solução inicial/função de avaliação. Na função de avaliação 2 esses tempos são elevados, indiciando um possível campo de melhoria. Na versão actual dos algoritmos de pesquisa local a função de avaliação é calculada de novo em cada movimento da pesquisa local. Como se trata de uma função de avaliação mais “complexa” que a função de avaliação 1, se se calcular o valor da função de avaliação 2 após um dado movimento da pesquisa local, tendo por base apenas os lotes que são alterados na solução actual, provavelmente conseguir-se-á reduzir o tempo de resolução da pesquisa local. Outra opção poderá passar pela redução do número de datas objectivo, para reduzir a dimensão da vizinhança.

A estrutura de vizinhança com melhores resultados globais, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento, em ambas as funções de avaliação é a inserção parcial para a frente. Partindo da heurística de ordenação e escalonamento, em ambas as funções de avaliação a estrutura de vizinhança que dá melhores resultados globais é a inserção parcial para trás. Em termos gerais as estruturas de inserção total (para trás e para a frente) têm menores tempos de resolução que as estruturas de inserção parcial (para trás e para a frente), mas exibem resultados piores do que os que se obtêm com as estruturas de inserção parcial.

Comparando as melhores soluções da pesquisa local, para a função de avaliação 1, partindo da heurística de fluxos em rede e escalonamento com as melhores soluções da pesquisa local, partindo da heurística de ordenação e escalonamento, verifica-se que apesar de em geral a qualidade da solução inicial da heurística de fluxos em rede e escalonamento ser pior do que a qualidade da solução inicial da heurística de ordenação e escalonamento, em 5 instâncias do conjunto de 54, a melhor solução da pesquisa local é obtida com a heurística de fluxos em rede e escalonamento. Fazendo o mesmo tipo de análise, para a função de avaliação 2, também neste caso há 5 instâncias onde a melhor solução da pesquisa local é obtida com a heurística de fluxos em rede e escalonamento. Mesmo assim, a heurística de ordenação e escalonamento é sem dúvida o melhor método para iniciar a pesquisa local.

Em todas as estruturas de vizinhança da pesquisa local, partindo da heurística de ordenação e escalonamento, na função de avaliação 1 não se consegue em geral

melhorar o valor do atraso total. O mesmo acontece nas meta-heurísticas. Quando a solução inicial é obtida, mais uma vez, com a heurística de ordenação e escalonamento, mas a função de avaliação é a 2, apenas a estrutura de inserção parcial para a frente consegue reduzir significativamente o valor do stock médio durante a produção com atraso.

Ao nível das meta-heurísticas pode-se dizer em termos gerais que os ganhos destes algoritmos sobre as melhores soluções encontradas com os algoritmos de pesquisa local não são muito expressivos, particularmente para as duas funções de avaliação, partindo da solução inicial obtida com a heurística de ordenação e escalonamento. Os resultados das meta-heurísticas, quando a função de avaliação considerada é a 2, estão em parte comprometidos com o facto de os tempos de execução dos algoritmos de pesquisa local nesta função de avaliação serem elevados face ao tempo limite de execução das meta-heurísticas.

Atendendo à relação qualidade da solução / esforço computacional de todos os algoritmos heurísticos propostos neste trabalho, o algoritmo de VND, cuja solução inicial é obtida com a heurística de ordenação e escalonamento e cujas soluções são avaliadas através da função de avaliação 1, parece ser o melhor algoritmo, embora como já referido anteriormente a melhor escolha dependerá sempre dos objectivos que o agente de decisão considere ser mais importantes. O motivo para a escolha da função de avaliação 1 prende-se essencialmente com questões de eficiência, embora se considere que o interesse prático da segunda função de avaliação é elevado. Para aumentar o potencial da segunda função de avaliação será necessário, tal como já se referiu, reduzir os tempos de resolução dos algoritmos de pesquisa local. Embora o ganho do algoritmo de VND escolhido sobre as melhores soluções da pesquisa local seja inferior ao ganho do algoritmo de VNS (para a mesma combinação de solução inicial e de função de avaliação) sobre as melhores soluções da pesquisa local, o seu tempo médio de execução (417 segundos) é bastante inferior ao tempo médio de execução do algoritmo de VNS (1 856 segundos). Em termos médios, com o algoritmo de VND consegue-se aumentar a qualidade das soluções iniciais (obtidas com a heurística de ordenação e escalonamento, para a função de avaliação 1) em 22.5%. Com o algoritmo de VNS a melhoria em termos médios é de 23.5%.

A heurística de ordenação e escalonamento é muito eficiente a encontrar soluções iniciais de qualidade (por comparação com a heurística de fluxos em rede e escalonamento e o modelo de PIM) para o problema DLEMP e é particularmente adequada para a função de avaliação 1, já que na afectação dos lotes às máquinas tenta respeitar as datas de entrega e simultaneamente garantir que todos os lotes que pertençam ao mesmo produto final terminem o mais próximo possível uns dos outros. Por outro lado, na situação de atraso, tenta dividir o mais possível a quantidade em falta de modo a reduzir o tempo de atraso. Para a função de avaliação 2, há uma outra característica que é importante, que está relacionada com a dimensão dos lotes. Neste caso quanto menor for a dimensão dos lotes, menores serão os níveis de stock da secção.

Nas figuras que se apresentam de seguida, comparam-se os vários algoritmos de pesquisa local, as meta-heurísticas e a heurística de fluxos em rede e escalonamento com a heurística de ordenação e escalonamento, em termos da percentagem média de melhoria da função de avaliação de cada um dos métodos sobre o valor da função de avaliação da heurística de ordenação e escalonamento e apresentam-se os tempos médios de resolução de cada um dos referidos métodos. Na Figura 6.13 apresentam-se os resultados para a função de avaliação 1 e na Figura 6.14 os resultados relativos à função de avaliação 2. Na Figura 6.13 não se apresenta a comparação com a heurística de fluxos em rede e escalonamento porque o seu valor sai da escala de valores. Comparando a heurística de fluxos em rede e escalonamento com a heurística de ordenação e escalonamento verifica-se uma deterioração média do valor da função de avaliação de cerca de 2448%. O tempo médio da heurística de fluxos em rede e escalonamento é igual a 578 segundos. Na Figura 6.14 também não se apresentam os valores da comparação entre a heurística de fluxos em rede e escalonamento com a heurística de ordenação e escalonamento pelo mesmo motivo. Na heurística de fluxos em rede e escalonamento existe uma deterioração média de 144.3% no valor da função de avaliação (em comparação com a heurística de ordenação e escalonamento).

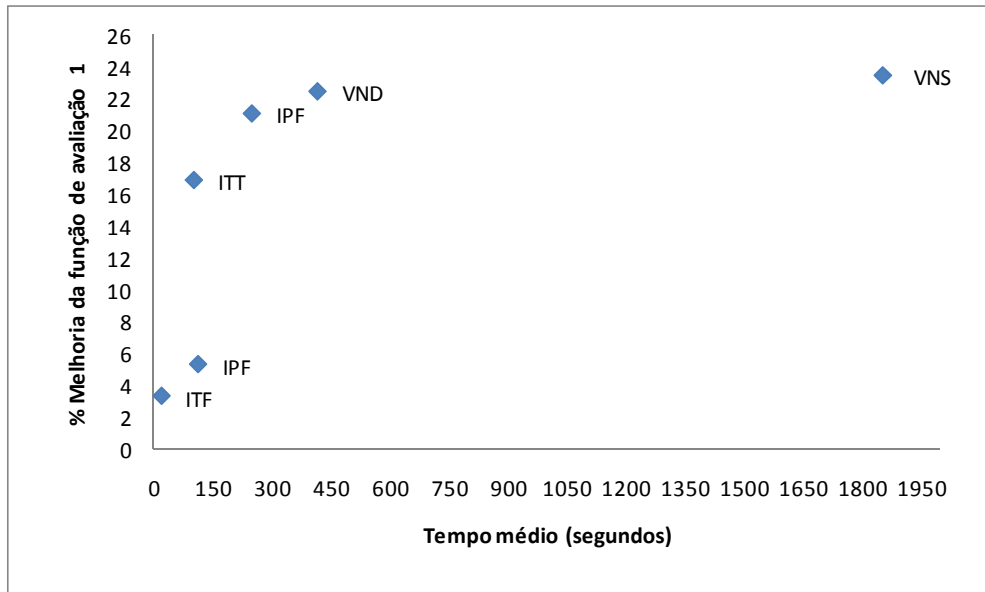


Figura 6.13 Comparação de métodos para a função de avaliação 1

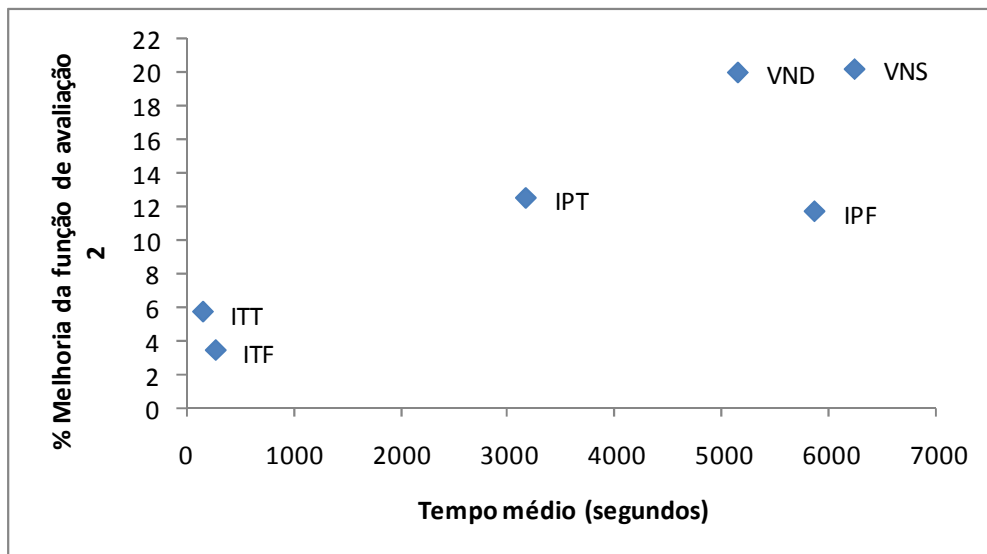


Figura 6.14 Comparação de métodos para a função de avaliação 2

Capítulo 7

Conclusões e Trabalho Futuro

O trabalho que se apresentou nesta tese centrou-se no estudo de dois problemas de planeamento de médio / curto prazo.

Um desses problemas foi abordado no Capítulo 2, e é um problema de lotes de produção multi-artigo capacitado com tempos de preparação (LPMACC). O problema consiste em determinar um plano de produção de médio-prazo para um conjunto de produtos finais, que estabelece as quantidades a produzir e a armazenar de cada um desses produtos finais ao longo do tempo, de maneira a respeitar as capacidades disponíveis por período e a satisfazer a procura de cada produto final em cada período, fazendo o balanço entre os custos de armazenagem, os custos de preparação e os custos de produção que podem variar por produto e por período.

A principal contribuição neste trabalho para o problema LPMACC é a comparação de várias formulações alternativas, baseadas num modelo compacto e em modelos de decomposição, para o problema em termos da qualidade das soluções obtidas.

Todos os modelos de decomposição baseiam-se na aplicação dos princípios da decomposição de Dantzig-Wolfe. Aquilo que os distingue é o modo como os subproblemas são definidos. Na decomposição por produto as restrições de ligação são as restrições de capacidade e os subproblemas estão associados aos produtos. Na decomposição por período as restrições de ligação são as restrições de procura e os

subproblemas resultantes estão associados aos períodos. Na decomposição múltipla, contrariamente ao que acontece nas duas decomposições anteriores, passam a existir os dois tipos de subproblemas (por produto e por período). Como ambos os subproblemas não têm a propriedade da integralidade, a qualidade dos limites inferiores da decomposição múltipla é potencialmente melhor do que a qualidade dos limites inferiores dos modelos de decomposição que consideram um só tipo de subproblema.

Os três modelos de decomposição são resolvidos com o método de partição e geração de colunas. A estratégia de partição no método de partição e geração de colunas consiste em adicionar restrições de partição baseadas nas variáveis originais ao problema mestre, garantindo-se dessa forma que não existem alterações na estrutura dos subproblemas.

Os limites inferiores da decomposição múltipla são melhores que os limites inferiores dos restantes métodos, mas as melhorias não são muito significativas comparando com o segundo melhor método, que é a decomposição por produto. Atendendo à relação qualidade da solução / tempo de resolução o melhor método é o da decomposição por produto.

O segundo problema abordado neste trabalho, o problema de dimensionamento de lotes e escalonamento integrados em máquinas paralelas (DLEMP) resultou de um estudo de caso, de um problema real da indústria têxtil. O facto de se tratar de um problema novo, com um elevado grau de complexidade e dimensão, constituiu um forte desafio deste trabalho, realçando-se as dificuldades em encontrar na literatura trabalhos que permitissem comparar os métodos que se propuseram neste trabalho com métodos alternativos para o mesmo problema. Este problema tem um claro interesse prático, já que se pode encontrar em situações industriais onde existam vários componentes que numa dada etapa do processo de fabrico sejam produzidos num conjunto de máquinas paralelas, e unidos na etapa posterior do processo de fabrico dando origem a um produto final ou a um produto semi-acabado. O modelo de programação inteira mista (PIM) e os métodos heurísticos desenvolvidos para o problema DLEMP são gerais, e podem certamente ser aplicados a outros contextos industriais com poucas modificações. De seguida, sintetizam-se os modelos e métodos desenvolvidos para o problema DLEMP, bem como as principais contribuições e resultados deste estudo.

Os Capítulos 3 a 6 foram dedicados ao problema DLEMP. Neste problema de planeamento da produção de curto-prazo, pretende-se definir um plano de produção semanal, que determine a dimensão de um conjunto de lotes de componentes a processar, proceda à afectação de cada um desses lotes a uma máquina e faça o seu escalonamento. Os objectivos operacionais de maior relevância são por um lado garantir que as datas de entrega são respeitadas e por outro lado minimizar os stocks em curso de fabrico.

O problema caracteriza-se pela existência de: um conjunto de máquinas paralelas idênticas; procuras e datas de entrega determinísticas associadas a produtos finais; tempos unitários de produção variáveis associados a componentes; uma matriz de compatibilidade entre máquinas e componentes; datas de disponibilidade de máquinas; e pela existência de relações de dependência entre subconjuntos de componentes e produtos finais.

Neste problema admite-se a possibilidade de: a procura associada a um componente ser dividida em mais do que um lote de dimensão variável; mais do que um lote do mesmo componente ser produzido na mesma máquina; mais do que um lote do mesmo componente ser produzido simultaneamente em duas ou mais máquinas; e existirem períodos de tempo livre numa máquina entre dois lotes de diferentes componentes.

No Capítulo 3 contextualizou-se e apresentou-se o problema real, fez-se a revisão da literatura relevante e apresentou-se um gerador de instâncias para o problema.

No Capítulo 4 desenvolveu-se e testou-se um modelo original de PIM para o problema, baseado na modelação contínua do tempo. A escolha deste tipo de modelação foi feita atendendo às características do problema, nomeadamente tendo em consideração o facto de os tempos unitários de produção serem contínuos e o objectivo de modelar os desvios entre os instantes de conclusão dos lotes relacionados. A função objectivo do problema é uma função pesada do atraso total dos produtos finais e dos desvios ocorridos durante a produção desses produtos finais. A consideração do objectivo relacionado com a minimização dos desvios constituiu um desafio na

modelação deste problema. No melhor conhecimento da autora este tipo de objectivo é inovador no contexto dos problemas de dimensionamento de lotes e de escalonamento.

Dada a enorme complexidade e dimensão do problema, também se desenvolveram vários métodos heurísticos para o problema DLEMP, com o objectivo de disponibilizar ao agente de decisão várias soluções alternativas, com características diferentes e com desempenhos diferentes.

No Capítulo 5 desenvolveram-se e testaram-se dois métodos heurísticos, com o intuito de se obterem soluções de qualidade, rapidamente. Um desses métodos combina modelos de fluxos em rede com uma heurística de escalonamento e o segundo método é uma heurística construtiva de ordenação e escalonamento.

No Capítulo 6, com o objectivo de melhorar a qualidade das soluções obtidas com as heurísticas do Capítulo 5, desenvolveram-se e testaram-se quatro algoritmos de pesquisa local, baseados em inserções de lotes, e duas meta-heurísticas (VND e VNS). As heurísticas do Capítulo 5 foram usadas para iniciar o processo de pesquisa local. Embora uma das heurísticas do Capítulo 5 tenha um desempenho superior à outra, na pesquisa local foram testadas ambas, para estudar a influência do número de lotes da solução inicial na pesquisa local.

Nas estruturas de vizinhança usadas nos algoritmos de pesquisa local e nas meta-heurísticas é usado o conceito de data objectivo. Este conceito torna as estruturas de vizinhança usadas neste trabalho diferentes das estruturas de inserção habitualmente usadas para resolver problemas de escalonamento, nas quais a solução é representada como uma sequência de produtos, consistindo um movimento de inserção na remoção de um produto de uma dada posição na sequência e na sua inserção noutra posição na sequência. O conceito de data objectivo é um aspecto central dos algoritmos de pesquisa local apresentados neste trabalho e está relacionado com o objectivo de se pretender minimizar os desvios ocorridos na produção de um dado produto final. Por esse motivo a data objectivo pode ser igual à data de entrega do produto final, ou igual aos instantes de conclusão de todos os lotes que pertençam a esse produto final, ou ainda igual aos instantes de início de todos os lotes que pertençam a esse produto final. Em cada

movimento de inserção um dado lote é inserido numa dada máquina, fazendo-se coincidir o seu instante de conclusão com uma dada data objectivo.

No Capítulo 6, para além de se testarem os algoritmos baseados em pesquisa local com a função de avaliação usada no modelo de PIM, estes foram também testados através de uma nova função de avaliação, baseada na minimização dos níveis de inventário durante a produção e após a produção. Esta função de avaliação constitui também uma contribuição deste trabalho.

Para testar e comparar todos os modelos e métodos desenvolvidos para o problema DLEMP, foi gerado um conjunto de 54 instâncias de teste, baseadas no problema real. Os modelos e métodos permitem obter soluções de qualidade para o problema real. Em particular para instâncias com alguma folga em termos de capacidade obtêm-se em geral soluções com desvios totais pequenos e para instâncias com capacidades muito apertadas (algumas das quais com carga superior a 100%) obtêm-se soluções com atrasos totais baixos.

Passa-se agora a descrever duas sugestões de trabalho futuro.

Uma contribuição relevante para o problema DLEMP passaria pela sua extensão, para a inclusão de tempos de preparação das máquinas quando há mudança de um trabalho, dependentes da sequência, significando que esse tempo de preparação dependeria da sequência dos trabalhos. Esta alteração viria adicionar complexidade ao problema, mas torná-lo-ia susceptível de ser aplicado a um maior número de situações reais. As alterações ao modelo de PIM e aos algoritmos de pesquisa local para incluir os tempos de preparação não são significativas.

O modelo de PIM apresentado para o problema DLEMP incorpora aspectos inovadores na modelação de problemas de escalonamento através de programação inteira, nomeadamente a modelação de desvios entre instantes de conclusão dos trabalhos. Uma forma de diminuir os tempos de resolução deste modelo consiste na inclusão de restrições que reduzam a sua simetria, tipicamente encontrada em problemas de máquinas paralelas (Jans, 2009).

Bibliografia

- AARTS, E. & LENSTRA, J. K. (Eds.) (2003) *Local Search in Combinatorial Optimization*, New Jersey, Princeton University Press.
- AHUJA, R., MAGNANTI, T. & ORLIN, J. (1993) *Network Flows: Theory, Algorithms and Applications*, New Jersey, Prentice Hall.
- ALCAIDE, D., GONZÁLEZ-MARTÍN, C. & SEDEÑO-NODA, A. (2002) Scheduling jobs on several machines using network flow approaches. CiteSeerX, , <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.5.9054>.
- ALLAHVERDI, A., NG, C., CHENG, T. & KOVALYOV, M. (2008) A survey of scheduling problems with setup times or costs. *European Journal of Operational Research*, 187, 985-1032.
- ALVELOS, F. (2005) Branch-and-Price and multicommodity flows. *DPS*. Braga, Universidade do Minho.
- ANDERSON, E., GLASS, C. & POTTS, C. (2003) Machine scheduling. IN AARTS, E. & LENSTRA, J. (Eds.) *Local Search in Combinatorial Optimization*. Reprint ed. New Jersey, Princeton University Press.
- ANGHINOLFI, D. & PAOLUCCI, M. (2007) Parallel machine total tardiness scheduling with a new hybrid metaheuristic approach. *Computers and Operations Research*, 34, 3471-3490.
- ARAGÃO, M. & UCHOA, E. (2003) Integer program reformulation for robust branch-and-cut-and-price algorithms. In *Proceedings of the Conference Mathematical Program in Rio: A Conference in Honour of Nelson Maculan*.
- BARNHART, C., JOHNSON, E., NEMHAUSER, G., SAVELSBERG, M. & VANCE, P. (1998) Branch-and-price: column generation for solving huge integer programs. *Operations Research*, 46, 316-329.
- BEHNAMIAN, J., ZANDIEH, M. & GHOMI, S. (2009) Parallel-machine scheduling problems with sequence-dependent setup times using an ACO, SA and VNS hybrid algorithm. *Expert Systems with Applications*, 36, 9637-9644.
- BELVAUX, G. & WOLSEY, L. A. (2000) bc-prod: A specialized branch-and-cut system for lot-sizing problems. *Management Science*, 46, 724-738.
- BITRAN, G. & YANASSE, H. (1982) Computational complexity of the capacitated lot size problem. *Management Science*, 28, 1174-1186.
- BLACKSTONE, J., PHILLIPS, D. & HOGG, G. (1982) A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations. *International Journal of Production Research*, 20, 27-45.
- BLUM, C. & ROLI, A. (2003) Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, 35, 268-308.
- CHANG, J. & CHIU, H. (2005) A comprehensive review of lot streaming. *International Journal of Production Research*, 43, 1515-1536.
- CHEN, C. & CHEN, C. (2009) Hybrid metaheuristics for unrelated parallel machine scheduling with sequence-dependent setup times. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43, 161-169.

- CHEN, W. H. & THIZY, J. M. (1990) Analysis of relaxations for the multi-item capacitated lot-sizing problem. *Annals of Operations Research*, 26, 29-72.
- CHENG, T. & SIN, C. (1990) A state-of-the-art review of parallel-machine scheduling research. *European Journal of Operational Research*, 47, 271-292.
- CLARK, A. & CLARK, S. (2000) Rolling-horizon lot-sizing when set-up times are sequence-dependent. *International Journal of Production Research*, 38, 2287-2307.
- DANTZIG, G. B. & WOLFE, P. (1960) Decomposition principle for linear programs. *Operations Research*, 8, 101-111.
- DAUZÈRE-PÉRES, S. & LASSERRE, J. (Eds.) (1994) *An Integrated Approach in Production Planning and Scheduling*, Berlin, Springer-Verlag.
- DAUZÈRE-PÉRÈS, S. & LASSERRE, J. (2002) On the importance of sequencing decisions in production planning and scheduling. *International Transactions in Operational Research*, 9, 779-793.
- DEFERSHA, F. & CHEN, M. (2010) A hybrid genetic algorithm for flowshop lot streaming with setups and variable sublots. *International Journal of Production Research*, 48, 1705-1726.
- DEGRAEVE, Z. & JANS, R. (2007) A new Dantzig-Wolfe reformulation and branch-and-price algorithm for the capacitated lot sizing problem with set up times. *Operations Research*, 55, 909-920.
- DESAULNIERS, G., DESROSIERS, J. & SOLOMON, M. (Eds.) (2005) *Column Generation*, New York, Springer.
- DIABY, M., BAHL, H. C., KARWAN, M. H. & ZIONTS, S. (1992a) Capacitated lot-sizing and scheduling by lagrangean relaxation. *European Journal of Operational Research*, 59, 444-458.
- DIABY, M., BAHL, H. C., KARWAN, M. H. & ZIONTS, S. (1992b) A lagrangean relaxation approach for very-large-scale capacitated lot-sizing. *Management Science*, 38, 1329-1340.
- DREXL, A. & KIMMS, A. (1997) Lot sizing and scheduling - survey and extensions. *European Journal of Operational Research*, 99, 221-235.
- DRIESSEL, R. & MÖNCH, L. (2010) Variable neighborhood search approaches for scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent setup times, precedence constraints, and ready times. *Computers and Industrial Engineering* (article in press).
- DROZDOWSKI, M. (2004) Scheduling parallel tasks - algorithms and complexity. IN LEUNG, J. (Ed.) *Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis*. USA, Chapman & Hall/CRC.
- EPPEN, G. D. & MARTIN, R. K. (1987) Solving multi-item capacitated lot-sizing problems using variable redefinition. *Operations Research*, 35, 832-848.
- FELDMANN, M. & BISKUP, D. (2008) Lot streaming in a multiple product permutation flow shop with intermingling. *International Journal of Production Research*, 46, 197-216.
- FLOUDAS, C. & LIN, X. (2004) Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review. *Computers and Chemical Engineering*, 28, 2109-2129.
- FORD, L. R. & FULKERSON, D. R. (1958) A suggested computation for maximal multicommodity network flows. *Management Science*, 5, 97-101.

- GEOFFRION, A. M. (1974) Lagrangean relaxation for integer programming. *Mathematical Programming Study*, 2, 82-114.
- GILMORY, P. C. & GOMORY, R. E. (1961) Linear programming approach to the cutting stock problem: part I. *Operations Research*, 9, 849-859.
- GILMORY, P. C. & GOMORY, R. E. (1963) Linear programming approach to the cutting stock problem: part II. *Operations Research*, 11, 863-888.
- GLOVER, F. & KOCHENBERGER, G. (Eds.) (2003) *Handbook of Metaheuristics*, Kluwer Academic Publishers.
- GRAHAM, R., LAWLER, E., LENSTRA, J. K. & KAN, A. R. (1979) Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: a survey. *Annals of Discrete Mathematics*, 5, 287-326.
- GUIGNARD, M. & KIM, S. (1987) Lagrangean decomposition: a model yielding stronger lagrangean bounds. *Mathematical Programming* 39, 215-228.
- HANSEN, P. & MLADENOVIC, N. (2001) Variable neighborhood search: principles and applications. *European Journal of Operational Research*, 130, 449-467.
- HANSEN, P., MLADENOVIC, N. & PÉREZ, J. (2010) Variable neighborhood search: methods and applications. *Annals of Operations Research*, 175, 367-407.
- HANSEN, P., MLADENOVIC, N. & UROSEVIC, D. (2006) Variable neighborhood search and local branching. *Computers and Operations Research*, 33, 3034-3045.
- HUANG, R. (2010) Multi-objective job-shop scheduling with lot-splitting production. *International Journal of Production Economics*, 124, 206-213.
- HURINK, J. & KNUST, S. (2001) List scheduling in a parallel machine environment with precedence constraints and setup times. *Operations Research Letters*, 29, 231-239.
- ILOG (2002) CPLEX 8.1 User's Manual.
- ILOG (2007) CPLEX 11.0 User's Manual.
- JANS, R. (2009) Solving lotsizing problems on parallel identical machines using symmetry breaking constraints. *INFORMS Journal on Computing*, 21, 123-136.
- JANS, R. & DEGRAEVE, Z. (2004) Improved lower bounds for the capacitated lot sizing problem with set up times. *Operations Research Letters*, 32, 185-195.
- JANS, R. & DEGRAEVE, Z. (2008) Modeling industrial lot sizing problems: a review. *International Journal of Production Research*, 46, 1619-1643.
- KARIMI, B., GHOMI, S. & WILSON, J. (2003) The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. *Omega The International Journal of Management Science*, 31, 365-378.
- KUIK, R., SALOMON, M. & WASSENHOVE, L. (1994) Batching decisions: structure and models. *European Journal of Operational Research*, 75, 243-263.
- LITTLE, J. D. C., MURTY, K. G., SWEENEY, D. W. & KAREL, C. (1963) An algorithm for the traveling salesman problem. *Operations Research*, 11, 972-989.
- LOGENDRAN, R. & SUBUR, F. (2004) Unrelated parallel machine scheduling with job splitting. *IIE Transactions*, 36, 359-372.
- LÜBBECKE, M. E. & DESROSIERS, J. (2005) Selected topics in column generation. *Operations Research*, 53, 1007-1023.
- MAES, J., MCCLAIN, J. & WASSENHOVE, L. (1991) Multilevel capacitated lotsizing complexity and LP-based heuristics. *European Journal of Operational Research*, 53, 131-148.

- MANNE, A. (1958) Programming of economic lot sizes. *Management Science*, 4, 115-135.
- MARAVELIAS, C. & GROSSMANN, I. (2003) New general continuous-time state-task network formulation for short-term scheduling of multipurpose batch plants. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 42, 3056-3074.
- MARAVELIAS, C. & GROSSMANN, I. (2004) A hybrid MILP/CP decomposition approach for the continuous time scheduling of multipurpose batch plants. *Computers and Chemical Engineering*, 28, 1921-1949.
- MEYR, H. (2002) Simultaneous lotsizing and scheduling on parallel machines. *European Journal of Operational Research*, 139, 277-292.
- MICHEL, S., PERROT, N. & VANDERBECK, F. (2009) Knapsack problems with setups. *European Journal of Operational Research*, 196, 909-918.
- MLADENOVIC, N. & HANSEN, P. (1997) Variable neighborhood search. *Computers and Operations Research*, 24, 1097-1100.
- MOKOTOFF, E. (2001) Parallel machine scheduling problems: a survey. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 18, 193-242.
- NEMHAUSER, G. L. & WOLSEY, L. A. (1999) *Integer and combinatorial optimization*, John Wiley and Sons.
- PANWALKAR, S. & ISKANDER, W. (1977) A survey of scheduling rules. *Operations Research*, 25, 45-61.
- PARK, S., KIM, D. & LEE, K. (2003) An integer programming approach to the path selection problem. In *Proceedings of the 2003 International Network Optimization Conference*. Evry/Paris.
- PIMENTEL, C. (2005) Algoritmos de partição e geração de colunas para dimensionamento de lotes de produção. *DPS*. Guimarães, Universidade do Minho.
- PIMENTEL, C., ALVELOS, F. & CARVALHO, J. M. V. D. (2010a) Comparing Dantzig-Wolfe decompositions and branch-and-price algorithms for the multi-item capacitated lot sizing problem. *Optimization Methods and Software*, 25, 299-319.
- PIMENTEL, C., ALVELOS, F., CARVALHO, J. M. V. D. & DUARTE, A. (2010b) Heuristic approaches for lot splitting and scheduling in identical parallel machines. *17th International Annual EUROMA Conference*. Porto, Portugal.
- PIMENTEL, C., ALVELOS, F., DUARTE, A. & CARVALHO, J. M. V. D. (2010c) Exact and heuristic approaches for lot splitting and scheduling on identical parallel machines. *International Journal of Manufacturing Technology and Management (accepted for publication)*
- PIMENTEL, C., ALVELOS, F., DUARTE, A. & CARVALHO, J. M. V. D. (2010d) A fast heuristic for a lot splitting and scheduling problem of a Textile industry. *5th International Conference on Management and Control of Production and Logistics*. Coimbra, Portugal.
- POCHET, Y. (2001) Mathematical programming models and formulations for deterministic production planning problems. IN JÜNGER, M. & NADDEF, D. (Eds.) *Computational Combinatorial Optimization: Optimal or Probably Near-Optimal Solutions*. Springer.
- POCHET, Y. & WOLSEY, L. A. (1991) Solving multi-item lot-sizing problems using strong cutting planes. *Management Science*, 37, 53-67.

- POCHET, Y. & WOLSEY, L. A. (2006) *Production Planning by Mixed Integer Programming*, USA, Springer.
- POTTS, C. & WASSENHOVE, L. (1992) Integrating scheduling with batching and lot-sizing: a review of algorithms and complexity. *Journal of the Operational Research Society*, 43, 395-406.
- QUADT, D. & KUHN, H. (2008) Capacitated lot-sizing with extensions: a review. *4OR*, 6, 61-83.
- ROCHA, P., RAVETTI, M., MATEUS, G. & PARDALOS, P. (2008) Exact algorithms for a scheduling problem with unrelated parallel machines and sequence and machine-dependent setup times. *Computers and Operations Research*, 35, 1250-1264.
- SERAFINI, P. (1996) Scheduling jobs on several machines with the job splitting property. *Operations Research*, 44, 617-628.
- SHEEN, G. & LIAO, L. (2007) Scheduling machine-dependent jobs to minimize lateness on machines with identical speed under availability constraints. *Computers and Operations Research*, 34, 2266-2278.
- SHIM, S. & KIM, Y. (2008) A branch and bound algorithm for an identical parallel machine scheduling problem with a job splitting property. *Computers and Operations Research*, 35, 863-875.
- TAHAR, D., YALAOUI, F., CHU, C. & AMODEO, L. (2006) A linear programming approach for identical parallel machine scheduling with job splitting and sequence-dependent setup times. *International Journal of Production Economics*, 99, 63-73.
- THIZY, J. M. & WASSENHOVE, L. N. V. (1985) Lagrangean relaxation for the multi-item capacitated lot sizing problem: a heuristic implementation. *IIE Transactions*, 17, 308-313.
- TRIGEIRO, W. W., THOMAS, L. J. & MCCLAIN, J. O. (1989) Capacitated lot sizing with setup times. *Management Science*, 35, 353-366.
- WAGELMANS, A., HOESEL, S. V. & KOLEN, A. (1992) Economic lot sizing: an $O(n \log n)$ algorithm that runs in linear time in the Wagner-Whitin case. *Operations Research*, 40, S145-S156.
- WAGNER, H. & WHITIN, T. (1958) Dynamic version of the economic lot size model. *Management Science*, 5, 89-96.
- WILHELM, W. E. (2001) A technical review of column generation in integer programming. *Optimization and Engineering*, 2, 159-200.
- XHAFA, F. & ABRAHAM, A. (Eds.) (2008) *Metaheuristics for scheduling in industrial and manufacturing applications*, Springer.
- XING, W. & ZHANG, J. (2000) Parallel machine scheduling with splitting jobs. *Discrete Applied Mathematics*, 103, 259-269.
- YALAOUI, F. & CHU, C. (2003) An efficient heuristic approach for parallel machine scheduling with job splitting and sequence-dependent setup times. *IIE Transactions*, 35, 183-190.
- ZHU, X. & WILHELM, W. (2006) Scheduling and lot sizing with sequence-dependent setup: a literature review. *IIE Transactions*, 38, 987-1007.

Anexo 1 Procedimento de Geração de Instâncias

Passo 1: Definir o número de produtos finais e o horizonte temporal. Em todas as instâncias o horizonte temporal considerado é igual a 168 horas.

Passo 2: Distribuir os produtos finais por tipo de encomenda (protótipos, colecções, pré-séries e produções), atendendo à sua representatividade. A representatividade de cada tipo de encomenda é a que se apresenta na Tabela A1.1. Nos arredondamentos, utilizar a seguinte regra: seleccionar a quantidade que tiver maior parte fraccionária, e arredondar o seu valor para cima, caso a sua parte fraccionária seja superior ou igual a 0.5. Repetir o processo até ao penúltimo valor. O último valor será arredondado para cima ou para baixo, de forma a garantir que o número de produtos finais não é ultrapassado.

Tabela A1.1 Representatividade de cada tipo de encomenda

Tipo de encomenda	Representatividade (%)
Protótipo	46.5
Colecção	11.7
Pré-série	20.9
Produção	20.9

Passo 3: Determinar o tipo de produto final (camisola, casaco, calça, vestido ou cachecol) associado a cada tipo de encomenda, o número de componentes associados a cada tipo de produto final e os factores de incorporação. Na Tabela A1.2 apresentam-se todas as informações relevantes. Nos arredondamentos, utilizar a seguinte regra: seleccionar a quantidade que tiver maior parte fraccionária, e arredondar o seu valor para cima, caso a sua parte fraccionária seja superior ou igual a 0.5. Repetir o processo

até ao penúltimo valor. O último valor será arredondado para cima ou para baixo, de forma a garantir que o número de produtos finais não é ultrapassado.

Tabela A1.2 Tipo de produto final e sua representatividade, número de componentes associados e sua representatividade e factores de incorporação dos componentes

Tipo de produto final	Representatividade (%)	Número de componentes	Factores de incorporação
Camisola	50	30% - 2 componentes 70% - 3 componentes	1 Frente + 1 Costa ou 1 Frente + 1 Costa + 2 Mangas
Casaco	30	90% - 3 componentes 10% - 4 componentes	1 Frente + 1 Costa + 2 Mangas ou 1 Frente Direita + 1 Frente Esquerda + 1 Costa + 2 Mangas
Calça	10	2 componentes	1 Pano Direito + 1 Pano Esquerdo
Vestido	5	40% - 2 componentes 60% - 3 componentes	1 Frente + 1 Costa ou 1 Frente + 1 Costa + 2 Mangas
Cachecol	5	1 componente	1 Cachecol

Passo 4: Determinar o jogo (21, 24 ou 27) associado a cada produto final. A representatividade de cada jogo pode variar ao longo do tempo, de acordo com os pedidos dos clientes. Na TabelaA1.3 apresentam-se três representatividades comuns. Nos arredondamentos, utilizar a seguinte regra: seleccionar a quantidade que tiver maior parte fraccionária, e arredondar o seu valor para cima, caso a sua parte fraccionária seja superior ou igual a 0.5. Repetir o processo até ao penúltimo valor. O último valor será arredondado para cima ou para baixo, de forma a garantir que o número de produtos finais não é ultrapassado.

TabelaA1.3 Representatividade do jogo

Jogo	Representatividade de instâncias do tipo 1 (%)	Representatividade de instâncias do tipo 2 (%)	Representatividade de instâncias do tipo 3 (%)
21	17	10	4
24	45	40	26
27	38	50	70

Passo 5: Determinar o fio associado a cada produto final

Passo 5.1: gerar o número de fios, usando uma distribuição uniforme inteira, com valor mínimo igual a 5 e valor máximo igual a 11.

Passo 5.2: distribuir o número de fios gerados no passo 5.1 por jogo. Na Tabela A1.4 apresenta-se o procedimento de distribuição do número de fios por jogo para um pequeno exemplo no qual o resultado do passo 5.1 é igual a 7 e existem 2 produtos finais de jogo 21, 4 de jogo 24 e 4 de jogo 27. Nos arredondamentos, utilizar a seguinte regra: seleccionar o número de fios por jogo que tiver maior parte fraccionária, e arredondar o seu valor para cima, caso a sua parte fraccionária seja superior ou igual a 0.5. Repetir o processo até ao penúltimo valor. O último valor será arredondado para cima ou para baixo, de forma a garantir que o número de fios não é ultrapassado.

Tabela A1.4 Procedimento de atribuição do número de fios aos produtos finais

Jogo	Número de produtos finais	Número de produtos finais/número total de produtos finais	Número de fios por jogo	Número de fios por jogo (arredondado)
21	2	0.2	$=0.2 \times 7 = 1.4$	1
24	4	0.4	$=0.4 \times 7 = 2.8$	3
27	4	0.4	$=0.4 \times 7 = 2.8$	3

Passo 5.3: atribuir um fio a cada produto final de cada jogo. Para o efeito, reservar 2 fios para o jogo 21 (fios 1 e 2), 5 fios para o jogo 24 (fios 3, 4, 5, 6 e 7) e 8 fios para o jogo 27 (fios 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15). Para atribuir os fios aos produtos

finais associados a cada jogo, gerar valores inteiros sem repetições aleatoriamente. Pegando no exemplo acima apresentado, e sabendo que se pretende atribuir os 3 fios de jogo 27 aos 4 produtos finais de jogo 27, teria de se gerar em primeiro lugar 3 inteiros não repetidos, entre os números 8 e 15 e depois repartir, através de gerações aleatórias, esses 3 inteiros pelos 4 artigos. Supondo que eram gerados os números 10, 13 e 14, o fio associado a cada um dos 4 artigos teria de ser um destes 3.

Passo 6: Determinar o número de tamanhos associados a cada produto final, bem como os respectivos tamanhos, atendendo a que as encomendas do tipo protótipo são produzidas em apenas um tamanho (tamanho T2), assim como os cachecóis (tamanho único). Para os restantes tipos de encomendas (coleções, pré-séries e produções), gerar os tamanhos usando o seguinte procedimento:

Passo 6.1: gerar aleatoriamente um valor entre 0 e 1.

Passo 6.2: verificar em qual dos intervalos da Tabela A1.5 está incluído o valor gerado no passo 6.1 e escolher o número de tamanhos correspondente a esse intervalo.

Tabela A1.5 Probabilidade de ocorrência de cada valor da variável número de tamanhos

Probabilidade	Intervalos	Número de tamanhos
0.02	[0, 0.02[	2
0.04	[0.02, 0.06[	3
0.9	[0.06, 0.96[	4
0.03	[0.96, 0.99[	5
0.01	[0.99, 1]	6

Passo 6.3: atribuir os tamanhos a cada produto final, começando por considerar o tamanho T2 (tamanho médio), e posteriormente prosseguindo com a distribuição de tamanhos para cima e para baixo. Se por exemplo o número de tamanhos associado a um determinado produto final for igual a 4, associar os tamanhos: T0 T1 T2 T3 ou T1 T2 T3 T4.

Passo 7: Considerar 29 máquinas distribuídas da seguinte forma: 5 máquinas de jogo 21, 13 máquinas de jogo 24 e 11 máquinas de jogo 27.

Passo 8: Determinar as datas de disponibilidade das máquinas em horas. As datas de disponibilidade devem ser geradas usando uma distribuição uniforme inteira, com valor mínimo igual a zero e valor máximo igual a oito.

Passo 9: Gerar as procuras associadas a cada produto final, através de uma distribuição uniforme inteira, com valores mínimos e máximos que variam de acordo com o tipo de encomenda a que está associado o produto final. Na Tabela A1.6 apresentam-se os padrões de procura para cada tipo de encomenda. A procura total associada a um dado produto final, deverá ser distribuída equitativamente pelos vários tamanhos associados a esse produto final.

Tabela A1.6 Padrão de procura por tipo de encomenda

Tipo de encomenda	Procura
Protótipo	4
Colecção	Mínimo = 4 Máximo = 30
Pré-série	Mínimo = 4 Máximo = 30
Produção	60% - Uniforme [0, 400] 15% - Uniforme [400, 1000] 20% - Uniforme [1000, 3000[5% - Uniforme [3000, 6000]

Passo 10: Gerar os tempos unitários de produção dos componentes. Numa primeira fase são gerados os tempos médios de produção para um tamanho médio (tamanho T2). Na Tabela A1.7 apresentam-se os tempos médios unitários de produção para todos os tipos de componentes no tamanho T2. Os tempos unitários de produção

dos componentes para um tamanho médio são gerados através de uma distribuição uniforme, cujo valor mínimo representa 70% do tempo médio apresentado na Tabela A1.7 e o valor máximo representa 130% do mesmo valor. Na segunda fase, determinam-se os tempos unitários de produção dos componentes nos restantes tamanhos, de acordo com a seguinte regra: por cada tamanho acima do tamanho médio, tamanho T2, deve considerar-se um acréscimo de 10% no tempo unitário de produção relativamente ao tempo médio unitário do tamanho T2, assim como para cada tamanho abaixo do tamanho médio, tamanho T2, se deve considerar uma redução de 10% relativamente ao tempo médio unitário do tamanho T2. Tal como se pode verificar na Tabela A1.5 o número máximo de tamanhos é igual a seis, os quais se distribuem desde o tamanho T0 até ao tamanho T5.

Tabela A1.7 Tempos unitários de produção por tipo de componente para um tamanho médio

Tipo de componente	Tempo médio (minutos)
Frente (de camisola ou de casaco)	1.25
Costa (de camisola ou de casaco)	1.125 (90% do tempo da frente)
Frente de vestido	3.4
Costa de vestido	3.06 (90% do tempo da frente)
Manga (de camisola, de casaco ou de vestido)	1.1
Pano de calça	2.5
Cachecol	2.1

Passo 11: Gerar as datas de entrega dos produtos finais, usando uma distribuição uniforme inteira, com valor mínimo igual ao limite superior de [(procura do produto final em questão × somatório dos tempos unitários de produção de todos os componentes que fazem parte do produto final em questão)/ número total de máquinas disponíveis no jogo a que corresponde o produto final em questão]. O valor máximo é igual ao horizonte temporal.

Passo 12: Definir a matriz de compatibilidade entre máquinas (de um jogo) e componentes. Neste passo são geradas as máquinas onde cada componente pode ser realizado.

Passo 12.1: gerar aleatoriamente um valor entre 0 e 1.

Passo 12.2: verificar em qual dos intervalos da Tabela A1.8 ou da Tabela A1.9 ou da Tabela A1.10, de acordo com o jogo em questão, está incluído o valor gerado no passo 12.1 e escolher o número de máquinas correspondente a esse intervalo.

Tabela A1.8 Probabilidade de ocorrência de cada valor da variável número de máquinas de jogo

21

Probabilidade	Intervalos	Número de máquinas de jogo 21
0.03	[0, 0.03[	1
0.07	[0.03, 0.1[	2
0.1	[0.1, 0.2[	3
0.2	[0.2, 0.4[	4
0.6	[0.4, 1]	5

Tabela A1.9 Probabilidade de ocorrência de cada valor da variável número de máquinas de jogo

24

Probabilidade	Intervalos	Número de máquinas de jogo 24
0.03	[0, 0.03[	9
0.07	[0.03, 0.1[	10
0.1	[0.1, 0.2[	11
0.2	[0.2, 0.4[	12
0.6	[0.4, 1]	13

Tabela A1.10 Probabilidade de ocorrência de cada valor da variável número de máquinas de jogo

27

Probabilidade	Intervalos	Número de máquinas de jogo 27
0.03	[0, 0.03[	7
0.07	[0.03, 0.1[	8
0.1	[0.1, 0.2[	9
0.2	[0.2, 0.4[	10
0.6	[0.4, 1]	11

Passo 12.3: para o jogo 21, gerar aleatoriamente números inteiros sem repetições entre os valores 1 e 5, até perfazer o número de máquinas de jogo 21 gerado no passo 12.2. Para o jogo 24, gerar aleatoriamente números inteiros sem repetições entre os valores 6 e 18, até perfazer o número de máquinas de jogo 24 gerado no passo 12.2. Por último para o jogo 27, gerar aleatoriamente números inteiros sem repetições entre os valores 19 e 29, até perfazer o número de máquinas de jogo 27 gerado no passo 12.2.

Alguns dos parâmetros (representatividade dos tipos de encomenda, representatividade dos jogos e procura dos produtos finais) definidos no procedimento para a geração das instâncias de teste, foram definidos para um tipo de instâncias com cerca de 25 produtos finais (dimensão média do problema real) e para o caso em que apenas existem encomendas de produção. Esses parâmetros ao longo do processo de geração de instâncias tiveram de ser ajustados em função do número de produtos finais, da representatividade dos tipos de encomenda e da representatividade dos jogos, de forma a obter-se problemas com cargas de produção equilibradas, *i. e.*, de modo a evitar por exemplo jogos com um grande excesso de carga ou jogos com uma elevada falta de carga.

Anexo 2 Estrutura das Instâncias de Teste e Exemplo

Estrutura das Instâncias de Teste

Nome da instância

Número de produtos finais

Horizonte temporal

Número de produtos finais por tipo

Número de produtos finais por jogo

Número de fios por jogo

Nome do produto final / Tipo de encomenda do produto final / Número de componentes / Factores de incorporação / Jogo / Número de tamanhos / Descrição dos tamanhos / Fio / Data de entrega / Procura total do produto final / Procura por tamanho

Número de máquinas por jogo

Datas de disponibilidade das máquinas

Nome do componente.tamanho / Tempo unitário de produção / Número de máquinas compatíveis / Nome das máquinas compatíveis

Exemplo de uma Instância

inst20T1_1.txt

20

168

10 6 2 1 1

3 9 8

1 3 2

Cm1 pr 2 1 1 27 4 t0 t1 t2 t3 12 7 11551 2888 2888 2888 2887

Cm2 pr 2 1 1 24 4 t1 t2 t3 t4 3 6 3257 815 814 814 814

Cm3 pr 2 1 1 21 4 t1 t2 t3 t4 2 7 7904 1976 1976 1976 1976

Cm4 pr 3 1 1 2 24 4 t1 t2 t3 t4 7 6 60 15 15 15 15

Cm5 pr 3 1 1 2 21 3 t1 t2 t3 2 5 243 81 81 81

Cm6 pr 3 1 1 2 24 4 t1 t2 t3 t4 4 2 5529 1383 1382 1382 1382

Cm7 pr 3 1 1 2 27 4 t0 t1 t2 t3 8 6 10963 2741 2741 2741 2740

Cm8 pr 3 1 1 2 24 4 t0 t1 t2 t3 7 4 166 42 42 41 41

Cm9 pr 3 1 1 2 24 4 t1 t2 t3 t4 3 7 147 37 37 37 36

Cm10 pr 3 1 1 2 24 2 t1 t2 7 3 4342 2171 2171

Cs1 pr 3 1 1 2 27 4 t1 t2 t3 t4 8 6 3655 914 914 914 913

Cs2 pr 3 1 1 2 24 4 t1 t2 t3 t4 4 7 5125 1282 1281 1281 1281

Cs3 pr 3 1 1 2 24 4 t1 t2 t3 t4 7 6 26 7 7 6 6

Cs4 pr 3 1 1 2 27 4 t0 t1 t2 t3 8 1 47 12 12 12 11

Cs5 pr 3 1 1 2 27 3 t1 t2 t3 8 1 121 41 40 40

Cs6 pr 4 1 1 1 2 27 4 t1 t2 t3 t4 8 6 324 81 81 81 81

Cl1 pr 2 1 1 27 4 t1 t2 t3 t4 8 3 310 78 78 77 77

Cl2 pr 2 1 1 24 4 t1 t2 t3 t4 3 7 7564 1891 1891 1891 1891

V1 pr 3 1 1 2 27 4 t1 t2 t3 t4 12 4 405 102 101 101 101

C1 pr 1 1 21 1 t2 2 1 681 681
5 13 11
1 8 8 1 6 1 4 3 8 4 5 1 3 4 1 0 0 7 5 2 0 5 0 8 4 3 7 0 1
Cm1Ft0 0.896 10 19 20 21 22 23 24 25 26 27 29
Cm1Ct0 0.8064 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cm1Ft1 1.008 10 19 20 21 22 23 24 26 27 28 29
Cm1Ct1 0.9072 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cm1Ft2 1.12 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cm1Ct2 1.008 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cm1Ft3 1.232 10 19 20 21 22 23 24 26 27 28 29
Cm1Ct3 1.1088 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cm2Ft1 0.9054 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cm2Ct1 0.81486 12 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 17 18
Cm2Ft2 1.006 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cm2Ct2 0.9054 11 6 7 8 9 10 11 12 13 14 16 18
Cm2Ft3 1.1066 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cm2Ct3 0.99594 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cm2Ft4 1.2072 11 6 7 8 9 10 11 13 14 15 17 18
Cm2Ct4 1.08648 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cm3Ft1 1.1439 4 1 2 3 4
Cm3Ct1 1.02951 4 1 2 3 5
Cm3Ft2 1.271 5 1 2 3 4 5
Cm3Ct2 1.1439 5 1 2 3 4 5
Cm3Ft3 1.3981 4 1 2 3 5
Cm3Ct3 1.25829 2 2 3
Cm3Ft4 1.5252 4 1 2 3 4

Cm3Ct4 1.37268 5 1 2 3 4 5

Cm4Ft1 1.0485 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm4Ct1 0.94365 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm4Mt1 1.1961 12 6 7 8 9 10 11 12 13 14 16 17 18

Cm4Ft2 1.165 11 6 7 8 9 10 11 13 14 16 17 18

Cm4Ct2 1.0485 10 6 7 8 9 10 11 13 15 16 18

Cm4Mt2 1.329 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm4Ft3 1.2815 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm4Ct3 1.15335 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm4Mt3 1.4619 11 6 7 8 10 11 12 13 15 16 17 18

Cm4Ft4 1.398 11 6 8 9 10 11 12 13 14 15 17 18

Cm4Ct4 1.2582 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm4Mt4 1.5948 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm5Ft1 1.2087 5 1 2 3 4 5

Cm5Ct1 1.08783 5 1 2 3 4 5

Cm5Mt1 1.2042 5 1 2 3 4 5

Cm5Ft2 1.343 5 1 2 3 4 5

Cm5Ct2 1.2087 5 1 2 3 4 5

Cm5Mt2 1.338 5 1 2 3 4 5

Cm5Ft3 1.4773 5 1 2 3 4 5

Cm5Ct3 1.32957 5 1 2 3 4 5

Cm5Mt3 1.4718 5 1 2 3 4 5

Cm6Ft1 1.4571 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm6Ct1 1.31139 11 6 7 8 9 11 12 13 14 15 16 18

Cm6Mt1 0.774 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm6Ft2 1.619 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm6Ct2 1.4571 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cm6Mt2 0.86 12 6 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cm6Ft3 1.7809 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cm6Ct3 1.60281 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cm6Mt3 0.946 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cm6Ft4 1.9428 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cm6Ct4 1.74852 11 6 7 8 9 10 12 14 15 16 17 18
Cm6Mt4 1.032 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cm7Ft0 1.1456 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cm7Ct0 1.03104 10 19 20 21 22 23 24 26 27 28 29
Cm7Mt0 0.7256 8 19 20 21 23 24 27 28 29
Cm7Ft1 1.2888 9 20 21 22 23 24 25 26 28 29
Cm7Ct1 1.15992 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cm7Mt1 0.8163 10 19 20 21 22 24 25 26 27 28 29
Cm7Ft2 1.432 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cm7Ct2 1.2888 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cm7Mt2 0.907 10 19 20 21 22 24 25 26 27 28 29
Cm7Ft3 1.5752 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cm7Ct3 1.41768 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cm7Mt3 0.9977 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cm8Ft0 0.7816 11 6 8 9 10 11 12 13 15 16 17 18
Cm8Ct0 0.70344 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cm8Mt0 0.7288 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cm8Ft1 0.8793 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cm8Ct1 0.79137 11 6 7 9 10 11 12 13 14 15 16 18
Cm8Mt1 0.8199 12 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 17 18

Cm8Ft2 0.977 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm8Ct2 0.8793 12 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 18

Cm8Mt2 0.911 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm8Ft3 1.0747 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm8Ct3 0.96723 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm8Mt3 1.0021 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm9Ft1 1.44 12 6 7 8 9 10 12 13 14 15 16 17 18

Cm9Ct1 1.296 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm9Mt1 1.134 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm9Ft2 1.6 11 6 7 8 9 10 11 12 13 15 16 17

Cm9Ct2 1.44 9 7 10 11 12 13 14 15 17 18

Cm9Mt2 1.26 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm9Ft3 1.76 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm9Ct3 1.584 12 6 7 8 9 10 11 12 14 15 16 17 18

Cm9Mt3 1.386 10 6 7 10 11 12 13 14 16 17 18

Cm9Ft4 1.92 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm9Ct4 1.728 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm9Mt4 1.512 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm10Ft1 0.8109 12 6 7 8 9 10 11 13 14 15 16 17 18

Cm10Ct1 0.72981 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm10Mt1 0.9288 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm10Ft2 0.901 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cm10Ct2 0.8109 11 6 8 9 10 11 12 13 14 15 16 18

Cm10Mt2 1.032 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Cs1Ft1 1.4319 8 20 21 22 23 25 26 27 28

Cs1Ct1 1.28871 10 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28

Cs1Mt1 0.7173 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs1Ft2 1.591 9 19 20 21 22 23 25 26 28 29
Cs1Ct2 1.4319 9 19 20 21 23 24 25 26 27 29
Cs1Mt2 0.797 8 19 21 23 24 25 27 28 29
Cs1Ft3 1.7501 7 19 20 21 23 24 26 29
Cs1Ct3 1.57509 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs1Mt3 0.8767 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs1Ft4 1.9092 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs1Ct4 1.71828 9 19 20 21 23 24 26 27 28 29
Cs1Mt4 0.9564 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs2Ft1 1.0521 12 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 18
Cs2Ct1 0.94689 11 6 7 8 9 11 13 14 15 16 17 18
Cs2Mt1 1.251 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cs2Ft2 1.169 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cs2Ct2 1.0521 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cs2Mt2 1.39 9 6 8 9 11 13 14 15 17 18
Cs2Ft3 1.2859 12 6 7 8 9 11 12 13 14 15 16 17 18
Cs2Ct3 1.15731 11 6 7 8 9 10 11 14 15 16 17 18
Cs2Mt3 1.529 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cs2Ft4 1.4028 9 6 7 8 9 11 12 15 17 18
Cs2Ct4 1.26252 11 6 7 8 9 10 12 13 14 15 16 17
Cs2Mt4 1.668 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cs3Ft1 0.8469 12 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17
Cs3Ct1 0.76221 10 6 7 8 9 10 11 12 14 15 16
Cs3Mt1 1.1349 12 6 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cs3Ft2 0.941 10 6 7 8 10 11 12 13 14 15 18

Cs3Ct2 0.8469 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cs3Mt2 1.261 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cs3Ft3 1.0351 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cs3Ct3 0.93159 12 6 7 8 9 11 12 13 14 15 16 17 18
Cs3Mt3 1.3871 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cs3Ft4 1.1292 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cs3Ct4 1.01628 9 7 8 9 10 11 12 14 15 18
Cs3Mt4 1.5132 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cs4Ft0 1.1272 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs4Ct0 1.01448 10 19 20 21 22 23 25 26 27 28 29
Cs4Mt0 0.896 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs4Ft1 1.2681 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs4Ct1 1.14129 9 19 20 21 22 23 25 26 27 28
Cs4Mt1 1.008 10 19 20 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs4Ft2 1.409 10 19 20 21 22 23 24 26 27 28 29
Cs4Ct2 1.2681 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs4Mt2 1.12 8 19 20 22 23 24 25 26 28
Cs4Ft3 1.5499 9 19 20 21 22 23 25 26 27 28
Cs4Ct3 1.39491 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs4Mt3 1.232 9 19 20 22 24 25 26 27 28 29
Cs5Ft1 0.9684 9 19 20 21 22 24 25 26 27 28
Cs5Ct1 0.87156 10 19 20 21 23 24 25 26 27 28 29
Cs5Mt1 0.7443 8 19 20 22 23 24 25 26 29
Cs5Ft2 1.076 9 19 20 22 23 24 25 26 28 29
Cs5Ct2 0.9684 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs5Mt2 0.827 8 19 20 23 24 25 26 27 29

Cs5Ft3 1.1836 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs5Ct3 1.06524 8 19 20 22 23 24 27 28 29
Cs5Mt3 0.9097 8 19 21 22 23 24 25 26 28
Cs6Fdt1 0.9216 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs6Fet1 0.9216 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs6Ct1 0.82944 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs6Mt1 0.7317 8 19 21 22 24 25 27 28 29
Cs6Fdt2 1.024 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs6Fet2 1.024 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs6Ct2 0.9216 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs6Mt2 0.813 10 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28
Cs6Fdt3 1.1264 10 19 20 21 22 23 25 26 27 28 29
Cs6Fet3 1.1264 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs6Ct3 1.01376 9 20 21 22 23 24 26 27 28 29
Cs6Mt3 0.8943 8 19 20 21 23 24 26 27 29
Cs6Fdt4 1.2288 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs6Fet4 1.2288 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs6Ct4 1.10592 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cs6Mt4 0.9756 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cl1Pdt1 2.0268 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cl1Pet1 2.0268 8 20 22 23 24 25 26 27 28
Cl1Pdt2 2.252 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cl1Pet2 2.252 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cl1Pdt3 2.4772 7 19 20 21 22 24 27 28
Cl1Pet3 2.4772 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cl1Pdt4 2.7024 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29

Cl1Pet4 2.7024 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
Cl2Pdt1 2.5056 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cl2Pet1 2.5056 12 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cl2Pdt2 2.784 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cl2Pet2 2.784 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cl2Pdt3 3.0624 9 6 7 9 10 13 14 15 17 18
Cl2Pet3 3.0624 12 6 7 8 9 10 11 12 13 14 16 17 18
Cl2Pdt4 3.3408 13 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Cl2Pet4 3.3408 12 6 7 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
V1Ft1 3.4875 9 19 21 22 23 25 26 27 28 29
V1Ct1 3.13875 10 19 20 21 22 23 24 26 27 28 29
V1Mt1 0.7479 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
V1Ft2 3.875 8 19 20 21 23 24 25 27 29
V1Ct2 3.4875 8 19 20 21 24 25 26 28 29
V1Mt2 0.831 10 19 20 22 23 24 25 26 27 28 29
V1Ft3 4.2625 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
V1Ct3 3.83625 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
V1Mt3 0.9141 10 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28
V1Ft4 4.65 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
V1Ct4 4.185 8 19 20 22 24 25 27 28 29
V1Mt4 0.9972 11 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
C1t2 1.903 1 3