

Rejane Arinos Vasco

*Otimização na alocação dinâmica de veículos  
no transporte rodoviário de cargas completas  
entre terminais*

São Carlos - SP, Brasil

2012

Rejane Arinos Vasco

*Otimização na alocação dinâmica de veículos  
no transporte rodoviário de cargas completas  
entre terminais*

Texto apresentado ao Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientador:

Prof. Dr. Reinaldo Morabito

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

São Carlos - SP, Brasil

2012

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

V331oa Vasco, Rejane Arinos.  
Otimização na alocação dinâmica de veículos no  
transporte rodoviário de cargas completas entre terminais /  
Rejane Arinos Vasco. -- São Carlos : UFSCar, 2012.  
347 f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos,  
2012.

1. Pesquisa operacional. 2. Alocação de recursos. 3.  
Otimização combinatória. 4. Transporte de cargas. 5.  
Estudos de validação. 6. Heurística. I. Título.

CDD: 658.4034 (20<sup>a</sup>)

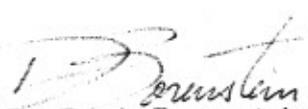


## FOLHA DE APROVAÇÃO

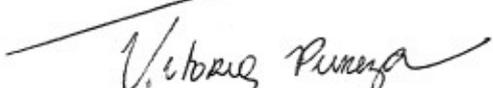
Aluno(a): Rejane Arinos Vasco

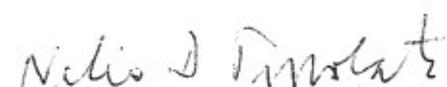
TESE DE DOUTORADO DEFENDIDA E APROVADA EM 01/06/2012 PELA  
COMISSÃO JULGADORA:

  
Prof. Dr. Reinaldo Morabito Neto  
Orientador(a) PPGE/UFSCar

  
Prof. Dr. Denis Borenstein  
EAUFRGS

  
Prof. Dr. Cláudio Barbieri da Cunha  
POLI/USP

  
Profª Drª Vitória Maria Miranda Pureza  
PPGE/UFSCar

  
Prof. Dr. Nélcio Domingues Pizzolato  
PUC-RIO

  
Prof. Dr. Mário Otávio Batalha  
Coordenador do PPGE/UFSCar

## *Agradecimentos*

Agradeço ao amigo e orientador Prof. Dr. Reinaldo Morabito pelas diretrizes dadas no decorrer desta pesquisa, pela sua dedicação e motivação para com o problema, qualidades estas que tanto me auxiliaram na superação de barreiras e desafios, estando sempre bem humorado, mesmo nos momentos mais difíceis. Obrigada.

Agradeço também aos colegas do GPO (Grupo de Estudos em Pesquisa Operacional), do Departamento de Engenharia de Produção da UFSCar, pelo apoio na utilização dos recursos computacionais do grupo, e principalmente pelas discussões, sempre muito interessantes, que me fizeram refletir e algumas vezes encarar o problema por outra perspectiva.

À Patrus Transportes por aceitar participar ativamente dessa pesquisa, e aos seus profissionais pelo seu envolvimento e comprometimento no processo de validação prática.

Ao Marcos Roberto Silva pelo apoio nas implementações das heurísticas propostas neste trabalho.

Por fim agradeço aos meus pais e à minha família, especialmente à minha filha Thaís pelo apoio incondicional.

*“A grande diferença entre construção  
e criação é esta: que uma coisa  
construída só pode ser amada depois  
de ser construída; mas uma coisa  
criada é amada antes de existir”.*

---

Gilbert Keith Chesterton, Prefácio a  
Dickens, Pickwick Papers

# *Resumo*

O domínio das atividades logísticas é fornecer aos clientes de um sistema o produto certo, no local certo e no tempo certo. Na economia moderna, o passo acelerado e o grande escopo das operações logísticas tem fomentado problemas gerenciais complexos, atraindo a atenção da indústria e da academia. Otimizar a quantidade de veículos para um determinado sistema de transporte requer a avaliação do *tradeoff* entre o custo de aquisição e manutenção de veículos e penalidades associadas com o não atendimento de demandas neste sistema. Esta tese se propõe a contribuir para apoiar decisões na gestão operacional de frotas de empresas prestadoras de serviços de transporte rodoviário de cargas. Em particular, na otimização do uso de veículos nos transportes de transferências de cargas entre terminais, tendo como fator crítico e determinante a maximização da utilização dos recursos nas operações. Vários problemas operacionais, em especial o gerenciamento da frota de transferência, consistem em dinamicamente alocar recursos limitados às requisições de tarefas. Especificamente, este trabalho trata do problema da alocação dinâmica (multi-períodos) de veículos (PADV) no transporte rodoviário de cargas completas entre terminais. O PADV pertence a classe de problemas de alocação dinâmica de recursos e consiste em definir “movimentos” de uma frota de veículos que realiza viagens entre terminais geograficamente dispersos que interagem entre si. Estes movimentos podem ser: veículos carregados com carga completa, veículos vazios para reposicionamento, ou veículos mantidos em um terminal de um período para outro como provisão para o atendimento de demandas futuras. A ênfase é dada na caracterização do problema em situações reais, na modelagem matemática do problema e na solução do mesmo utilizando técnicas de pesquisa operacional, envolvendo ainda a utilização de heurísticas e metaheurísticas para solução, como o GRASP, o *simulated annealing* e a colônia de formigas. O objetivo é definir a alocação dinâmica e necessidades de frota que minimizem o custo operacional no atendimento a demandas por serviços. A principal motivação para o desenvolvimento do trabalho é a possibilidade de aplicação prática, no desenvolvimento de modelos de programação linear inteira e métodos exatos e heurísticos para as suas soluções, visando a validação prática das abordagens em um ambiente real de operação de uma empresa transportadora no Brasil.

Palavras-chave: Alocação de veículos de carga, Otimização multi-período, Transporte de cargas. Validação. Heurísticas.

# *Abstract*

The domain of logistics is concerned with providing customers with the right product in the right place at the right time. In our modern economy, the faster pace and wider scope of logistic operations has led to complex management problems that have drawn the attention of both industry and the academic world. Optimizing the number of vehicles for a determined transport system requires a trade-off between the cost of vehicle acquisition and maintenance and the penalties involved in not meeting the requirements of the system. This thesis proposes to contribute to decision making in the operational management of those companies working in the transportation of goods by road, particularly as regards the optimization of vehicle use in freight transfer between terminals. Various operational problems, especially management of the transfer fleet, involves the dynamic allocation of limited resources to meet demand. Specifically, this paper deals with the dynamic (multi-period) vehicle allocation problem (DVAP) in the road transportation of full loads between terminals. The DVAP belongs to that class of problems dealing with dynamic resource allocation and consists of defining the “movements” of a fleet of vehicles that transport goods between terminals with a wide geographical distribution and which interact among themselves. These movements may be of fully-laden vehicles, unladen vehicles for repositioning or vehicles held at a terminal to meet future demands. Emphasis is given to the characterization of the problem in real situations, mathematical modeling of the problem and the use of operational research techniques in solving the problem. Also, heuristics and metaheuristics such as GRASP, simulated annealing and ant colony optimization are used in the solution. The objective is to determine dynamic allocation and fleet needs in order to minimize operational costs in meeting the demand for services. The main reason for undertaking this work was the possibility of practical application, the development of integer linear programming models and both exact and heuristic methods for solutions, aiming at the practical validation of the approaches in the real operational environment of a Brazilian transport company.

Keywords: Freight car allocation. Multi-period optimization. Freight transportation. Validation. Heuristics.

# *Sumário*

<b>Lista de Figuras</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Escopo e relevância do trabalho . . . . .	1
1.2 Objetivos específicos . . . . .	5
1.3 Organização da tese . . . . .	8
<b>2 O transporte de cargas no Brasil e o problema de alocação de veículos</b>	<b>12</b>
2.1 A importância do transporte de cargas . . . . .	12
2.2 Contextualização para o problema . . . . .	14
2.2.1 Transporte rodoviário de cargas no Brasil . . . . .	14
2.2.2 Operações no transporte rodoviário de cargas . . . . .	15
2.3 Descrição e delimitação do problema . . . . .	16
<b>3 Revisão Bibliográfica</b>	<b>21</b>
3.1 Aplicações no transporte rodoviário de cargas . . . . .	21
3.1.1 Conclusões sobre os trabalhos desenvolvidos para o TRC . . . . .	28
3.2 Aplicações no transporte ferroviário . . . . .	28
3.2.1 Conclusões sobre os trabalhos para o modal ferroviário . . . . .	34
3.3 Aplicações no transporte marítimo . . . . .	34
3.3.1 Conclusões sobre os trabalhos desenvolvidos para o modal marítimo	39

---

3.4	GRASP, <i>Simulated Annealing</i> e Colônia de Formigas . . . . .	39
3.4.1	GRASP . . . . .	39
3.4.2	A metaheurística <i>Simulated Annealing</i> . . . . .	43
3.4.3	A metaheurística colônia de formigas . . . . .	45
3.5	Validação de modelos . . . . .	49
3.6	Conclusões do capítulo . . . . .	57
<b>4</b>	<b>Modelos matemáticos para representar o PADV</b>	<b>59</b>
4.1	Conjuntos, parâmetros e variáveis dos modelos . . . . .	59
4.1.1	Conjuntos dos modelos . . . . .	59
4.1.1.1	Conjunto $N$ de terminais . . . . .	59
4.1.1.2	Conjunto $E$ de veículos . . . . .	59
4.1.1.3	Conjunto $T$ de períodos . . . . .	60
4.1.2	Parâmetros dos modelos . . . . .	61
4.1.3	Variáveis dos modelos . . . . .	63
4.2	Modelo utilizado para representar o PADV ( $M_1$ ) . . . . .	64
4.2.1	Exemplo ilustrativo . . . . .	67
4.3	Dimensionamento da frota adicional ( $M_2$ ) . . . . .	70
4.4	Modelo $M_3$ capacitado . . . . .	73
4.5	Modelo $M_4$ com <i>backlog</i> da demanda . . . . .	75
4.6	Modelo $M_5$ para dimensionamento da frota com <i>backlog</i> . . . . .	78
4.7	Conclusões do capítulo . . . . .	80
<b>5</b>	<b>Experimentos computacionais com modelos</b>	<b>83</b>
5.1	Dados iniciais fornecidos para teste . . . . .	85
5.2	Avaliação dos modelos propostos - $M_1$ , $M_2$ , $M_3$ , $M_4$ e $M_5$ . . . . .	90
5.2.1	Resultados obtidos com o modelo $M_1$ – Problema Teste . . . . .	90

---

5.2.2	Resultados obtidos com o modelo $M_2$ – Problema Teste . . . . .	92
5.2.3	Resultados obtidos com o modelo $M_3$ – Problema Teste . . . . .	93
5.2.4	Resultados obtidos com o modelo $M_4$ – Problema Teste . . . . .	94
5.2.5	Resultados obtidos com o modelo $M_5$ – Problema Teste . . . . .	96
5.3	Experimentos com problemas gerados aleatoriamente . . . . .	98
5.4	Conclusões do capítulo . . . . .	102
<b>6</b>	<b>Heurísticas para solução do PADV</b>	<b>104</b>
6.1	Heurística “gulosa” para o PADV . . . . .	105
6.2	Procedimento de melhoria utilizando busca local . . . . .	109
6.3	Utilizando o GRASP para solução do PADV . . . . .	113
6.4	Utilizando o <i>Simulated Annealing</i> (SA) para solução do PADV . . . . .	118
6.5	Utilizando a Colônia de Formigas (ACS) para solução do PADV . . . . .	122
6.6	Conclusões do capítulo . . . . .	130
<b>7</b>	<b>Experimentos com heurísticas</b>	<b>132</b>
7.1	Resultados obtidos com as heurísticas gulosa e de melhoria . . . . .	133
7.2	Parâmetros utilizados para as metaheurísticas . . . . .	137
7.3	Resultados obtidos com as metaheurísticas . . . . .	139
7.3.1	Resultados para o GRASP . . . . .	141
7.3.2	Resultados para o SA . . . . .	142
7.3.3	Resultados para o ACS . . . . .	148
7.3.4	Análise comparativa entre as metaheurísticas . . . . .	151
7.4	Conclusões do capítulo . . . . .	156
<b>8</b>	<b>Validação prática</b>	<b>160</b>
8.1	Fase 1: teste prático e solução de problema exemplo . . . . .	162
8.2	Fase 2: aplicação de questionário . . . . .	164

---

8.3	Fase 3: validação técnica . . . . .	170
8.4	Conclusão do capítulo . . . . .	177
<b>9</b>	<b>Conclusões e sugestões para estudos futuros</b>	<b>179</b>
9.1	Conclusões . . . . .	179
9.2	Sugestões para estudos futuros . . . . .	182
	<b>Referências</b>	<b>184</b>
	<b>Anexo A – Breve histórico do transporte de cargas no Brasil</b>	<b>196</b>
	<b>Anexo B – Programa em C para geração de problemas aleatórios do PADV</b>	<b>199</b>
	<b>Anexo C – Código em AMPL do exemplo ilustrativo do PADV</b>	<b>216</b>
	<b>Anexo D – Representação gráfica da solução obtida com o modelo <math>M_1</math>.</b>	<b>219</b>
	<b>Anexo E – Resultados obtidos com as heurísticas e metaheurísticas propostas</b>	<b>221</b>
	<b>Anexo F – Problema exemplo proposto para validação</b>	<b>313</b>
F.1	Modelo matemático utilizado para solução . . . . .	320
F.2	Solução ótima do problema exemplo utilizado para validação . . . . .	323

## *Lista de Figuras*

2.1	Matriz do transporte de cargas (CNT, 2010) . . . . .	15
2.2	Distribuição do PIB brasileiro para cada estado do país . . . . .	17
2.3	Fluxograma macro de uma empresa transportadora de cargas parceladas. . . . .	18
3.1	Processo de modelagem apresentado em Morabito e Pureza (2010). . . . .	50
3.2	Tetraedro proposto por Oral e Kettani (1993) para a validação de modelos. . . . .	55
4.1	Esquema gráfico da restrição (4.2) com relação ao balanço de veículos. . . . .	66
4.2	Representação gráfica da solução ótima do problema exemplo. . . . .	69
4.3	Solução ótima do problema exemplo alterado utilizando-se o modelo $M_1$ . . . . .	70
4.4	Solução ótima do problema exemplo alterado utilizando-se o modelo $M_2$ . . . . .	73
4.5	Solução ótima do problema exemplo alterado aumentando-se a oferta de veículos. . . . .	75
4.6	Solução ótima restringindo-se a capacidade do terminal 2 no período 4. . . . .	76
4.7	Solução ótima do problema exemplo para o modelo $M_4$ . . . . .	78
4.8	Solução ótima do problema exemplo para o modelo $M_5$ . . . . .	80
5.1	Mensagem de erro apresentada pelo CPLEX. . . . .	102
6.1	Representação gráfica da solução gulosa do problema exemplo. . . . .	109
6.2	Representação gráfica de solução alternativa para o problema exemplo. . . . .	112
6.3	Representação gráfica da solução ótima do problema exemplo. . . . .	113
6.4	Representação gráfica da primeira etapa do GRASP. . . . .	118
6.5	Representação gráfica da segunda etapa do GRASP. . . . .	119
6.6	Representação gráfica da solução gulosa do problema exemplo. . . . .	121
6.7	Solução gulosa alterando-se o vetor de cargas. . . . .	122

---

6.8	Solução ótima obtida após melhoria - $FO = 4, 4$ .	123
6.9	Representação equivalente do problema exemplo.	125
6.10	Solução gulosa inicial para o ACS.	127
6.11	Atendendo a primeira demanda na primeira etapa do ACS.	128
6.12	Atendendo uma das cargas da demanda $d_{123} = 2$ pelo ACS.	129
6.13	Solução final obtida ao se utilizar o ACS.	130
7.1	Intervalo dos parâmetros para o SA	140
7.2	Resultado obtido com o SA	140
7.3	Intervalo dos parâmetros para o ACS	141
7.4	Resultado obtido com o ACS	141
7.5	Comparativo entre as heurísticas para problemas contendo 17 grupos ( $ E  = 17$ ).	152
7.6	Comparativo entre as heurísticas para problemas contendo 130 grupos ( $ E  = 130$ ).	153
7.7	Tempo de processamento do CPLEX para diferentes quantidades de grupos $ E $ .	159
8.1	Tetraedro de Oral e Kettani (1993).	160
8.2	Controle logístico criado pelo tomador de decisão	165
C.1	Modelo matemático em AMPL	217
C.2	Dados em AMPL do exemplo <i>Murty</i>	218
D.1	Representação gráfica da solução obtida com o modelo $M_1$ .	220

## *Lista de Tabelas*

4.1	Terminais do problema exemplo <i>Murty</i> apresentado em Ghiani et al. (2003)	68
4.2	Tempos de viagem entre terminais no problema exemplo <i>Murty</i> . . . . .	68
4.3	Custo de transporte de veículo vazio no problema exemplo <i>Murty</i> . . . . .	68
4.4	Lucro com um transporte de uma carga completa no problema exemplo <i>Murty</i> . . . . .	69
5.1	Valores utilizados para teste do parâmetro $C^v$ . . . . .	86
5.2	Terminais envolvidos no problema exemplo . . . . .	87
5.3	Oferta de veículos - $m_{it}^v$ . . . . .	88
5.4	Demandas a serem atendidas - $d_{ijt}$ . . . . .	88
5.5	Tempos de viagens entre terminais (em períodos de 4 horas) - $\tau_{ij}$ . . . . .	89
5.6	Receita por percurso entre terminais para veículos próprios - $p_{ij}^{pro}$ . . . . .	91
5.7	Receita por percurso entre terminais para veículos agregados - $p_{ij}^{agr}$ . . . . .	91
5.8	Custo de deslocamento de veículo vazios próprios - $c_{ij}^{pro}$ . . . . .	91
5.9	Custo de deslocamento de veículo vazios agregados- $c_{ij}^{agr}$ . . . . .	91
5.10	Resumo dos resultados obtidos com o modelo $M_1$ . . . . .	92
5.11	Resumo dos resultados obtidos com o modelo $M_2$ . . . . .	93
5.12	Resultados obtidos com o modelo $M_2$ -restrito variando-se o parâmetro $C^v$ . . . . .	93
5.13	Resumo dos resultados obtidos com o modelo $M_3$ . . . . .	94
5.14	Oferta de veículos para o modelo $M_4$ obtida resolvendo-se o modelo $M_5$ . . . . .	95
5.15	Resultados obtidos variando-se o parâmetro $h_{ijt}$ para o modelo $M_4$ . . . . .	95
5.16	Resultados obtidos variando-se o parâmetro $h_{ijt}$ para o modelo $M_5$ . . . . .	97

5.17	Resumo dos resultados obtidos com o modelo $M_5$ variando-se o parâmetro $C^v$ . . . . .	97
5.18	Resultados obtidos com os problemas aleatórios gerados - $M_1$ . . . . .	100
5.19	Resultados obtidos com os problemas aleatórios gerados - $M_2$ . . . . .	100
5.20	Resultados obtidos com os problemas aleatórios gerados - $M_3$ . . . . .	100
5.21	Resultados obtidos com os problemas aleatórios gerados - $M_4$ . . . . .	101
5.22	Resultados obtidos com os problemas aleatórios gerados - $M_5$ . . . . .	101
7.1	Amostra de resultados: Heurística Gulosa e Busca Local $ E  = 17$ . . . . .	134
7.2	Amostra de resultados: Heurística Gulosa e Busca Local $ E  = 130$ . . . . .	135
7.3	Valores médios obtidos: Heurística Gulosa e Busca Local . . . . .	136
7.4	Amostra de resultados GRASP $ E  = 17$ . . . . .	143
7.5	Amostra de resultados GRASP $ E  = 130$ . . . . .	144
7.6	Amostra de resultados SA $ E  = 17$ . . . . .	146
7.7	Amostra de resultados SA $ E  = 130$ . . . . .	147
7.8	Amostra de resultados ACS $ E  = 17$ . . . . .	149
7.9	Amostra de resultados ACS $ E  = 130$ . . . . .	150
7.10	Exemplo de tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV $ E  = 17$	154
7.11	Exemplo de abela comparativa entre as heurísticas para o PADV $ E  = 130$	155
7.12	Desvio padrão médio da função objetivo ( $\sigma_{fo}$ ) e do tempo de processamento ( $\sigma_t$ ) . . . . .	156
8.1	Tabela auxiliar criada pelo tomador de decisão para solução do problema exemplo . . . . .	166
8.2	Resultado obtido pelo tomador de decisão . . . . .	167
8.3	Tomadores de Decisão que colaboraram com a pesquisa estruturada . . . . .	167
8.4	Resumo da pontuação atribuída pelos tomadores de decisão . . . . .	168
8.5	Resumo referente a questão 1 . . . . .	169
8.6	Resumo referente a questão 2 . . . . .	170

---

8.7	Resumo referente a questão 3 . . . . .	171
8.8	Resumo referente a questão 4 . . . . .	172
8.9	Resumo referente a questão 5 . . . . .	172
8.10	Resumo referente a questão 6 . . . . .	173
8.11	Resumo referente a questão 7 . . . . .	173
8.12	Resumo referente a questão 8 . . . . .	174
8.13	Resumo referente a questão 9 . . . . .	174
8.14	Resumo referente a questão 10 . . . . .	175
8.15	Resposta ao questionário referente a Fase 3 . . . . .	176
E.1	Resultados heurística gulosa e busca local $ E  = 1$ . . . . .	223
E.2	Resultados heurística gulosa e busca local $ E  = 2$ . . . . .	224
E.3	Resultados heurística gulosa e busca local $ E  = 3$ . . . . .	225
E.4	Resultados heurística gulosa e busca local $ E  = 4$ . . . . .	226
E.5	Resultados heurística gulosa e busca local $ E  = 5$ . . . . .	227
E.6	Resultados heurística gulosa e busca local $ E  = 6$ . . . . .	228
E.7	Resultados heurística gulosa e busca local $ E  = 7$ . . . . .	229
E.8	Resultados heurística gulosa e busca local $ E  = 8$ . . . . .	230
E.9	Resultados heurística gulosa e busca local $ E  = 9$ . . . . .	231
E.10	Resultados heurística gulosa e busca local $ E  = 10$ . . . . .	232
E.11	Resultados heurística gulosa e busca local $ E  = 11$ . . . . .	233
E.12	Resultados heurística gulosa e busca local $ E  = 12$ . . . . .	234
E.13	Resultados heurística gulosa e busca local $ E  = 13$ . . . . .	235
E.14	Resultados heurística gulosa e busca local $ E  = 14$ . . . . .	236
E.15	Resultados heurística gulosa e busca local $ E  = 15$ . . . . .	237
E.16	Resultados heurística gulosa e busca local $ E  = 16$ . . . . .	238
E.17	Resultados heurística gulosa e busca local $ E  = 17$ . . . . .	239

---

E.18 Resultados heurística gulosa e busca local $ E  = 130$ . . . . .	240
E.19 Resultados GRASP $ E  = 1$ . . . . .	241
E.20 Resultados GRASP $ E  = 2$ . . . . .	242
E.21 Resultados GRASP $ E  = 3$ . . . . .	243
E.22 Resultados GRASP $ E  = 4$ . . . . .	244
E.23 Resultados GRASP $ E  = 5$ . . . . .	245
E.24 Resultados GRASP $ E  = 6$ . . . . .	246
E.25 Resultados GRASP $ E  = 7$ . . . . .	247
E.26 Resultados GRASP $ E  = 8$ . . . . .	248
E.27 Resultados GRASP $ E  = 9$ . . . . .	249
E.28 Resultados GRASP $ E  = 10$ . . . . .	250
E.29 Resultados GRASP $ E  = 11$ . . . . .	251
E.30 Resultados GRASP $ E  = 12$ . . . . .	252
E.31 Resultados GRASP $ E  = 13$ . . . . .	253
E.32 Resultados GRASP $ E  = 14$ . . . . .	254
E.33 Resultados GRASP $ E  = 15$ . . . . .	255
E.34 Resultados GRASP $ E  = 16$ . . . . .	256
E.35 Resultados GRASP $ E  = 17$ . . . . .	257
E.36 Resultados GRASP $ E  = 130$ . . . . .	258
E.37 Resultados SA $ E  = 1$ . . . . .	259
E.38 Resultados SA $ E  = 2$ . . . . .	260
E.39 Resultados SA $ E  = 3$ . . . . .	261
E.40 Resultados SA $ E  = 4$ . . . . .	262
E.41 Resultados SA $ E  = 5$ . . . . .	263
E.42 Resultados SA $ E  = 6$ . . . . .	264
E.43 Resultados SA $ E  = 7$ . . . . .	265

---

E.44 Resultados SA $ E  = 8$ . . . . .	266
E.45 Resultados SA $ E  = 9$ . . . . .	267
E.46 Resultados SA $ E  = 10$ . . . . .	268
E.47 Resultados SA $ E  = 11$ . . . . .	269
E.48 Resultados SA $ E  = 12$ . . . . .	270
E.49 Resultados SA $ E  = 13$ . . . . .	271
E.50 Resultados SA $ E  = 14$ . . . . .	272
E.51 Resultados SA $ E  = 15$ . . . . .	273
E.52 Resultados SA $ E  = 16$ . . . . .	274
E.53 Resultados SA $ E  = 17$ . . . . .	275
E.54 Resultados SA $ E  = 130$ . . . . .	276
E.55 Resultados ACS $ E  = 1$ . . . . .	277
E.56 Resultados ACS $ E  = 2$ . . . . .	278
E.57 Resultados ACS $ E  = 3$ . . . . .	279
E.58 Resultados ACS $ E  = 4$ . . . . .	280
E.59 Resultados ACS $ E  = 5$ . . . . .	281
E.60 Resultados ACS $ E  = 6$ . . . . .	282
E.61 Resultados ACS $ E  = 7$ . . . . .	283
E.62 Resultados ACS $ E  = 8$ . . . . .	284
E.63 Resultados ACS $ E  = 9$ . . . . .	285
E.64 Resultados ACS $ E  = 10$ . . . . .	286
E.65 Resultados ACS $ E  = 11$ . . . . .	287
E.66 Resultados ACS $ E  = 12$ . . . . .	288
E.67 Resultados ACS $ E  = 13$ . . . . .	289
E.68 Resultados ACS $ E  = 14$ . . . . .	290
E.69 Resultados ACS $ E  = 15$ . . . . .	291

---

E.70 Resultados ACS $ E  = 16$ . . . . .	292
E.71 Resultados ACS $ E  = 17$ . . . . .	293
E.72 Resultados ACS $ E  = 130$ . . . . .	294
E.73 Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV $ E  = 1$ . . . . .	295
E.74 Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV $ E  = 2$ . . . . .	296
E.75 Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV $ E  = 3$ . . . . .	297
E.76 Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV $ E  = 4$ . . . . .	298
E.77 Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV $ E  = 5$ . . . . .	299
E.78 Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV $ E  = 6$ . . . . .	300
E.79 Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV $ E  = 7$ . . . . .	301
E.80 Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV $ E  = 8$ . . . . .	302
E.81 Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV $ E  = 9$ . . . . .	303
E.82 Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV $ E  = 10$ . . . . .	304
E.83 Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV $ E  = 11$ . . . . .	305
E.84 Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV $ E  = 12$ . . . . .	306
E.85 Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV $ E  = 13$ . . . . .	307
E.86 Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV $ E  = 14$ . . . . .	308
E.87 Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV $ E  = 15$ . . . . .	309
E.88 Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV $ E  = 16$ . . . . .	310
E.89 Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV $ E  = 17$ . . . . .	311
E.90 Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV $ E  = 130$ . . . . .	312
F.1 Questionário respondido pelo tomador de decisão 1 . . . . .	338
F.2 Questionário respondido pelo tomador de decisão 2 . . . . .	340
F.3 Questionário respondido pelo tomador de decisão 3 . . . . .	342
F.4 Questionário respondido pelo tomador de decisão 4 . . . . .	344
F.5 Questionário respondido pelo tomador de decisão 5 . . . . .	346

# 1 *Introdução*

## 1.1 Escopo e relevância do trabalho

O gerenciamento da cadeia de suprimentos é um tópico em evidência no mundo dos negócios de hoje e tem havido um constante crescimento da terceirização na área de logística. Logística é um termo que se refere às funções administrativas que sustentam o ciclo complexo de fluxo de material e informações. A ênfase em estoques enxutos significa que há menos espaço para erros nas entregas (CHASE et al., 2006). Segundo o *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP), logística pode ser definida como sendo a parcela do processo da cadeia de suprimentos que planeja, implanta e controla o fluxo eficiente e eficaz de matérias-primas, estoque em processo, produtos acabados e informações relacionadas, desde seu ponto de origem até o ponto de consumo, com o propósito de atender aos requisitos dos clientes (VITASEK, 2010).

O setor de transporte de cargas vêm alcançando, mundialmente, altos níveis de desempenho em termos de eficiência econômica e qualidade de serviço. Eficiência em decorrência da necessidade de empresas de transportes em buscar lucro em um ambiente de mercado aberto, competitivo, focado no custo e nível de serviço. Qualidade devido aos serviços de transportes, que devem se adequar aos altos padrões impostos pelos atuais paradigmas de produção e gestão, tais como redução de estoques e dos *lead-times* de produção, compras e distribuição, serviços personalizados, e controle da qualidade focado no cliente da cadeia logística como um todo (CRAINIC, 1998).

Para as empresas de transporte de cargas, os padrões da qualidade dizem respeito particularmente ao tempo total para entrega e à confiabilidade do serviço, os quais têm, muitas vezes, se traduzido dentro de objetivos como “oferecer serviços de alta qualidade e desempenho consistente”. O transporte de cargas representa um componente estratégico na economia atual, pois permite a produtores e consumidores atuarem em localidades que são centenas ou milhares de quilômetros distantes umas das outras (GHIANI et al., 2003). Ele fornece suporte à produção, comércio e atividades de consumo, assegurando a movi-

mentação eficiente e disponibilizando, em tempo oportuno, matérias-primas e produtos acabados. Em consequência, o transporte pode representar uma parcela significativa do custo de muitos produtos, bem como da despesa nacional de um país. No Brasil, segundo dados do IBGE de 2009, a classe de transporte, armazenagem e correio representou uma despesa de 5,5% do PIB <sup>1</sup>. Os requerimentos por serviços de transporte de cargas em termos de intensificar o valor aos clientes, reduzindo custos de transportes e distribuição enquanto respondem às necessidades dos clientes em termos de prazo de entrega e confiabilidade, têm aumentado consideravelmente.

No Brasil, 61,1% do transporte de carga são realizados por rodovias (CNT, 2010). Isto deve-se principalmente a alguns fatos, como: a implantação da indústria automobilística na década de 50; o governo até a década de 70 alocou 1,5% do PIB no setor de transportes (em 1990 somente 0,1% do PIB); a flexibilidade de entrega porta a porta; a necessidade de maior rapidez (*transit time*) devido às mais frequentes entregas e aos baixos níveis de estoque; serviço personalizado, entre outros. O transporte rodoviário de cargas no Brasil evoluiu significativamente nos últimos anos, em parte devido às exigências dos clientes, mas principalmente em decorrência do aumento da competição entre empresas, com margens de lucro cada vez menores. Outro fator relevante a ser considerado é que no Brasil há um desbalanceamento das demandas por transportes entre regiões devido aos diferentes desenvolvimentos econômicos e sociais dessas regiões e, também, devido às questões político / tributárias entre estados. É provável que o Brasil se mantenha na rota do crescimento econômico nos próximos anos, preservando o ciclo experimentado no passado recente, exceção feita em 2009, por conta da crise financeira global. Essa tendência se apresenta a despeito das imensas necessidades que o país ainda tem de enfrentar para aperfeiçoar tanto sua infraestrutura física quanto a estrutura e aplicabilidade das leis e regulamentos.

De forma geral, o desenvolvimento e a solução de modelos matemáticos de otimização aplicados a situações do mundo real representam ainda um grande desafio para os pesquisadores no mundo e, em particular, no Brasil. Além das dificuldades próprias da natureza do problema a ser modelado, surgem dificuldades relativas à disponibilidade de dados e da empresa a ser estudada como, por exemplo, o sigilo exigido e até a necessidade de se comprovar a eficiência do uso de modelos matemáticos para a otimização, neste caso do gerenciamento da frota e alocação dinâmica dos seus veículos.

Seja nos níveis de planejamento estratégico, tático e operacional, modelos de dimen-

---

<sup>1</sup>Fonte: Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Contas Nacionais <http://www.ibge.gov.br/>

sionamento de frotas e alocação de veículos podem ser úteis para se realizar simulações com diferentes conjuntos de dados (previsões de demandas, limitação de capacidade, menor número de veículos, nível de serviço, atendimentos regionais, frota própria ou não), permitindo, assim, que o tomador de decisão teste diferentes cenários. Modelos também podem colaborar na redução de custos e tempos da programação da frota, o que pode ter um impacto importante na empresa. No entanto, a modelagem matemática de sistemas de gerenciamento de frota é um trabalho difícil e exige tempo. Os modelos matemáticos resultantes em geral têm natureza combinatória e o desenvolvimento de abordagens para resolvê-los exige pessoal familiarizado em modelagem matemática e métodos de solução para problemas de otimização, o que pode ser complicado para empresas prestadoras de serviços de transportes de carga por rodovias no Brasil.

Nesse cenário, esta tese se propõe a contribuir para apoiar decisões no nível operacional da gestão de frotas de empresas prestadoras de serviços de transporte rodoviário de cargas. Em particular, na otimização do uso de veículos nos transportes de transferências de cargas entre terminais, envolvendo veículos de média e grande capacidade, tendo como fator crítico e determinante a maximização da utilização dos recursos nas operações. Vários problemas operacionais, em especial o gerenciamento da frota de transferência, consistem em alocar recursos limitados às requisições de tarefas. Por exemplo, a alocação de veículos vazios devido às diferenças geográficas de demanda por serviços de transporte muitas vezes acumulam veículos vazios em uma região onde eles não são necessários, ou geram um *deficit* de veículos vazios em outras regiões onde há demanda. Desta forma, os veículos devem mover-se vazios, ou cargas adicionais de retorno devem ser encontradas, com o objetivo de reposicioná-los onde são necessários para satisfazerem uma demanda conhecida ou prevista nos períodos de planejamento em nível operacional.

Estas operações são conhecidas como reposicionamento de veículos e são componentes importantes do que é conhecido como gerenciamento da frota. No Brasil, em empresas de transporte rodoviário de cargas, essas operações são desenvolvidas pelo setor denominado de tráfego, que em geral está ligado às diretorias operacionais, através da gestão de frotas (VALENTE et al., 2008). A movimentação de veículos vazios não contribui diretamente para o lucro da empresa, mas é essencial para a continuidade das operações. O balanceamento de veículos vazios, ou melhor, a distribuição de veículos vazios para balancear a oferta e a demanda em períodos futuros, é um componente central do planejamento e controle das operações de empresas de transporte rodoviário de cargas, consistindo inclusive em um dos maiores desafios para o gerenciamento da frota. Problemas de alocação de veículos são apresentados por transportes de cargas completas sobre longas distâncias, como em

transportes (*truckload* - *TL*), nas viagens de transferências entre terminais (*less than truckload* - *LTL*) e despachos de contêineres. Após a entrega da carga, o veículo torna-se vazio e deve ser movimentado para um ponto de coleta de outra carga, ou deve ser reposicionado em antecipação a demandas futuras (GHIANI et al., 2003).

Uma das maiores dificuldades é quando tratamos de incertezas de demanda em períodos futuros, bem como, eventualmente, incertezas relacionadas na realização das operações. Nesses casos, decisões tomadas “agora” para períodos subsequentes nem sempre podem ser baseadas em dados confiáveis, mas em estimativas de como o sistema evoluirá, e qual demanda se materializará de fato. De modo geral, no Brasil, no setor de Transporte Rodoviário de Cargas (TRC), esta tarefa é realizada usualmente de forma empírica, não tendo sido encontrado até o momento ferramentas de apoio disponíveis à gestão de frotas, que tratem todas as restrições operacionais envolvidas.

Diferentes tipos de veículos com suas diferentes capacidades, janelas de horário para atendimento de certas demandas, incertezas e/ou imprevistos no itinerário, um horizonte de planejamento multi-períodos, previsão de demanda, entre outras, são algumas das restrições operacionais. Outro fator importante é a administração da razão receita/custo por veículo carregado. Quanto maior esta razão, mais atrativo é o carregamento para a empresa transportadora. Geralmente, a empresa impõe um limite máximo de representatividade do custo de transferência sobre o frete gerado e, se este limite não for atingido, o veículo não é liberado para viagem. Em contrapartida, é necessário garantir o nível de serviço prestado aos clientes, já que o prazo de entrega acordado deve ser cumprido.

Apesar da importância do tema devido aos altos custos envolvidos nas operações de transporte de carga, pouca pesquisa tem sido realizada no Brasil em Programas de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Transportes. Não foram encontrados trabalhos na literatura explorando aplicação da definição de necessidades de frota e alocação dinâmica (multi-períodos) de veículos para problemas operacionais de transporte rodoviário no Brasil, nem modelos matemáticos que considerem os aspectos práticos aqui tratados. Em geral, o problema é resolvido de forma empírica pelas empresas de transportes de carga no Brasil. Assim, a formulação e o desenvolvimento de abordagens de solução para problemas de alocação dinâmica de veículos é um tema relevante para pesquisa e pode contribuir para fornecer subsídios para apoio à decisão para empresas de transportes no Brasil e para o enriquecimento da literatura sobre o assunto. As estratégias no TRC frequentemente se apoiam em abordagens intuitivas, pois é relevante buscar respostas técnicas para questões técnicas, muitas vezes e quase sempre, respondidas por senso comum.

A abordagem proposta nesta tese permite que questões importantes de programação operacional e posicionamento de frota sejam respondidas, como: (i) como e onde os veículos devem ser alocados / distribuídos, (ii) quais os tamanhos desses agrupamentos de veículos e em quais períodos, e (iii) como os veículos devem ser alocados entre movimentos cheios, vazios e agrupamentos.

Sendo assim, este trabalho se propõe a caracterizar o problema no contexto de empresas brasileiras e a fornecer subsídios para suporte às decisões operacionais no que diz respeito às necessidades de frota e alocação de veículos de transferência de cargas entre terminais, e o consequente reposicionamento dos mesmos, de tal forma a garantir que todas as cargas sejam carregadas para os seus destinos dentro da sua janela de horário, minimizando o custo total. A ênfase é dada na modelagem matemática do problema e na utilização de métodos e técnicas de pesquisa operacional (ARENALES et al., 2007); e (WINSTON, 2003). “O modelo é uma construção mental da ordem. Os modelos são construídos de conceitos e estes, geralmente, guardam uma semelhança com as coisas visíveis, mas nem sempre. Faz-se necessário, então, lançar mão da linguagem matemática” (MIGUEL et al., 2010). A aplicação da abordagem proposta com dados reais de uma empresa de transporte, parceira, provedora das informações, é fundamental para a contribuição proposta neste trabalho.

## 1.2 **Objetivos específicos**

Conforme mencionado, o objetivo deste trabalho é estudar o problema da alocação dinâmica (multi-períodos) de veículos, e da definição da frota adicional necessária para a operação de transporte de cargas completas entre terminais, e propor métodos de solução, através do uso de técnicas de pesquisa operacional e analisar a adequação das soluções obtidas ao problema real de empresas transportadoras de cargas parceladas no Brasil. O foco é dado nas decisões em nível operacional, ou seja, de curto prazo, embora tais abordagens também possam ser utilizadas para apoiar certas decisões táticas.

Este trabalho visa propor novos modelos matemáticos que incorporam situações reais do dia a dia de uma transportadora de cargas no Brasil, considerando restrições importantes da prática dessas empresas, como por exemplo, a extensiva utilização de frota terceirizada (ou agregada), com seus diferentes custos operacionais; o tratamento da situação em que certos veículos não utilizam determinadas rotas, por motivos diversos, como por exemplo: (i) rotas que não incluam passagem (na ida ou na volta) ao município de

domicílio da família do motorista, (ii) inexistência de locais específicos para manutenções do veículo, (iii) não permitem pontos para troca de motoristas, (iv) transportadores autônomos de cargas que nem sempre conhecem todos os percursos, (v) oferta ou escassez de carga de retorno, (vi) condições físicas da rodovia *versus* condições de manutenção dos veículos, (vii) risco do percurso (ou rota) *versus* o valor limite (em unidades monetárias) permitido pela seguradora ao condutor, dentre outros.

Nesta tese é tratado o caso em que se deseja definir o movimento de veículos, cheios e vazios, para uma empresa transportadora de carga parcelada pelo modal rodoviário. Em uma empresa transportadora de carga parcelada são utilizadas estratégias de consolidação para a definição de cargas diretas, ou linhas de transferência entre terminais. Neste cenário, uma vez que a carga parcelada é aceita para transporte, são utilizadas estratégias de consolidação, muitas vezes envolvendo paradas intermediárias em outros terminais, para que essa carga chegue ao seu destino a um menor custo possível. Nesse momento, as linhas de transferência de cargas entre terminais são criadas, surgindo assim a demanda por transporte entre terminais, que é utilizada como parâmetro de entrada para o PADV.

Nos modelos matemáticos usualmente propostos na literatura para representar o problema de alocação dinâmica de veículos (PADV), existem cargas que podem ser recusadas pelo transportador caso não haja frota suficiente para o transporte, ou ainda, se financeiramente não for atrativa (no que diz respeito ao lucro obtido pelo transporte *versus* o custo de deslocamento de veículos vazios para atendimento).

Diferente de certas aplicações encontradas na literatura que tratam o PADV para cargas completas, em uma empresa transportadora de carga parcelada, cargas não são rejeitadas, sendo obrigatoriamente transferidas para o seu terminal de destino, que será responsável pela entrega final ao destinatário. Dessa forma, se não houver veículos suficientes para que toda a demanda seja atendida, as cargas permanecem no terminal de origem até que haja frota disponível. Essa é uma situação indesejável, dada a exigência por altos níveis de serviço pelos embarcadores. Assim, esta tese se propõe, além do reposicionamento de veículos vazios, também dimensionar a frota adicional necessária para que toda a demanda seja atendida, atribuindo um custo adicional devido ao não atendimento de linhas de transferência no momento (período) em que são demandadas.

Conforme foram sendo incorporadas situações e restrições reais encontradas na prática de empresas transportadoras de carga parcelada no Brasil, a complexidade para a solução dos problemas aumentou, chegando ao ponto em que, mesmo utilizando sofisticados pacotes comerciais de otimização e computadores específicos com grande capacidade

de processamento, não foi possível a obtenção de soluções ótimas para os problemas, ou de limitantes de alta qualidade (superiores ou inferiores) das soluções. Com isso, foram propostas heurísticas e metaheurísticas para solução do problema. Primeiramente, foi desenvolvida uma heurística construtiva que utiliza um procedimento guloso (*greedy*), para a geração de uma solução viável para o problema. Depois foi desenvolvida uma heurística de busca local, que funcionou como um procedimento de melhoria para a solução inicial criada pelo procedimento guloso. Em seguida, a título de investigação, foram desenvolvidos métodos de solução utilizando primeiramente a metaheurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) (HART; SHOGAN, 1987; FEO; RESENDE, 1989), em seguida, a aplicação da metaheurística *Simulated Annealing* (SA) (KIRKPATRICK et al., 1983; CERNY, 1985), e por fim, a metaheurística colônia de formigas (*Ant Colony System* - ACS) (DORIGO; GAMBARDELLA, 1997b).

Nesta pesquisa objetiva-se ainda a validação dos modelos matemáticos propostos para representar o problema de alocação dinâmica de veículos e definição das necessidades de frota, incluindo, conforme já citado, a incorporação de situações e restrições encontradas no ambiente real de operação de empresas transportadoras de cargas no Brasil. Em linhas gerais, o processo de validação consiste em verificar se os modelos matemáticos propostos para representar um determinado problema realmente conseguem capturar todas as características e representar adequadamente as restrições, analisando ainda a aderência da solução obtida, resolvendo-se os modelos matemáticos, e alcançando a solução do problema real em estudo.

A adequação dos modelos matemáticos desenvolvidos é validada utilizando-se de parceria com uma típica empresa de transporte rodoviário de cargas, que opera em toda a região Sul, Sudeste do Brasil, e também nos estados da Bahia e Sergipe. Essa empresa busca ferramentas de suporte para dimensionar as necessidades de frota para as viagens de transferências entre terminais, bem como ainda otimizar a utilização da frota de veículos existente. Devido aos custos envolvidos e a magnitude do problema (aproximadamente um quarto das viagens de transferências entre terminais são de reposicionamento de veículos vazios), a empresa em questão mostrou-se interessada nesse tipo de estudo, apoiando e colaborando com a pesquisa, fornecendo dados para testes e também contribuindo com informações detalhadas da operação atual, inclusive restrições importantes a serem consideradas.

A pesquisa quantitativa utilizada neste projeto é mais interpretativa, baseada em observações e experiências diretas da realidade. Nessa linha de pesquisa, a preocupação

principal é assegurar que exista adesão entre observações e ações na realidade e o modelo elaborado daquela realidade. Objetiva-se também a aplicação de processo de validação de modelos, através de pesquisas realizadas com a participação de tomadores de decisão da empresa parceira.

## 1.3 Organização da tese

Este texto está estruturado em capítulos, sendo que no Capítulo 2 é discutida a importância do transporte no desenvolvimento econômico das nações; um breve histórico do transporte rodoviário de cargas no Brasil; a contextualização para o problema estudado e uma descrição detalhada do problema objeto da pesquisa. O Capítulo 3 corresponde à revisão bibliográfica em que são apresentados inicialmente conceitos e definições básicas para o desenvolvimento dos demais capítulos, relacionados aos modelos de alocação dinâmica de veículos existentes, bem como dos métodos de solução empregados para se resolver o PADV: (i) GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), *Simulated Annealing* (SA), e colônia de formigas (*Ant Colony System* - ACS). Nesse capítulo são revisados trabalhos relacionados ao problema de alocação dinâmica de veículos e contêineres, nos diferentes modais de transporte. Técnicas de validação de modelos matemáticos na prática, com foco na aplicação em problemas reais, são também discutidas nesse capítulo, analisando os principais trabalhos nessa área, e uma investigação das abordagens existentes para a validação de modelos.

No Capítulo 4 são apresentados os modelos matemáticos determinísticos desenvolvidos para representar o PADV, especificamente para o transporte rodoviário de cargas, incorporando nesses modelos aspectos importantes necessários para aplicação prática no contexto de empresas brasileiras. São propostos cinco modelos matemáticos para representar o problema, abrangendo a alocação dinâmica de veículos e a definição conjunta das necessidades de frota.

O primeiro modelo, nomeado de  $M_1$ , consiste em: (i) dado um horizonte de planejamento finito composto de vários períodos, (ii) uma frota geograficamente dispersa com posicionamento e períodos conhecidos, e (iii) demandas de cargas completas a serem transportadas entre terminais nos períodos; definir as demandas a serem atendidas e os deslocamentos cheios e vazios de veículos, de tal forma a maximizar a diferença entre a receita líquida apurada no transporte de cargas entre terminais e, o custo de deslocamento de veículos vazios para reposicionamento, visando atender demandas futuras.

Uma importante restrição foi adicionada em relação ao modelo clássico usualmente utilizado para representar o problema, relevante do ponto de vista prático, pois considera que certos tipos de veículos não podem realizar determinadas rotas. Ela é particularmente importante quando uma empresa transportadora utiliza veículos agregados, terceirizados, nas suas linhas de transferência entre terminais, em que são também consideradas questões sobre a qualidade de vida do motorista, por possibilitar que o mesmo possa, de tempos em tempos, visitar seu domicílio de origem, onde vive a sua família, que muitas vezes está localizada em um município intermediário entre a origem e o destino da rota. Outros fatores como: locais específicos para manutenções do veículo, pontos para troca de motoristas, falta de conhecimento do percurso de certas rotas por parte de transportadores autônomos de cargas, oferta ou escassez de carga de retorno, condições físicas das rodovias *versus* condições de manutenção dos veículos, risco do percurso (ou rota) *versus* o valor limite (em unidades monetárias) permitido pela seguradora ao condutor, dentre outros, podem ser representados utilizando-se essa restrição.

A proposta do segundo modelo (modelo  $M_2$ ) foi resolver, além do problema de alocação e reposicionamento de veículos, também a avaliação das necessidades de frota requerida para que toda a demanda seja atendida. Esse modelo possui significativa importância prática, em que se deseja avaliar a quantidade de veículos de transferência necessários para operação, principalmente veículos de terceiros, uma vez que a rejeição de cargas não é algo comum na realidade prática do transporte rodoviário de cargas parceladas. Já o terceiro modelo (modelo  $M_3$ ) parte do modelo  $M_1$ , e incorpora uma restrição que diz respeito à capacidade de descarga de um dado terminal de destino em um certo período. Em termos práticos, os terminais de carga possuem uma quantidade finita de docas para descarga, e também de mão de obra para essa tarefa, sendo estes fatores críticos que, se não considerados, podem comprometer todo o planejamento operacional, pois interferem diretamente na disponibilidade da frota.

Nos modelos  $M_1$  e  $M_3$ , cargas podem ser rejeitadas por conta do posicionamento corrente dos veículos, e de parâmetros de receita líquida e custo. No caso do modelo  $M_2$ , pode haver uma super-estimativa das necessidades de frota, já que toda a demanda deve ser atendida no momento em que é solicitada. Sendo assim, foi proposto um quarto modelo (modelo  $M_4$ ), que, conforme o que ocorre na prática, permite que cargas não transportadas no período solicitado aguardem no terminal de origem (até um certo limite) por um veículo disponível para realizar a transferência para o terminal de destino. Foi criada uma nova variável para representar as cargas que permanecem em “*backlog*” devido ao não atendimento no período solicitado, e ainda, um parâmetro que representa uma

penalização por cargas não atendidas. Um aspecto importante do modelo  $M_4$  é que todas as cargas obrigatoriamente devem ser atendidas até o fim do período do horizonte de planejamento.

A proposta do último modelo matemático (modelo  $M_5$ ) foi o desenvolvimento de um modelo capaz de servir de apoio para o desenvolvimento de uma ferramenta de planejamento mais completa do ponto de vista operacional, mais ajustada as operações do TRC, por incorporar todos os importantes aspectos dos modelos anteriores, realizando a definição das necessidades de frota adicional para operação, permitindo o “*backlog*” de cargas, não havendo cargas rejeitadas, incorporando ainda a restrição de capacidade de descarga dos terminais de destino.

No Capítulo 5 são apresentados os experimentos computacionais realizados com os modelos  $M_1$ – $M_5$ , juntamente com os resultados obtidos nesses testes, utilizando problemas inspirados em situações reais de empresas transportadoras, e ainda problemas gerados aleatoriamente com tamanho e complexidade similares aos encontrados na prática. Os resultados com a aplicação dos modelos são apresentados juntamente com uma análise das soluções encontradas.

Em seguida, no Capítulo 6 são propostos métodos de solução baseados na utilização de heurísticas e metaheurísticas para o problema de alocação dinâmica de veículos, especificamente para o primeiro modelo proposto no Capítulo 4 (modelo  $M_1$ ). Inicialmente, foi desenvolvida uma heurística gulosa para a geração de soluções viáveis para o problema, e em seguida uma heurística de busca local, que serviu como procedimento de melhoria para soluções. Foi proposta ainda a utilização de três metaheurísticas para solução, sendo a primeira delas utilizando o GRASP, a segunda *simulated annealing*, e a última, colônia de formigas. Os experimentos computacionais realizados utilizaram as heurísticas e metaheurísticas para a solução de 540 problemas teste gerados aleatoriamente, possuindo tamanho e complexidade similares às encontradas na prática e são apresentados no Capítulo 7.

No Capítulo 8 é apresentado o processo de validação utilizado, para verificar a adequação dos modelos matemáticos propostos à prática de uma empresa transportadora de carga parcelada no Brasil. A metodologia utilizada consistiu em três fases básicas, sendo a primeira fase composta pela aplicação de um exemplo prático a um tomador de decisão (gerente de frotas de uma empresa transportadora de cargas parceladas), sendo a solução apresentada pelo tomador de decisão comparada com a solução ótima exata do problema proposto, seguindo de discussões e reflexões sobre a solução obtida.

Na segunda fase foi desenvolvido e aplicado um questionário estruturado a alguns

tomadores de decisão de uma empresa transportadora, cujo objetivo foi tentar capturar a opinião de profissionais com larga experiência profissional no setor de transporte de cargas, no que diz respeito à relevância do tema em estudo, a modelagem matemática e métodos de solução empregados, e finalmente a solução obtida com problemas teste inspirados na prática. A terceira e última fase da validação consistiu na aplicação de um questionário estruturado a um membro específico pertencente a uma equipe técnica da empresa parceira, que possui formação adequada para avaliar o modelo formal, os métodos de solução empregados e a qualidade das soluções obtidas.

No Capítulo 9 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros como continuidade da pesquisa.

## *2 O transporte de cargas no Brasil e o problema de alocação de veículos*

### **2.1 A importância do transporte de cargas**

A logística refere-se à gestão do fluxo de materiais e informações de um negócio, passando pelo canal de distribuição até o consumidor final (SLACK et al., 2002). A característica fundamental da logística é a visão integrada das atividades que a cerca: aquisição, gerenciamento de estoques, gerenciamento de transportes, gerenciamento da armazenagem e distribuição. A logística está interessada pela integração destas e outras atividades para agregar valor de tempo e espaço ao sistema ou corporação (GHIANI et al., 2003). Com a globalização das cadeias de suprimento na indústria varejista, existe um aumento da necessidade por entregas mais frequentes e mais rápidas, para menores quantidades e ao mínimo custo. Para reduzir seus custos logísticos, os clientes estão interessados em obter um melhor entendimento sobre os preços oferecidos pelo mercado do transporte rodoviário de cargas, e de fornecedores de operações logísticas pelos seus serviços. No Brasil, segundo Hijjar (2010) o número de Prestadores de Serviços Logísticos (PSL) saltou de 35 em 1997 para 168 em 2008.

O transporte de cargas parceladas é um modo de transporte que atende a essas necessidades de entregas fracionadas, regulares e de baixo custo. Essa atividade, LTL - “*less-than-truckload*”, utiliza uma rede de transportes com terminais para consolidação de cargas, transporte de transferência, TL - “*truckload*”, entre terminais, desconsolidação e entrega das cargas parceladas. Essas instalações e operações incorrem em custos altos de manuseio e planejamento. O preço do frete é usualmente apresentado em tabelas específicas pelo tipo de carga a ser transportada, ou do item de maior representatividade no *mix* de produtos do cliente, considerando-se a origem e destino da carga, a classificação do tipo de serviço (exemplo, urgente ou comum), valor da mercadoria e seu peso. Nos EUA, a

titulo de ilustração, a desregulamentação da indústria do transportes (LTL) trouxe a uma consequente complexidade tarifária, com inconsistências nos preços. Segundo Caracik-Jr (2010) o custo do sistema logístico declinou 18,2% em 2009. No ano da crise, a atividade de transporte caiu mais de 20% em todos os modais, e em termos de volume, a queda foi de 8,7% sobre os números de 2008.

As necessidades dos clientes e dos transportadores são desafiantes, contudo compatíveis. Esses objetivos conflitam em parte com os dos motoristas que estão interessados com a segurança nas estradas e a qualidade de vida, e possuem o desejo de retornar aos seus domicílios mais frequentemente. Estes conflitos de objetivos têm levado a indústria de transporte de cargas a desenvolver estratégias de despacho que tendem a otimizar seu lucro no gasto com o retorno aos domicílios, o que impacta também na alocação de veículos vazios. Nos EUA, o excessivo *turnover* (taxa de substituição de trabalhadores antigos por novos de uma organização) na categoria motoristas tem se agravado nos últimos 20 anos após a desregulamentação do setor de transporte de carga, através do “*Motor Carrier Act*” de 1980 (CALISKAN; HALL, 2003). A taxa de *turnover* no primeiro quadrimestre de 2008 nos EUA foi de 103% para transportador TL de grande porte, e 80% para pequenos transportadores TL (SUZUKI et al., 2009). No Brasil não foi possível identificar fontes atualizadas sobre o *turnover* da categoria motorista.

Nos EUA, 18% dos movimentos diários de caminhões são vazios (LIU et al., 2010). O problema de minimização de viagens vazias pode levar ao conflito com os objetivos dos motoristas. Para os carreteiros autônomos há o desejo de uma alta utilização do veículo devido ao recebimento por quilômetro percorrido, mas desejam também viagens mais curtas devido ao retorno ao domicílio. A maximização da utilização dos veículos e a minimização do reposicionamento de vazios, apesar de serem problemas complexos, é uma necessidade na gestão de transportes de cargas.

Nos dias atuais, expedidores de cargas e transportadores estão buscando por alternativas mais eficientes às exigências do mercado competitivo, às alterações nos custos de combustíveis, prêmios de seguros, e um transporte mais adequado às questões ambientais. Juntos, têm desenvolvido várias estratégias para melhorar a eficiência de suas operações internas com foco na redução de custos operacionais individuais, entre elas o transporte colaborativo (LIU et al., 2010). “É preciso juntar os participantes da mesma cadeia logística ou embarcadores que ofereçam cargas complementares, ou seja, cargas compatíveis com o equipamento de transporte disponível na rota complementar, gerando a carga de retorno” (BOTTER et al., 2006). No caso de pequenas e médias empresas, elas são importantes com-

ponentes de concentrações e redes de negócios e, juntas, podem se unir para adotar ações de gestão colaborativa e compartilhada do transporte, no intuito de eliminar ineficiências do planejamento e da execução do transporte individual (MARTINS et al., 2010). Segundo Hill (2009), a prática do transporte colaborativo, através da troca de informações com transportadores e entre unidades operacionais e a administração de conflitos via acordo de nível de serviços pode ser realizada pela entidade conhecida como Central de Tráfego ou em inglês *Load Control Center*.

O problema de desbalanceamento de cargas relativas ao TRC entre as várias regiões brasileiras apresenta-se como fator relevante nos objetivos para a redução de custos operacionais e vantagens competitivas decorrentes. O “frete de retorno” geralmente não cobre os custos totais - despesas indiretas, fixas e variáveis da empresa de transportes. Quase sempre, o frete de retorno cobrado somente cobre as despesas com combustível, pneus, lubrificação e peças, o que pode levar a grandes prejuízos. Se o retorno é sempre vazio, o frete deve cobrir tanto o percurso de ida como o de retorno, inclusive os pedágios do retorno. Esta prática é usual, por exemplo, para transportes de automóveis zero quilômetro e transporte de combustível, pois o tipo de carroceria não tem flexibilidade na acomodação de outro tipo de carga. No Brasil, por determinação legal do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), os tanques não podem transportar carga seca. Segundo Gonçalves et al. (2010), para outros tipos de mercadorias, cerca de 60% das viagens de volta a origem são realizadas vazias, com a defasagem de frete em torno de 42% no total da remuneração de ida e volta. Um breve histórico do transporte de cargas no Brasil é apresentado no Anexo A.

## 2.2 Contextualização para o problema

### 2.2.1 Transporte rodoviário de cargas no Brasil

O Transporte Rodoviário de Carga no Brasil gira em torno de 7,5% do Produto Interno Bruto (PIB), próximo de 30 bilhões de dólares por ano (VALENTE et al., 2008). A título de ilustração, nos EUA o transporte representou 9,8% do GNP- *Gross National Product*<sup>1</sup>.

Segundo a Lei No 11.442 de 5 de janeiro de 2007, o TRC no Brasil opera em regime de livre concorrência, e o transportador depende de prévia inscrição no Registro Nacional de Transportadores Rodoviários de Cargas (RNTRC) que é a certificação, de porte obrigatório, para a prestação do serviço de transporte rodoviário de carga, na forma re-

<sup>1</sup>consulta em 4/12/2010 - <http://www.uschamber.com/reports/transportation-challenge>

<b>MATRIZ DO TRANSPORTE DE CARGAS</b>		
<b>MODAL</b>	<b>MILHÕES (TKU)</b>	<b>PARTICIPAÇÃO (%)</b>
Rodoviário	485.625	61,1
Ferroviário	164.809	20,7
Aquaviário	108.000	13,6
Dutoviário	33.300	4,2
Aéreo	3.169	0,4
<b>Total</b>	<b>794.903</b>	<b>100</b>

Figura 2.1: Matriz do transporte de cargas (CNT, 2010)

gulamentada pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). A título de ilustração, as categorias no RNTRC são: Transportador Autônomo de Cargas (TAC); Empresa de Transporte Rodoviário de Cargas (ETC) e Cooperativas de Transporte de Cargas (CTC). Ao Transportador da Carga Própria (TCP) é vedada a inscrição no RNTRC. A Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) é responsável pela regulamentação e fiscalização dos serviços prestados pelos transportadores, objetivando expandir e qualificar o setor. Como pode ser visto na Figura 2.1, o transporte rodoviário de cargas participa em 61,1% do total de cargas transportadas no Brasil, segundo pesquisa realizada pela CNT (Confederação Nacional do Transporte).

## 2.2.2 Operações no transporte rodoviário de cargas

Segundo Valente et al. (2008), o TRC no Brasil apresenta apenas 43% de ocupação de sua capacidade total. O caminhão médio é o campeão da ociosidade, enquanto o caminhão extra-pesado, com capacidade superior a 40 toneladas, destaca-se por ser o mais utilizado (com sobrecarga, em média, de 3,4 toneladas a mais do que seu peso ideal, em quase 60% das viagens). A demanda por serviços de uma transportadora não é estável ao longo do tempo, independente da área de atuação e da finalidade dos serviços que executa. As oscilações no mercado podem implicar na utilização de uma quantidade de veículos diferentes daquela dimensionada. Como, por exemplo, a contratação de veículos de terceiros, ampliando assim a capacidade estática de transportes, buscando preservar a produtividade e evitar um aumento significativo nos custos, mantendo nível de serviço.

O custo fixo de um veículo tipo *truck*, com eixo traseiro adicional e 12.000 kg de

capacidade de carga, é aproximadamente 17% menor, quando operado por um carreteiro, em relação à operação correspondente com a frota própria. O custo variável, por sua vez, é 21% menor (VALENTE et al., 2008). As operações de frotas estão ligadas diretamente ao gerente de tráfego, e os problemas a serem solucionados no planejamento e programação da operação são de elevada complexidade e envolvem questões relacionadas, a roteirização, alocação de frota e programação da tripulação, entre outras. Tudo isso conciliando racionalização, economia, segurança, com prazos de entrega, legislação trabalhista, tabelas de horários, veículos disponíveis, etc.

Terminais de cargas, são centralizadores de cargas de diversos clientes através das operações de coleta e recepção das mercadorias. Nestes terminais ocorrem consolidações de cargas, facilitando assim que se formem carregamentos complexos maiores. Estes carregamentos são transferidos para outros centros de distribuição, para posterior entrega aos destinatários. No transporte de transferência são comumente utilizados veículos de maior capacidade, usualmente caminhões do tipo *truck* ou cavalos/carretas com capacidade de carga na faixa de 18.000 a 25.000 kg. A proposta em se operar em “*cross docking*”, (operação de transferência direta de cargas das docas de recebimento para as docas de expedição, dentro de terminais de cargas, (ASLOG, 2009)), favorece a consolidação de diferentes tamanhos de carregamentos com o mesmo destino por veículos de cargas cheios. Este transporte de cargas completas entre terminais (*truckload* ou TL) é escopo deste trabalho. Em grandes empresas (*less-than-truckload* ou LTL) é necessário manter frequências regulares entre os terminais. A proliferação de *websites*, e o contínuo aumento de volume de atividades de consumo individuais, estão contribuindo para a transformação da indústria de transporte de carga. Destaque aos requerimentos de intensificação do valor percebido pelos clientes através da redução dos custos de transportes e distribuição, e resposta às necessidades dos clientes em termos de prazo de entrega e confiabilidade (CRAINIC et al., 2009). As operações planejadas do transporte entre os terminais (TL) nas empresas de carga parcelada tornam-se cada vez mais importantes à medida que os requerimentos se acentuam, em um mercado cada vez mais competitivo.

## 2.3 Descrição e delimitação do problema

Os clientes contratam não somente o transporte entre localidades, mas também o cumprimento do prazo de entrega, e o fornecimento de informações rápidas e precisas. Isso faz com que as empresas do TRC tenham que investir em instalações, frota, sistemas (*softwares*), equipamentos, contratações de colaboradores mais experientes e técnicos. O



Figura 2.2: Distribuição do PIB brasileiro para cada estado do país

gerenciamento correto dos custos, a aplicação eficaz dos recursos, e a gestão de pessoas (com ênfase aos motoristas), é de fundamental importância para a sustentabilidade e perenização de empresas do TRC.

Diante desse cenário competitivo, uma motivação para esta pesquisa foi a necessidade de gestão mais analítica e técnica nas empresas de TRC, com foco no problema de alocação de veículos vazios, nas operações de transferências entre terminais, de maneira a minimizar o custo decorrente dessa operação. A necessidade de se realocar veículos deve-se principalmente ao fato de que no Brasil temos regiões com diferentes desenvolvimentos e vocações econômicas e produtivas, o que gera o trânsito de veículos cheios em uma direção e vazios no retorno à base origem do veículo. A Figura 2.2, do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), apresenta o PIB brasileiro por estado, o que aponta o desbalanceamento produtivo das regiões. Por consequência a demanda por transporte segue aproximadamente essa mesma distribuição.

Comumente, uma empresa do TRC no Brasil, seja atuando somente no transporte doméstico, seja também atuando no Cone Sul, possui um fluxo operacional básico para prestação de serviços de transportes de carga parcelada, esquematizado na Figura 2.3.

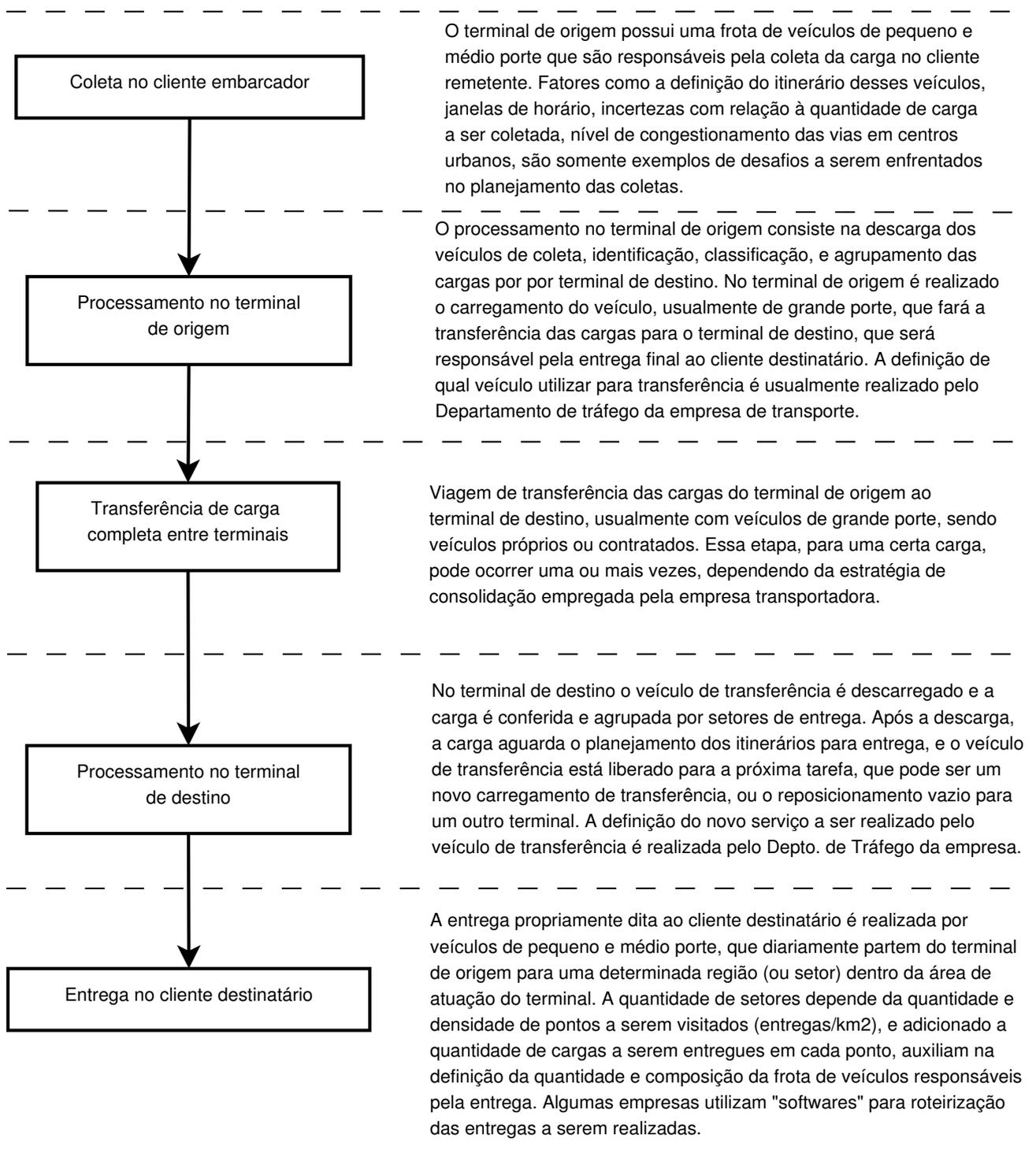


Figura 2.3: Fluxograma macro de uma empresa transportadora de cargas parceladas.

As operações do tráfego dos veículos de longo curso são quase sempre centralizadas na matriz, no setor de tráfego. Esse setor contrata carreteiros e gerencia a frota própria e motoristas, monitorando a movimentação dos veículos através das tecnologias atuais disponíveis como, por exemplo, o monitoramento via satélite GPS (*Global Positioning System*). É comum o setor de tráfego realizar o planejamento dos deslocamentos dos veículos levando-se em conta as particularidades dos motoristas da frota própria, como, por exemplo, a necessidade de retorno ao domicílio. No caso do transportador autônomo de cargas (TAC), quando o proprietário é o motorista do equipamento, a administração é bastante similar a do motorista contratado pela empresa como funcionário, exceto ao fato de que esse motorista (TAC) precisa honrar os compromissos com pagamentos decorrentes do uso do veículo e, portanto, sujeita-se à jornada de trabalho mais longa e muitas vezes prejudicial a todos, como ele próprio, sua família e terceiros envolvidos em acidentes nas estradas.

O segmento de transporte de cargas completas (TL) está incluído na classe de empresas transportadoras de cargas pelo modal rodoviário (TRC), operando em vários segmentos tais como o transporte de carga líquida, de produtos perecíveis, o transporte de cargas perigosas, entre outras. Contudo, este estudo refere-se ao segmento de transporte de carga conhecido no mercado como transporte de carga seca e encomendas (carga parcelada). Mais especificamente, o transporte de cargas completas (viagens de transferências entre terminais) desse segmento. Nessas empresas o compromisso no cumprimento de prazos de entrega é mais crítico, sendo praticado muitas vezes por clientes embarcadores um ônus financeiro pelo atraso ocorrido por responsabilidade da empresa de transporte e, em contrapartida, um bônus financeiro decorrente de um desempenho acima do estabelecido como meta. Índices de cumprimento de prazos de entrega acima de 98% são bastante comuns. Portanto, a gestão do tráfego e das operações como um todo, precisa estar atenta ao gerenciamento dos recursos disponíveis, considerando os prazos acordados com os clientes, lembrando ainda que em muitos casos a antecipação das entregas constitui também um problema para diversos clientes, sendo o transportador penalizado de forma similar aos casos de atrasos.

Dada a flutuação da demanda por transporte em determinados períodos do mês, e em determinados meses do ano, questões do tipo: (i) inclusão de frota própria (aquisição) ou frota contratada e (ii) melhorias em instalações de terminais de cargas, não são fáceis de serem implementadas a curto prazo. Problemas como a demora na entrega de veículos e equipamentos adquiridos, atrasos nas liberações de motoristas por parte de empresas reguladoras de sinistros, e questões técnicas como, por exemplo, a instalação e operação

de rastreadores via satélite, são comuns nas contratações do TAC. Melhorias em terminais podem ser de ordem física, como obras de ampliações, pátios e acesso, mudança física, contratações de equipes adicionais, entre outros.

Conforme mencionado no capítulo anterior, o presente trabalho tem como objetivo estudar a alocação dinâmica (multi-períodos) de veículos responsáveis pelas transferências de cargas completas entre terminais, e propor métodos de solução, através do uso de técnicas de pesquisa operacional, verificando a adequação das soluções obtidas em um caso real de uma típica empresa transportadora de cargas no Brasil. É dado enfoque no desenvolvimento de modelos determinísticos que consideram simultaneamente as operações de transporte de transferência de cargas entre terminais, uma demanda conhecida ou prevista, em um determinado horizonte de planejamento com múltiplos períodos, decisões de alocação de veículos (vazios) visando otimizar o uso dos recursos, e no dimensionamento da quantidade de veículos necessários para atender toda a demanda, garantindo ainda a qualidade esperada, muitas vezes traduzida no cumprimento do prazo de entrega acordado, ao menor custo possível. Diante da relevância do setor de transporte de cargas na economia, em especial em um país de dimensões continentais como o Brasil, com grandes projeções econômicas, potencial de desenvolvimentos e melhorias, o mercado cada vez mais exigente, concorrência mais presente, agravamento do trânsito, altos riscos envolvidos nas atividades e margens de lucros vulneráveis às flutuações de demanda e de custos, motivou a olhar o cotidiano do TRC no Brasil.

A adequação dos modelos matemáticos desenvolvidos é verificada por meio de informações reais fornecidas por uma empresa típica do TRC. Essa empresa busca ferramentas de suporte para otimizar a utilização da frota de veículos existente. Nesta empresa os custos envolvidos nesse problema de reposicionamento de veículos vazios ocorre aproximadamente entre um quarto e um terço da quantidade das viagens entre terminais e centros de distribuição. Dada a magnitude e complexidade do assunto, a empresa em questão mostrou-se interessada neste estudo, apoiando e colaborando com a pesquisa, fornecendo dados para testes, informações detalhadas da operação atual, discutindo restrições importantes a serem consideradas, e participando do processo de validação das abordagens propostas.

## *3 Revisão Bibliográfica*

O problema de alocação dinâmica de veículos surge em uma variedade de situações que envolvem o gerenciamento de uma frota de veículos ao longo de um dado período de tempo, possuindo aplicações no transporte rodoviário de cargas, no transporte ferroviário, e no transporte marítimo, com o reposicionamento de contêineres vazios. No transporte aéreo encontrou-se alguns poucos artigos publicados, porém sem relação objetiva com os aspectos considerados nesta pesquisa, motivo pelo qual não foram referenciados na revisão bibliográfica. Aplicações similares podem também ser encontradas no gerenciamento de uma frota de táxis, e no aluguel de veículos, especialmente no caso particular de locação para somente um único percurso. Neste capítulo é apresentada uma revisão dos trabalhos desenvolvidos relacionados ao problema de alocação dinâmica de veículos, envolvendo a distribuição e reposicionamento de veículos vazios. A revisão foi separada em aplicações nos modais rodoviário, ferroviário e marítimo, respectivamente. Para simplificar a revisão apresentada foi adotada a ordem cronológica destacada da literatura por cada modal de transporte.

### **3.1 Aplicações no transporte rodoviário de cargas**

Para o transporte rodoviário de cargas, um dos primeiros problemas estudados na literatura foi o problema de alocação dinâmica de veículos para o gerenciamento de uma grande frota de caminhões. Powell et al. (1984) foi um dos trabalhos pioneiros na literatura que estudou o problema de alocação dinâmica de veículos para o transporte rodoviário de cargas. Foi apresentado um modelo dinâmico não-linear, levando em conta as incertezas nas previsões de demanda.

Powell (1986) refinou e estendeu o modelo apresentado em Powell et al. (1984) e incorporou incertezas na quantidade de veículos mantidos em estoque, permitindo que veículos ociosos permanecessem em estoque, e também acompanhando tanto o movimento de veículos cheios como vazios. Esse estudo também tratou do problema da alocação dinâmica

de veículos assumindo a demanda como incerta. As decisões comumente tomadas nesse problema consistem basicamente na definição da movimentação de veículos carregados, vazios ou mantidos em “estoque”. Estas decisões foram representadas em uma rede espaço-tempo, onde cada nó  $i$  representou uma região em um dado ponto no tempo. Os arcos dessa rede foram utilizados para representar os três possíveis movimentos dos veículos: (i) cheios, (ii) vazios, e (iii) em estoque. Dada a estrutura da função objetivo e do conjunto de restrições resultante, Powell (1986) utilizou o algoritmo de Frank-Wolfe, o qual, segundo o autor, se mostrou útil particularmente no campo de otimização de redes estocásticas. A principal razão para a facilidade na sua utilização é que, uma vez que a função objetivo é linearizada, ela se decompõe em um conjunto de subproblemas que podem ser resolvidos de forma simples, um para cada nó da rede. O método de gradiente reduzido de Frank e Wolfe (1956) é um método iterativo para programação não linear, e foi proposto para a solução de problemas de otimização quadrática, podendo também ser utilizado para a solução de problemas não lineares que não precisam ter necessariamente a estrutura quadrática.

No trabalho de Dejax e Crainic (1987) foi estudado o problema de movimentação de veículos vazios no transporte de cargas. Eles propuseram uma taxonomia para o problema de fluxo de veículos vazios, fazendo ainda uma ampla revisão da literatura existente para o tema. Powell (1987) apresentou um modelo alternativo que pode ser usado em ambiente operacional, na determinação de como gerenciar uma frota de veículos, antecipando as consequências das decisões tomadas. Ele descreveu um mecanismo de programação de veículos em tempo real num ambiente de incertezas. As decisões que devem ser tomadas são aquelas que aceitam ou rejeitam determinadas cargas por meio de análise da margem de contribuição em enviar veículos vazios em atendimento à uma demanda futura, ou aguardar em uma determinada região de um período a outro.

Powell (1988) revisou o problema de alocação dinâmica de veículos no contexto de transporte de cargas completas por caminhões, com atenção especial ao despacho e reposicionamento de caminhões em antecipação a demandas futuras previstas. Ele revisou quatro diferentes metodologias: (a) Redes de transporte determinísticas; (b) Redes não lineares estocásticas; (c) Processos de programação estocástica e (d) Processos de decisão markovianos. Ele comentou que os modelos determinísticos, apesar de serem mais simples, são viáveis na prática. Também apresentou modelos de rede de transporte determinística divididos entre: modelo de um único estágio, consistindo em uma simplificação para o problema de designação em transportes, não realizando o planejamento para múltiplos períodos; e modelo dinâmico, que explicitamente localiza/dispõe caminhões e cargas ao

longo de um horizonte de planejamento. Uma grande vantagem do modelo de um único estágio é a incorporação do alto nível de detalhe sobre a localização e características dos veículos. Um ponto fraco dessa abordagem é que, devido a sua representação simplificada, tratando somente um único período, limita o reposicionamento correto de veículos vazios entre regiões.

O problema de alocação dinâmica estudado por Powell (1988) considera o diagrama espaço-tempo, em que cada nó representa uma região num ponto particular no tempo. Três alternativas de ligação foram consideradas: cargas conhecidas, onde o coeficiente de custo é mínimo na contribuição daquela carga, movimento de vazios, com um custo igual de região para região (custo de reposicionamento de vazios) e cargas previstas, com um coeficiente de custo igual ao mínimo da média histórica da contribuição direta.

Powell et al. (1988) apresentaram uma aplicação prática em uma transportadora de carga completa nos Estados Unidos, tratando não somente o problema de alocação dinâmica de veículos como em Powell (1988), mas também o problema de alocação de motoristas, incorporando incertezas na demanda futura por transportes. Foi desenvolvida uma ferramenta chamada pelos autores de LOADMAP, responsável por combinar em tempo real informações sobre os veículos e cargas com um modelo elaborado de previsão de demanda e de atividade dos veículos, com o objetivo de maximizar a lucratividade e o nível de serviço. Com esse novo sistema, foi estimado um aumento no lucro anual da empresa de cerca de US\$ 2,5 milhões na época.

Frantzeskakis e Powell (1990) estudaram o problema estocástico de alocação dinâmica de veículos, tratando as incertezas de demanda, e modelaram matematicamente como um problema de programação estocástica. Os autores desenvolveram uma nova heurística para solução do problema e compararam os resultados obtidos com várias aproximações determinísticas. Foram apresentados os resultados computacionais obtidos empregando um procedimento de horizonte rolante para simular a operação de um transportador, em um horizonte de planejamento de 12 períodos e o tamanho da frota variando de 100 a 1.500 veículos, obtendo resultados satisfatórios, superando o algoritmo proposto em Powell (1986).

O modelo matemático de Frantzeskakis e Powell (1990) possui uma função objetivo não linear, admitida como côncava dos fluxos esperados, e que maximiza a diferença entre a contribuição média (receita menos custos operacionais diretos), e o custo de deslocamento de veículos vazios. Os autores fizeram o uso do algoritmo de Frank-Wolfe para resolver a forma condicional da rede do problema para valores dados de variância.

Os resultados obtidos com os experimentos computacionais realizados em Frantzeskakis e Powell (1990) indicaram que: (i) o procedimento consistentemente convergiu para um ponto fixo, contudo a solução final obtida foi de alguma forma dependente do ponto inicial da busca; (ii) apesar do procedimento convergir para diferentes pontos fixos, as diferenças entre os valores da função objetivo foram pequenas; (iii) quando o procedimento foi iniciado, partindo de uma boa estimativa razoável da variância da quantidade de veículos ofertados, o procedimento consistentemente convergiu para soluções que estão em uma vizinhança relativamente pequena e com pequenas diferenças nos valores da melhor solução encontrada.

Braklow et al. (1992) apresentaram um modelo interativo de otimização em larga escala, chamado pelos autores de SYSNET, com objetivo de definir o roteamento da carga parcelada em uma rede de transporte, e também o reposicionamento de veículos vazios para responder ao desbalanceamento da demanda. O modelo foi aplicado com sucesso em uma empresa americana de transporte rodoviário de carga parcelada, *Yellow Freight*.

Powell et al. (1995) aprofundaram e estenderam o estudo do problema de alocação dinâmica de veículos e suas diversas variações para os modais rodoviário, ferroviário, aéreo, e também para o caso de reposicionamento de contêineres. Segundo esses autores, o objetivo básico da alocação dinâmica de veículos é gerar lucro no transporte de cargas completas (não considera consolidação de carga). Transportar uma carga significa que um veículo deve mover-se de uma cidade a outra, onde o veículo após descarregado deverá ser designado para uma nova carga. Três tipos de atividades dos veículos são consideradas: movimento cheio, movimento vazio e aguardando (sem operação). Movimento vazio deve ser dividido entre movimento vazio para satisfazer uma demanda atual e para satisfazer um demanda prevista. Os autores apresentam ainda uma formulação básica do problema, expressa como uma rede dinâmica para um único tipo de veículo, e também para múltiplos tipos de veículos.

Powell (1996) revisou o problema de designação dinâmica aplicado nas áreas de logística e transporte. O trabalho foca no transporte de longa distância com designações de veículos a cargas em tempo real. Faz um breve histórico da evolução científica de problemas de alocação dinâmica de veículos, modelos dinâmicos determinísticos e modelos dinâmicos estocásticos, para tempo de viagem único e multi-períodos. Apresentou um modelo híbrido para combinar as melhores características dos modelos apresentados e incluiu um teste experimental, com o uso de um simulador denominado pelos autores

de MIDAS (*Micro Dispatch and Simulation*).

Powell e Carvalho (1998a, 1998b) modificaram a formulação introduzida por Powell et al. (1995) para tratar um problema de gerenciamento de frota, chamado de *Logistics Queueing Network* (LQN). Apresentaram soluções com desvios mínimos do ótimo global, com maior flexibilidade para representar situações reais, superando *softwares* genéricos para solução de problemas de programação linear. A solução é iniciada com uma formulação clássica de programação linear que, então, é reformulada como um problema de programação dinâmica.

Hall (1999) desenvolveu métricas/dimensões para o desbalanceamento espacial e temporal nos fluxos de carga e estudou a aplicação dessas métricas para uma rede de transporte rodoviário. Na rede de terminais considerada, o desbalanceamento no transporte de longa distância e o fluxo total de movimentos de equipamentos vazios foi equivalente ou superior a 13,3% do fluxo total de equipamentos carregados da rede em terminais individuais, e 8,2% do fluxo total do movimento de equipamentos carregados na rede em grupos de terminais. Devido ao desbalanceamento nas curtas distâncias, o número de movimentos de vazios poderia aumentar em torno de 50% sobre a média da longa distância.

Hall (1999) desenvolveu ainda métodos para dimensionar fluxos desbalanceados e aleatórios em uma rede de transportes, e discutiu as implicações dos custos de desbalanceamento. As medidas são aplicadas sobre ambos: terminal individual e conjunto de terminais, bem como para avaliar os efeitos ou riscos associados aos grupos de terminais. As métricas foram aplicadas com base de dados representando todos os carregamentos ocorridos nos EUA durante o período de uma ano de uma das maiores empresas de transporte rodoviário de cargas parceladas. As métricas desenvolvidas são de natureza estatística, e não utilizaram algoritmos de otimização em rede. Elas foram planejadas para fornecer de forma relativamente rápida uma avaliação da significância do desbalanceamento na rede. Elas foram planejadas para serem um precursor ao processo de otimização.

Utilizando dados da maior empresa de transporte de carga parcelada dos EUA, Hall (1999) propôs uma análise empírica a fim de avaliar a magnitude dos desbalanceamentos dos custos em uma rede real e desenvolver um modelo de probabilidades para ser usado em análises futuras. Ele concluiu que a aleatoriedade inerente em sistemas de terminais foi atenuada pelo agrupamento de fluxo de cargas entre grupos de terminais e pelo agrupamento de fluxos de cargas sobre longos períodos. Outra conclusão interessante é a de que a distribuição gama de probabilidade fornece uma boa representação dos fluxos de carga entre terminais por período.

Hall e Zhong (2002) investigaram métodos de controle descentralizados para o gerenciamento de equipamentos no transporte de cargas parceladas. O desempenho foi medido no que diz respeito a: (i) custo de se mover equipamentos vazios, (ii) custo de propriedade dos equipamentos, e (iii) pedidos atrasados devido a falta de equipamentos. A proposta básica possuiu duas etapas: resolver um programa linear para determinar onde obter veículos vazios, e reprogramar os pedidos para determinar quando mover um equipamento vazio.

Ghiani et al. (2003) apresentam o problema de alocação de veículos (*Vehicle Allocation Problem* - VAP), um modelo matemático para representar o problema (originalmente apresentado em Powell et al. (1995)), porém de forma mais didática, alterando algumas nomenclaturas de variáveis e fornecendo um exemplo didático (problema exemplo: empresa *Murty*) para estudo. Dada a sua importância para o entendimento do problema em estudo neste trabalho, segue o detalhamento da formulação apresentada em Ghiani et al. (2003). Esses autores utilizaram os seguintes conjuntos, parâmetros e variáveis para representar o VAP:

### Conjuntos

- $N \rightarrow$  conjunto de terminais da rede de transporte.
- $T \rightarrow$  conjunto de períodos do horizonte de planejamento.

### Parâmetros

- $\tau_{ij}$  : tempo de viagem de  $i \rightarrow j$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ .
- $d_{ijt}$  : demanda por serviços de transporte (em número de veículos cheios) entre  $i$  e  $j$  no período  $t$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $t \in T$ .
- $p_{ij}$  : lucro (receita - custos operacionais diretos) obtida ao se realizar a rota de  $i$  para  $j$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ .
- $c_{ij}$  : custo de deslocamento vazio de veículos de  $i$  para  $j$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ .
- $m_{it}$  : quantidade de veículos que entram no sistema no terminal  $i$  no período  $t$ ,  $i \in N$ ,  $t \in T$ .

### Variáveis

- $X_{ijt}$  : fluxo (isto é, número) de veículos cheios usados para satisfazer a demanda entre  $i$  e  $j$  no período  $t$ ,  $d_{ijt}$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $t \in T$ .
- $Y_{ijt}$  : fluxo (isto é, número) de veículos vazios deslocados de  $i$  para  $j$  no período  $t$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $t \in T$ .

O modelo apresentado em Ghiani et al. (2003) pode ser escrito como:

$$\text{máx } \mathcal{Z} = \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} (p_{ij} X_{ijt} - c_{ij} Y_{ijt}) \quad (3.1)$$

sujeito às restrições:

$$\sum_{j \in N} (X_{ijt} + Y_{ijt} - \sum_{\substack{k \in N \\ k \neq i \\ t > \tau_{ki}}} (X_{kit - \tau_{ki}} + Y_{kit - \tau_{ki}})) - Y_{ii(t-1)} = m_{it}, \quad \forall i \in N, t \in T, \quad (3.2)$$

$$X_{ijt} \leq d_{ijt}, \quad \forall i \in N, j \in N, t \in T, \quad (3.3)$$

$$X_{ijt} \geq 0, \quad \forall i \in N, j \in N, t \in T, \quad (3.4)$$

$$Y_{ijt} \geq 0, \quad \forall i \in N, j \in N, t \in T. \quad (3.5)$$

A função objetivo (3.1) representa o lucro total descontados os custos de reposicionamento de veículos vazios. A restrição (3.2) impõe a conservação de fluxo no início de cada período, enquanto a restrição (3.3) assegura que o número de movimentos carregados seja menor ou igual à demanda. É interessante notar que as diferenças  $d_{ijt} - X_{ijt}$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $t \in T$ , representam as cargas que devem ser rejeitadas, enquanto que as variáveis  $Y_{iit}$ ,  $i \in N$ ,  $t \in T$ , representam os veículos que permaneceram ociosos, movimentos estes também conhecidos como de estoque. O estudo do modelo e problema exemplo apresentados em Ghiani et al. (2003) foram um ponto de partida importante para o desenvolvimento desta pesquisa, e são revisados no Capítulo 4.

Convém salientar que, como os parâmetros  $\tau_{ij}$ ,  $m_{it}$  e  $d_{ijt}$  são supostos números inteiros, pode ser mostrado que a solução do problema de programação linear (3.1)-(3.5) resulta em valores sempre inteiros para as variáveis  $X_{ijt}$  e  $Y_{ijt}$ , dado que o problema pode ser visto como um problema de fluxo em rede. Desta maneira, embora as variáveis sejam inteiras, elas não precisam ser declaradas como tal, devido à característica e proprieda-

des do problema de programação linear inteiro envolvido, que resulta num problema de programação linear.

### 3.1.1 Conclusões sobre os trabalhos desenvolvidos para o TRC

Até onde pôde-se levantar, foram desenvolvidos alguns trabalhos para o modal rodoviário, sendo que a maioria dos autores incorporou nos modelos matemáticos a incerteza na demanda por cargas a serem transportadas. De forma geral, o problema a ser resolvido foi no nível de decisão operacional, voltado para a prática do dia a dia de uma empresa transportadora de cargas, tendo ainda alguns trabalhos apresentado resultados de aplicações práticas em empresas transportadoras de cargas nos Estados Unidos. Foram ainda propostos modelos matemáticos não lineares, como por exemplo modelos em que a função objetivo é côncava. Com relação aos métodos de solução empregados, certos trabalhos aplicaram técnicas de otimização estocástica, simulação e o desenvolvimento de heurísticas. Não foi encontrado na literatura nenhum trabalho que estudou a alocação de veículos juntamente com o dimensionamento da frota no nível de decisão operacional. Também não foi encontrado nenhum estudo aplicando estas técnicas para resolver esses problemas no transporte rodoviário de cargas no Brasil.

## 3.2 Aplicações no transporte ferroviário

Sendo um dos modais mais antigos, o transporte ferroviário sempre foi tema de pesquisas na área de otimização. Um dos principais desafios tem sido no gerenciamento eficaz de uma grande frota de vagões. Feeney (1957), Leddon e Wrathall (1967), Gorenstein et al. (1971), Herren (1973) e Herren (1977) são exemplos de trabalhos iniciais no esforço de otimizar uma frota de vagões. White e Bomberault (1969) utilizaram a estrutura dinâmica da rede para desenvolver um algoritmo especializado, sendo este um dos primeiros esforços para a solução do problema. Misra (1972) representou o problema como um problema de programação linear, enquanto White (1972) apresentou uma rede de transbordo dinâmica sobre um horizonte de planejamento finito.

Mendiratta (1981) e Mendiratta e Turnquist (1982) apresentaram modelos de estoque para o gerenciamento de vagões vazios, levando-se em conta a natureza descentralizada do processo de tomada de decisão. Jordan e Turnquist (1983) apresentaram o primeiro modelo estocástico para o problema do gerenciamento de vagões vazios. Ratcliffe et al. (1984) utilizaram um modelo de simulação para o estudo do reposicionamento de vagões

vazios, enquanto Glickman e Sherali (1985) estudaram o problema de agrupamento de uma frota de vagões vazios, considerando que no modal ferroviário existe o compartilhamento de vagões.

Crainic et al. (1984) estudam o problema de roteamento de cargas, programação de trens e alocação de serviços de classificação entre pátios em uma rede de transporte ferroviário, incluindo também o reposicionamento de vagões vazios. Foi descrito um modelo geral de otimização que levou em conta a interação entre essas atividades, desenvolvendo uma estratégia de gerenciamento em um horizonte de planejamento de médio prazo. Foi desenvolvida uma heurística para resolver o problema, modelado como um problema não linear de programação inteira mista de fluxos *multicommodity* (isto é, multi-fluxos), para uma empresa de transporte ferroviário no Canadá. Shan (1985) utilizou um modelo de rede dinâmica com fluxos *multicommodity* para a consideração de múltiplos tipos de veículos, utilizando a diretiva de decomposição de recursos para resolver a rede resultante. Chih (1986) estendeu esse modelo para também levar em conta múltiplas ferrovias.

Foram publicados ainda trabalhos que vão além do problema de gerenciamento de vagões vazios. Haghani (1989) apresenta um modelo combinado para a composição de trens e reposicionamento de vagões vazios, sendo um dos primeiros esforços para tratar simultaneamente o fluxo de vagões carregados e vazios. No trabalho de Chih et al. (1990) foi tratado também o gerenciamento de locomotivas. Kraay et al. (1991) estudaram o problema do gerenciamento dinâmico da movimentação de trens em uma linha ferroviária, o qual requer a otimização do uso de linhas laterais para permitir a passagem de trens.

Beaujon e Turnquist (1991) propõem um modelo matemático para tratar simultaneamente problemas de alocação dinâmica de veículos com problemas do dimensionamento da frota para o atendimento da demanda. Todos os trabalhos anteriormente desenvolvidos que trataram do problema da alocação dinâmica de veículos assumiam a quantidade de veículos a ser utilizada como um dado do problema, e focaram no uso eficiente desta quantidade fixa de veículos. O modelo proposto incorporou uma penalização para demandas não atendidas, e também incertezas quanto a proporção de veículos disponíveis em cada período e incertezas no tempo de viagem entre terminais. Assim como o trabalho de Ghiani et al. (2003) citado na seção anterior, o trabalho de Beaujon e Turnquist (1991) foi importante e influente para o desenvolvimento desta tese, por ser a primeira iniciativa de se tentar modelar simultaneamente as necessidades de frota e a alocação dinâmica de veículos cheios e vazios, e por isso o modelo proposto é aqui apresentado.

Similarmente ao VAP descrito em (3.1)-(3.5), seja  $N$  o conjunto de localizações, os

autores assumiram que o horizonte de planejamento foi dividido em “períodos de decisão” discretos e utilizaram  $t$  para denotar cada um desses períodos. Assumiram ainda que existem demandas por serviços de transporte entre os pontos  $i$  e  $j$ ,  $i \in N$  e  $j \in N$ , no período  $t$ , que foi representado como  $d_{ijt}$ . As variáveis de decisão utilizadas por Beaujon e Turnquist (1991) foram:

- $X_{ijt}$  = número de veículos carregados despachados de  $i$  para  $j$  no período  $t$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $t \in T$ ;
- $Y_{ijt}$  = número de veículos vazios despachados de  $i$  para  $j$  no período  $t$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $t \in T$ ;
- $V_{i0}$  = número de veículos inicialmente alocados na localização  $i$ ,  $i \in N$ .

Devido as incertezas nos tempos de viagem, Beaujon e Turnquist (1991) definiram  $\alpha_{ij\tau t}$  e  $\beta_{ij\tau t}$  como a proporção de veículos cheios e vazios, respectivamente, despachados de  $i$  para  $j$  no período  $\tau$  no qual realmente chegarão no período  $t$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $t \in T$ . É interessante destacar que os autores definiram  $\alpha$ 's e  $\beta$ 's como variáveis aleatórias, dado que não é sabido de antemão a quantidade de veículos que realmente chegarão em um dado período. De acordo com os autores, como existem incertezas nas demandas e tempos de viagem, os valores ótimos para as decisões de alocação de veículos,  $X_{ijt}$  e  $Y_{ijt}$ , dependerão da realização de  $d_{ij}$ 's,  $\alpha_{ij}$ 's e  $\beta_{ij}$ 's. De acordo com Beaujon e Turnquist (1991), o estado do sistema em qualquer período  $t$ ,  $t \in T$ , pode ser dado como:

- $V_{it}$  = número de veículos presentes na localização  $i$  no final do período  $t$ ,  $i \in N$ ,  $t \in T$ ;
- $U_{ijt}$  = demanda não atendida de  $i$  para  $j$  no período  $t$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $t \in T$ ;

e as receitas e custos associados com a operação do sistema:

- $r_{ij}$  = receita por veículo carregado de  $i$  para  $j$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,
- $l_{ij}$  = custo ao se mover um veículo carregado de  $i$  para  $j$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,
- $e_{ij}$  = custo ao se mover um veículo vazio de  $i$  para  $j$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,
- $q$  = custo fixo por veículo por período,

- $H_i$  = custo unitário ao se manter um veículo de um período a outro na localização  $i$ ,  $i \in N$ ,
- $P_{ij}$  = penalização de custo por período para uma unidade de demanda não atendida de  $i$  para  $j$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,
- $\alpha_{ij\tau t}$  = proporção de veículos carregados despachados de  $i$  para  $j$  no período  $\tau$  que chegarão no período  $t$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $t \in T$ ,
- $\beta_{ij\tau t}$  = proporção de veículos vazios despachados de  $i$  para  $j$  no período  $\tau$ , que chegarão no período  $t$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $t \in T$ ,
- $d_{ijt}$  = demanda por serviços de transporte entre  $i$  e  $j$  no período  $t$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $t \in T$ .

O modelo apresentado por Beaujon e Turnquist (1991) para representar o problema de alocação e dimensionamento de veículos é dado como segue:

$$\begin{aligned}
\text{máx } \pi &= \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} r_{ij} X_{ijt} \\
&- \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (l_{ij} X_{ijt} + e_{ij} Y_{ijt}) \\
&- \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{\tau \in T} \left( (X_{ij\tau} \sum_{\substack{t \in T \\ t > \tau}} (t - \tau) q \alpha_{ij\tau t}) \right. \\
&\quad \left. + (Y_{ij\tau} \sum_{\substack{t \in T \\ t > \tau}} (t - \tau) q \beta_{ij\tau t}) \right) \\
&- \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} H_i V_{it} - \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} P_{ij} U_{ijt} \tag{3.6}
\end{aligned}$$

sujeito às restrições:

$$U_{ijt} = U_{ij(t-1)} + d_{ijt} - X_{ijt} \quad \forall i \in N, \quad \forall j \in N, \quad \forall t \in T, \tag{3.7}$$

$$\begin{aligned}
V_{it} &= V_{i(t-1)} + \sum_{\substack{j \in N \\ \tau \in T \\ \tau < t}} \left( (X_{ji\tau} \alpha_{ji\tau t} + Y_{ji\tau} \beta_{ji\tau t}) \right) \\
&- \sum_{j \in N} (X_{ijt} + Y_{ijt}) \quad \forall i \in N, \quad \forall t \in T, \tag{3.8}
\end{aligned}$$

$$X_{ijt}, Y_{ijt}, U_{ijt}, V_{it} \geq 0, \text{ inteiros}, \forall i \in N, \forall j \in N, \forall t \in T. \quad (3.9)$$

A função objetivo (3.6) inclui os termos de receita, custos diretos de transporte, custos de propriedade para veículos em rota e os custos de veículos vazios mantidos no terminal de origem. A restrição (3.7) diz respeito as demandas atendidas, sendo que a demanda não atendida em um certo período  $t$  deve ser igual a demanda não atendida no período anterior mais a nova demanda menos o movimento de cheios. A restrição (3.8) representa a conservação de fluxo de cada terminal em cada período, e inclui os efeitos de incertezas no tempo de viagem através dos termos  $\alpha$  e  $\beta$ , representando as incertezas nos tempos de chegada de veículos aos seus destinos. A restrição (3.9) assegura que todas as variáveis de decisão do problema sejam inteiras não negativas.

O modelo de Beaujon e Turnquist (1991) representado pelas equações (3.6)– (3.9) pode ser visto como um problema de programação estocástica, tendo as demandas ( $d_{ijt}$ ) e os tempos de viagem, representados por  $\alpha$  e  $\beta$ , como variáveis aleatórias. Dessa forma, trata-se de um problema de programação estocástica com variáveis aleatórias tanto na função objetivo como nas restrições. De acordo com os autores, essa combinação, além do tamanho do problema a ser resolvido, tornou o modelo (3.6)-(3.9) intratável para ser resolvido utilizando-se técnicas tradicionais de otimização estocástica.

De acordo com Powell et al. (1995), apesar do aumento da sofisticação dos modelos desenvolvidos na literatura, há pouca evidência de que esses modelos tenham sido utilizados em ferrovias. Em contrapartida, modelos considerados simples, tais como a abordagem apresentada em Turnquist (1986) e Turnquist e Markowicz (1989), tiveram uma larga aceitação e uso na prática.

Spieckermann e Vofß (1995) apresentaram um estudo de caso do reposicionamento de veículos vazios de uma empresa alemã de aluguel de vagões ferroviários, comparando a heurística proposta para se resolver o problema com o método tradicional utilizado pela empresa para o gerenciamento do dia a dia. Holmberg et al. (1998) trataram do problema de distribuição de vagões vazios em uma empresa de transporte ferroviário. Inicialmente foi analisado o processo utilizado pela empresa, visando identificar potenciais de melhoria, focando na importância de um processo de distribuição confiável para satisfazer a demanda dos clientes e reduzir o custo de capital. Os autores mostraram que o processo poderia ser melhorado utilizando um modelo de otimização, que incluiu restrições de capacidade nos trens e aderiu aos horários de chegada e partida dos trens. O problema foi formulado como um modelo de fluxo em rede com múltiplas *commodities* com variáveis inteiras. Os testes

computacionais apresentados mostraram que o modelo matemático pôde ser resolvido em um tempo de processamento razoável para problemas de tamanho igual ao encontrado na prática.

Bojovic (2002) estudou o problema de dimensionamento de uma frota de vagões, juntamente com o reposicionamento de veículos vazios em uma rede de transporte ferroviário de cargas, e desenvolveu um novo modelo matemático para representar o problema, incorporando incertezas na demanda. Joborn et al. (2004) apresentaram uma contribuição na análise de economia de escala na distribuição de veículos de carga vazios no modal ferroviário e o uso de heurística (*tabu search*) para a resolver o problema. Topaloglu (2006) propôs um modelo estocástico para o problema de gerenciamento dinâmico da frota de vagões ferroviários com tempos de viagem e de carregamentos aleatórios, decompondo o modelo em localidades e períodos de tempo. Os subproblemas gerados, em uma dada localidade e período, foram resolvidos em paralelo.

Sayarshad e Ghoseiri (2009) estudaram o problema de dimensionamento da frota de vagões ferroviários em múltiplos períodos, e desenvolveram um modelo de programação matemática, baseado no modelo (3.6)-(3.9), e um método de solução baseado no uso da heurística *simulated annealing*. Inspirados em uma aplicação prática, os autores propuseram uma formulação matemática para representar o problema de otimização do dimensionamento da frota e alocação de vagões, no qual demandas por vagões e tempos de viagens são assumidos como determinísticos e demandas não atendidas são reprogramadas para o próximo período. No final do período de planejamento as demandas não atendidas tornam-se zero, ou seja, as demandas por vagões são totalmente satisfeitas dentro do horizonte de planejamento. Eles mostraram ainda as importantes interações entre as decisões no dimensionamento da frota e na utilização da mesma. E ainda que o uso ótimo dos vagões em respostas às demandas ao longo dos períodos de tempo foi uma das principais vantagens do modelo proposto. Segundo os autores, o modelo incorporou informações da rede ferroviária, tais como capacidade de pátio, demandas não atendidas e número de vagões carregados e vazios em um dado tempo e local. As variáveis de decisão utilizadas no modelo matemático proposto foram todas declaradas como inteiras. Os testes computacionais apresentados em Sayarshad e Ghoseiri (2009) demonstraram que problemas de pequeno porte puderam ser resolvidos utilizando-se métodos exatos com reduzidos tempos de processamento, porém, para problemas de médio e grande porte, os autores propuseram uma heurística baseada em *simulated annealing* com desempenho aceitável, no que diz respeito à qualidade da solução final obtida e no tempo necessário para obtenção da solução. Sayarshad e Tavakkoli-Moghaddam (2010), dando continuidade

ao trabalho de Sayarshad e Ghoseiri (2009), realizaram um estudo do dimensionamento da frota de vagões ferroviários em múltiplos períodos, sendo a demanda estocástica. Estes estudos também influenciaram a presente pesquisa.

### 3.2.1 Conclusões sobre os trabalhos para o modal ferroviário

Na revisão do modal ferroviário o foco foi no estudo e desenvolvimento de técnicas para o reposicionamento de vagões. Também foram revisados ainda alguns trabalhos que, além do reposicionamento de vagões, se propõem a realizar simultaneamente o dimensionamento de vagões necessários para atender uma demanda futura. Foram apresentadas ainda algumas aplicações práticas em empresas transportadoras do modal ferroviário, sendo o problema usualmente resolvido utilizando heurísticas e simulação, principalmente devido a complexidade de se resolver problemas de grande porte, similares aos encontrados na prática.

## 3.3 Aplicações no transporte marítimo

Aplicações de modelos dinâmicos no transporte marítimo surgem, por exemplo, no planejamento do movimento de embarcações e na otimização de uma frota de contêineres em uma rede logística global. Dantzig e Fulkerson (1954) forneceram uma das aplicações mais antigas de otimização em uma rede dinâmica, visando minimizar o número de embarcações do tipo tanque para atender uma determinada programação de transporte.

White (1972) elaborou um dos primeiros trabalhos que abordam a movimentação de contêineres vazios por meio da utilização de modelos de fluxo em rede, tratando a distribuição e alocação dos vazios como um problema de transbordo dinâmico. De acordo com White (1972), é possível saber o local, a quantidade e em quais períodos os contêineres vazios estão disponíveis no sistema. Entretanto, dado que existem incertezas em relação aos instantes de chegada dos contêineres vazios nos pontos de demanda, o autor estabeleceu uma relação entre os dados de custos e os instantes de chegada dos vazios: associou custos de estocagem aos vazios que chegam antes do período de atendimento da demanda, e custos de manuseio que chegam depois desse período, dado que estes têm que ser manuseados mais rapidamente.

Outros estudos também interessantes aparecem em Ermol'ev et al. (1976) e Florez (1986), que consideraram a otimização de contêineres, e em Brown et al. (1987), Fisher e Rosenwein (1989) e Perakis e Papadakis (1989) na otimização do movimento de embar-

cações. Crainic et al. (1993) estudaram a movimentação de contêineres em terra dentro de uma região próxima ao porto.

Gao (1994) propôs um modelo em dois estágios com o objetivo de determinar soluções de custo mínimo para decisões que dizem respeito ao tamanho do estoque de contêineres (investimento de capital) e alocação de vazios. O modelo apresentado considera o aluguel, a compra, o estoque e a alocação de contêineres, tratando apenas de contêineres de um tipo. O primeiro estágio do modelo consiste em calcular o desequilíbrio entre a demanda e a oferta de contêineres em cada porto considerado na rede, através do que o autor chama “autoprodução de contêineres vazios”, isto é, os valores de demanda e oferta são obtidos considerando o tempo médio necessário para que um contêiner cheio seja esvaziado, tornando um contêiner vazio disponível no sistema. O segundo estágio, um modelo de otimização, corrige estes desequilíbrios dimensionando os estoques de vazios necessários em cada porto e alocando-os através dos caminhos de menores custos.

Shen e Khoong (1995) desenvolveram um sistema de suporte à decisão para resolver um problema de distribuição multi-período de contêineres vazios por transporte marítimo, considerando que este problema está decomposto em três níveis inter-relacionados: (i) planejamento do porto, (ii) planejamento intra-regional, e (iii) planejamento inter-regional. A partir da decisão a respeito do estoque de vazios em cada porto, efetuado pelo responsável por este gerenciamento, o sistema proposto utilizou modelos de otimização de redes para resolver os problemas intra e inter-regionais. Além de otimizar a distribuição de vazios entre portos, trabalhando com apenas um tipo de contêiner, o sistema também permitiu o aluguel dos mesmos, caso necessário. No entanto, adotou como variável o custo dos vazios alugados, de acordo com o período de aluguel, e considerou o retorno dos vazios para as companhias de *leasing*, após utilização.

Lai et al. (1995) estudaram os problemas da distribuição e alocação de contêineres através do transporte marítimo. Eles utilizaram técnicas de simulação e heurísticas para determinar a quantidade de vazios que devem ser carregados em determinado porto, a fim de atender as demandas em outros portos e prevenir o não atendimento a seus clientes, devido à falta de contêineres vazios disponíveis. Os autores consideram as rotas fixas dos navios, assim como suas restrições de capacidade, dois tipos de contêineres e um estoque mínimo de segurança para os portos. A simulação foi empregada para lidar com a incerteza inerente ao problema devido à flutuação da demanda. Já uma heurística foi utilizada para determinar os fluxos de contêineres de um porto a outro que proveriam o menor custo total, composto pelos custos de aluguel, armazenamento, transporte e retorno de vazios

alugados.

Barco (1998) estudou o reposicionamento de veículos vazios e propôs um modelo de otimização inspirado no trabalho de Crainic et al. (1993), incorporando diversos tipos diferentes de contêineres, e considerando cada porto como um ponto de oferta e demanda, excluindo os depósitos em terra. O autor não considerou explicitamente o custo do reposicionamento de contêineres vazios, mas apenas os custos relativos ao manuseio dos mesmos. Cheung e Chen (1998) propuseram um modelo de fluxo em redes em dois estágios para o problema dinâmico de alocação apresentado em Crainic et al. (1993). Eles consideraram apenas um tipo de contêiner, rotas fixas para os navios e a possibilidade de aluguel quando os contêineres próprios da companhia de navegação não forem suficientes para o atendimento das demandas, sendo que não foram impostas restrições no que diz respeito ao fornecimento de contêineres alugados.

Ainda no âmbito de pesquisa no Brasil para o problema de alocação dinâmica de veículos e contêineres, têm-se os trabalhos de Leal e Dall'orto (1999a, 1999b), Leal et al. (2000), Leal e Dall'orto (2000) e Borges (2002), sendo o primeiro tratando especificamente do problema de alocação dinâmica de veículos, o segundo tratando especificamente do gerenciamento de contêineres, e os dois últimos de implementações da *Logistics Queueing Network* (LQN) aplicada à alocação dinâmica de veículos.

Imai e Rivera (2001) estudaram a relação entre os problemas de dimensionamento e gerenciamento de frotas de contêineres. Sendo que o problema de dimensionamento de frotas consistiu na determinação do número de contêineres necessários para atender a demandas futuras, enquanto que o problema de gerenciamento objetivou alocar contêineres vazios para pontos de demanda, seja através do transporte marítimo ou do fornecimento por aluguel. Souza (2001) desenvolveu três modelos de otimização distintos para analisar os procedimentos operacionais da alocação de contêineres vazios em relação às demandas e ao fluxo de informações de uma empresa de navegação, são eles: um método heurístico, o qual segue o procedimento padrão adotado pela empresa; outro método heurístico “guloso”, o qual aloca a maior quantidade possível de contêineres nos arcos de menores custos; e um modelo de alocação que utiliza o algoritmo *out-of-kilter*, fazendo uma comparação entre os métodos de solução, considerando os custos resultantes da operação, concluindo que o método heurístico “guloso” obteve o melhor resultado com um menor custo para operação.

Choong et al. (2002) apresentam uma análise sobre os efeitos dos tamanhos dos horizontes de planejamento adotados no gerenciamento de uma rede de transporte intermodal

de contêineres vazios, considerando apenas um tipo de contêiner. Essa análise foi inspirada em um modelo de programação linear inteira cujo objetivo é minimizar os custos totais relativos à movimentação de vazios. Rezende (2003) propôs um modelo de otimização para o problema de reposicionamento de contêineres vazios a partir do estudo de Barco (1998). O problema foi modelado como sendo um problema de programação linear (PPL), e tentou representar de forma mais adequada aspectos práticos do problema, diferindo do modelo particular de Barco (1998) no que diz respeito à consideração da capacidade do navio, no estabelecimento de estoques mínimos de contêineres e na inserção de janelas para entrega de contêineres vazios nos portos.

Li et al. (2004) estudaram o gerenciamento de estoques de contêineres vazios em um porto, considerando dados estatísticos de importação e exportação para apenas um tipo de contêiner. Os autores admitiram que os contêineres, uma vez vazios, tornam-se disponíveis para o uso assim que são recebidos no porto, enquanto que, para os contêineres cheios, esse processo necessita de um intervalo de um período. As demandas devem ser atendidas sem atraso e, quando os contêineres próprios da companhia de navegação não foram suficientes para suprir as mesmas, é permitido o aluguel de contêineres vazios. Li et al. (2007), numa continuidade do trabalho anterior, desenvolveram uma heurística para mostrar como alocar os contêineres vazios de forma a reduzir o custo médio associado à operação de reposicionamento dos mesmos.

Shintani et al. (2007) estudaram o projeto de uma rede de transporte marítimo de contêineres, levando-se em conta o reposicionamento de vazios, resolvendo o problema utilizando algoritmos genéticos. Wang e Wang (2007) propuseram um modelo de programação linear inteira para o problema de reposicionamento de contêineres vazios no continente, utilizando diferentes modais de transporte, possuindo restrições de capacidade e tratando o problema como sendo determinístico. Lam et al. (2007) trataram do problema do reposicionamento de contêineres vazios, com um único tipo de contêiner, incorporando incertezas na demanda a ser atendida, e propuseram uma heurística baseada em um modelo dinâmico estocástico para sua solução.

Shi (2007) apresenta um estudo sobre problemas de alocação dinâmica de recursos com regras de trabalho complexas e incertas. A pesquisa está no contexto de transporte de contêineres do porto até a cidade de Hong Kong, considerando os recursos como sendo motoristas, trator e chassi para o transporte dos contêineres em condições regulatórias bastante rígidas. Foi proposta uma decomposição estrutural para resolver o modelo de rede e no gerenciamento dinâmico da frota para curtas distâncias com demandas e tempos

de viagens incertos. Os resultados dos experimentos computacionais realizados indicaram que a abordagem utilizada pode ser atrativa na solução de problemas de grande porte.

Bandeira et al. (2008, 2009) apresentam estudos sobre um modelo de rede combinando realocação de contêineres vazios e operações de transbordo de contêineres cheios e vazios, visando auxiliar gestores no tratamento do desbalanceamento normalmente existente em quantidades de contêineres de exportação e de importação. Segundo os autores, o objetivo dos estudos foi apresentar um modelo de gerenciamento integrado da distribuição que auxilie a resolução do problema da alocação de contêineres vazios integrada à distribuição de contêineres cheios. De forma eficiente o modelo leva em consideração a minimização dos custos envolvidos, bem como o pronto atendimento aos clientes, a fim de otimizar métodos atualmente utilizados. Para tanto, foi utilizado um modelo de transbordo estático, com a inclusão de heurísticas para escalonamento e integração dinâmica dos fluxos de contêineres cheios e vazios.

Dong e Song (2009) propuseram um método de solução baseado em simulação para o problema conjunto de dimensionamento e reposicionamento de contêineres vazios em sistemas com múltiplas embarcações e portos. Um único tipo de contêiner foi estudado, incorporando incertezas na demanda a ser atendida. Francesco et al. (2009) trataram do problema de reposicionamento de contêineres vazios, incorporando incertezas da demanda, oferta, capacidade de transporte, carregamento e descarregamento, com múltiplos tipos de contêineres, utilizando programação linear inteira para solução.

Zambuzi e Cunha (2009), e ainda Zambuzi (2010), estudaram o problema de reposicionamento e distribuição de contêineres vazios no modal marítimo, buscando atender a demanda a um menor custo possível. Foi proposto um modelo matemático inspirado no problema de fluxo em redes *multicommodity*, levando-se em consideração a movimentação marítima e terrestre de contêineres vazios, além da possibilidade de aluguel dos mesmos dentro de um horizonte de planejamento determinado. O modelo proposto foi aplicado com sucesso em uma empresa de transporte marítimo que opera no Brasil.

Teixeira et al. (2010) trataram do problema integrado de escolha de cargas e reposicionamento de contêineres vazios no transporte marítimo, visando maximizar a receita total. O problema foi modelado como um problema de fluxo em rede multi-produto em uma rede espaço-tempo, e problemas inspirados em um problema real foram resolvidas utilizando o pacote de otimização GUROBI com interface para entrada de dados utilizando planilha eletrônica. O modelo proposto se apresentou flexível, permitindo incorporar novas restrições, e obtendo soluções exatas em um tempo de processamento aceitável.

### 3.3.1 Conclusões sobre os trabalhos desenvolvidos para o modal marítimo

Na revisão bibliográfica do modal marítimo, observou-se que o foco das pesquisas foi basicamente no dimensionamento e alocação de embarcações e contêineres, destacando-se, principalmente, o dimensionamento e alocação de contêineres vazios, dada a extensa quantidade de trabalhos encontrados na literatura. Foram estudadas diferentes estratégias para se atender a demanda, como por exemplo a incorporação da possibilidade de aluguel de equipamentos. E também descritas aplicações para diferentes tipos de contêineres, incorporando ainda, em aplicações mais recentes, intermodalidade, incertezas com relação à demanda, tempos de viagem, e regras de trabalho complexas. Os modelos matemáticos utilizados para representar o problema foram baseados em programação linear, programação inteira mista e modelos estocásticos, destacando-se a utilização de heurísticas e metaheurísticas para solução, além de simulação.

## 3.4 As metaheurísticas GRASP, *simulated annealing* e colônia de formigas

Como neste trabalho foram utilizadas as metaheurísticas GRASP (*Greedy Randomized Search Procedures*), *simulated annealing* (SA) e colônia de formigas para solução do PADV, é apresentada a seguir uma breve revisão bibliográfica destes métodos de solução, suas características principais e teoria envolvida.

### 3.4.1 GRASP

O GRASP (*greedy randomized adaptative search procedure*) é uma metaheurística multi-início (*multi-start*) utilizada para a solução de problemas de otimização combinatória. É considerada uma heurística semi-gulosa que adiciona variabilidade na heurística gulosa (FEO; RESENDE, 1989, 1995), e consiste em um processo iterativo, sendo que cada iteração consiste em duas fases: (i) uma fase construtiva, e (ii) uma fase de busca local. Na fase construtiva cria uma solução inicial viável para o problema, enquanto que a vizinhança da solução é explorada até que um ótimo local seja encontrado pela busca local.

No pseudocódigo 3.4.1 são descritos de forma genérica os passos básicos da metaheurística GRASP. A primeira etapa consiste na leitura dos dados de entrada do problema a

ser resolvido. Em seguida o procedimento entra no seu *loop* principal, que consiste a cada iteração criar uma solução inicial aleatória tendo como parâmetro a semente para a geração de números aleatórios. A solução inicial gerada é utilizada para a realização de um procedimento de busca local, na tentativa de obtenção de soluções de melhor qualidade para o problema. A solução obtida após o procedimento de melhoria é comparada com a melhor solução alcançada até o momento, e a melhor solução é atualizada caso a nova solução obtida possua um melhor valor da função objetivo.

**Pseudocódigo 3.4.1:** METAHEURÍSTICA GRASP( $Max\_iteracoes, Semente$ )

Realiza a leitura dos dados de entrada

**Para**  $k = 1, \dots, Max\_iteracoes$

**Faça**  $\left\{ \begin{array}{l} Solucao \leftarrow Construc\tilde{a}o\_gulosa\_aleatoria(Seed) \\ Solucao \leftarrow Busca\_local(Solucao) \\ Atualiza\_solucao(Solucao, Melhor\_solucao) \end{array} \right.$

**Retorno** ( $Melhor\_solucao$ )

Na criação da solução inicial, elementos candidatos são todos os que podem ser incorporados na solução parcial em construção sem violar nenhuma restrição do problema. A definição do próximo elemento a ser incorporado na solução é determinada pela avaliação de todos os elementos candidatos de acordo com uma função de avaliação gulosa. Essa função gulosa geralmente representa o aumento incremental na função de custo devido a incorporação desse elemento na solução em construção. A avaliação do elemento por essa função leva à criação de uma lista restrita de candidatos, ou *Restricted Candidate List* (RCL), formada pelos melhores elementos, isto é, todos aqueles cuja incorporação na solução parcial resulte em um menor custo incremental (esse é o aspecto guloso da heurística).

O elemento a ser incorporado na solução parcial é aleatoriamente selecionado dentre os contidos na lista restrita, sendo esse o aspecto probabilístico da heurística. Uma vez que o elemento é selecionado e incorporado na solução parcial, a lista de candidatos é atualizada e os custos incrementais são reavaliados. Esse é o aspecto adaptativo da heurística. Essa estratégia é similar à heurística semi-gulosa proposta por Hart e Shogan (1987), que também possui uma abordagem multi-início baseada em construções gulosas aleatórias, porém sem a utilização de busca local. As soluções geradas pelo procedimento guloso aleatório não são necessariamente ótimas, mesmo para problemas em que a vizinhança é simples e fácil de ser explorada. A busca local consiste em iterativamente buscar soluções

de melhor qualidade na vizinhança da solução corrente, e o procedimento termina quando não for mais possível obter soluções de melhor qualidade na vizinhança.

Hart e Shogan (1987) e Feo e Resende (1989) propuseram duas formas de criação de uma lista restrita, sendo a primeira delas baseada na *cardinalidade*, ou seja, as primeiras  $k$  melhores soluções são consideradas, e outra baseada no *valor da função objetivo* das soluções gulosas geradas. Em um esquema baseado em valor para a criação da lista restrita, em vez da cardinalidade, todos os candidatos são inseridos na lista restrita se estiverem dentro de uma faixa  $\alpha\%$  do valor guloso, onde  $\alpha \in [0, 100]$ . Um esquema menos tendencioso foi proposto em Resende et al. (2000), em que os elementos inseridos na lista restrita são todos os quais o valor da função objetivo estiver entre  $\alpha(c^{max} - c^{min})$  do valor guloso, onde  $c^{max} = \max\{c(e)|e \in C\}$  e  $c^{min} = \min\{c(e)|e \in C\}$ , onde  $C$  é o conjunto de soluções gulosas candidatas criadas. Para um problema de minimização, a lista restrita é composta por todas as soluções em que  $RCL = \{e \in C | c(e) \leq c^{min} + \alpha(c^{max} - c^{min})\}$ . É interessante ressaltar que se  $\alpha = 0$ , a heurística semi-gulosa se torna puramente gulosa e, por outro lado, se  $\alpha = 1$ , a busca é puramente aleatória.

No pseudocódigo 3.4.2 são apresentadas as etapas básicas para a construção de uma solução gulosa aleatória baseada no valor do custo incremental dos candidatos. Inicialmente são calculados todos os custos incrementais de todos os candidatos a serem incorporados na solução. O conjunto  $C$  de candidatos é avaliado e os valores máximo e mínimo dos custos incrementais são armazenados nas variáveis  $c^{max}$  e  $c^{min}$ , respectivamente. É definido um valor para  $\alpha$ , e todos os candidatos que possuírem um custo incremental menor ou igual a  $\alpha(c^{max} - c^{min})$  são inseridos na lista restrita. Em seguida, é selecionado aleatoriamente um candidato contido na lista restrita para fazer parte da solução, e todos os candidatos não selecionados têm seu valor de custo incremental atualizado para a próxima iteração. Esse procedimento é realizado até que uma solução completa para o problema seja criada.

**Pseudocódigo 3.4.2:** CONSTRUCAO GULOSA ALEATORIA( $\alpha$ , *Semente*)

*Solucao*  $\leftarrow \emptyset$

- Inicializa gerador de números aleatórios com a semente fornecida
- Inicialize o conjunto de candidatos:  $C \leftarrow E$
- Avalie o custo incremental  $c(e)$  para cada  $e \in C$

**Enquanto**  $C \neq \emptyset$

<b>Faça</b>	{	$c^{min} \leftarrow \min\{c(e) e \in C\};$
		$c^{max} \leftarrow \max\{c(e) e \in C\};$
		$RCL \leftarrow \{e \in C c(e) \leq c^{min} + \alpha(c^{max} - c^{min})\};$
		Selecione um elemento $s$ de $RCL$ de forma aleatória;
		$Solucao \leftarrow Solucao \cup s;$
		Atualize o conjunto de candidatos $C;$
		Reavalie o custo incremental $c(e)$ para todo $e \in C;$

**Retorno** (*Solucao*)

Implementações iniciais do GRASP utilizaram um valor fixo para  $\alpha$ , sendo geralmente determinado através de experimentos. Entretanto, em alguns casos, uma simples mudança de classe de problema, ou um problema particular de uma classe de problemas requeriam um valor diferente para o parâmetro  $\alpha$ . Com isso Resende et al. (2000) propuseram a utilização de diferentes valores de  $\alpha$  para cada iteração do GRASP, sendo  $\alpha$  gerado como  $\alpha \in UNIF[0, 1]$ .

Um mecanismo de auto ajuste para o parâmetro  $\alpha$  foi proposto por Prais e Ribeiro (2000a, 2000b), nomeado pelos autores de GRASP reativo e, da mesma forma que em Resende et al. (2000), um novo valor para o parâmetro  $\alpha$  foi utilizado em cada iteração da heurística. Entretanto, em vez de ser escolhido por uma distribuição uniforme,  $\alpha$  foi escolhido a partir de um conjunto discreto de valores  $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m\}$ , e tendo cada valor  $\alpha_k$  uma probabilidade  $p(\alpha_k)$  de ser escolhido. O GRASP reativo de Prais e Ribeiro (2000b) muda as probabilidades  $\{p(\alpha_1), p(\alpha_2), \dots, p(\alpha_m)\}$  visando favorecer valores de  $\alpha$  que produzem soluções de melhor qualidade.

Outros mecanismos visando melhorar a eficiência e robustez do GRASP foram propostos na literatura, principalmente visando incorporar mecanismos de memória ao procedimento, como por exemplo, a utilização de *path relinking*. O *path relinking* foi proposto pela primeira vez no contexto da busca tabu ou *tabu search* (TS) (GLOVER; LAGUNA, 1997). Uma coletânea de aplicações da busca tabu utilizando *path relinking* é apresentada

em Glover et al. (2000), sendo o trabalho de Laguna e Martí (1999) a primeira aplicação do *path relinking* com o GRASP.

A metaheurística GRASP foi aplicada com sucesso em diversos problemas e aplicações. Em Festa e Resende (2002) são apresentados 230 trabalhos, desde material introdutório e tutoriais sobre GRASP, como também aplicações em diversos domínios e problemas, como por exemplo, na teoria de grafos, problemas encontrados na operação de transportes, roteamento de veículos, localização de instalações, biologia, sistemas elétricos, problemas de corte e empacotamento, problemas de designação quadrática, telecomunicações, implementações paralelas, entre outros.

### 3.4.2 A metaheurística *Simulated Annealing*

Kirkpatrick et al. (1983) e também Cerny (1985) de forma independente propuseram um algoritmo aleatório chamado *Simulated Annealing* (SA), que é baseado na analogia entre problemas de otimização em larga escala e mecânica estatística. Para o propósito da solução de problemas de otimização, essa analogia consiste simplesmente em visualizar a função de custo como uma função de energia definida em um espaço de estado finito de um sistema físico imaginário. O SA é visto como uma variação do algoritmo de Monte-Carlo desenvolvido por Metropolis et al. (1953) para a realização de cálculos de mecânica estatística.

É bem conhecido que o estado de um sistema físico em equilíbrio térmico obedece a distribuição de Gibbs  $\propto e^{[-U(\bullet)/T]}$ , onde  $U(\bullet)$  é a função de energia e  $T$  a temperatura. O algoritmo Metropolis foi desenvolvido para obter amostragens a partir de uma distribuição de Gibbs, e para o cálculo de estimativas da média de funcionalidade sobre a distribuição de Gibbs. O algoritmo Metropolis pode ser descrito como: dado um estado  $i$  do sistema, selecione um estado candidato  $j$  de forma aleatória correspondendo a uma pequena perturbação do sistema, e calcule a mudança de energia:  $\Delta U = U(j) - U(i)$ . Se  $\Delta U \leq 0$ , então aceite o estado  $j$  como sendo o novo estado do sistema para a próxima iteração do algoritmo. Se  $\Delta U > 0$ , aceite o estado  $j$  com probabilidade  $e^{[-\Delta U/T]}$ ; caso contrário, o algoritmo inicia no estado  $i$  para a próxima iteração.

A metaheurística *simulated annealing* consiste em identificar uma função de custo a ser minimizada como função de energia  $U(\bullet)$ , assumindo a temperatura  $T$  como função do tempo e que lentamente é reduzida até alcançar o zero. Suponha que a distribuição de estados dos candidatos seja independente dos estados passados quando comparado com o estado atual. O algoritmo Metropolis simula o caminho de amostragens de uma cadeia

de Markov, e pode ser mostrado que, se os estados dos candidatos forem selecionados de forma apropriada, essa cadeia na realidade possui uma distribuição de Gibbs  $\propto e^{-U(\bullet)/T}$  e distribuição de equilíbrio única. Adicionalmente, conforme a temperatura  $T$  se reduz a zero, a distribuição de Gibbs se concentra mais e mais em estados de baixa energia. A motivação por trás do *simulated annealing* é que, se a temperatura  $T$  se reduzir lentamente a ponto de manter o sistema não muito distante do equilíbrio, é de se esperar a convergência (de forma probabilística) para o mínimo global de  $U(\bullet)$ .

Basicamente, o SA explora aleatoriamente a vizinhança de uma solução para o problema e substitui a solução corrente com probabilidade 1 se a solução vizinha possui melhor valor da função objetivo, e com uma certa probabilidade estritamente entre 0 e 1 se a mesma possui um valor de função objetivo pior que a solução corrente. A probabilidade de se aceitar uma solução pior é proporcional à diferença de valor da função objetivo das soluções, de tal forma que soluções ligeiramente piores possuem uma maior probabilidade de serem aceitas, enquanto que soluções muito piores serão aceitas com uma frequência pequena. A probabilidade de se aceitar soluções que pioram a solução corrente decresce ao longo do tempo, de tal forma que a heurística por fim converge para um ótimo local, que se espera de boa qualidade. Uma revisão do método SA e também uma revisão das provas de convergência do mesmo são apresentadas em Bertsimas e Tsitsiklis (1993).

No pseudocódigo 3.4.3 é apresentado genericamente os passos básicos que compõem o SA. Pode-se verificar que, quanto maior o  $\Delta$  (desvio), menor é a chance de se aceitar uma solução vizinha que piore a solução corrente. E também, conforme a temperatura  $T$  diminui, a chance de se aceitar uma solução que piore a solução corrente fica cada vez menor.

**Pseudocódigo 3.4.3: METAHEURÍSTICA SA( $S, T, r$ )**

- Escolha uma solução inicial  $S$
- Defina os valores iniciais para os parâmetros de temperatura  $T$  e de resfriamento  $r$ , com  $0 < r < 1$

**Enquanto** o resfriamento não estiver completo

<b>Faça</b>	{	<p><b>Enquanto</b> a quantidade máxima de iterações <math>L</math> não for alcançada</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Escolha aleatoriamente uma solução <math>S'</math> pertencente à vizinhança de <math>S</math></li> <li>- Seja <math>\Delta = f(S') - f(S)</math></li> </ul> <p><b>Faça</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>se</b> <math>\Delta \leq 0</math></li> <li style="padding-left: 40px;"><b>então</b> <math>S \leftarrow S'</math></li> <li><b>se</b> <math>\Delta &gt; 0</math></li> <li style="padding-left: 40px;"><b>então</b> <math>S \leftarrow S'</math> com probabilidade <math>e^{-\Delta/T}</math></li> </ul>
	}	<p><b>Faça</b> <math>T \leftarrow rT</math></p>

### 3.4.3 A metaheurística colônia de formigas

No início dos anos 1990, a metaheurística colônia de formigas (*ant colony optimization* - ACO) foi introduzida por Marco Dorigo (DORIGO et al., 1991; DORIGO, 1992) e outros pesquisadores associados, como uma nova metaheurística inspirada na natureza para a solução de problemas difíceis de otimização combinatória. O ACO pertence à classe de metaheurísticas, que são métodos aproximados utilizados para obter soluções de qualidade para problemas difíceis de otimização combinatória em um tempo de processamento aceitável.

A fonte de inspiração para o ACO é o comportamento de formigas reais muito abundantes em regiões tropicais do continente americano. Quando estão procurando alimento, as formigas inicialmente exploram uma área ao redor do seu formigueiro de forma aleatória. Tão logo uma formiga encontra uma fonte de alimento, ela avalia a quantidade e qualidade do alimento e carrega consigo uma certa quantidade de alimento para o formigueiro. Durante a sua viagem de retorno, a formiga deposita uma trilha de feromônio no chão. A quantidade de feromônio depositado, que vai depender da quantidade e qualidade do alimento encontrado, guiará outras formigas para a fonte de alimento encontrada.

Como apresentado em Deneubourg et al. (1990), a comunicação indireta entre as

formigas pela trilha de feromônio possibilita que elas encontrem o caminho mínimo entre o formigueiro e a fonte de alimento. Essa característica das formigas reais foi explorada para a solução de problemas de otimização combinatória utilizando formigas artificiais.

O componente central da metaheurística ACO é um modelo probabilístico parametrizado, o qual é chamado de modelo de feromônio. O modelo de feromônio consiste em um vetor do modelo de parâmetros  $\mathcal{T}$  chamado parâmetro da trilha de feromônio. Os parâmetros da trilha de feromônio  $\mathcal{T}_i \in \mathcal{T}$ , geralmente associados a componentes da solução, possuem valor  $\tau_i$ , chamados valores do feromônio.

O modelo de feromônio é utilizado para probabilisticamente gerar soluções para o problema em consideração, realizando a construção a partir de um conjunto finito de componentes da solução. Na sua execução, o ACO atualiza os valores do feromônio utilizando soluções previamente geradas. A atualização do feromônio tem como objetivo concentrar a busca em regiões do espaço de soluções contendo soluções de boa qualidade. Em particular, a ênfase em certos componentes da solução, dependendo da qualidade da mesma, é um fator importante da metaheurística ACO, assumindo implicitamente que boas soluções consistem de bons componentes de soluções.

Em geral, o ACO tenta resolver um problema de otimização repetindo as duas etapas que seguem:

- soluções candidatas são construídas utilizando um modelo de feromônio, isto é, uma distribuição de probabilidade parametrizada sobre o espaço de soluções;
- as soluções candidatas são utilizadas para modificar os valores do feromônio de tal forma a serem considerados em amostragens futuras direcionando para a obtenção de soluções de boa qualidade.

O primeiro exemplo de aplicação desse conceito foi o desenvolvimento da metaheurística nomeada de *Ant System* (AS) (DORIGO, 1992; DORIGO et al., 1991, 1996), no qual foi aplicada na solução do problema do caixeiro viajante (*Traveling Salesman Problem*, TSP). Apesar dos resultados iniciais terem sido promissores, a heurística AS não pode competir com o estado da arte de algoritmos para o TSP. Contudo, teve um papel importante ao estimular pesquisas futuras em variantes da metaheurística no qual obtiveram desempenhos superiores, e também na aplicação em diferentes problemas de otimização.

Das variações mais populares da metaheurística colônia de formigas podemos citar a *Ant Colony System* (ACS) (GAMBARDELLA; DORIGO, 1996; DORIGO; GAMBARDELLA,

1997a, 1997b), e também a *MAX-MIN Ant System* (MMAS) (STÜTZLE, 1997; STÜTZLE; HOOS, 1997, 2000). AS, ACS e MMAS diferem basicamente na forma com que o feromônio é depositado e também na forma do cálculo da probabilidade de uma formiga escolher um determinado caminho de busca. A metaheurística colônia de formigas possui três fases principais, que são:

- construção de soluções;
- busca local (opcional);
- atualização de feromônio.

Na fase de construção de soluções, cada formiga artificial é responsável por construir uma solução para o problema, levando-se em conta o feromônio já depositado por outras formigas. A cada iteração decide qual caminho seguir, levando-se em conta também um mecanismo chamado de “informações heurísticas”. As informações heurísticas, juntamente com o feromônio, visam auxiliar cada formiga artificial na decisão de qual caminho seguir.

Por exemplo, para o problema do caixeiro viajante ou *Traveling Salesman Problem* (TSP), a informação heurística foi utilizada por muitos autores como sendo  $1/d_{ij}$ , supondo que a formiga, na construção da solução para o TSP, está localizada no ponto  $i$  e necessita decidir qual o próximo ponto  $j$  a ser visitado. Além do feromônio de  $i$  para  $j$ , a formiga levará em conta também a distância entre os pontos, tendo pontos mais próximos a  $i$  uma maior probabilidade de serem escolhidos. Na colônia de formigas a importância do feromônio e da informação heurística na decisão de cada formiga é controlada via parâmetros.

A fase de busca local, que é um procedimento opcional para a metaheurística colônia de formigas, um agente com o conhecimento global do sistema executa ações que não poderiam ser executadas por uma formiga individualmente. Ações essas que são específicas para cada problema e, embora opcional, essa etapa tem sido usada para se obter melhores resultados.

A última fase consiste na atualização do feromônio de cada componente da solução utilizado pela formiga, envolvendo primeiramente a “evaporação” dos feromônios já depositados e, em seguida, o depósito do feromônio. A evaporação é realizada em todos os componentes da solução, enquanto que o depósito do feromônio é realizado somente nos componentes da solução utilizados pela formiga. A metaheurística colônia de formigas possui os seguintes parâmetros básicos:

- $m$ : parâmetro que indica o número de formigas artificiais na colônia;
- $\alpha$ : parâmetro utilizado para representar a importância do feromônio;
- $\beta$ : parâmetro que indica a importância da informação heurística;
- $\rho$ : parâmetro utilizado para regular a taxa de evaporação do feromônio;
- $\tau$ : indica a quantidade de feromônio,  $\tau_{ij}$  indica a quantidade de feromônio entre as localidades  $i$  e  $j$  para o TSP, ou ainda  $\tau_0$  a quantidade inicial de feromônio nas arestas;
- $\eta$ : valor da informação heurística, sendo, por exemplo, para o TSP,  $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ ;
- $\Delta\tau_{ij}^k$ : quantidade de feromônio a ser depositado pelas formigas, sendo esse parâmetro muitas vezes dependente do valor obtido pela função objetivo após a construção da solução para o problema.

Depois da prova de conceito inicial, com a solução do problema do caixeiro viajante (*Traveling Salesman Problem* - TSP) (DORIGO et al., 1991, 1996), o ACO foi aplicado em muitos outros problemas de otimização combinatória. Como exemplos, temos as aplicações ao problema de designação (COSTA; HERTZ, 1997; MANIEZZO; COLORNI, 1999; MANIEZZO, 1999; SOCHA et al., 2003; STÜTZLE; HOOS, 2000), problemas de *scheduling* (BLUM; SAMPELS, 2004; BESTEN et al., 2000; GAGNE et al., 2002; MERKLE et al., 2002; STÜTZLE, 1998; NETO; FILHO, 2011), e problemas de roteamento de veículos (GAMBARDELLA et al., 1999; PUREZA et al., 2012; REIMANN et al., 2004). .

Conforme alguns autores, algoritmos ACO tem resolvido com sucesso problemas de ordenamento sequencial (*sequential ordering problem* - SOP) (GAMBARDELLA; DORIGO, 2000), problemas de programação de projetos com recursos restritos (MERKLE et al., 2002), e problemas de programação de *open shop* (OSS) (BLUM, 2005). Revisões mais abrangentes das aplicações do ACO para problemas de otimização são apresentados em Dorigo e Stützle (2004) e Mohan e Baskaran (2012).

## 3.5 Validação de modelos matemáticos e a utilização de técnicas de pesquisa operacional em ambientes reais de operação

Nesta tese pretende-se estudar e desenvolver modelos e abordagens formais para apoiar decisões em gestão de frotas em empresas de transporte de cargas. O Problema de Alocação Dinâmica de Veículos (PADV) reflete importantes decisões referentes aos recursos e custos no gerenciamento da frota de veículos no setor de transporte rodoviário de cargas. Assim, uma boa distribuição e programação da frota aumentará a satisfação dos proprietários de veículos de carga, que inclui a própria empresa de transportes, aumentará a produtividade operacional das empresas de transporte de cargas, proporcionará melhor atendimento ao nível de serviço contratado e pode conduzir a rendas mais altas para os *stakeholders* do processo.

Esta seção consiste em uma revisão bibliográfica sobre o tema validação. Segundo Finlay (1988), o processo de validação pode ser expresso como sendo o modelo mais apropriado de se testar a realidade percebida do sistema do mundo real. Segundo Morabito e Pureza (2010), a pesquisa operacional é mais efetivamente aplicada quando são estudados modelos que expliquem ou capturem parte importante do comportamento dos problemas encontrados em processos operacionais reais, que possam ser validados e cujos resultados das análises sejam testados na prática. Desta forma, são obtidas opiniões e informações acerca da qualidade do modelo utilizado e das soluções obtidas dessas análises. O diagrama da Figura 3.1 ilustra um processo simplificado da abordagem de pesquisa operacional para solução de um problema utilizando modelagem matemática. Essa abordagem possui várias fases, entre elas a validação do modelo. Na fase validação é verificado se o modelo proposto descreve adequadamente o comportamento do sistema real, diante das hipóteses admitidas na definição do problema.

Baseados em modelos de pesquisa operacional, vêm sendo incorporados, na gestão de produção e operações, sistemas de apoio à decisão (*DSS – Decision Support Systems*). No núcleo desses sistemas em geral existe um modelo matemático, cuja validação pode ser vista como o processo de testar a analogia entre o comportamento do modelo e o funcionamento no mundo real do sistema sendo modelado. A validação do modelo não está interessada em provar uma verdade absoluta entre o modelo e a realidade, mas demonstrar que, com razoável probabilidade, as relações estão apropriadas.

Uma vez que modelos matemáticos estão cada vez mais internalizados em sistemas

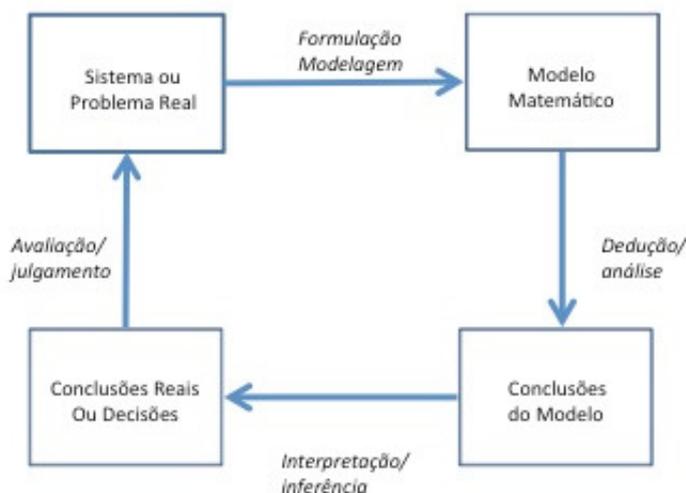


Figura 3.1: Processo de modelagem apresentado em Morabito e Pureza (2010).

de computador, uma área importante de validação é a da verificação, que é o processo de testar os programas para verificar o desempenho esperado. É comum, nesse processo, a realização de diversos testes preliminares para identificar possíveis erros e verificar a adequação e o desempenho da implementação computacional do algoritmo. Para verificar a consistência e a robustez das soluções, particularmente quando os parâmetros do modelo não podem ser estimados com precisão, é comum a realização de análises de sensibilidade e de cenários.

Segundo Borenstein (1998), há um princípio geral na literatura sobre a necessidade de validar sistemas baseados em modelos complexos para averiguar o que um sistema conhece, conhece incorretamente, ou não conhece. Métodos de validação e técnicas aplicadas a modelos de pesquisa operacional podem oferecer estrutura de validação para DSS. Entretanto, esses métodos de validação fornecem abordagens muito descritivas de como validar um modelo, e aspectos práticos envolvidos em validações específicas, tais como restrições (custo e tempo) e condições, são comumente negligenciadas. No que se refere à validação é importante considerar que há diferentes entendimentos por parte de quem observa o sistema. Um modelo pode parecer plausível na estrutura e resultados produzidos, mas, sob um minucioso exame de partes interessadas, produz diferentes interpretações. A utilidade, ou conveniência, depende do ponto de vista do usuário e do contexto ao qual ele está inserido.

Embora os modelos sejam úteis, eles são frequentemente difíceis de validar devido às suas complexidades técnicas. Pode não existir um conjunto confiável de condições iniciais reproduzíveis que possa ser modelada e comparada com um conjunto paralelo

de “condições reais” (realidade) para ser julgado como válido. Em modelos envolvendo muitas relações, a validação torna-se muito mais difícil, e existe uma grande tendência de simplesmente serem aceitos (como uma caixa preta) ou rejeitados por gerentes que lidam com o problema, tendo nenhum tempo ou inclinação para compreendê-lo. “Validação não é e não pode ser um processo absoluto” (FINLAY, 1988). Na busca do entendimento do que possa ser considerada a validação de modelo formal em pesquisa científica, estudou-se na literatura os conceitos referentes ao tema validação. Alguns autores apresentam metodologias para validações específicas, conforme discute-se a seguir.

Tilanus (1985) apresentou um interessante estudo sobre os sucessos e fracassos de modelos quantitativos na administração. A análise se baseia em 58 casos, referentes aos Países Baixos obtidos na indústria, algo em torno de 30%, negócios, aproximadamente 30% dos casos e governo, com representatividade de 40% dos casos. Segundo o autor, a literatura e o mundo real necessitam um do outro, e a implementação de estudos relativos ao mundo real podem estar baseados em experiências, questionários, entrevistas e estudos de caso. Uma análise de 36 casos referente à aplicação de estudo de caso, inseridos nos 58 casos coletados, é apresentada.

A título de ilustração, com relação às técnicas empregadas, dos 36 casos, 16 são de programação inteira mista e programação linear, sendo, 7 casos de fracasso e 9 de sucesso. Ainda 14 são de otimização combinatória, destes, 11 com fracasso e 3 com sucesso. Considerando os casos em estudo, com relação às possíveis razões que levaram ao fracasso dos modelos quantitativos na administração, destacam-se: a) as relativas aos clientes (38% das citações), b) as relativas ao pesquisador (22% das citações), c) as relativas a ambos, cliente e pesquisador, e destas destaca-se as do tipo *top down* (40% das citações).

Mudanças organizacionais e deficiência de dados são as mais frequentes razões de fracasso, relativas aos clientes, podendo inclusive “matar” projetos. Problemas complexos e tempos excessivos de processamento são as mais frequentes razões de responsabilidade do pesquisador. A combinação de problema e modelo é uma das frequentes razões do fracasso, o uso de um padrão de solução errado ou feito errado *ad hoc* sobre o modelo.

Com relação às possíveis razões de sucesso, destacam-se relativo aos clientes (com representatividade em 32%), os benefícios em forma econômica ou lucratividade. Com relação ao pesquisador (27% de representatividade das razões de sucesso), destaca-se a simplicidade, clareza, flexibilidade do modelo e rápida evolução do modelo, com procedimentos passo a passo.

Gass (1987) apresentou 5 critérios para avaliação de modelos que foram desenvolvidos para atender ao GAO (*General Accounting Office* – EUA), através do *Guidelines for Model Evaluation*. Os principais critérios com o processo de modelagem são: documentação (porque foi feito, o como foi feito, e se é passível de ser replicado); validade (validade teórica, validade de dados, validade operacional); verificação do modelo computadorizado (assegurar que o modelo roda como previsto); manutenção (atualização e revisões), refere-se ao ciclo de vida do modelo; utilidade (habilidade do usuário entender os resultados do modelo, custos e portabilidade). O autor salienta que não existe uma orientação sobre como validar um modelo de decisão. E apresenta algumas questões que são propostas por avaliadores: Sobre a teoria (a teoria ajusta-se ao problema real?); sobre dados (os dados são acurados, completos, apropriados, imparciais?) e sobre questões operacionais (como o modelo diverge da percepção dos usuários do mundo real?). Com relação à importância do ciclo de vida do modelo, o autor propõe 13 fases para o gerenciamento do modelo e sua manutenção: iniciação, praticabilidade, formulação, dados, projeto, desenvolvimento de *software*, validação, treinamento e educação, instalação, implementação, manutenção e atualização, avaliação e revisão, documentação e divulgação.

Labys (1990) comentou sobre o uso de modelos para apoio em decisões em engenharia econômica por parte de governo e de gerentes de negócios. Validação nesse contexto refere-se à correspondência entre o modelo e os processos básicos que estão sendo modelados. Esta forma de validação inclui três elementos: a característica estrutural do modelo, especificações conceituais, especificação e aplicação do processo de medida pelos quais os dados do modelo são gerados e obtidos, especificação e análise das hipóteses científicas derivadas da teoria básica do modelo. A inclusão de variáveis relevantes e a capacidade do modelo, determinação se a informação científica e os resultados incluídos no modelo são suficientes para a discriminação de diferentes políticas. A mais apropriada expressão de um resultado do modelo é que ele seja “útil”, “com informações claras”, “convicente” e “inspire confiança”, mais do que ser válido.

Déry et al. (1996) discutiram que a questão de validação de modelos está ligada fortemente às escolhas epistemológicas. Fornecem uma visão geral das principais escolas do pensamento em epistemologia que impactam na metodologia da pesquisa operacional, desde sua iniciação como uma disciplina para apoiar tomadores de decisão. Iniciam com a escola do positivismo lógico, e dela para o modelo dedutível hipotético, seguem para o instrumentalismo, para o modelo relativista, e finalmente para os robustos e competitivos modelos das ciências sociais. Apresentam algumas conclusões que são baseadas na suposição de que a resposta à questão fundamental: “O que é um modelo válido?” não

pode ser dissociada da visão da ciência e do conhecimento. Segundo Déry et al. (1996): “Não existe um método científico universal e, portanto, não há um conjunto de critérios universal para a validação de modelo. A construção e a validação de modelos não são somente atividades cognitivas, mas também atividades sociais e portanto eles não podem ser julgados com respeito a um conjunto de critérios de natureza cognitiva somente. Deve ser reconhecida a influência da organização social na atividade de pesquisa, na escolha do critério para calcular ou avaliar a validade dos modelos”.

Miser (1993) apresentou conceitos da ciência que podem ser úteis como referências apropriadas ao ser considerada a questão de validação. Comenta sobre os aspectos das habilidades da pesquisa científica, dos objetos do trabalho científico, da visão geral de processos científicos, dos aspectos sociais do trabalho científico e das relações desses assuntos com a pesquisa operacional. Sobre o aspecto social do trabalho científico, relativo à qualidade da teoria, o autor identifica três tipos de critérios de valor: critério interno, relacionado com o como o resultado da pesquisa contribui para o campo dos quais o objeto de pesquisa é parte; critério externo relacionado às contribuições que podem ser acrescentadas a outros campos da ciência, a tecnologia, ou aplicada a problemas políticos, ideológicos ou à filosofia. E finalmente o critério pessoal, o valor relacionado ao propósito e desejos do pesquisador. Os pesquisadores estão envolvidos em uma ampla variedade de situações de problema, que se distinguem pelos seus objetivos: problemas científicos cujo objetivo é resolver o problema ajustado e próximo a realidade e contribuir com pesquisa futuras; problemas técnicos, um conjunto de funções que são desenvolvidas para resolver um determinado problema, e problemas práticos cujo objetivo é servir à alguma proposta humana e são considerados resolvidos quando o que foi planejado apresenta-se como sendo efetivo. Segundo Miser (1993), verificação pode ser considerada como parte do processo de validação. Verificação é o processo pelo qual o cientista assegura a si próprio e a outros que a teoria ou o modelo desenvolvido é realmente o que eles pretendiam construir. O autor enfatiza que o primeiro e mais fundamental passo no sentido de propor validação é comparar a consequente dedução de um modelo com o fenômeno na realidade.

Landry e Oral (1993) apresentaram uma perspectiva geral para proposta de posicionamento para cada artigo que aparece na edição especial em “Modelos de Validação em Pesquisa Operacional”. Cada artigo que aparece nessa edição especial é brevemente apresentado e comentado. Não existe dúvida que a construção de modelos é uma atividade central e essencial nos estudos de pesquisa operacional. Os autores levantam questões do motivo pelo qual o problema de validação de modelos reaparece de tempos em tempos. O que é que torna o problema de validação de modelo de uma situação específica preferível

a uma geral? É possível, ou ainda é necessário ter uma teoria geral sobre validação de modelos? Uma parte das respostas a estas questões encontra-se talvez no fato de que não existe uma definitiva concordância do que constitui um modelo válido. A literatura pertinente sugere que validação de modelos tem tradicionalmente sido tratada da perspectiva da eficiência (fazendo certas coisas). A perspectiva da eficácia (fazendo as coisas certas), por outro lado, tem sido negligenciada ou completamente ignorada.

Smith (1993) apresentou uma metodologia não numérica para estimar a validade de modelos complexos. A validação de tais modelos foi estimada qualitativamente através da identificação de argumentos usados por partes interessadas associadas com o modelo. Os exemplos de raciocínio sobre a fundamentação do modelo foram identificados através da análise de argumentos defendendo e rejeitando a validade do modelo. A ideia central para a implementação do processo de validação de Smith é a de construir um debate estruturado. Isto requer a identificação dos agentes envolvidos no modelo, a descrição das considerações sobre o modelo, a extração dos argumentos prós e contras desses agentes, e a análise desses argumentos na estrutura de modelo de Toulmin (TOULMIN, 2003) para a sua classificação em termos de prós e contras em cada questão de validação do modelo. O estudo ilustra a aplicação através de um estudo de caso.

Gass (1993) apresentou um ponto de vista com relação à credibilidade ou a confiança que o tomador de decisão tem no modelo e a habilidade do modelo de produzir informações que tenham real valor para o tomador de decisão. Apresenta um esquema básico de registro para determinar o nível de confiança que o usuário possui no modelo. Para o tomador de decisão, a sua confiança no modelo é expressa pela influência que o resultado do modelo tem na sua decisão. Pode ser pensado que confiança é a qualidade do modelo e um equivalente da validade. O autor enfatiza que confiança não é um atributo do modelo, mas sim do usuário do modelo.

O processo foi baseado em atributos do modelo. Estes atributos foram resumidos e transformados em sete critérios sob os quais o modelo pudesse ser medido. São eles: definição do modelo, estrutura do modelo, dados do modelo, verificação do programa computacional; validação do modelo, utilidade do modelo e histórico do modelo. O tomador de decisão, após entendimento e aceitação do critério, estabelece o nível de resultado desejado para os critérios em uma escala de baixo (1) até alto (5). Um avaliador de modelo, independente, não conhecendo o nível de desejo do tomador de decisão, revê o modelo, sua documentação, uso passado e proposta de uso, e estabelece uma pontuação para cada critério na mesma escala de 1 a 5. As avaliações são comparadas e então é possível ao

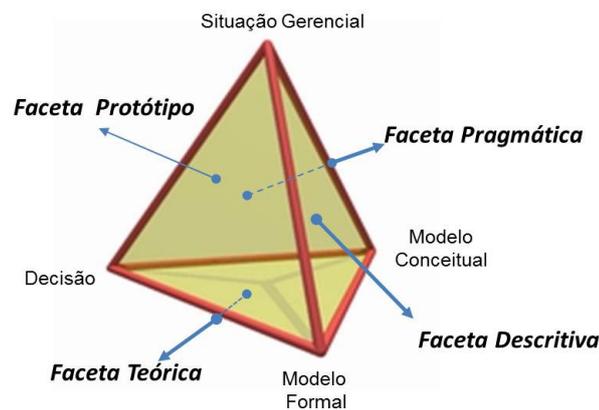


Figura 3.2: Tetraedro proposto por Oral e Kettani (1993) para a validação de modelos.

tomador de decisão fazer um julgamento mais adequado sobre o uso do modelo ou não. A proposta é que, no final da análise, um valor numérico seja atribuído ao modelo, quando o modelo está para ser usado por um específico tomador de decisão.

Embora este processo seja razoavelmente sistemático, a implementação e julgamento final possibilita muitas discussões. Baseado nisso, Gass (1993) apresentou a utilização da metodologia AHP (*Analytic Hierarchy Process*), através do uso do software *Expert Choice*, afim de ilustrar a avaliação da proposta para um modelo de processo de acreditação pelo MORS (*Military Operations Research Society*). O esquema básico do AHP é calcular o problema de decisão em uma estrutura hierárquica que relaciona o objetivo do problema, com os critérios ex. validação) e subcritérios (ex. validade dos dados) e o nível de intensidade (ex. superior ou baixo) de cada alternativa com referência ao critério e subcritério.

O ponto de partida do artigo de Oral e Kettani (1993) foi a estrutura apresentada em duas dimensões no artigo de Landry et al. (1983), que é construído em torno de quatro conceitos: situação gerencial, modelo conceitual, modelo formal e decisão. Os autores transformam essa estrutura bidimensional em uma tridimensional e exploram as questões de validação de modelos através das facetas do tetraedro formado dos vértices: situação gerencial, modelo conceitual, modelo formal e decisão. Nesta tese optou-se por utilizar a metodologia proposta por estes autores, e por conta disso será mais detalhado. Na Figura 3.2 pode-se visualizar o tetraedro proposto por Oral e Kettani (1993). A análise de cada faceta do tetraedro é útil para fornecer novas abordagens da estrutura original (bidimensional) e sugere novas perspectivas para validação de modelo. De acordo com os autores, cada faceta do tetraedro define, legitima e justifica a área de especialização do pesquisador e direciona para diferentes perspectivas do modelo de validação.

A faceta do tetraedro chamada “Faceta Protótipo” (Figura 3.2) é caracterizada pela natureza da situação gerencial, modelo formal e decisão. Problemas de protótipo são relativamente bem estruturados. Os pesquisadores são orientados a se concentrarem em 4 tipos de validades relacionadas entre si: validade da formulação, validade experimental, validade operacional e validade de dados. A validade da formulação é definida como o grau de relevância das hipóteses e teorias que embasam o modelo formal dos benefícios previstos para a situação gerencial. No caso da validade experimental, a qualidade das soluções, o tipo de solução, a natureza técnica da solução e a eficiência do método de solução são os principais interesses. A validade operacional foca na utilidade, oportunidade, sinergia, e custo de implementação das soluções fornecidas por um modelo formal. A validação de dados está interessada com a adequação, exatidão, conveniência, viabilidade, manutenção, confiança e custo de dados.

A faceta chamada de “Faceta Descritiva” (Figura 3.2), é caracterizada pela natureza da situação gerencial, modelo conceitual e modelo formal. O foco aqui está mais na compreensão do sistema ou situação gerencial em estudo do que em uma tomada de decisão particular. As questões de validação nesta faceta são definidas pelas: validação conceitual, validação lógica, validação de competência, e validação de dados. A validação conceitual é para assegurar a existência de uma legitimidade e apropriada relação entre a situação gerencial e o modelo conceitual. A principal questão da validação lógica é a adequada transformação do modelo conceitual no modelo formal. A validação de competência refere-se a: utilidade, benefício, caráter representativo, sinergia, e custo de se usar o modelo formal.

A faceta do tetraedro chamada de “Faceta Pragmática” (Figura 3.2), está caracterizada pela natureza da situação gerencial, modelo conceitual e decisão. As questões de validação para problemas de pesquisa operacional associadas com esta faceta são definidas pelos requerimentos: validade conceitual, validade de legitimidade, validade operacional e validade de dados. Segundo os autores, a validação de legitimidade atende as validações lógica e experimental na falta de um modelo formal. Contudo, eles especificam que a qualidade, representação e eficiência da recomendação gerencial são as questões básicas com as quais a validação de legitimidade está primariamente ligada.

Finalmente, a última faceta, a “Faceta Teórica” (Figura 3.2), é definida pela natureza do modelo conceitual, modelo formal e decisão. A faceta refere-se principalmente com a produção teórica do conhecimento da pesquisa operacional, através do desenvolvimento conceitos abstratos, soluções técnicas, e generalizações. As questões de validação reque-

ridas nesta faceta são caracterizadas pelas: validação da lógica, validação experimental, validação de verificação e validação de dados. A validação de verificação está conectada com a justificativa da teoria ou trabalho técnico feito isoladamente das situações gerenciais no mundo real. Ou seja, correspondem às validações conceitual e operacional e necessita ser justificada como aparece no modelo formal e nas soluções obtidas com relação a conformidade com as pretensões de utilidade e benefício no mundo real. Um segundo aspecto da validação de verificação é mais de natureza técnica e está relacionada com a verificação da pretensão feita pelos modeladores, considerando os valores do modelo formal construído e as técnicas de soluções desenvolvidas para este propósito.

## 3.6 Conclusões do capítulo

Diversos trabalhos apresentados na literatura consideraram o problema da alocação dinâmica de veículos, em diferentes modais e em aplicações distintas. Vários destes trabalhos, especialmente os mais recentes, incorporam incertezas na demanda a ser atendida, seja de veículos no transporte rodoviário, vagões no transporte ferroviário, e contêineres no modal marítimo. Nas primeiras aplicações na literatura, os problemas foram modelados como sendo em geral um problema de programação linear (PPL), e conforme outros fatores de ordem prática foram sendo incorporados, o modelo passou a ser um problema de programação inteira mista, muitas vezes não linear, e ainda com parâmetros estocásticos.

Juntamente com a complexidade dos modelos matemáticos utilizados para representar os problemas, os métodos também evoluíram para a obtenção de soluções ótimas ou aproximadas para os problemas, sendo utilizadas heurísticas e metaheurísticas para a obtenção de soluções de qualidade em um tempo de processamento aceitável, especialmente desenvolvidas para cada aplicação. No âmbito nacional, não há nenhuma aplicação prática para o transporte rodoviário de cargas, apesar desse modal ser no momento o mais utilizado para o transporte de cargas, com uma participação de 61,1% (CNT, 2010). Não foram encontrados estudos para o modal aéreo que justificassem até o momento incluir neste trabalho devido às diferenças operacionais e custos envolvidos.

Neste trabalho optou-se pela modelagem determinística para resolver o problema em função de algumas razões:

1. maior facilidade para compreensão, desenvolvimento e solução;
2. os modelos determinísticos são computacionalmente mais fáceis de serem resolvidos

(BIRGE; LOUVEAUX, 1997).

3. esses modelos não necessitam de muitos dados históricos, como por exemplo, nos modelos estocásticos para se caracterizar distribuições de probabilidade;
4. esses modelos permitem fácil análise de sensibilidade.

Uma perspectiva interessante para pesquisa futura seria estender os modelos e abordagens aqui propostos para considerar incertezas nos parâmetros do problema.

Assim, o trabalho apresentado por Beaujon e Turnquist (1991) para tratar simultaneamente o problema do reposicionamento de veículos e o dimensionamento da frota necessária para operação e também os modelos com parâmetros determinísticos, como os apresentados nos trabalhos de Powell et al. (1995), e Ghiani et al. (2003) para o reposicionamento de veículos vazios, serviram como um importante ponto de partida para os modelos desenvolvidos neste trabalho.

No que diz respeito à revisão bibliográfica de trabalhos relacionados à validação prática de modelos de pesquisa operacional, o foco foi na revisão de trabalhos que realizam a validação de modelos, sendo considerados também alguns documentos sobre sistemas computacionais desenvolvidos a partir de formulações matemáticas. Na fase validação é verificado se o modelo proposto descreve adequadamente o comportamento do sistema real, diante das hipóteses admitidas na definição do problema. O trabalho de Oral e Kettani (1993), com destaque nessa revisão devido ao interesse de uso para validação das abordagens propostas nesta tese, apresentam uma estrutura tridimensional construída em torno de quatro conceitos: situação gerencial, modelo conceitual, modelo formal e decisão. Os autores exploram as questões de validação de modelos através das facetas de um tetraedro, e a análise de cada faceta é útil e sugere novas perspectivas para o processo de validação de modelos.

## ***4 Modelos matemáticos para representar o PADV***

Dentre os diversos modelos revisados na literatura para representar o problema de alocação dinâmica de veículos, utilizou-se o modelo genérico do PADV, representado pelas equações (3.1)-(3.5), como ponto de partida para a modelagem do problema em estudo. Em seguida, são apresentados os modelos matemáticos que foram desenvolvidos e utilizados neste trabalho para representar adequadamente a questão de pesquisa desta tese. Foram considerados aspectos importantes do problema prático do transporte rodoviário de cargas. Neste trabalho optou-se por modelos determinísticos em função de algumas razões já citadas no final do Capítulo 3.

### **4.1 Conjuntos, parâmetros e variáveis dos modelos**

Nesta seção são apresentados os conjuntos, parâmetros e variáveis utilizadas nos modelos matemáticos que são apresentados no decorrer deste Capítulo.

#### **4.1.1 Conjuntos dos modelos**

##### **4.1.1.1 Conjunto $N$ de terminais**

O conjunto  $N$  é composto por todos os terminais da rede de transporte em estudo, entendendo-se como um terminal um ponto onde se originam ou se destinam cargas. Esses terminais podem ainda ter função mista, exercendo também a atividade de consolidação e de transbordo de cargas.

##### **4.1.1.2 Conjunto $E$ de veículos**

O conjunto de veículos  $E$  é formado pela subdivisão de toda a frota disponível em grupos para o transporte de cargas, e foi proposto neste trabalho distinguir os veículos,

seja pela sua forma de remuneração, rotas praticadas, ou ainda, como o mais utilizado na prática, o tratamento individual de cada veículo placa a placa, sendo nesse caso  $|E|$  igual a quantidade de veículos existentes na frota.

Vale ressaltar que para este trabalho a frota foi considerada como “homogênea” no que diz respeito à capacidade de carga transportada, e desempenho, resultando em velocidades médias equivalentes nos deslocamentos entre terminais. A subdivisão de veículos da frota pode ainda auxiliar no gerenciamento da emissão de gases de efeito estufa, pois cada veículo pode possuir sua própria taxa de emissão, que está diretamente relacionada ao consumo médio ( $km/l$ ), ao ano de fabricação do veículo, etc. e que interferem diretamente na quantidade de gases de efeito estufa emitidos na atmosfera.

#### 4.1.1.3 Conjunto $T$ de períodos

O conjunto  $T$  de períodos discretizados foi definido a partir do horizonte de planejamento usualmente utilizado em situações práticas, em que são realizados planos semanais, muitas vezes de maneira informal, iniciando na segunda-feira como o primeiro dia para planejamento, e o sábado como o último dia do horizonte de planejamento. Para se aproximar da realidade, tanto dos tempos de viagem entre terminais, como também do período para demanda, cada dia pode ser subdividido, por exemplo, em seis períodos de quatro horas (ou menos, dependendo da frequência das decisões envolvidas), totalizando trinta e seis períodos. Uma quantidade menor de períodos, apesar de tornar o problema menor e mais simples de ser resolvido, poderia gerar planos que não poderiam ser utilizados na prática devido à maior imprecisão nos tempos de viagem entre terminais, e também no período da demanda.

A definição de que cada período representa, por exemplo, quatro horas se mostrou também adequada para empresas do transporte de cargas parceladas, pois em torno de quatro horas é usualmente possível realizar a descarga / carregamento de um veículo, sem comprometer o planejamento. Ou seja, pode-se considerar as operações de carga em descarga em um período de 4 horas. Se um veículo chega em um certo terminal  $i$ ,  $i \in N$ , e período  $t$ ,  $t \in T$ , carregado, pode ainda atender uma demanda partindo de  $i$  no mesmo período  $t$ .

### 4.1.2 Parâmetros dos modelos

- $\tau_{ij}$  : tempo de viagem entre terminais, medido em quantidade de períodos, entre os terminais  $i$  e  $j$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ . Em termos práticos esse parâmetro representa o tempo médio de deslocamento, e independe do tipo de veículo utilizado, uma vez que a frota foi considerada homogênea. Com cada período composto, por exemplo, por quatro horas é possível ainda absorver pequenos atrasos no deslocamento, já que para o caso prático o tempo de viagem, em horas, foi dividido por quatro e arredondado para cima (lembrando que um dia foi subdividido em seis períodos de quatro horas cada).
- $d_{ijt}$  : demanda por serviços de transporte (em número de veículos cheios) entre os terminais  $i$  e  $j$  no período  $t$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $t \in T$ .

Uma demanda consiste em uma carga com peso (volume ou frete) suficiente para que justifique a liberação de um veículo para viagem do terminal de origem para o terminal de destino. Para definir uma carga, como sendo as somatórias dos pesos e volumes de todos os despachos que a compõe, foi utilizado o conceito apresentado em Silva (2010) em que um despacho correspondendo a um embarque único contendo uma origem, um destino e dimensões (peso e volume) definidos, um único cliente remetente e um único cliente destinatário.

- $p_{ij}^v$  : lucro (receita - custos operacionais diretos) obtida ao se realizar a rota de  $i$  para  $j$ , utilizando um veículo do tipo  $v$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $v \in E$ .
- $c_{ij}^v$  : custo de deslocamento vazio de veículos do tipo  $v$  de  $i$  para  $j$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $v \in E$ . Para esse trabalho, para o caso de frota própria, esse custo está diretamente ligado ao custo operacional, composto por custos fixos e variáveis. Os custos fixos mensais são compostos por:

- renumeração do capital;
- salário do motorista, com encargos;
- depreciação do veículo;
- licenciamento;
- seguro.

Os custos variáveis compreendem:

- manutenção e peças;

- combustível;
- lubrificante;
- lavagem e lubrificação;
- pneus.

Portanto, para o caso da frota própria, o custo por quilômetro é calculado pela somatória dos custos fixos dividido pela distância percorrida no período. Já o custo variável é obtido diretamente por quilômetro. Para se calcular o valor de  $c_{ij}^v$  para o caso de frota própria, multiplica-se a distância em quilômetros de  $i$  para  $j$  pelo custo operacional por quilômetro. Para veículos terceirizados, há uma negociação prévia do valor a ser pago por quilômetro percorrido, e esse valor é multiplicado pela distância no percurso de  $i$  para  $j$ .

- $C^v$  : custo fixo ao se adicionar um veículo do tipo  $v$  ao sistema,  $v \in E$ . Esse parâmetro é utilizado nos modelos que realizam o cálculo da quantidade adicional de veículos necessária para o atendimento de toda a demanda.

Para efeito de estudo, esse custo foi assumido como sendo o custo fixo operacional mensal, conforme listado acima para  $c_{ij}^v$  nos casos de frota própria, mesmo que na prática, a curto prazo, sejam utilizados veículos terceirizados para operação. Essa premissa se mostrou razoável na prática pois, mesmo no caso de veículos terceirizados, a empresa paga um valor por quilômetro percorrido que remunera também os custos fixos para o proprietário do veículo.

- $m_{it}^v$  : quantidade de veículos do tipo (ou grupo)  $v$  que entram no sistema no terminal  $i$  no período  $t$ ,  $i \in N$ ,  $t \in T$ ,  $v \in E$ . Observa-se que em alguns modelos matemáticos apresentados a seguir, esta quantidade de veículos foi definida como sendo uma variável de decisão do modelo, e não um parâmetro de entrada.
- $K_{jt}$  : capacidade de descarga do terminal  $j$  (em número de veículos), no período  $t$ ,  $j \in N$ ,  $t \in T$ . Essa capacidade, em termos práticos, pode estar relacionada diretamente com a quantidade de docas disponíveis para descarga de veículos, assim como também da quantidade de equipe interna disponível para tal operação.

Essa capacidade varia de terminal para terminal, e ainda por período, pois em um determinado terminal pode haver uma quantidade maior ou menor de docas para descarga e, ainda, diferentes turnos de trabalho, variando ao longo do dia a quantidade de equipes disponíveis para a operação de descarga. Uma equipe de

descarga é usualmente composta por um conferente de cargas e dois auxiliares de transportes.

- $h_{ijt}$  : valor unitário de penalização pelo não atendimento da demanda entre terminais  $i$  e  $j$  no período  $t$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $t \in T$ . Se uma carga não é transportada no período definido, pode incorrer em custos adicionais para o transportador, muitas vezes impostos pelos embarcadores baseados em contratos. Caso haja algum atraso na entrega, o transportador é obrigado a pagar um valor estipulado nesse contrato como “ônus” pelo atraso.

Podem ocorrer também custos adicionais nos terminais de destino em decorrência desses atrasos, seja na mão de obra para descarga do veículo de transferência, seja em veículos alugados para entrega, que poderão ficar ociosos.

- $Y_{ij0}^v = 0$ ,  $\forall i \in N$ ,  $\forall j \in N$ ,  $\forall v \in E$ , variável fixada como parâmetro, garantindo que no período zero, não exista movimentos de veículos vazios.
- $A_{ij}^v$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $v \in E$  sendo:

$$A_{ij}^v = \begin{cases} 1 & : \text{ se o veiculo do tipo } v \text{ pode ser usado para realizar o percurso de } i \text{ para } j \\ 0 & : \text{ caso contrário} \end{cases}$$

Esse parâmetro é utilizado para representar situações práticas em que certos veículos não realizam determinadas rotas por motivos diversos, como por exemplo: (i) rotas que não incluam passagem (na ida ou na volta) ao município de domicílio da família do motorista, (ii) falta de locais específicos para manutenções do veículo, (iii) inexistência de pontos para troca de motoristas, (iv) transportadores autônomos de cargas que nem sempre conhecem todos os percursos, (v) oferta ou escassez de carga de retorno, (vi) condições físicas da rodovia *versus* condições de manutenção dos veículos, (vii) risco do percurso (ou rota) *versus* o valor limite (em unidades monetárias) permitido pela seguradora ao condutor, dentre outros.

### 4.1.3 Variáveis dos modelos

- $X_{ijt}^v$  : fluxo (número) de veículos cheios do tipo  $v$  usados para satisfazer a demanda  $d_{ijt}$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $t \in T$ ,  $v \in E$ .
- $Y_{ijt}^v$  : fluxo (número) de veículos vazios do tipo  $v$  de  $i$  para  $j$  no período  $t$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $t \in T$ ,  $v \in E$ . Vale ressaltar que se  $i = j$ , o movimento é dito de “estoque”, e o veículo  $v$  é mantido no terminal de origem  $i$ , de um período a outro.

- $I_{ijt}$  : demanda (em número de veículos cheios) não atendida em (*backlog*) de  $i$  para  $j$  no período  $t$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $t \in T$ .

Essa variável é utilizada para computar a quantidade de demanda não atendida em cada período, para cada percurso, e penalizar cargas não atendidas no período da sua solicitação, utilizando o parâmetro  $h_{ijt}$  já definido. Caso uma demanda não seja atendida no período em que foi solicitada, a mesma permanece no terminal de origem aguardando o momento em que será transferida para o terminal de destino. Nesse caso não há “recusa” de carga conforme alguns modelos apresentados, por exemplo, em Powell et al. (1995), pois a realidade para a empresa de transporte é que, dado que a carga já foi aceita (recebida ou coletada) pelo transportador, a mesma, em algum momento, deve ser transportada para seu terminal de destino e posterior entrega ao destinatário final.

## 4.2 Modelo utilizado para representar o PADV ( $M_1$ )

O modelo nomeado de  $M_1$  é uma modificação do modelo tradicionalmente utilizado para representar o PADV (GHIANI et al., 2003), apresentado no Capítulo 3. No modelo  $M_1$  incorporou-se a possibilidade de utilização de mais de um tipo (ou grupo) de veículo, e também foi feita a inclusão da restrição de que certos tipos (ou grupos) de veículos não realizam determinadas rotas. Essas modificações no modelo original tiveram como objetivo representar melhor a realidade prática das empresas transportadoras de carga no Brasil, pois nem todos os veículos podem ser tratados da mesma forma (em um único grupo) como, por exemplo, (i) veículos próprios, (ii) veículos de terceiros (agregados), (iii) transportador autônomo de carga, entre outros.

O PADV com múltiplos tipos de veículo (conjunto  $E$ ) pode ser modelado como um problema linear de fluxo *multicommodity* de mínimo custo, transformando a restrição de demanda (3.3) apresentada no Capítulo 3, em uma restrição de mochila (*bundle constraint*) (POWELL et al., 1995). Dessa maneira, diferente do modelo utilizado para representar o PADV em (3.1)–(3.5), ele é de difícil solução exata (NP-difícil), conforme indicado, por exemplo, em (GHIANI et al., 2003).

Considerando os conjuntos, parâmetros e variáveis já definidos na Seção 4.1, o modelo matemático determinístico  $M_1$  para representar o problema de alocação dinâmica de veículos pode ser definido como o seguinte modelo de programação linear inteira:

$$\text{máx } Z_1 = \sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ i \neq j}} \sum_{t \in T} \sum_{v \in E} (p_{ij}^v X_{ijt}^v - c_{ij}^v Y_{ijt}^v) \quad (4.1)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in N} (X_{ijt}^v + Y_{ijt}^v) - \sum_{\substack{k \in N \\ k \neq i \\ t > \tau_{ki}}} (X_{kit}^v + Y_{kit}^v) = m_{it}^v + Y_{ii(t-1)}^v, \quad \forall i \in N, \forall t \in T, \forall v \in E \quad (4.2)$$

$$\sum_{v \in E} X_{ijt}^v \leq d_{ijt} \quad \forall i, j \in N, \forall t \in T, \quad (4.3)$$

$$X_{ijt}^v = 0, \text{ e } Y_{ijt}^v = 0, \text{ se } A_{ij}^v = 0, \quad \forall i, j \in N, \forall t \in T, \forall v \in E \quad (4.4)$$

$$X_{ijt}^v \geq 0, Y_{ijt}^v \geq 0, \text{ inteiros}, \quad \forall i, j \in N, \forall t \in T, \forall v \in E \quad (4.5)$$

A função objetivo (4.1), visa maximizar a diferença entre a receita obtida com o transporte de cargas (movimentos cheios), e o custo ao se deslocar veículos vazios para reposicionamento. As restrições (4.2) impõem a conservação de fluxo no início de cada período, enquanto que as restrições (4.3) asseguram que o número de veículos cheios seja menor ou igual à demanda. Como consequência, temos que as diferenças  $\sum_{v \in E} X_{ijt}^v - d_{ijt}$ ,  $\forall i, j \in N, t \in T$  representam as cargas rejeitadas, ou não atendidas. As restrições (4.3), diferente das restrições (3.3) do PADV do Capítulo 3, tornam o modelo  $M_1$  de multi-fluxos (*multicommodity*), em cada arco  $(i, j)$  em  $t$ , e, portanto, um modelo de programação linear inteira.

Esse modelo matemático pode servir de apoio na decisão de alocação de veículos vazios, apresentando quais demandas poderão ser atendidas, levando-se em conta os diferentes (grupos de) veículos. Caso seja sabido de antemão demandas que não poderão ser atendidas, em termos práticos, a empresa transportadora pode se antecipar e contratar veículos em certos terminais e períodos para que todas as cargas sejam transportadas, sem necessariamente gerar um atraso.

A Figura 4.1 pode contribuir para um melhor entendimento da restrição (4.2). A

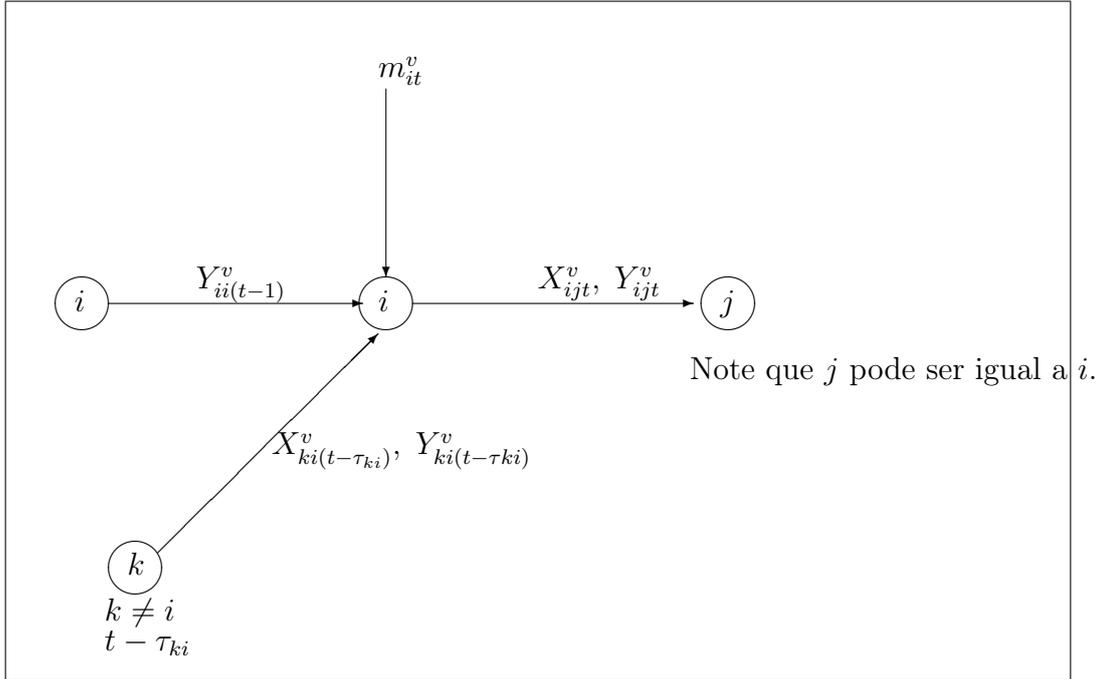


Figura 4.1: Esquema gráfico da restrição (4.2) com relação ao balanço de veículos.

quantidade de veículos em um dado terminal  $i$ , no instante  $t$ , é igual à quantidade de veículos que entram no sistema no instante  $t$  ( $m_{it}^v$ ), adicionado à quantidade de veículos que foram mantidos no terminal  $i$  no período anterior ( $t - 1$ ), também conhecido por movimento de “estoque” ( $Y_{ii(t-1)}^v$ ), adicionando ainda, a quantidade de veículos cheios e vazios originados de um dado terminal  $k$ ,  $k \neq i$ , no instante  $t - \tau_{ki}$  ( $X_{ki(t-\tau_{ki})}^v$  e  $Y_{ki(t-\tau_{ki})}^v$ ). O valor resultante deve ser reduzido pela quantidade de veículos cheios e vazios que partiram do terminal  $i$  para  $j$  no instante  $t$  ( $X_{ijt}^v$  e  $Y_{ijt}^v$ ), sendo que, neste caso,  $j$  pode ser igual a  $i$ , caso o veículo seja mantido em  $i$  como “estoque” para o período seguinte ( $Y_{iit}^v$ ).

A restrição (4.4) visa garantir que veículos de um dado tipo transitem, cheios ou vazios, em somente um determinado conjunto de percursos. Essas restrições são relevantes do ponto de vista prático, pois permitem evitar que determinados grupos, ou certas placas de veículos, realizem certas rotas. Por exemplo, direcionar veículos agregados a rotas que possuam frete de retorno. Convém salientar que estas restrições podem ser substituídas por simples procedimentos de fixação de variáveis, disponíveis nos pacotes de otimização.

Em situações práticas, pode ser necessário tratar individualmente cada veículo, em vez de separá-los em grupos. Na prática das empresas transportadoras é comum utilizar a placa do veículo, ou o número da frota, no momento do planejamento do atendimento

das demandas, e definição dos movimentos cheios e vazios a serem realizados. “*O veículo placa XXXX vai retornar vazio para ...*” ou “*... o cavalo frota YYYY realizará a viagem para ...*” são expressões comuns de serem utilizadas no dia a dia da operação de tráfego de uma empresa de transporte.

Como neste trabalho têm-se a pretensão de se validar os modelos propostos em ambientes reais de operação, a classificação de veículos em grupos não se mostrou totalmente adequada, pois o tomador de decisão espera que a saída do modelo possa ser avaliada e aplicada diretamente, definindo os movimentos a serem realizados por cada veículo individualmente, e não em grupos. Assim, cada veículo passa a ser considerado como um grupo diferente. Para isso, fixou-se  $m_{it}^v = \{0, 1\}$ ,  $\forall i \in N$ ,  $\forall t \in T$ ,  $\forall v \in E$  representando, se o veículo  $v$  entra no sistema no terminal  $i$  no período  $t$  (sim ou não), satisfazendo:

$$\sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \sum_{v \in E} m_{it}^v = |E|.$$

Ao se tratar individualmente cada veículo, espera-se que a complexidade para solução do modelo matemático aumente consideravelmente, em função do aumento do número de variáveis e restrições, pois, as variáveis de decisão tornam-se binárias, definindo se o veículo  $v$  se movimenta de  $i$  para  $j$  (carregado ou vazio) no período  $t$ ,  $i \in N$ ,  $t \in T$ ,  $v \in E$ .

Nos casos em que parte da demanda  $d_{ijt}$  só pode ser atendida por um grupo de veículos  $v$  (como, por exemplo, em *green logistics*), basta separar essa demanda como um parâmetro específico  $d_{ijt}^v$ , e incluir uma restrição adicional ao modelo, do tipo:  $X_{ijt}^v \leq d_{ijt}^v$ . Como exemplo, alguns clientes exigem veículos adequados que atendam as especificações dos seus programas de sustentabilidade.

### 4.2.1 Exemplo ilustrativo

Para um melhor entendimento do modelo matemático utilizado para representar o problema, a seguir, utiliza-se um exemplo ilustrativo adaptado de Ghiani et al. (2003), referenciado no Capítulo 3. O código para representar o problema exemplo, utilizando a linguagem algébrica AMPL (FOURER et al., 2002), é apresentado no Anexo C.

*Murty é uma transportadora operando na região de Andhraachuki (Índia). No último 11 de julho, quatro requisições de carga completa (TL) foram realizadas: de Chittoor para Khammam em 11 de julho, de Srikakulam para Ichapur em 11 de julho, e de Ananthapur para Chittoor em 13 de julho (duas cargas). Em 11 de julho, um veículo estava disponível em Chittoor e outro em Khammam. Um outro veículo estava no momento transportando*

Tabela 4.1: Terminais do problema exemplo *Murty* apresentado em Ghiani et al. (2003)

Número	Local
1	Ananthapur
2	Chittoor
3	Ichapur
4	Khammam
5	Srikakulam

Tabela 4.2: Tempos de viagem entre terminais no problema exemplo *Murty*

$\tau_{ij}$	1	2	3	4	5
1	0	1	2	2	2
2	1	0	2	2	2
3	2	2	0	2	1
4	2	2	2	0	2
5	2	2	1	2	0

um carregamento previamente programado e estaria disponível em Chittoor em 12 de julho. Os tempos de viagem entre os terminais são apresentados na Tabela 4.2. O lucro obtido com um transporte de uma carga completa é 1,8 vezes o custo de transporte de um veículo vazio por período. Seja  $T = \{11 \text{ de julho}, 12 \text{ de julho}, 13 \text{ de julho}\} = \{1, 2, 3\}$ , e  $N = \{\text{Ananthapur}, \text{Chittoor}, \text{Ichapur}, \text{Khammam}, \text{Srikakulam}\} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ , a demanda descrita pode ser representada como:  $d_{531} = 1$ ,  $d_{241} = 1$  e  $d_{123} = 2$ .

Para o modelo  $M_1$ , assumindo um único tipo de veículo (isto é,  $|E| = 1$ ), e que não há restrições de circulação em rotas (4.4) (isto é,  $A_{ij}^v = 1$ ,  $\forall i, j \in N$ ,  $v \in E$ ), o índice  $v$  das variáveis e parâmetros do modelo  $M_1$  foi omitido. A solução ótima para o PADV ((4.1) – (4.5)) utilizando-se os dados do exemplo são apresentadas na Figura 4.2. Os valores das variáveis na solução ótima são:  $X_{241}^* = 1$ ,  $X_{123}^* = 1$ ,  $Y_{441}^* = Y_{442}^* = 1$ ,  $Y_{443}^* = 2$  e  $Y_{212}^* = 1$ ,

Tabela 4.3: Custo de transporte de veículo vazio no problema exemplo *Murty*

$c_{ij}$	1	2	3	4	5
1	0	1	2	2	2
2	1	0	2	2	2
3	2	2	0	2	1
4	2	2	2	0	2
5	2	2	1	2	0

Tabela 4.4: Lucro com um transporte de uma carga completa no problema exemplo *Murty*

$p_{ij}$	1	2	3	4	5
1	0	1,8	3,6	3,6	3,6
2	1,8	0	3,6	3,6	3,6
3	3,6	3,6	0	3,6	1,8
4	3,6	3,6	3,6	0	3,6
5	3,6	3,6	1,8	3,6	0

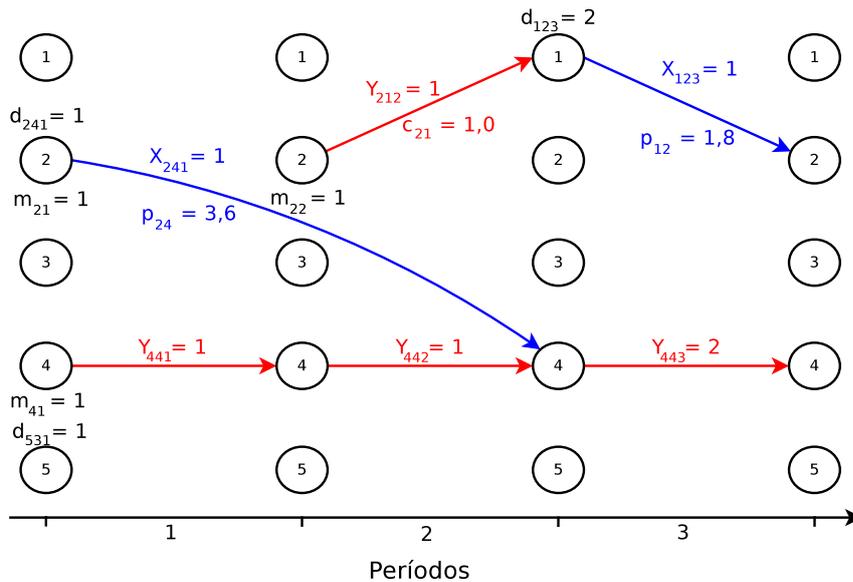


Figura 4.2: Representação gráfica da solução ótima do problema exemplo.

resultando em um valor da função objetivo de  $Z_1^* = p_{24} + p_{12} - c_{21} = 3,6 + 1,8 - 1,0 = 4,4$ . Nota-se que as demandas do terminal 5 para o terminal 3 no período 1 ( $d_{531}$ ), e uma das cargas do terminal 1 para o terminal 2 ( $d_{123}$ ) não são atendidas. Ainda nessa figura estão representados os movimentos ditos de “estoque”, pois o veículo que entra no terminal 4 no período 1 ( $m_{41} = 1$ ) é mantido neste terminal até o fim do horizonte de planejamento em estudo.

Para demonstrar as implicações e consequências práticas ao se incorporar veículos de mais de um tipo, e também a restrição de circulação de veículos de determinados tipos a certas rotas, foi alterado o problema exemplo da seguinte forma:

1. foi incluído mais um tipo de veículo, portanto agora temos  $|E| = 2$ ;
2. alterou-se o tipo de veículo que entra no sistema no período 2 no terminal 2, sendo agora um veículo do tipo 2:  $m_{22}^2 = 1$ ;

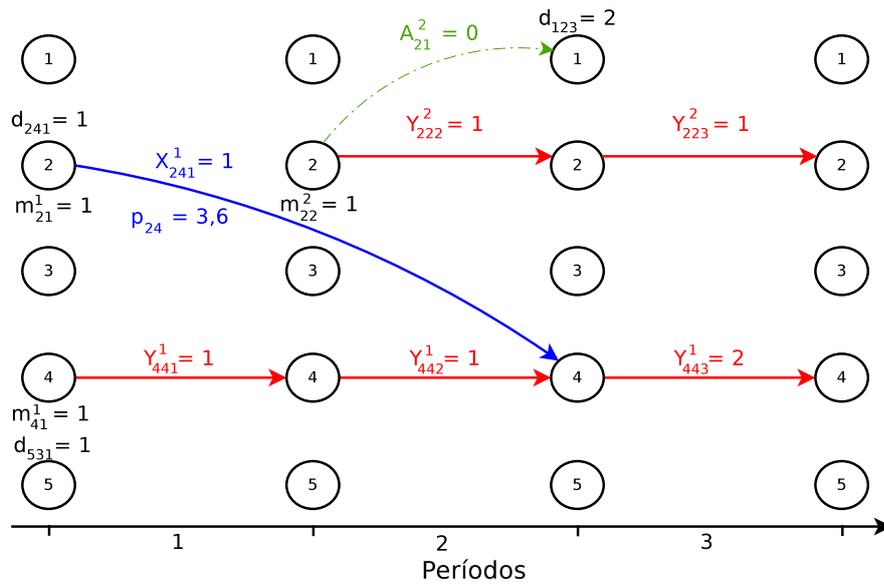


Figura 4.3: Solução ótima do problema exemplo alterado utilizando-se o modelo  $M_1$ .

3. restringiu-se a circulação de veículos do tipo 2 do terminal 2 para o terminal 1:

$$A_{21}^2 = 0.$$

Com as alterações descritas acima, o novo valor ótimo da função objetivo para o problema exemplo alterado foi de  $Z_1^* = p_{24} = 3,6$ . Como consequência da restrição de circulação ( $A_{21}^2 = 0$ ), nenhuma demanda do terminal 1 para o terminal 2 foi atendida ( $d_{123} = 2$ ). Na Figura 4.3, é apresentada de forma gráfica a solução ótima do problema exemplo alterado.

### 4.3 Modelo de dimensionamento da frota adicional para operação ( $M_2$ )

No modelo  $M_1$  podem ocorrer demandas não atendidas ou rejeitadas. Uma abordagem alternativa para o problema seria: dado um determinado conjunto de cargas a serem transportadas (demandas a serem atendidas), com seus percursos e períodos definidos, e veículos previamente posicionados, o problema pode ser o de dimensionar a quantidade, posição e período de veículos adicionais, necessários para que todas as demandas sejam atendidas. Isso pode ser útil para estimar, por exemplo, as necessidades de contratação de veículos terceirizados (agregados ou terceiros) ao longo do horizonte de planejamento, sendo ainda uma definição no nível de decisão operacional.

Inspirado no trabalho de Beaujon e Turnquist (1991), detalhado em (3.6)–(3.9) no

Capítulo 3, é proposto a seguir um modelo matemático determinístico para representar o problema de dimensionamento da frota e alocação dinâmica de veículos. Esse modelo permite que questões importantes de planejamento e posicionamento de frota sejam respondidas, como: (i) como e onde os veículos devem ser alocados / distribuídos, (ii) quais os tamanhos desses agrupamentos de veículos e em quais períodos, e (iii) como os veículos devem ser alocados entre movimentos cheios, vazios e agrupamentos.

No modelo  $M_2$ , o parâmetro  $m_{it}^v$ ,  $i \in N$ ,  $t \in T$ ,  $v \in E$ , definido na Seção 4.1, passou a ser, portanto, uma variável de decisão. É introduzido o parâmetro  $C^v$ ,  $v \in E$ , para representar o custo fixo ao se alocar um veículo do tipo  $v$  ao sistema, e, o posicionamento atual dos veículos existentes no sistema é representado pelo parâmetro  $\bar{m}_{it}^v$ ,  $i \in N$ ,  $t \in T$ ,  $v \in E$ . Assumindo os parâmetros e variáveis já definidos na Seção 4.1, o modelo  $M_2$  pode ser escrito como o seguinte problema de programação linear inteira:

$$\min Z_2 = \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \left( C^v (m_{it}^v - \bar{m}_{it}^v) \right) + \sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ i \neq j}} \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} c_{ij}^v Y_{ijt}^v \quad (4.6)$$

sujeito a:

$$(4.2), (4.4), (4.5),$$

$$\sum_{v \in V} X_{ijt}^v = d_{ijt} \quad \forall i, j \in N, \quad \forall t \in T \quad (4.7)$$

$$m_{it}^v \geq \bar{m}_{it}^v \quad \forall i \in N, \quad \forall t \in T, \quad \forall v \in E \quad (4.8)$$

$$m_{it}^v \geq 0, \text{ inteiros}, \quad \forall i \in N, \quad \forall t \in T, \quad \forall v \in E \quad (4.9)$$

A função objetivo (4.6) visa minimizar o custo fixo ao se alocar veículos para a operação, adicionado aos custos variáveis associados ao deslocamento de veículos vazios. A restrição (4.2) é a equação de balanço de veículos para um dado terminal, em um determinado período e para cada tipo de veículo. A restrição (4.4), da mesma forma que no modelo  $M_1$ , visa garantir que veículos transitem somente em rotas permitidas, independente se o transporte é vazio ou carregado. Já a restrição (4.7), assegura que toda a demanda seja atendida, assumindo que a demanda não é restrita a um especí-

fico de veículo. A restrição (4.8) assegura que os veículos já existentes no sistema sejam considerados para o dimensionamento das necessidades de frota.

Se retomarmos ao problema exemplo disponível em Ghiani et al. (2003), apresentado na Seção 4.2.1, alterando-se:

- $C^1 = 10,0$  e  $C^2 = 11,5$ ;
- inclusão de mais um tipo de veículo, sendo agora  $|E| = 2$ ;
- alteração do tipo de veículo que entra no sistema no período 2 no terminal 2, sendo agora um veículo do tipo 2:  $m_{22}^2 = 1$ ;
- restrição da circulação de veículos do tipo 2 do terminal 2 para o terminal 1:  $A_{21}^2 = 0$ ;

temos que a solução ótima para o problema exemplo, definindo simultaneamente a alocação e o dimensionamento veículos, utilizando o modelo  $M_2$ , é apresentada na Figura 4.4. É importante ressaltar que, ao se levar em consideração a frota existente, de acordo com a restrição (4.8), as seguintes variáveis foram limitadas inferiormente:

$$\begin{aligned} m_{21}^1 &\geq 1, \\ m_{41}^1 &\geq 1, \\ m_{22}^2 &\geq 1, \end{aligned}$$

pois  $\bar{m}_{21}^1 = \bar{m}_{41}^1 = \bar{m}_{22}^2 = 1$ .

O valor ótimo obtido da função objetivo foi:

$$\begin{aligned} \mathcal{Z}_2^* &= C^1 \times \left( (m_{51}^1 - \bar{m}_{51}^1) + (m_{13}^1 - \bar{m}_{13}^1) + (m_{41}^1 - \bar{m}_{41}^1) + (m_{21}^1 - \bar{m}_{21}^1) \right) + C^2 \times (m_{22}^2 - \bar{m}_{22}^2) + c_{41}^1 \times \\ &= 10,0 \times \left( (1 - 0) + (1 - 0) + (1 - 1) + (1 - 1) \right) + 11,5 \times (1 - 1) + (2 \times 1) \\ &= 10,0 \times 2 + 2 \\ &= 22. \end{aligned}$$

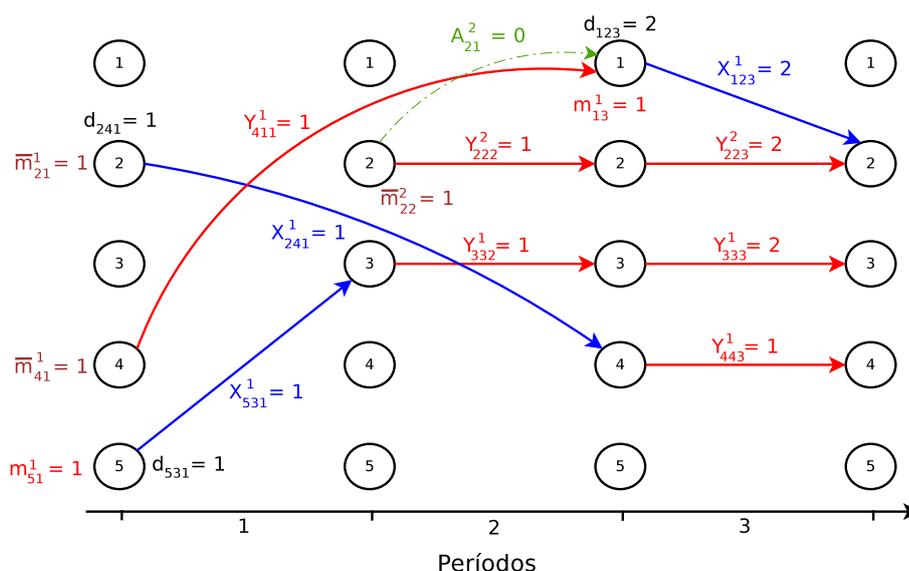


Figura 4.4: Solução ótima do problema exemplo alterado utilizando-se o modelo  $M_2$ .

#### 4.4 Modelo incorporando restrições de capacidade nos terminais ( $M_3$ )

Uma empresa especializada no transporte de cargas parceladas possui um conjunto de instalações físicas, chamadas de terminais de cargas, que são responsáveis pelo manuseio e classificação de despachos. Novaes (2008) denomina essas instalações de “depósitos de triagem”, cuja função é a de receber mercadorias procedentes de vários pontos, verificá-las e classificá-las segundo pontos de destino diversos, não tendo como objetivo prioritário o armazenamento de mercadorias. O conceito de terminal de cargas utilizado neste trabalho está ainda relacionado ao conceito de sistema de distribuição do tipo *cross-docking*, também chamado de distribuição *flow through* que permite que a administração do terminal concentre-se no fluxo de mercadorias e não na sua armazenagem (OLIVEIRA; PIZZOLATO, 2002).

A capacidade de operação desses terminais está diretamente relacionada à quantidade máxima possível de veículos de transferência que podem ser descarregados em um dado período de tempo. Fatores relacionados à estrutura operacional, como a quantidade de docas para descarga, mão de obra envolvida e tecnologia empregada são fundamentais para a definição da capacidade de um terminal.

Visando adequar o modelo matemático  $M_1$  à realidade de empresas transportadoras de carga parcelada, foi incorporado ao modelo a restrição de capacidade de cada terminal em um dado período, representado pelo parâmetro  $K_{jt}$ , sendo relacionada explicitamente

à quantidade máxima de veículos de transferência que podem ser descarregados simultaneamente no terminal  $j$ ,  $j \in N$ , em um dado período  $t$ ,  $t \in T$ . Sejam os mesmos conjuntos, parâmetros e variáveis já definidos na Seção 4.1. O modelo  $M_3$  pode ser escrito como o modelo  $M_1$ , incorporando somente a restrição:

$$\sum_{\substack{i \in N \\ i \neq j \\ t > \tau_{ij}}} \sum_{v \in E} X_{ij(t-\tau_{ij})}^v \leq K_{jt} \quad \forall j \in N, \forall t \in T \quad (4.10)$$

Voltando no problema exemplo, introduzido por Ghiani et al. (2003), apresentado na Seção 4.2.1, ao realizarmos as seguintes alterações nos parâmetros de entrada:

1. aumentar a oferta de veículos de 1 para 2 unidades no terminal 2 no período 2 ( $m_{22} = 2$ );
2. restringir a capacidade de descarga dos terminais para 2 veículos simultâneos ( $K_{jt} = 2, \forall j \in N, \forall t \in T$ ;

temos que a solução ótima obtida atende a toda a demanda  $d_{123} = 2$ , já que foi aumentada a oferta de 1 para 2 veículos no período 2 no terminal 2,  $m_{22} = 2$ . O valor ótimo obtido da função objetivo foi de:

$$\begin{aligned} Z_3^* &= p_{24} + 2 \times p_{12} - c_{21} \times Y_{212} \\ &= 3,6 + 2 \times 1,8 - 1 \times 2 \\ &= 3,6 + 3,6 - 2,0 = 5,2. \end{aligned}$$

Na Figura 4.5, é apresentada a solução obtida, bem como o valor das variáveis de decisão maiores que zero. Como foi assumido um único grupo de veículos, ou  $|E| = 1$ , o índice  $v$  foi omitido das variáveis e parâmetros da figura. Se, por outro lado, mesmo com uma oferta maior de veículos, restringir-se a capacidade do terminal 2 no período 4 para somente 1 veículo ( $K_{24} = 1$ ), temos valor ótimo obtido com a função objetivo de  $Z_3^{*'} = 4,4$ , que corresponde ao valor ótimo do modelo  $M_1$ .

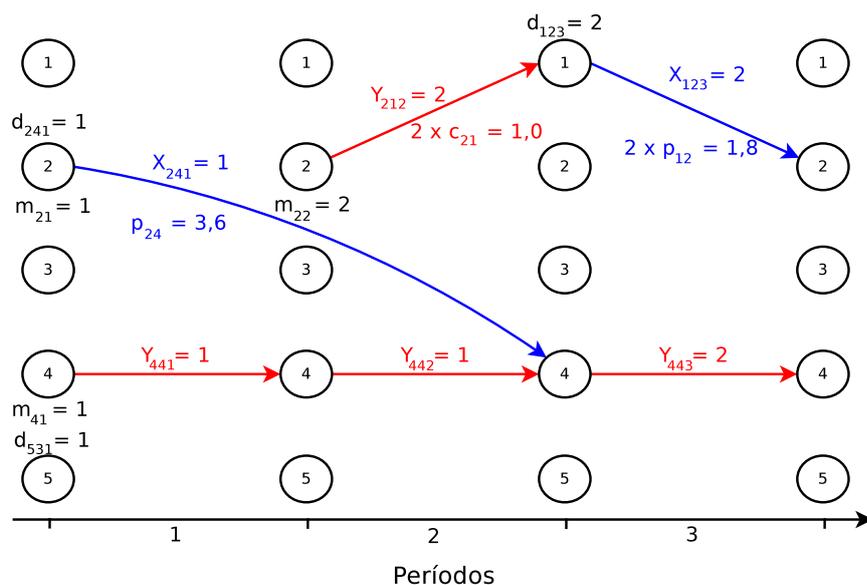


Figura 4.5: Solução ótima do problema exemplo alterado aumentando-se a oferta de veículos.

$$\begin{aligned}
 Z_3^* &= p_{24} + p_{12} - c_{21} \times Y_{212} \\
 &= 3,6 + 1,8 - 1 \times 1 \\
 &= 3,6 + 1,8 - 1,0 = 4,4.
 \end{aligned}$$

A representação gráfica da solução obtida para esse novo problema é apresentado na Figura 4.6, em que é possível observar que, apesar de existirem 2 veículos no terminal 2 no período 2 ( $m_{22} = 2$ ), foi deslocado somente um veículo para o terminal 1 ( $Y_{212}^* = 1$ ), apesar de existir demanda para 2 veículos ( $d_{123} = 2$ ), pois é sabido que não será possível descarregar mais que um veículo no terminal 2 no período 4 ( $K_{24} = 1$ ), que é quando o veículo partindo do terminal 1 chegará no terminal 2, ( $X_{123}^* = 1$ ).

## 4.5 Modelo de reposicionamento de veículos com *backlog* da demanda ( $M_4$ )

O modelo matemático  $M_1$  utilizado para representar o PADV, representado pelas equações (4.1)–(4.5), permite que cargas sejam rejeitadas. Em situações reais no transporte de cargas parceladas, demandas não atendidas em um dado período, por falta de veículo, podem aguardar no terminal de origem para serem transportadas em um período

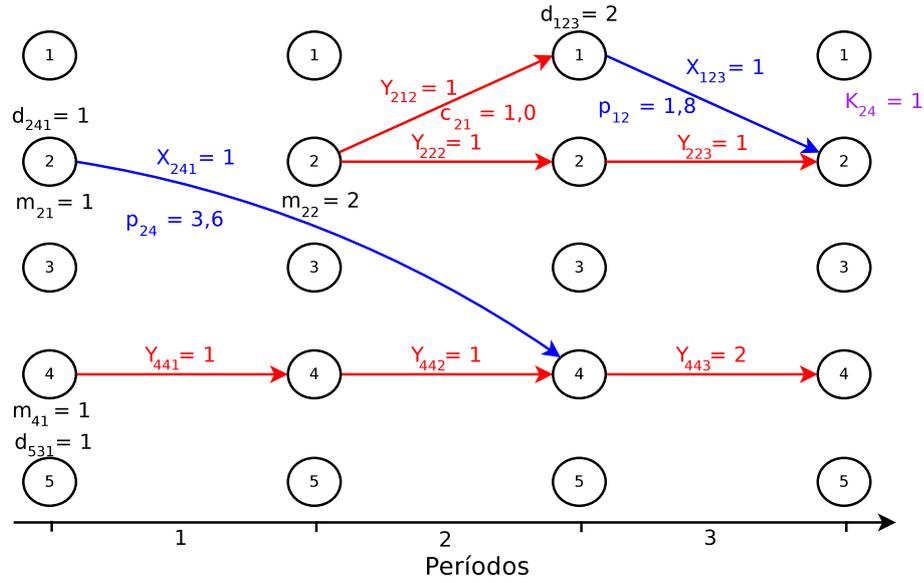


Figura 4.6: Solução ótima restringindo-se a capacidade do terminal 2 no período 4.

posterior (em *backlog*), e, obrigatoriamente, são transportadas para o terminal de destino, pois em algum momento deverão ser atendidas.

Sendo assim, é proposto o modelo matemático  $M_4$ , a partir do modelo  $M_1$ , que incorpora a situação de cargas não atendidas no período onde ocorreu a demanda, penalizando os atrasos decorrentes da falta de veículos para transporte. Neste modelo é incluído o parâmetro  $h_{ijt}$ , correspondendo ao valor unitário de penalização pelo não atendimento da demanda entre terminais  $i$  e  $j$  no período  $t$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $t \in T$ . E ainda é incluída a variável  $I_{ijt}$ , sendo a demanda não atendida de  $i$  para  $j$  no período  $t$ ,  $i \in N$ ,  $j \in N$ ,  $t \in T$ .

Sejam os mesmos conjuntos, parâmetros e variáveis já definidos, o modelo matemático  $M_4$  utilizado para representar o PADV, permitindo *backlog* de cargas, pode ser descrito como o seguinte problema de programação linear inteira:

$$\text{máx } Z_4 = \sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \sum_{t \in T} \sum_{v \in E} (p_{ij}^v X_{ijt}^v - c_{ij}^v Y_{ijt}^v) - \sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \sum_{t \in T} h_{ijt} I_{ijt} \quad (4.11)$$

sujeito a:

$$(4.2), (4.4), (4.5), (4.10),$$

$$I_{ijt} = I_{ij(t-1)} + d_{ijt} - \sum_{v \in E} X_{ijt}^v, \quad \forall i, j \in N, \quad \forall t \in T | t > 1, \quad (4.12)$$

$$I_{ijT} = 0, \quad \forall i, j \in N \quad (4.13)$$

$$I_{ij1} = d_{ij1} - \sum_{v \in E} X_{ij1}^v, \quad \forall i, j \in N \quad (4.14)$$

$$I_{ijt} \geq 0, \text{ inteiros}, \quad \forall i, j \in N, \quad \forall t \in T \quad (4.15)$$

A função objetivo (4.11) visa maximizar a receita obtida ao se realizar o transporte de cargas, deduzindo-se os custos para reposicionamento de veículos vazios e a penalização pelo não atendimento de demandas no período requerido. A restrição (4.12) representa a quantidade de demanda não atendida para um dado percurso e período. A restrição (4.13) garante que toda a carga deve ser transportada até o último período. A restrição (4.14) garante que não haja *backlog* no primeiro período.

Tomemos novamente o exemplo de Ghiani et al. (2003), apresentado na Seção 4.2.1, já com as modificações de parâmetros incorporadas conforme apresentado para o modelo  $M_3$  ( $m_{22} = 2$ , e  $K_{24} = 1$ ). Foi incorporado ainda no problema exemplo a penalização por demandas não atendidas, cujo valor foi fixado em 0,5 para qualquer demanda, ou melhor,  $h_{ijt} = 0,5, \forall i, j \in N, \forall t \in T$ . O valor ótimo da função objetivo obtido foi de  $Z_4^* = 5,3$ , e a representação gráfica, bem como o valor das variáveis de decisão maiores que zero, são apresentadas na Figura 4.7. Para facilitar a visualização, a figura foi estendida até o período 5 e, como foi utilizado um único grupo de veículos ( $|E| = 1$ ), o índice  $v$  foi omitido das variáveis e parâmetros.

$$\begin{aligned} Z_4^* &= p_{24}X_{241} + p_{12}X_{123} + p_{12}X_{124} + p_{53}X_{533} \\ &\quad - (c_{45}Y_{451} + c_{21}Y_{212} + c_{21}Y_{213}) \\ &\quad - (h_{531}I_{531} + h_{532}I_{532} + h_{123}I_{123}) \\ &= (3,6 \times 1 + 1,8 \times 1 + 1,8 \times 1 + 3,6 \times 1) \\ &\quad - (2 \times 1 + 1 \times 1 + 1 \times 1) \\ &\quad - (0,5 \times 1 + 0,5 \times 1 + 0,5 \times 1) \\ &= 10,8 - 4,0 - 1,5 = 5,3. \end{aligned}$$

Pela figura é possível verificar que toda a demanda foi atendida porém, a demanda

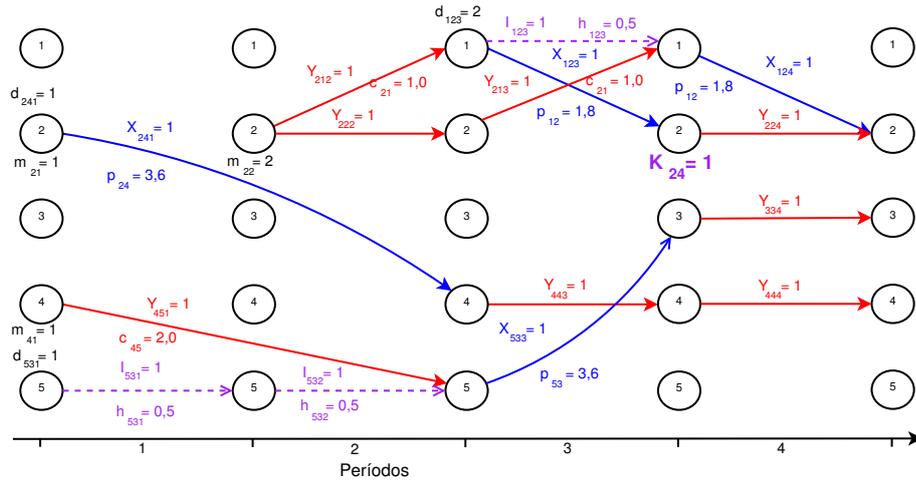


Figura 4.7: Solução ótima do problema exemplo para o modelo  $M_4$ .

$d_{531} = 1$  não é atendida por não existir veículo disponível, e a demanda  $d_{123} = 1$ , devido a sua capacidade  $K_{24} = 1$ , também não pode ser atendida no período demandado, sendo atendida em um ou dois períodos posteriores, havendo portanto o “backlog” da demanda, sendo evidenciado ainda pelo valor das variáveis:  $I_{531}^* = 1$ ;  $I_{532}^* = 1$ ;  $I_{123}^* = 1$ .

## 4.6 Modelo de dimensionamento da frota com backlog da demanda ( $M_5$ )

O modelo matemático  $M_5$ , utilizado para representar o PADV, da mesma forma que em  $M_2$ , avalia as necessidades de frota adicional necessária para operação (ou seja, tendo o parâmetro  $m_{it}^v$  como variável), e permite backlog de cargas, podendo ser representado a partir dos modelos  $M_2$  e  $M_4$ . Considerando-se os mesmos conjuntos, parâmetros e variáveis definidos na Seção 4.1, temos:

$$\min Z_5 = \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \left( C^v (m_{it}^v - \bar{m}_{it}^v) + \sum_{\substack{j \in N \\ i \neq j}} (c_{ij}^v Y_{ijt}^v + h_{ijt} I_{ijt}) \right) \quad (4.16)$$

sujeito a:

$$(4.2), (4.4)-(4.5), (4.8), (4.9), (4.10), (4.12)-(4.15).$$

A função objetivo (4.16) visa minimizar os custos envolvidos ao se atribuir veículos para operação, adicionado à penalização por demandas não atendidas no período solicitado. Incorporados ao modelo matemático, temos as restrições de balanço da quantidade

de veículos em cada terminal e em cada período (4.2), e também, as restrições de circulação de certos veículos em determinadas rotas são apresentadas na equação (4.4). A integralidade das variáveis de decisão do modelo é garantida pelas restrições (4.5), (4.9) e (4.15). A restrição (4.12) define a quantidade de demanda não atendida entre terminais em um dado período. As restrições que asseguram não haver *backlog* no primeiro e último períodos são representadas pelas equações (4.13) e (4.14), respectivamente. A restrição (4.10) diz respeito à capacidade de cada terminal em cada período, que não deve ultrapassar um dado limite.

Se retomarmos o problema exemplo, disponível em Ghiani et al. (2003), apresentado na Seção 4.2.1, assumindo os mesmos parâmetros já incluídos para solução desse problema utilizado pelos modelos  $M_2$ ,  $M_3$  e  $M_4$ , temos a solução representada de forma gráfica na Figura 4.8. O valor da função objetivo foi de:

$$\begin{aligned}
Z_5^* &= C^1 \times (m_{21}^1 - \bar{m}_{21}^1) + C^1 \times (m_{41}^1 - \bar{m}_{41}^1) + C^2 \times (m_{22}^2 - \bar{m}_{22}^2) \\
&\quad + (c_{21}^2 Y_{212}^2 + c_{21}^1 Y_{213}^1 + c_{45}^1 Y_{451}^1) \\
&\quad + (h_{123} I_{123} + h_{241} I_{241} + h_{242} I_{242} + h_{243} I_{243} + h_{531} I_{531} + h_{532} I_{532}) \\
&= 10,0 \times (1 - 1) + 10,0 \times (1 - 1) + 11,5 \times (1 - 1) \\
&\quad + (1 \times 1) + (1 \times 1) + (2 \times 1) \\
&\quad + (0,5 \times 1 + 0,5 \times 1) \\
&= 0,0 + 4,0 + 3,0 = 7,0.
\end{aligned}$$

Na Figura 4.8, é possível verificar que toda a demanda foi atendida sem a necessidade de veículos adicionais, porém existindo “*backlog*” de demandas não atendidas, principalmente a demanda no primeiro período do terminal 2 para o terminal 4  $d_{241} = 1$ , que foi atendida somente no período 4. Outro “*backlog*” foi de uma das duas cargas do terminal 1 para o terminal 2 no período 3,  $d_{123} = 2$ , que foi atendida no período 4. É interessante ressaltar que, em situações práticas nem sempre é possível, principalmente para certos percursos considerados de curta distância, fazer com que cargas aguardem mais que 2 períodos para serem transportadas. O correto balanceamento do parâmetro de penalização por demandas não atendidas ( $h_{ijt}, i \in N, j \in N, t \in T$ ) é um fator crucial, pois interfere diretamente no dimensionamento da frota para operação, que possui um custo proporcionalmente elevado.

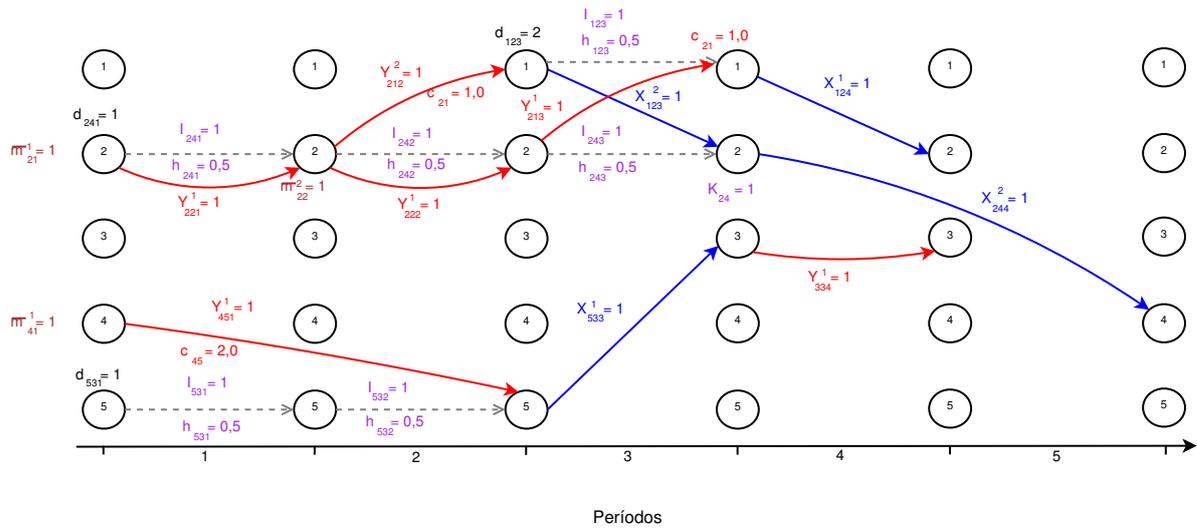


Figura 4.8: Solução ótima do problema exemplo para o modelo  $M_5$ .

## 4.7 Conclusões do capítulo

Neste Capítulo foram apresentados modelos matemáticos para representar o problema de alocação dinâmica de veículos, incluindo o reposicionamento de veículos vazios para o atendimento de demandas futuras. Foram descritos cinco modelos, nomeados de  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_4$  e  $M_5$ , possuindo entre si uma certa hierarquia no que diz respeito à complexidade e abrangência, no sentido de representarem de forma mais próxima os problemas, e suas restrições, similares aos encontrados na prática do transporte rodoviário de cargas no Brasil.

O modelo  $M_1$ , consistiu em: (i) dado um horizonte de planejamento finito composto de vários períodos, (ii) uma certa frota geograficamente dispersa com posicionamento e períodos conhecidos, e (iii) uma demanda de cargas completas a serem transportadas entre terminais nos períodos; definir as demandas a serem atendidas e os deslocamentos cheios e vazios de veículos, de tal forma a maximizar a diferença entre a receita líquida apurada no transporte de cargas entre terminais e o custo de deslocamento de veículos vazios para reposicionamento, visando atender demandas futuras.

Uma importante restrição foi adicionada, em relação ao modelo clássico (3.1)–(3.5), muito relevante do ponto de vista prático. Essa restrição considera que certos tipos de veículos não podem realizar determinadas rotas. Ela é importante, por exemplo, quando uma empresa transportadora utiliza veículos agregados, terceirizados, nas suas linhas de transferência entre terminais, em que são também consideradas questões sobre a qualidade de vida do motorista por possibilitar que o mesmo possa, de tempos em tempos, visitar

seu domicílio de origem, onde vive a sua família, que muitas vezes está localizada em um município intermediário entre a origem e o destino da rota, entre outras situações reais.

No caso do modelo  $M_2$ , a proposta foi resolver, além do problema de alocação e reposicionamento de veículos, também a avaliação das necessidades de frota adicional para que toda a demanda seja atendida. Esse modelo possui significativa importância prática, em que deseja-se avaliar a quantidade de veículos de transferência necessários para operação, uma vez que a rejeição de cargas não é algo comum na realidade prática do transporte rodoviário de cargas parceladas. Já o modelo  $M_3$  parte do modelo  $M_1$ , e incorpora uma restrição que diz respeito à capacidade de descarga de um dado terminal de destino em um certo período. Em termos práticos, os terminais de carga possuem uma quantidade finita de docas para descarga, e também de mão de obra para essa tarefa, sendo estes fatores críticos que, se não considerados, podem comprometer todo o planejamento operacional, pois podem interferir diretamente na disponibilidade da frota.

Nos modelos  $M_1$  e  $M_3$ , cargas podem ser rejeitadas por conta do posicionamento corrente dos veículos e de parâmetros de receita líquida e custo. No caso do modelo  $M_2$ , pode haver uma super-estimativa das necessidades de frota, já que toda a demanda deve ser atendida no momento em que é solicitada. Sendo assim, foi proposto o modelo  $M_4$ , que, conforme o que ocorre na prática, permite que cargas não transportadas no período solicitado aguardem no terminal de origem (até um certo limite) por um veículo disponível para realizar a transferência para o terminal de destino. Foi criada uma nova variável para representar o “*backlog*” de cargas não atendidas no período solicitado, e ainda, um parâmetro que representa uma penalização por cargas não atendidas. Um aspecto importante do modelo  $M_4$  é que todas as cargas obrigatoriamente são atendidas até o fim do período do horizonte de planejamento.

A proposta do modelo  $M_5$  foi o desenvolvimento de uma ferramenta de planejamento mais completa do ponto de vista operacional, mais ajustada às operações do TRC por incorporar todos os importantes aspectos dos modelos anteriores, realizando o dimensionamento da frota para operação, permitindo o “*backlog*” de cargas, não havendo cargas rejeitadas, incorporando ainda a restrição de capacidade de descarga dos terminais de destino.

Os modelos  $M_1 - M_5$  aqui apresentados, apesar de conceitualmente simples, constituem melhorias no que diz respeito aos modelos já desenvolvidos para o problema de dimensionamento e alocação de veículos para o transporte rodoviário de cargas. Esses modelos ( $M_1 - M_5$ ), são suficientemente flexíveis, podendo ainda serem modificados para

incluir outras possíveis restrições e outras situações reais de empresas transportadoras de cargas. Conforme mencionado anteriormente, embora o foco principal dos modelos seja apoiar decisões no nível operacional, eles também podem ser utilizados em certos casos para apoiar algumas decisões táticas, ou até mesmo estratégicas da empresa.

Vale ressaltar ainda que esses modelos podem ser aplicados na prática usando-se técnicas de horizonte de planejamento “rolante”, em que os modelos são rodados novamente a cada período (ou subconjunto de períodos), com dados atualizados e novos horizontes de planejamento (“rolados” para frente). Nos casos de tomadas de decisão em tempo real, os modelos podem ainda ser resolvidos a cada 4 horas, ou mesmo em intervalos de tempos menores, dependendo da frequência das decisões envolvidas, podendo auxiliar no tratamento de incertezas e variações nos dados, que podem ser atualizados em intervalos de tempo pré-definidos (ou a cada ocorrência / evento inesperado ou imprevisto).

## 5 *Experimentos computacionais com modelos*

Neste capítulo, são descritos os experimentos computacionais realizados visando analisar o desempenho e a aplicabilidade dos modelos  $M_1-M_5$ , desenvolvidos no Capítulo 4. Por isso, um estudo de caso foi desenvolvido no problema prático de uma empresa transportadora de carga parcelada no Brasil. São descritos os dados utilizados, as ferramentas empregadas, as soluções obtidas, e as conclusões iniciais obtidas com esses modelos.

A empresa que colaborou com esta pesquisa e concedeu os dados para o presente estudo foi a Patrus Transportes Urgentes Ltda., empresa que atua no transporte rodoviário de carga parcelada. A Patrus é uma empresa mineira, com administração familiar, fundada em 1973. Possui matriz localizada em Contagem-MG e outras 52 unidades de negócio, ou no total 53 terminais de carga, distribuídos nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo, Espírito Santo, Bahia, Sergipe, além do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Uma das estratégias da empresa é somente operar com captação de carga nos estados da região Sul. Com frota composta de 350 veículos pesados e médios, 70 veículos leves, totalizando 420 veículos próprios, opera com 800 veículos na região de atendimento, incluindo os contratados terceirizados. Possui 1.500 colaboradores diretos, sendo destes 70% alocados na área operacional.

A Patrus Transportes é uma empresa considerada de médio porte no setor de transporte de cargas, com mais de 120 mil entregas por mês, operando principalmente com transportes, coleta e entrega de cosméticos, confecções, tecidos, calçados, material esportivo, eletroeletrônicos, materiais de escritório, peças automotivas e brinquedos. Possui um *hub* (terminal para consolidação de cargas) localizado em Contagem, onde ocorrem operações de transbordo e consolidação de cargas, com uma maior proporção originada na região Sudeste com destino aos estados da Bahia e Sergipe. E também entregas itinerantes para o interior do estado de Minas Gerais - Vale do Aço e Norte de Minas Gerais - são programadas a partir deste *hub*. Suas Unidades de Negócios realizam operações de coleta

e entrega, e os prazos de transferências entre terminais, ou seja os tempos de viagem entre as Unidades são de 1, 2 e até 3 dias. Dado o tipo de carga que opera, com prazos de entregas estreitos e a proximidade dos terminais, considerando também a operação com o *hub* de Contagem, o gerenciamento operacional da frota é bastante dinâmico, necessitando de uma equipe central de monitoramento e controle, denominada Tráfego, com operação 24 horas por dia em sete dias da semana.

Como reconhecimento pelo bom nível de serviço prestado aos clientes, a empresa recebeu nos últimos anos diversos prêmios de vários clientes, citando como exemplo: São Paulo Alpargatas S/A, Santista Têxtil S/A, L'oreal do Brasil, Hermes, BIC, O Boticário, 3M do Brasil, DHL *Supply Chain* do Brasil, Natura, dentre outros <sup>1</sup>.

A empresa possui sistema de monitoramento de veículos via satélite, permitindo assim uma maior acurácia no posicionamento dos veículos, o que de certa forma facilita o processo de gerenciamento da frota. Atualmente, a programação, a distribuição e o reposicionamento de veículos vazios são realizados de forma empírica, não existindo nenhuma ferramenta de apoio ao gerenciamento da frota de transferência entre os terminais. A empresa possui uma gestão focada no lucro e na excelência do atendimento, destacando o prazo de entrega acordado e o contínuo monitoramento de informações ao cliente. Através do DEOP - Departamento de Engenharia Operacional, apoia desenvolvimentos que contribuam com melhorias, ganhos de produtividade e lucratividade para o negócio. A movimentação de veículos vazios não contribui diretamente para o lucro da empresa, pelo contrário, só gera custo, mas é uma atividade essencial dado o desbalanceamento do fluxo de cargas das regiões Sul e Sudeste para o Norte e Nordeste do país. Dado que o alto desempenho no atendimento aos prazos de entrega são preocupação constante, a empresa entende que uma abordagem técnica e científica para o problema seria bem interessante.

O problema do dimensionamento e alocação de veículos de transferência é resolvido na empresa em estudo pelo Departamento de Tráfego, que é responsável por definir diariamente a alocação e o reposicionamento de veículos vazios aos terminais da empresa. Essa decisão é atualmente tomada de forma empírica, levando em conta somente a experiência prática do gestor com relação à operação da empresa, e o conhecimento dos veículos próprios e agregados disponíveis. Não há nenhuma ferramenta formal para apoio a decisão e de previsão de demanda no horizonte de planejamento deste problema. Os custos de deslocamentos de veículos são conhecidos, estejam eles carregados ou vazios, sejam eles veículos próprios ou contratados/agregados, porém no dia a dia as decisões são tomadas

---

<sup>1</sup>Fonte: [www.patrus.com.br](http://www.patrus.com.br)

levando-se em conta somente aspectos individuais, não sendo possível analisar simultaneamente toda a rede, com todos os dados necessários, sem uma ferramenta abrangente de apoio à decisão.

## 5.1 Dados iniciais fornecidos para teste

Para os testes iniciais, a empresa forneceu dados completos de uma semana de operação, a fim de permitir que os experimentos fossem realizados. Com o objetivo de avaliação dos modelos propostos, considerou-se inicialmente um problema de menor porte, utilizado como exemplo-teste, inspirado nos dados reais da empresa. Os dados de entrada considerados nesse problema teste são apresentados nas Tabelas 5.1–5.9. Outros conjuntos e parâmetros como:

- Conjunto  $E$  de veículos do tipo carreta, sendo inicialmente dividido pela empresa em dois grupos ou tipos: agregados (*agr*) e próprios (*pro*). Os agregados (*agr*) são na sua grande maioria transportadores autônomos que possuem um contrato de exclusividade com a empresa, sendo remunerados pelo transporte de transferência entre terminais, seja carregados ou vazios. A empresa possui também veículos próprios que realizam a transferência de carga entre terminais.
- Quantidade de períodos:  $T = 36$ , correspondendo a seis dias de operação, sendo cada dia dividido em seis períodos de quatro horas, resultado em trinta e seis períodos no total.
- $A_{ij}^v$  que foi o parâmetro utilizado para definir se um determinado grupo de veículos ( $v \in E$ ) pode realizar o percurso do terminal de origem  $i$  para o terminal de destino  $j$ ,  $i, j \in N$ , sendo  $N$  o conjunto de terminais da rede. De modo geral existe uma maior flexibilidade com veículos próprios ao se comparar com veículos agregados, pois os últimos muitas vezes solicitam realizar um determinado subconjunto de percursos, de tal forma a possibilitar que os mesmos realizem paradas intermediárias no seu domicílio onde reside a sua família, ou onde possuem uma base para manutenção.
- $C^v$  : Custo fixo operacional mensal por veículo, sendo que os valores utilizados para teste são apresentados na Tabela 5.1.
- $K_{jt}$  : capacidade de descarga do terminal  $j$  em número de veículos no período  $t$ , capacidade esta dependente não somente da quantidade de docas destinadas no

terminal de destino para descarga de veículos de transferência, mas também na mão de obra alocada para operação, que pode variar em certos períodos do dia, por exemplo. Os valores de capacidade foram fixados independente do terminal e do período, com seus valores variando como:

$$- K_{jt} = 3, 5, 7, 9, 11 \text{ e } 13, \forall j \in N, \forall t \in T.$$

- $h_{ijt}$  : valor unitário de penalização pelo não atendimento da demanda entre terminais  $i$  e  $j$  no período  $t$ ,  $i, j \in N$ ,  $t \in T$ . Os valores utilizados para teste foram:

$$- h_{ijt} = 50, 200 \text{ e } 400, \forall i, j \in N, \forall t \in T.$$

Na Tabela 5.2 são apresentados os cinco terminais envolvidos no problema exemplo, que estão envolvidos na maioria das viagens da empresa. A oferta de veículos próprios e agregados é apresentada na Tabela 5.3 em que é possível verificar 24 veículos disponíveis, apresentando individualmente a quantidade de veículos em cada terminal e em cada período, para um dado grupo (agregados ou próprios). Por exemplo: em Contagem, no período 12 temos disponível um veículo agregado e um veículo próprio ( $m_{CON,12}^{agr} = m_{CON,12}^{pro} = 1$ ). As demandas a serem atendidas são apresentadas na Tabela 5.4, em que são apresentadas as quantidades de cargas a serem transportadas, seu percurso com os terminais de origem e destino, e o período requerido. São 114 demandas a serem atendidas, por exemplo, há 7 cargas a serem transportadas de São Paulo para Contagem no período 18 ( $d_{SAO,CON,18} = 7$ ).

Os tempos de viagem entre terminais são apresentados na Tabela 5.5. As receitas líquidas e custos por percurso entre terminais são apresentados nas Tabelas 5.6– 5.7, e 5.8–5.9, respectivamente. O custo de deslocamento vazio foi estimado levando-se em consideração que um período corresponde a 4 horas, e em 4 horas em média um veículo de transferência percorre 240 quilômetros a uma velocidade média de 60 km/h, a um custo variável médio de R\$ 1,30 / km, resultando em R\$ 312,00 por período rodado

Tabela 5.1: Valores utilizados para teste do parâmetro  $C^v$ .

$C^{agr}$	$C^{pro}$
0,00	0,00
1,00	1,05
1.000,00	1.050,00
5.000,00	5.250,00
14.000,00	14.633,40

para veículos próprios, e R\$ 259,00 por período para agregados (R\$ 1,09 / km). Para este estudo inicial foi assumido que a receita é o dobro do custo variável, ou seja, R\$ 624,00 por período. Esses valores foram estimados apenas para apoiar a realização destes experimentos computacionais.

Tabela 5.2: Terminais envolvidos no problema exemplo

<i>i</i>	Sigla	Localidade
1	CPQ	Campinas-SP
2	CON	Contagem-MG
3	RIO	Rio de Janeiro-RJ
4	SAO	São Paulo-SP
5	VIX	Vitória-ES

Tabela 5.3: Oferta de veículos -  $m_{it}^v$ 

Origem ( $i$ )	Período ( $t$ )	Tipo veíc. ( $v$ )	Qtd. ( $m_{it}^v$ )	Origem ( $i$ )	Período ( $t$ )	Tipo veíc. ( $v$ )	Qtd. ( $m_{it}^v$ )
CON	12	agr	1	RIO	12	pro	1
CON	12	pro	1	RIO	6	agr	1
CON	18	agr	1	RIO	6	pro	1
CON	6	agr	1	SAO	12	agr	1
CON	6	pro	1	SAO	12	pro	2
CPQ	12	agr	1	SAO	6	agr	2
CPQ	12	pro	1	SAO	6	pro	1
CPQ	36	pro	1	VIX	12	agr	1
CPQ	6	agr	1	VIX	18	agr	1
CPQ	6	pro	1	VIX	6	agr	1
RIO	12	agr	1	VIX	6	pro	1

Tabela 5.4: Demandas a serem atendidas -  $d_{ijt}$ 

Origem ( $i$ )	Destino ( $j$ )	Período ( $t$ )	D ( $d_{ijt}$ )	Origem ( $i$ )	Destino ( $j$ )	Período ( $t$ )	D ( $d_{ijt}$ )
CON	VIX	12	3	RIO	CON	30	2
CON	VIX	18	2	RIO	CON	36	3
CON	VIX	24	2	RIO	VIX	30	2
CON	VIX	30	2	SAO	CON	12	4
CON	VIX	36	2	SAO	CON	18	7
CPQ	CON	12	3	SAO	CON	24	6
CPQ	CON	18	4	SAO	CON	30	6
CPQ	CON	24	4	SAO	CON	36	5
CPQ	CON	30	2	SAO	RIO	12	2
CPQ	CON	36	4	SAO	RIO	18	2
CPQ	RIO	12	2	SAO	RIO	24	3
CPQ	RIO	18	2	SAO	RIO	30	2
CPQ	RIO	24	2	SAO	RIO	36	2
CPQ	RIO	30	2	SAO	VIX	12	2
CPQ	RIO	36	2	SAO	VIX	18	2
CPQ	VIX	18	2	SAO	VIX	24	3
CPQ	VIX	24	3	SAO	VIX	30	2
CPQ	VIX	36	2	SAO	VIX	36	3
RIO	CON	12	2	VIX	SAO	24	2
RIO	CON	18	2	VIX	SAO	36	2
RIO	CON	24	3				

Tabela 5.5: Tempos de viagens entre terminas (em períodos de 4 horas) -  $\tau_{ij}$ 

$\tau_{ij}$	CPQ	CON	RIO	SAO	VIX
CPQ	0	3	3	1	6
CON	3	0	3	3	3
RIO	3	3	0	3	3
SAO	1	3	3	0	5
VIX	5	3	3	5	0

## 5.2 Avaliação dos modelos propostos - $M_1$ , $M_2$ , $M_3$ , $M_4$ e $M_5$

Nesta seção são apresentados e avaliados os resultados obtidos ao se resolver os problemas modelados no Capítulo 4, utilizando-se dos dados do estudo de caso. Os experimentos computacionais foram realizados em um *laptop* equipado com um CPU Intel(R) Core (TM) 2 DUO T6600 2,2GHz, e 4 GB de memória RAM (sendo que somente um processador foi utilizado), e sistema operacional *Windows 7 Ultimate*. Neste estudo, exemplares dos modelos foram resolvidos utilizando o pacote de otimização CPLEX versão 11.1.1 (ILOG, 2008) para a obtenção da solução ótima dos problemas. A linguagem de modelagem AMPL (FOURER et al., 2002) foi utilizada para facilitar a interface entre os modelos e o CPLEX.

### 5.2.1 Resultados obtidos com o modelo $M_1$ – Problema Teste

O modelo  $M_1$  corresponde ao primeiro modelo matemático utilizado para representar o PADV, e apresentado nas equações (4.1) – (4.5). Foram realizados testes variando-se o valor do parâmetro  $A_{ij}^v$  para avaliar o impacto de se incorporar a restrição de que certos percursos são permitidos ou não a determinados grupos de veículos. Ao se fixar o parâmetro  $A_{ij}^v = 1 \forall i, j \in N, \forall v \in E$ , ou seja, permitindo-se que todos os grupos de veículos realizem todas as rotas, obteve-se um valor da função objetivo como referência. O modelo resultante possui 3.600 variáveis e 4.860 restrições. O valor ótimo obtido com a função objetivo foi de R\$ 137.855,00, com 99 demandas atendidas (15 não foram atendidas), sendo realizadas 65 viagens de reposicionamento e 138 movimentos de “estoque” em que os veículos foram mantidos no terminal de origem. A solução ótima foi obtida em menos de um segundo. A título de ilustração, a representação gráfica da solução obtida é apresentada no Anexo D, na Figura D.1.

Foram realizados ainda testes variando-se o parâmetro  $A_{ij}^v$ , proibindo que certos grupos de veículos realizem os seguintes percursos:

- $A_{SAO,VIX}^{pro} = 0;$
- $A_{CPQ,VIX}^{pro} = 0;$
- $A_{RIO,VIX}^{pro} = 0;$
- $A_{CPQ,RIO}^{pro} = 0;$

Tabela 5.6: Receita por percurso entre terminais para veículos próprios -  $p_{ij}^{pro}$ 

$p_{ij}^{pro}$	CPQ	CON	RIO	SAO	VIX
CPQ	0	1554	1554	518	2590
CON	1554	0	1554	1554	1554
RIO	1554	1554	0	1554	1554
SAO	518	1554	1554	0	2590
VIX	2590	1554	1554	2590	0

Tabela 5.7: Receita por percurso entre terminais para veículos agregados -  $p_{ij}^{agr}$ 

$p_{ij}^{agr}$	CPQ	CON	RIO	SAO	VIX
CPQ	0	1872	1872	624	3120
CON	1872	0	1872	1872	1872
RIO	1872	1872	0	1872	1872
SAO	624	1872	1872	0	3120
VIX	3120	1872	1872	3120	0

Tabela 5.8: Custo de deslocamento de veículo vazios próprios -  $c_{ij}^{pro}$ 

$c_{ij}^{pro}$	CPQ	CON	RIO	SAO	VIX
CPQ	0	936	936	312	1872
CON	936	0	936	936	936
RIO	936	936	0	936	936
SAO	312	936	936	0	1560
VIX	1560	936	936	1560	0

Tabela 5.9: Custo de deslocamento de veículo vazios agregados-  $c_{ij}^{agr}$ 

$c_{ij}^{agr}$	CPQ	CON	RIO	SAO	VIX
CPQ	0	777	777	259	1554
CON	777	0	777	777	777
RIO	777	777	0	777	777
SAO	259	777	777	0	1295
VIX	1295	777	777	1295	0

- $A_{CPQ,CON}^{agr} = 0$ ;
- $A_{SAO,CON}^{agr} = 0$ .

O objetivo de se alterar o parâmetro  $A_{ij}^v$  foi para verificar o impacto na solução final obtida, e o impacto no custo da solução. Com as alterações realizadas no parâmetro  $A_{ij}^v$ , o novo valor ótimo obtido com a função objetivo foi de R\$ 135.193,00 com 103 demandas atendidas, porém com 71 viagens de reposicionamento e 113 movimentos de “estoque”, sendo a solução ótima obtida também em menos de um segundo. Um sumário dos resultados obtidos é apresentado na Tabela 5.10. Nessa tabela, a coluna “ $M_1$ -restrito” corresponde aos valores obtidos ao se alterar o problema, restringindo-se o parâmetro  $A_{ij}^v$ .

Tabela 5.10: Resumo dos resultados obtidos com o modelo  $M_1$ 

Item	$M_1$	$M_1$ -restrito
Função Objetivo	137.855,00	135.193,00
Demanda atendida	99	103
Demanda não atendida	15	11
Movimentos cheios	99	103
Movimentos vazios	65	71
Movimentos de estoque	138	113
Tempo (s)	< 0,1	< 0,1
Qtd. De Veículos	24	24

### 5.2.2 Resultados obtidos com o modelo $M_2$ – Problema Teste

O modelo  $M_2$  corresponde ao modelo matemático apresentado nas equações (4.6) – (4.9) para estimar a frota adicional necessária para que toda a demanda seja atendida, tendo o parâmetro  $m_{it}^v$  agora como variável do modelo, com a restrição de que toda a demanda deve ser atendida. O modelo  $M_2$ , utilizando os dados do problema teste, resulta em 3.960 variáveis e 5.220 restrições. Todas as 114 demandas foram atendidas utilizando 7 veículos adicionais, resultando na utilização de 31 veículos, realizando 67 viagens vazias para reposicionamento e 264 movimentos de “estoque”. O valor ótimo obtido com a função objetivo foi de R\$ 171.320,00 em menos de um segundo.

Da mesma forma que em  $M_1$ , foram realizados ainda testes mantendo a variação apresentada do parâmetro  $A_{ij}^v$ , apresentado na Seção 5.2.1. Na Tabela 5.11 é apresentado um resumo dos resultados obtidos, sendo nomeado de “ $M_2$ -restrito” o problema modificado, incluindo as restrições do parâmetro  $A_{ij}^v$ . Na Tabela 5.12 são apresentados os resultados

obtidos variando-se o parâmetro de custo fixo  $C^v$  para o problema restrito. De acordo com os resultados obtidos, como esperado, quanto menor o custo fixo (variando de 5.250,00 até 0,00, conforme Tabela 5.1), maior a quantidade de veículos utilizados para atender toda a demanda (os valores variando de 33 veículos até 103 veículos, quando o custo fixo é nulo), e conseqüentemente uma menor quantidade de viagens vazias para reposicionamento, tendo em contra partida uma maior quantidade de movimentos de estoque. Note que no limite de custos nulos, toda a demanda é atendida com custo nulo, utilizando 103 veículos.

Tabela 5.11: Resumo dos resultados obtidos com o modelo  $M_2$ 

Item	$M_2$	$M_2$ -restrito
Função Objetivo	96.713,00	105.783,00
Demanda atendida	114	114
Demanda não atendida	0	0
Movimentos cheios	114	114
Movimentos vazios	67	67
Movimentos de estoque	256	340
Tempo (s)	< 0,1	< 0,1
Qtd. De Veículos	31	33

Tabela 5.12: Resultados obtidos com o modelo  $M_2$ -restrito variando-se o parâmetro  $C^v$ .

Item	$C^{agr} = 0,00$	$C^{agr} = 1,00$	$C^{agr} = 1.000,00$	$C^{agr} = 5.000,00$
	$C^{pro} = 0,00$	$C^{pro} = 1,05$	$C^{pro} = 1.050,00$	$C^{pro} = 5.250,00$
Função Objetivo	0,00	75,00	63.366,00	105.783,00
Demanda atendida	114	114	114	114
Demanda não atendida	0	0	0	0
Movimentos cheios	114	114	114	114
Movimentos vazios	0	0	48	67
Movimentos de estoque	1.262	1.289	780	340
Tempo (s)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Qtd. De Veículos	103	99	51	33

### 5.2.3 Resultados obtidos com o modelo $M_3$ – Problema Teste

O modelo chamado  $M_3$ , conforme apresentado no Capítulo 4, é idêntico ao modelo  $M_1$ , adicionando somente uma restrição que diz respeito a capacidade de descarga, em número de veículos, de um dado terminal  $j$  ( $j \in N$ ) no período  $t$  ( $t \in T$ ). O modelo

$M_3$ , utilizando os dados do problema exemplo, possui 3.600 variáveis e 5.040 restrições. Foram realizados experimentos variando-se a capacidade de descarga dos terminais  $K_{jt}$ , designando-se um valor fixo  $K$  para todos os terminais em todos os períodos, variando-se esse valor  $K$  conforme apresentado na Seção 5.1 (da capacidade  $K = 13$  até  $K = 3$ ).

A análise foi realizada avaliando-se a demanda não atendida devido à limitação de capacidade, para o problema utilizado no modelo  $M_1$ -restrito, mantendo os outros parâmetros inalterados. Os resultados obtidos com a variação do parâmetro  $K$  são apresentados na Tabela 5.13, onde é possível verificar que quanto maior a capacidade de descarga dos terminais, menor a quantidade de cargas rejeitadas. A solução obtida com o valor de  $K = 13$  corresponde à solução obtida ao se resolver o problema teste  $M_1$ -restrito com apenas 11 cargas rejeitadas.

Tabela 5.13: Resumo dos resultados obtidos com o modelo  $M_3$ 

Item	$K = 3$	$K = 5$	$K = 7$	$K = 9$	$K = 11$	$K = 13$
Função Objetivo	118.678,00	128.107,00	131.644,00	134.369,00	135.087,00	135.193,00
Demanda atendida	67	84	93	99	102	103
Demanda não atendida	47	30	21	15	12	11
Movimentos cheios	67	84	93	99	102	103
Movimentos vazios	30	47	59	65	69	71
Movimentos de estoque	310	208	151	125	116	113
Tempo (s)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Qtd. De Veículos	24	24	24	24	24	24

#### 5.2.4 Resultados obtidos com o modelo $M_4$ – Problema Teste

O modelo matemático  $M_4$  corresponde ao modelo para solução do PADV, permitindo o *backlog* da demanda, porém toda a demanda deve ser atendida até o último período ( $I_{ijT} = 0$ ). Dessa forma, ao se resolver o problema teste com o parâmetro  $m_{it}^v$  apresentado na Tabela 5.3, a solução é inviável, como esperado. Sendo assim, foi utilizado o parâmetro  $m_{it}^v$  conforme Tabela 5.14 cujos valores foram obtidos resolvendo-se o problema utilizando o modelo  $M_5$ , que define a quantidade adicional de veículos para que toda a demanda seja atendida.

O modelo  $M_4$  resultou em 4.500 variáveis e 5.065 restrições. Foram realizados testes variando-se o parâmetro  $h_{ijt}$ , que representa a penalização por demandas não atendidas no percurso e período requisitado. A capacidade  $K_{jt}$  foi mantida constante no valor igual a 11 para todos os terminais em todos os períodos (isto é,  $K = 11$ ). Os demais parâmetros foram mantidos inalterados. O parâmetro  $A_{ij}^v$  foi restrito da seguinte forma:

Tabela 5.14: Oferta de veículos para o modelo  $M_4$  obtida resolvendo-se o modelo  $M_5$ 

Origem ( $i$ )	Período ( $t$ )	Tipo veíc. ( $v$ )	Quantidade ( $m_{it}^v$ )
SAO	6	agr	5
CON	7	agr	10
CPQ	8	agr	3
CON	12	agr	6
CPQ	14	agr	1
CPQ	22	agr	1
SAO	22	agr	3

- $A_{SAO,VIX}^{pro} = 0$ ;
- $A_{CPQ,VIX}^{pro} = 0$ ;
- $A_{RIO,VIX}^{pro} = 0$ ;
- $A_{CPQ,RIO}^{pro} = 0$ ;
- $A_{CPQ,SAO}^{agr} = 0$ ;
- $A_{SAO,CPQ}^{agr} = 0$ .

Na Tabela 5.15 é apresentado um resumo dos resultados obtidos variando-se o parâmetro  $h_{ijt}$ . Analisando estes resultados, pôde-se verificar que, conforme esperado, quanto menor a penalização por demandas não atendidas, maior é o *backlog* de cargas a serem transportadas.

Tabela 5.15: Resultados obtidos variando-se o parâmetro  $h_{ijt}$  para o modelo  $M_4$ 

Item	$h_{ijt} = 50,00$	$h_{ijt} = 200,00$	$h_{ijt} = 400,00$
Função Objetivo	177.966,00	175.398,00	173.808,00
Demanda atendida	114	114	114
Demanda não atendida	0	0	0
Movimentos cheios	114	114	114
Movimentos vazios	70	72	78
Movimentos de estoque	202	200	190
Movimentos de <i>backlog</i>	19	15	5
Tempo (s)	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Qtd. De Veículos	29	29	29

Vale ressaltar que os resultados obtidos e apresentados na Tabela 5.15 para o modelo  $M_4$  não são diretamente comparáveis aos resultados anteriores, já que o parâmetro  $m_{it}^v$  foi

alterado conforme Tabela 5.14.

### 5.2.5 Resultados obtidos com o modelo $M_5$ – Problema Teste

O modelo  $M_5$  avalia as necessidades de frota adicional, com terminais capacitados, permitindo o *backlog* da demanda. Da mesma forma que no modelo  $M_4$ , o parâmetro  $A_{ij}^v$  assumiu os seguintes valores:

- $A_{SAO,VIX}^{pro} = 0$ ;
- $A_{CPQ,VIX}^{pro} = 0$ ;
- $A_{RIO,VIX}^{pro} = 0$ ;
- $A_{CPQ,RIO}^{pro} = 0$ ;
- $A_{CPQ,SAO}^{agr} = 0$ ;
- $A_{SAO,CPQ}^{agr} = 0$ .

A capacidade  $K_{jt}$  foi mantida como constante e igual a 11 para todos os terminais em todos os períodos, e o parâmetro  $C^v$  assumiu valores  $C^{agr} = 5.000,00$  e  $C^{pro} = 5.250,00$ . Os demais parâmetros não foram alterados, tendo o modelo resultante 4.860 variáveis e 5.065 restrições.

Similarmente ao modelo  $M_4$ , o parâmetro  $h_{ijt}$  foi estudado em três níveis: 50; 200 e 400,  $\forall i, j \in N, \forall t \in T$ . Conforme evidenciado no modelo  $M_4$ , também no modelo  $M_5$ , quanto maior a penalização por demandas não atendidas, menor é o movimento de *backlog*. Os resultados obtidos resolvendo modelo  $M_5$  para diferentes valores de penalização  $h_{ijt}$  são apresentados na Tabela 5.16.

Na Tabela 5.17 são apresentados os resultados obtidos variando-se o valor do custo fixo ao se alocar um veículo no sistema ( $C^v$ ) conforme a Tabela 5.1, mantendo o valor de penalização por *backlog* de  $h_{ijt} = 400,00$ ,  $\forall i, j \in N, \forall t \in T$ . Analisando-se os resultados obtidos pode-se verificar que, quanto maior o custo fixo, menor a quantidade de veículos adicionais para atender toda a demanda, porém com uma maior quantidade de movimentos *backlog*. Ao se comparar as soluções obtidas, ao se resolver o problema teste, com os modelos  $M_2$  e  $M_5$ , ambos realizando o dimensionamento da frota adicional para que toda a demanda seja atendida, é possível verificar que enquanto no modelo  $M_2$  foram dimensionados sete veículos adicionais a frota (composta inicialmente de 24 veículos), no

modelo  $M_5$  foram dimensionados somente dois veículos adicionais, por permitir cargas em *backlog*.

Tabela 5.16: Resultados obtidos variando-se o parâmetro  $h_{ijt}$  para o modelo  $M_5$

Item	$h_{ijt} = 50,00$	$h_{ijt} = 200,00$	$h_{ijt} = 400,00$
Função Objetivo	85.243,00	91.112,00	95.014,00
Demanda atendida	114	114	114
Demanda não atendida	0	0	0
Movimentos cheios	114	114	114
Movimentos vazios	73	78	74
Movimentos de estoque	110	94	181
Movimentos de <i>backlog</i>	49	33	13
Tempo (s)	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Qtd. De Veículos	26	26	28

Ao se comparar os resultados obtidos com os modelos  $M_4$  e  $M_5$ , apresentados nas Tabelas 5.15– 5.16, respectivamente, no caso de variação da penalização por *backlog*  $h_{ijt}$ , é possível verificar que para o  $M_5$  houve uma maior quantidade de movimentos de *backlog* devido ao custo de incremento da frota para que toda a demanda seja atendida. Houve também uma maior quantidade de movimentos vazios e, em contrapartida, uma menor quantidade de movimentos de estoque.

Tabela 5.17: Resumo dos resultados obtidos com o modelo  $M_5$  variando-se o parâmetro  $C^v$ .

Item	$C^{agr} = 0,00$	$C^{agr} = 1,00$	$C^{agr} = 1.000,00$	$C^{agr} = 5.000,00$	$C^{agr} = 14.000,00$
	$C^{pro} = 0,00$	$C^{pro} = 1,05$	$C^{pro} = 1.050,00$	$C^{pro} = 5.250,00$	$C^{pro} = 14.633,40$
Função Objetivo	1.600,00	1.672,00	63.342,00	95.014,00	115.536,00
Demanda atendida	114	114	114	114	114
Demanda não atendida	0	0	0	0	0
Movimentos cheios	114	114	114	114	114
Movimentos vazios	0	0	46	74	80
Movimentos de estoque	1.263	1.979	819	181	101
Movimentos de <i>backlog</i>	4	4	4	13	31
Tempo (s)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Qtd. De Veículos	104	96	50	28	26

## 5.3 Experimentos com problemas gerados aleatoriamente

Com a finalidade de se avaliar o desempenho dos modelos  $M_1$ – $M_5$  ao se resolver problemas de maior porte (bem maiores que o problema teste das seções anteriores), foi criado um programa utilizando a linguagem de programação C para gerar aleatoriamente problemas de tamanhos e complexidades similares aos encontrados na prática. Os problemas gerados foram resolvidos utilizando-se os modelos propostos ( $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_4$  e  $M_5$ ). O código fonte do programa, bem como detalhes dos parâmetros de entrada e formato de saída, são apresentados em detalhes no Anexo B. Foram gerados 5 problemas aleatórios para cada modelo, totalizando 25 problemas a serem resolvidos, com os seguintes parâmetros para o programa gerador de problemas aleatórios:

- 36 períodos (6 períodos de 4 horas cada, em 6 dias);
- 53 terminais;
- 300 percursos com cargas a serem transportadas, sendo em cada percurso até 10 cargas;
- 2 grupos de veículos: (i) próprios, e (ii) agregados ( $|E| = 2$ );
- 130 ofertas de veículos distribuídos nestes dois grupos, com  $m_{it}^v$  variando para cada  $v$  uma quantidade de até 10 veículos para um dado  $i$  e  $t$ , sendo  $\sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \sum_{v \in E} m_{it}^v = 130$ ;

sendo esses valores inspirados nos problemas reais da empresa, com dimensões similares às encontradas na prática. Todos os 25 problemas foram gerados com os mesmos parâmetros.

Para os parâmetros:

- Capacidade dos terminais ( $K_{jt}$ ): foram gerados valores aleatórios inteiros positivos entre 9 e 18, para cada terminal  $j$  em cada período  $t$ ,  $\forall i \in N$ ,  $\forall t \in T$ ;
- Penalização por *backlog* ( $h_{ijt}$ ): foram gerados valores reais positivos aleatórios entre 0,1 e 1,1, para cada  $\forall i, j \in N$ , e  $\forall t \in T$ ;
- Custo por tipo de veículo ( $C^v$ ), sendo um valor real positivo aleatório entre 0,5 e 10,5,  $\forall v \in E$ ;

- Custo de reposicionamento de veículos vazios ( $c_{ij}^v$ ): valor real positivo aleatório entre 1 e 9, sendo gerado individualmente para cada combinação de  $i, j$  e  $v$ ,  $i, j \in N$ ,  $v \in E$ ;
- Lucro ao se transportar veículos cheios ( $p_{ij}^v$ ), um valor real positivo aleatório entre 10 e 18, gerado para cada  $i, j \in N$ , e para cada  $v \in E$ ;
- O tempo de viagem entre terminais ( $\tau_{ij}$ ) foi calculado da seguinte forma:
  - são gerados aleatoriamente  $|N|$  pontos no plano, com abscissas e ordenadas entre 1 e 100, assumindo somente valores inteiros;
  - é criada uma matriz de distâncias euclidianas entre os pontos gerados, sendo a cada distância  $d$  calculada,  $\tau_{ij} = \frac{d}{15}$ ;
- O parâmetro  $A_{ij}^v$  foi variado convenientemente, sorteando aleatoriamente a possibilidade do veículo  $v$  poder realizar o percurso de  $i$  para  $j$  ( $A_{ij}^v = 1$ ),  $\forall i, j \in N$ ,  $\forall v \in E$ .

Os resultados obtidos ao se resolver os problemas aleatórios gerados para cada modelo são apresentados nas Tabelas 5.18–5.22. Nessas tabelas pode-se verificar que conforme o tamanho do problema aumenta, aumentam também os tempos de execução, porém sendo ainda bem aceitáveis para decisões práticas. Adicionalmente, pode-se ressaltar que o comportamento dos modelos foi coerente com relação às mudanças de dados e os resultados anteriores apresentados, e obtidos na solução do problema exemplo na seção anterior.

Quando o número de grupos de veículos é pequeno (por exemplo com  $|E| = 2$ ), e os veículos não são muito diferentes entre os grupos (custos, receitas, restrições de rotas, etc.), observa-se que o problema é mais fácil de ser resolvido pelo CPLEX, pois fica mais próximo de um problema multi-fluxo como o de Ghiani et al. (2003). Porém, à medida que o número de grupos aumenta, e a frota se torna mais “heterogênea”, as dificuldades para a solução aumentam, conforme vai ficar mais evidente abaixo, e nos resultados adicionais com o CPLEX apresentados no Capítulo 7.

Foram ainda gerados aleatoriamente problemas em que cada veículo pertence a um grupo diferente. Para isso fixou-se  $|E| = 130$ , e cada  $m_{it}^v = \{0, 1\}$ ,  $\forall i \in N$ ,  $\forall t \in T$ ,  $\forall v \in E$ , satisfazendo:

$$\sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \sum_{v \in E} m_{it}^v = |E|.$$

Tabela 5.18: Resultados obtidos com os problemas aleatórios gerados -  $M_1$ 

$M_1$	Problema 1	Problema 2	Problema 3	Problema 4	Problema 5
Função Objetivo	14.024,58	10.400,93	7.569,51	9.073,29	8.798,15
Demanda atendida	213	173	155	166	135
Demanda não atendida	87	127	145	134	165
Movimentos cheios	213	173	155	166	135
Movimentos vazios	374	307	286	310	243
Movimentos de estoque	1.224	1.095	1.107	833	948
Tempo (s)	5,1636	2,9172	2,9952	2,4024	2,4648
Qtd. De Veículos	130	130	130	130	130

Tabela 5.19: Resultados obtidos com os problemas aleatórios gerados -  $M_2$ 

$M_2$	Problema 1	Problema 2	Problema 3	Problema 4	Problema 5
Função Objetivo	658,31	322,75	837,11	473,41	483,02
Demanda atendida	300	300	300	300	300
Demanda não atendida	0	0	0	0	0
Movimentos cheios	300	300	300	300	300
Movimentos vazios	201	99	264	244	223
Movimentos de estoque	4.448	5.820	3.092	2.987	4.021
Tempo (s)	3,9624	3,4944	4,3524	3,9780	9,1261
Qtd. De Veículos	235	289	199	198	217

Conforme mencionado anteriormente, em situações práticas pode ser necessário tratar individualmente cada veículo, placa a placa, em vez de separá-los em grupos. Porém, dessa maneira a complexidade para solução do modelo matemático deve crescer consideravelmente, em função do aumento do número de variáveis e restrições, e ainda devido ao fato de que todas as variáveis de decisão do problema, por exemplo para o modelo  $M_1$ , se tornam binárias.

Para o problema realista em estudo, contendo 53 terminais, 36 períodos e 130 veículos, temos mais de 26 milhões de variáveis de decisão binárias e restrições, tornando

Tabela 5.20: Resultados obtidos com os problemas aleatórios gerados -  $M_3$ 

$M_3$	Problema 1	Problema 2	Problema 3	Problema 4	Problema 5
Função Objetivo	14.024,58	10.400,93	7.569,51	9.073,29	8.798,15
Demanda atendida	213	173	155	166	135
Demanda não atendida	87	127	145	134	165
Movimentos cheios	213	173	155	166	135
Movimentos vazios	374	307	286	310	243
Movimentos de estoque	1.224	1.095	1.107	833	948
Tempo (s)	10,6705	6,1152	6,1308	4,7736	5,1324
Qtd. De Veículos	130	130	130	130	130

Tabela 5.21: Resultados obtidos com os problemas aleatórios gerados -  $M_4$ 

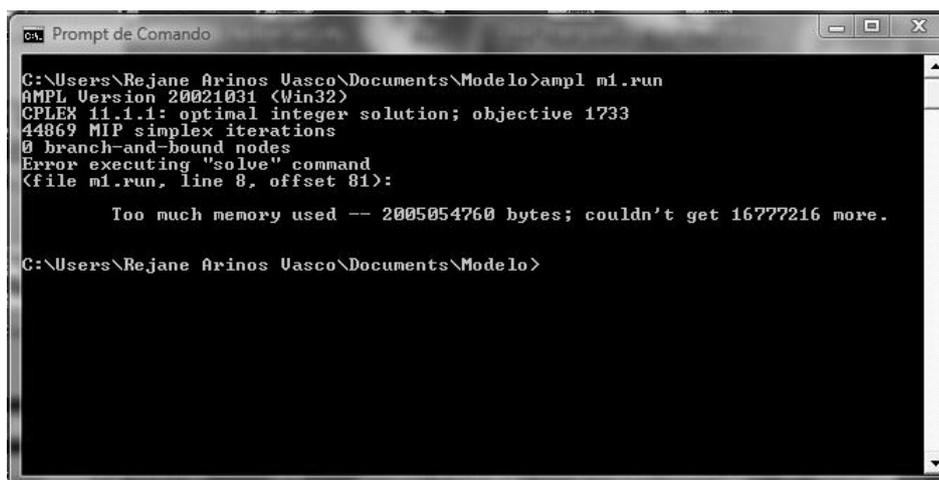
$M_4$	Problema 1	Problema 2	Problema 3	Problema 4	Problema 5
Função Objetivo	21.227,25	19.579,52	16.573,93	15.758,38	19.785,32
Demanda atendida	300	300	300	300	300
Demanda não atendida	0	0	0	0	0
Movimentos cheios	300	300	300	300	300
Movimentos vazios	401	498	372	323	363
Movimentos de estoque	924	427	453	243	1
Movimentos de <i>backlog</i>	2.148	2.630	2.880	2.461	4.511
Tempo (s)	5,5848	3,3540	6,1776	3,9624	2,2464
Qtd. De Veículos	130	130	130	130	130

Tabela 5.22: Resultados obtidos com os problemas aleatórios gerados -  $M_5$ 

$M_5$	Problema 1	Problema 2	Problema 3	Problema 4	Problema 5
Função Objetivo	619,85	315,55	780,34	447,48	448,41
Demanda atendida	300	300	300	300	300
Demanda não atendida	0	0	0	0	0
Movimentos cheios	300	300	300	300	300
Movimentos vazios	209	101	263	235	203
Movimentos de estoque	3.892	5.661	2.766	2.833	3.587
Movimentos de <i>backlog</i>	64	22	111	67	78
Tempo (s)	4,9140	4,2276	24,7106	9,2977	9,1573
Qtd. De Veículos	216	282	189	186	201

o problema difícil de ser resolvido na sua otimalidade, mesmo utilizando pacotes comerciais de otimização de última geração. Foram então utilizados os mesmos parâmetros apresentados anteriormente para gerar aleatoriamente os problemas, sendo que não foi possível resolver nenhum dos problemas gerados por conta da quantidade de memória necessária para o AMPL/CPLEX. Na Figura 5.1 é apresentada a mensagem de erro ao se tentar resolver um dos problemas gerados, tendo ainda somente  $|E| = 20$  veículos (ao invés de  $|E| = 130$ ). Estes experimentos ilustram as limitações dos modelos para resolver problemas com muitos tipos de veículos.

Foram realizados ainda testes adicionais utilizando o CPLEX (versão 11.1.1) em um computador na plataforma de 64 bits e com 16GB de memória RAM pertencente ao Grupo de Estudos em Pesquisa Operacional (GPO) do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos (DEP-UFSCar), e mesmo assim o problema não pode sequer ser gerado, apresentando uma mensagem de erro similar a apresentada na Figura 5.1, motivando assim o desenvolvimento de heurísticas para sua solução, o que vai ser objeto de estudo no Capítulo 6. Os resultados dos modelos em experimentos adicionais com um conjunto  $|E|$  variando de 1 até 17 tipos de veículos serão ainda analisados no



```

C:\Users\Rejane Arinos Vasco\Documents\Modelo>ampl m1.run
AMPL Version 20021031 (Win32)
CPLEX 11.1.1: optimal integer solution; objective 1733
44869 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes
Error executing "solve" command
<file m1.run, line 8, offset 81>:

    Too much memory used -- 2005054760 bytes; couldn't get 16777216 more.

C:\Users\Rejane Arinos Vasco\Documents\Modelo>
```

Figura 5.1: Mensagem de erro apresentada pelo CPLEX.

Capítulo 7, comparativamente aos resultados das heurísticas.

## 5.4 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foram realizados alguns experimentos computacionais para se verificar o comportamento dos modelos matemáticos propostos no Capítulo 4, utilizando-se dados inspirados em um problema real de uma empresa típica de transporte rodoviário de cargas no Brasil. Foram resolvidos problemas testes verificando-se os efeitos na solução final quando da variação de determinados parâmetros, verificando-se, para alguns modelos, uma relação direta entre a mudança de um determinado parâmetro e seu impacto (positivo ou negativo) na solução. Os modelos se comportaram de forma coerente e consistente com relação a estas mudanças e seus efeitos, tendo:

**Modelo  $M_1$**  : seja nos experimentos realizados nos dados fornecidos para o estudo de caso, como também nos experimentos com dados gerados aleatoriamente, foi possível a obtenção da solução ótima em um curto espaço de tempo, mesmo variando o parâmetro  $A_{ij}^v$ ;

**Modelo  $M_2$**  : realizou além da alocação dos veículos vazios, também o dimensionamento da frota adicional necessária para que toda a demanda fosse atendida, sendo importante destacar a importância do parâmetro  $C^v$ , pois as soluções obtidas foram muito sensíveis a esse parâmetro, variando a quantidade adicional de veículos de 7 a 79 veículos, indicando que, em aplicações práticas esse valor deve ser investigado

com cautela, sob pena de incorrer em soluções que não condizem com o problema em estudo.

**Modelo  $M_3$**  : foi incluída a restrição de capacidade nos terminais de destino em certos períodos, o CPLEX se mostrou eficaz para a solução do problema, sendo possível verificar que, quanto menor a capacidade nos terminais, maior a quantidade de carga rejeitada, ou não atendida.

**Modelo  $M_4$**  : não há cargas rejeitadas e deseja-se definir a alocação de veículos, considerando-se possíveis cargas em *backlog*, e que devem ser atendidas até o fim do horizonte de planejamento, tendo uma penalização ( $h_{ijt}$ ) para cargas não atendidas no período solicitado. A solução ótima pôde ser obtida em todos os problemas teste utilizados, podendo evidenciar que quanto maior a penalidade  $h_{ijt}$ , maior a quantidade de movimentos vazios, e obviamente uma menor quantidade de movimentos de *backlog*.

**Modelo  $M_5$**  : realiza o dimensionamento da frota adicional necessária para que toda a demanda seja atendida, incluindo restrições de capacidade nos terminais de destino, e permitindo que cargas permaneçam em *backlog* para atendimento em períodos futuros. Esse modelo pôde ser resolvido utilizando o CPLEX, sendo possível verificar a sensibilidade dos parâmetros  $h_{ijt}$  e  $C^v$  na solução final do problema.

Foram ainda resolvidos problemas gerados aleatoriamente com tamanho similar ao encontrado na prática, com o objetivo de se verificar se o método de solução empregado se mantinha adequado para tratar problemas de maior porte. Pôde-se verificar que, de forma geral, quando o problema possui somente dois grupos de veículos ( $|E| = 2$ ), o problema pode ser resolvido sem maiores dificuldades utilizando o método *branch-and-cut* do Cplex, com um tempo de processamento aceitável na prática. Porém, em situações práticas, pode ser necessário separar os veículos em muitos grupos (no limite, um grupo para cada veículo, para que os veículos sejam tratados individualmente, placa a placa), fazendo com que  $|E|$  seja igual a quantidade de veículos disponíveis. Isso pode inviabilizar a solução do problema pelo Cplex, em função dos requisitos de tempo e memória computacionais, o que motivou o desenvolvimento e métodos heurísticos do próximo capítulo.

## 6 *Heurísticas para solução do PADV*

Neste Capítulo são apresentadas heurísticas para solução do Problema de Alocação Dinâmica de Veículos (PADV) para casos em que os veículos pertencem a muitos grupos. Por exemplo, o caso em que cada veículo necessita ser tratado individualmente permitindo distinguir os movimentos realizados pela frota. Nestes casos a resolução dos modelos via linguagem de modelagem e *softwares* de otimização apresentou-se limitada em função do tempo e memória computacional, conforme mostrado no Capítulo 5.

Em situações práticas, os operadores de tráfego de uma empresa transportadora de cargas realizam suas decisões de alocação de veículos a cargas completas, neste trabalho, utilizando usualmente a placa, o nome do motorista ou do proprietário do caminhão, para definir qual veículo atenderá qual demanda em um dado período. Muitas vezes os operadores memorizam as placas dos veículos, ou o número da frota do veículo, ou ainda o nome dos motoristas / proprietários, e por conta disso estão acostumados a tratar cada veículo como sendo único, conhecendo ainda suas particularidades, como, por exemplo, no que diz respeito às rotas preferencialmente operadas pelos mesmos, adequação do veículo a rota, particularidades com clientes etc.

Como um dos objetivos centrais desta tese é o de contribuir para o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio na tomada de decisões operacionais de alocação de veículos vazios para ser utilizada em ambientes reais de operação, verificou-se que a separação da frota de veículos em grandes grupos nem sempre se apresenta mais adequada, podendo inclusive dificultar sua utilização prática, pois espera-se que a ferramenta de apoio defina os movimentos de cada um dos veículos, tendo um resultado que possa ser diretamente aplicado à prática, sem a necessidade de muito julgamento e decisão do operador.

Ao se tratar individualmente cada veículo, a complexidade para solução do modelo matemático cresce consideravelmente em função do aumento do número de variáveis e restrições. As variáveis de decisão tornam-se binárias, definindo se cada veículo  $v$  se

movimenta de  $i$  para  $j$  (carregado ou vazio) no período  $t$ ,  $i \in N$ ,  $t \in T$ ,  $v \in E$ , onde  $N$  representa o conjunto de terminais,  $T$  o tamanho do horizonte de planejamento discretizado em períodos, e  $E$  o conjunto de veículos.

Como foi apresentado no Capítulo 5, mesmo utilizando-se sofisticados pacotes comerciais de otimização e computadores com boas configurações de *hardware*, não foi possível gerar o problema por conta da grande necessidade de memória. Assim, para o problema em que cada veículo é tratado como um grupo, são propostas três heurísticas para solução do problema nomeado de  $M_1$ , conforme já apresentado na Seção 4.2. Para este trabalho, um problema de tamanho similar ao encontrado na prática consiste em 53 terminais geograficamente dispersos que interagem entre si, um horizonte de planejamento composto por 36 períodos, correspondendo a 6 dias de operação, sendo cada dia dividido em 6 períodos de 4 horas. Uma frota composta por 130 veículos ou grupos, e 300 demandas a serem transportadas.

De forma resumida, o modelo  $M_1$  difere do modelo tradicionalmente utilizado para representar o PADV (GHIANI et al., 2003) nos seguintes aspectos:

- o modelo  $M_1$  incorpora a possibilidade de inclusão de mais de um tipo ou grupo de veículos para distinguir os veículos da frota;
- inclui um parâmetro que possibilita restringir ou não que certos tipos (ou grupos) de veículos operem em determinadas rotas.

Conforme comentado anteriormente, com essas modificações, o modelo com múltiplos tipos de veículos pode ser modelado como um problema linear de fluxo *multicommodity* de mínimo custo, transformando a restrição de demanda (3.3) apresentada no Capítulo 3, em uma restrição de mochila (*bundle constraint*) (POWELL et al., 1995). Dessa maneira, diferente do modelo utilizado para representar o PADV em (3.1)–(3.5), ele é de difícil solução exata (NP-difícil), conforme indicado, por exemplo, em (GHIANI et al., 2003).

## 6.1 Uma heurística “gulosa” para geração de soluções iniciais para o PADV

Heurísticas gulosas para a obtenção de soluções iniciais viáveis para problemas difíceis de otimização são muito utilizadas, pois permitem rapidamente, e muitas vezes de forma intuitiva, gerar ótimos locais, servindo de ponto de partida para outras heurísticas mais sofisticadas que visam por fim ir além do ótimo local obtido pelo procedimento “guloso”.

Para a obtenção de uma solução inicial viável para o PADV, optou-se pelo desenvolvimento de uma heurística construtiva “gulosa” (*greedy*) que levasse em conta as demandas a serem atendidas, nos diferentes terminais e em diferentes períodos, priorizando as demandas mais lucrativas (com maior  $p_{ij}^v$ ), verificando-se qual (ou quais) veículos podiam ser deslocados vazios, caso necessário, para o atendimento da demanda.

Uma heurística gulosa realiza iterativamente uma escolha ótima local com a esperança de que essas decisões direcionem para o ótimo global do problema em estudo. Raramente heurísticas gulosas obtêm soluções ótimas para problemas de otimização, mas para certos grupos de problemas, como apresentado em Lawler (1976) e Papadimitriou e Steiglitz (1982), ela se mostra eficaz. Como exemplo, podemos citar o caso do problema da árvore geradora de mínimo custo (*Minimal Spanning Tree, MST*) que pode ser resolvido otimamente utilizando uma heurística gulosa (VINCE, 2002).

Por outro lado, Bang-Jensen et al. (2004) apresentam diversos casos em que a heurística gulosa apresenta soluções de baixa qualidade, senão a pior solução dentre algumas heurísticas alternativas para certos problemas. Um exemplo desse comportamento é o caso do problema do caixeiro viajante assimétrico (ATSP), ou ainda em certos exemplos do problema do caixeiro viajante simétrico (STSP), no caso especial em que os problemas possuem múltiplas soluções ótimas, em que soluções de baixa qualidade são obtidas utilizando abordagens gulosas.

Para o PADV foi desenvolvida uma heurística gulosa para geração de uma solução inicial viável que foi utilizada como ponto de partida para um procedimento de melhoria, ou ainda para outras heurísticas que utilizam busca local ou utilizam uma população de soluções, como o GRASP, *simulated annealing* e a colônia de formigas.

No pseudocódigo 6.1.1 é descrita a heurística gulosa proposta para a geração de soluções iniciais viáveis para o PADV. Para a representação do pseudocódigo adotou-se o mesmo formato utilizado em Kreher e Stinson (1999). Após a ordenação das demandas em ordem cronológica e em seguida por lucro  $p_{ij}^v$  (para servir de desempate nos casos de cargas no mesmo período), é verificado para cada carga não atendida se existe algum veículo que pode “chegar a tempo” para atender a demanda. Entende-se por “chegar a tempo” o tempo de viagem a partir da posição atual do veículo até a origem da carga. Além de verificar se um determinado veículo pode chegar a tempo para atender a demanda, é necessário também analisar se esse veículo pode realizar o percurso vazio da sua posição atual até a origem da carga, e também da origem da carga até seu destino.

Na heurística gulosa, dentre os veículos candidatos que podem chegar a tempo para

atender a demanda, escolhe-se o de menor custo de deslocamento vazio  $c_{ij}^v$ . Esse procedimento é realizado até que todas as cargas não atendidas sejam verificadas. São armazenados em uma estrutura de dados específica todos os movimentos de cada veículo, sejam eles cheios ou vazios, com seus respectivos percursos, períodos, custos e lucros.

**Pseudocódigo 6.1.1:** HEURÍSTICA GULOSA(*cargas*, *veículos*)

Ordenar cargas de forma cronológica e em seguida decrescente de lucro  $p_{ij}^v$ .

**Para cada** carga não atendida

{	<i>encontrou</i> ← <i>falso</i>																		
{	<i>custo</i> ← ∞																		
{	<b>Para cada</b> veículo <i>v</i> da frota																		
{	<table style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;"><b>Faça</b> {</td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;"> <table style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;"><b>se</b> veículo <i>v</i> pode chegar a tempo e</td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;">pode realizar o percurso</td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;"><b>então</b> {</td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;"><b>se</b> <math>c_{ij}^v &lt; \textit{custo}</math></td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;"><b>então</b> {</td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;"><i>encontrou</i> ← <i>verdadeiro</i></td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;"><i>custo</i> ← <math>c_{ij}^v</math></td> </tr> </table> </td> </tr> </table>	{	<b>Faça</b> {	{	<table style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;"><b>se</b> veículo <i>v</i> pode chegar a tempo e</td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;">pode realizar o percurso</td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;"><b>então</b> {</td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;"><b>se</b> <math>c_{ij}^v &lt; \textit{custo}</math></td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;"><b>então</b> {</td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;"><i>encontrou</i> ← <i>verdadeiro</i></td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;"><i>custo</i> ← <math>c_{ij}^v</math></td> </tr> </table>	{	<b>se</b> veículo <i>v</i> pode chegar a tempo e	{	pode realizar o percurso	{	<b>então</b> {	{	<b>se</b> $c_{ij}^v < \textit{custo}$	{	<b>então</b> {	{	<i>encontrou</i> ← <i>verdadeiro</i>	{	<i>custo</i> ← $c_{ij}^v$
{	<b>Faça</b> {																		
{	<table style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;"><b>se</b> veículo <i>v</i> pode chegar a tempo e</td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;">pode realizar o percurso</td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;"><b>então</b> {</td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;"><b>se</b> <math>c_{ij}^v &lt; \textit{custo}</math></td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;"><b>então</b> {</td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;"><i>encontrou</i> ← <i>verdadeiro</i></td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: middle; padding-right: 10px;">{</td> <td style="padding-right: 10px;"><i>custo</i> ← <math>c_{ij}^v</math></td> </tr> </table>	{	<b>se</b> veículo <i>v</i> pode chegar a tempo e	{	pode realizar o percurso	{	<b>então</b> {	{	<b>se</b> $c_{ij}^v < \textit{custo}$	{	<b>então</b> {	{	<i>encontrou</i> ← <i>verdadeiro</i>	{	<i>custo</i> ← $c_{ij}^v$				
{	<b>se</b> veículo <i>v</i> pode chegar a tempo e																		
{	pode realizar o percurso																		
{	<b>então</b> {																		
{	<b>se</b> $c_{ij}^v < \textit{custo}$																		
{	<b>então</b> {																		
{	<i>encontrou</i> ← <i>verdadeiro</i>																		
{	<i>custo</i> ← $c_{ij}^v$																		

{	**Faça** {															
{	**se** *encontrou*															
{					---	--		-	realiza o movimento vazio		-	desloca o veículo <i>v</i> para a origem <i>i</i> da carga		-	realiza o movimento carregado	
{	**então** {															
-	desloca o veículo *v* para o destino *j* da carga															
-	grava os movimentos vazios e cheios															
-	atualiza a quantidade de carga a ser atendida															
-	atualiza a posição e período do veículo *v*															

No procedimento guloso para criação da solução inicial, todas as cargas são ordenadas em ordem cronológica e, se houver mais de uma carga no mesmo período, são ainda ordenadas em ordem decrescente de lucro  $p_{ij}^v$  a fim de favorecer cargas que estejam no mesmo período, porém com a possibilidade de serem mais favoráveis do ponto de vista do valor final da função objetivo. Resumidamente, essa ordenação teve como objetivo realizar o transporte de cargas mais próximas ao início do horizonte de planejamento para que os veículos, após esse transporte, estejam liberados o mais recente possível para novas designações, tentando aumentar assim a produtividade dos mesmos. Se não houvesse essa ordenação, haveria o risco de que veículos que entram no sistema em períodos iniciais fossem designados para o atendimento de uma carga com período de início próximo ao

fim do horizonte de planejamento, comprometendo o atendimento a outras demandas.

Seguindo o procedimento guloso para geração de soluções iniciais para o PADV, cada carga (mais próxima ao início do horizonte de planejamento e com maior lucro  $p_{ij}^v$ ) é analisada individualmente e todos os veículos que podem chegar a tempo (caso existam) para atender a demanda são candidatos a serem deslocados vazios para o atendimento. Além do tempo de viagem com o deslocamento vazio, é analisando ainda se o veículo  $v$  pode realizar o percurso desde a sua posição atual  $k$  até a origem  $i$  da carga, e também o deslocamento da origem  $i$  da carga até o seu destino  $j$ , ou melhor,  $A_{ki}^v = A_{ij}^v = 1$ .

O veículo escolhido será o que possuir o menor custo de deslocamento vazio  $c_{ij}^v$ . Após escolhido o veículo, a demanda é atendida e são atualizados os dados de posicionamento do veículo escolhido, deslocando o mesmo para o terminal de destino da carga, no seu respectivo período final, sendo  $t + \tau_{ij}$ , onde  $t$  é o período de início da demanda, e  $\tau_{ij}$  o tempo de viagem desde a origem  $i$  da carga até o seu destino  $j$ .

Para facilitar o entendimento da heurística gulosa para geração de uma solução inicial viável para o PADV, é apresentado na Figura 6.1 a solução inicial gulosa para o problema exemplo apresentado em Ghiani et al. (2003) e utilizado no Capítulo 4 na Subseção 4.2.1. Nesse problema exemplo, três veículos entram no sistema:  $m_{21}^1 = 1$ ;  $m_{41}^2 = 1$  e  $m_{22}^2 = 1$ . O lucro  $p_{ij}^v$  e o custo de deslocamento vazio  $c_{ij}^v$ , são considerados iguais independente do tipo de veículo, para esse problema exemplo. As demandas a serem atendidas são:

1.  $d_{241} = 1$ ;
2.  $d_{531} = 1$ ;
3.  $d_{123} = 2$ .

Seguindo os passos apresentados na heurística gulosa, primeiramente é necessário ordenar as demandas por período e em seguida por lucro  $p_{ij}$ , resultando na seguinte sequência de demandas a serem avaliadas  $cargas = \{1, 2, 3\}$ . Com a ordenação realizada, o próximo passo é tentar encontrar um veículo que pode atender a demanda 1 que possui como origem o terminal 2 e tem seu destino o terminal 4 no período 1. Como o veículo 1 entra no sistema no terminal 2 e período 1 ( $m_{21}^1 = 1$ ), o mesmo é utilizado para atender a demanda.

A próxima demanda a ser atendida tem como origem o terminal 5 destinada ao terminal 3 no período 1. Como não há nenhum veículo que possa ser deslocado para atender

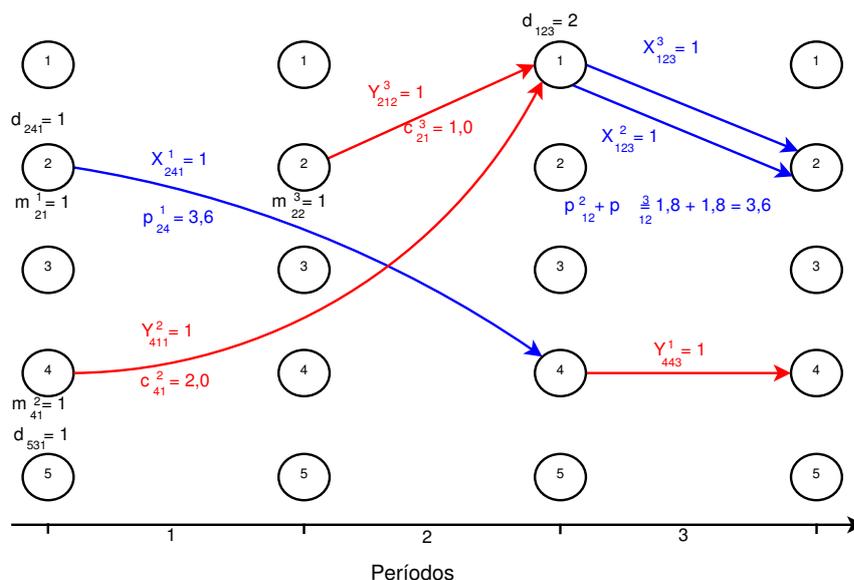


Figura 6.1: Representação gráfica da solução gulosa do problema exemplo.

a demanda, essa carga não é atendida. A última demanda são duas cargas a serem transportadas do terminal 1 para o terminal 2 no período 3. Dois veículos são deslocados vazios para atender a demanda. O primeiro do terminal 2 e período 2 ( $m_{22}^3 = 1$ ), e o segundo do terminal 4 no primeiro período ( $m_{41}^2 = 1$ ), tendo portanto toda a demanda sido atendida. Como não há mais nenhuma carga a ser avaliada, essa é a solução inicial gulosa para o problema exemplo. A representação gráfica da solução inicial gulosa é apresentada na Figura 6.1.

O valor da função objetivo ( $FO$ ) é calculado como:

$$\begin{aligned}
 FO &= X_{241}^1 \times p_{24}^1 + X_{123}^2 \times p_{12}^2 + X_{123}^3 \times p_{12}^3 - Y_{212}^3 \times c_{21}^3 - Y_{411}^2 \times c_{41}^2 \\
 &= 1,0 \times 3,6 + 1,0 \times 1,8 + 1,0 \times 1,8 - 1,0 \times 1,0 - 1,0 \times 2,0 \\
 &= 4,2;
 \end{aligned}$$

lembrando que a solução ótima para esse problema possui valor 4,4 ( $FO = 4,4$ ).

## 6.2 Procedimento de melhoria utilizando busca local

Foi desenvolvido um procedimento de melhoria para, a partir da solução inicial, investigar dentre as cargas não atendidas no procedimento guloso, quais delas seriam mais

interessantes a serem atendidas considerando-se o seu lucro  $p_{ij}^v$ . O procedimento de melhoria descrito no pseudocódigo 6.2.1 consistiu em verificar-se, para cada carga não atendida, possíveis veículos que pudessem atender essa demanda, mas foram deslocados para outra carga na estratégia gulosa, que considera a análise das demandas obedecendo a ordem cronológica e de contribuição ao lucro.

É mantido um histórico detalhado de todos os movimentos realizados por cada veículo  $v$ , armazenando todas as suas paradas em um dado terminal  $k$  e período  $t$ , e ainda se o deslocamento realizado para se chegar em  $k$  em  $t$  foi vazio ou carregado. Com base nesse histórico, o procedimento de melhoria consiste em iterativamente analisar cada posicionamento do veículo em um dado terminal em um dado período e verificar se o mesmo pode ser deslocado desse espaço-tempo para atender uma outra carga não atendida. Da mesma forma que na heurística gulosa, é analisado se o veículo pode realizar o percurso da sua posição  $k$  para a origem  $i$  da carga, e também se pode realizar o percurso desde a origem  $i$  até o destino da carga, ou seja,  $A_{ki}^v = A_{ij}^v = 1$ . O veículo escolhido para alteração da solução será aquele que tiver uma maior contribuição no valor corrente da função objetivo.

**Pseudocódigo 6.2.1:** PROCEDIMENTO DE MELHORIA(*cargas*, *veículos*)

Cria solução inicial gulosa conforme pseudocódigo 6.1.1

Ordenar as cargas não atendidas em ordem decrescente de lucro  $p_{ij}$

**Para cada** carga não atendida

{	$encontrou \leftarrow falso$ $valor \leftarrow \infty$ <b>Para cada</b> veículo $v$ da frota <b>Faça Para cada</b> movimento realizado pelo veículo $v$ <b>Faça Para</b> $t \leftarrow T$ até 1 <b>Faça se</b> veículo $v$ em $t$ no terminal $k$ pode chegar a tempo e pode realizar o percurso então { - seja $f$ a contribuição do veículo $v$ na função objetivo a partir de $k$ e $t$ - calcula a contribuição na função objetivo caso o veículo $v$ se desloque vazio e realize atendimento da demanda $f' \leftarrow p_{ij}^v - c_{ki}^v$ <b>se</b> $f' > f$ então <b>se</b> $f' > valor$ então { $encontrou \leftarrow verdadeiro$ $valor \leftarrow f'$ } }
}	<b>se</b> encontrou então { - apaga movimentos do veículo $v$ a partir de $k$ e $t$ - realiza o movimento vazio - desloca o veículo $v$ para a origem $i$ da carga - realiza o movimento carregado - desloca o veículo $v$ para o destino $j$ da carga - grava os movimentos vazios e cheios - atualiza a quantidade de carga a ser atendida - atualiza a posição e período do veículo $v$ - atualiza valor da função objetivo }

Utilizando o mesmo problema exemplo utilizado na seção anterior para facilitar o entendimento da heurística gulosa, se alterarmos a sequência com que as demandas são avaliadas na heurística gulosa, de  $\{1, 2, 3\}$  para  $\{3, 1, 2\}$ , somente para fins ilustrativos,

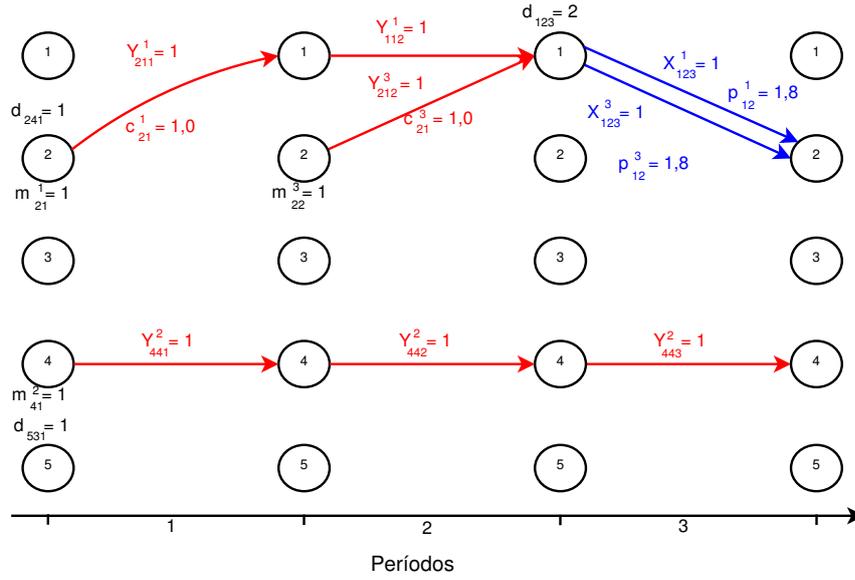


Figura 6.2: Representação gráfica de solução alternativa para o problema exemplo.

temos uma nova solução inicial gulosa conforme apresentado na Figura 6.2. Nessa nova solução inicial, as duas cargas do terminal 1 para o terminal 2 no período 3 ( $d_{123} = 2$ ), demanda 3, são as primeiras a serem avaliadas, fazendo com que dois veículos realizem deslocamentos vazios. O primeiro deles do terminal 2 no primeiro período ( $m_{21}^1 = 1$ ), e o segundo do terminal 2 no período 2 ( $m_{22}^3 = 1$ ). Com esses movimentos da frota, todas as outras cargas são rejeitadas por não haver mais veículos disponíveis. O valor da função objetivo ( $FO$ ) dessa nova solução é:

$$\begin{aligned}
 FO &= X_{123}^1 \times p_{12}^1 + X_{123}^3 \times p_{12}^3 - Y_{211}^1 \times c_{21}^1 - Y_{212}^3 \times c_{21}^3 \\
 &= 1 \times 1,8 + 1 \times 1,8 - 1 \times 1,0 - 1 \times 1,0 \\
 &= 1,6.
 \end{aligned}$$

Utilizando o procedimento de melhoria para essa solução inicial, o primeiro passo é ordenar as demandas não atendidas. Como as duas demandas não atendidas possuem o mesmo valor de lucro ( $p_{53} = p_{24} = 3,6$ ), não há diferença em se selecionar a primeira carga a ser avaliada. Observa-se que a demanda 2 com origem no terminal 5 e destino no terminal 3 no período 1 ( $d_{531} = 1$ ), independentemente do veículo avaliado, é impossível de ser atendida.

Já a demanda 1 com origem no terminal 2 e destino no terminal 4 no primeiro período ( $d_{241} = 1$ ) poderia ter sido atendida pelo veículo que entra no sistema no terminal 2 e no período 1 ( $m_{21}^1$ ), mas esse veículo foi deslocado para o terminal 1 para atender

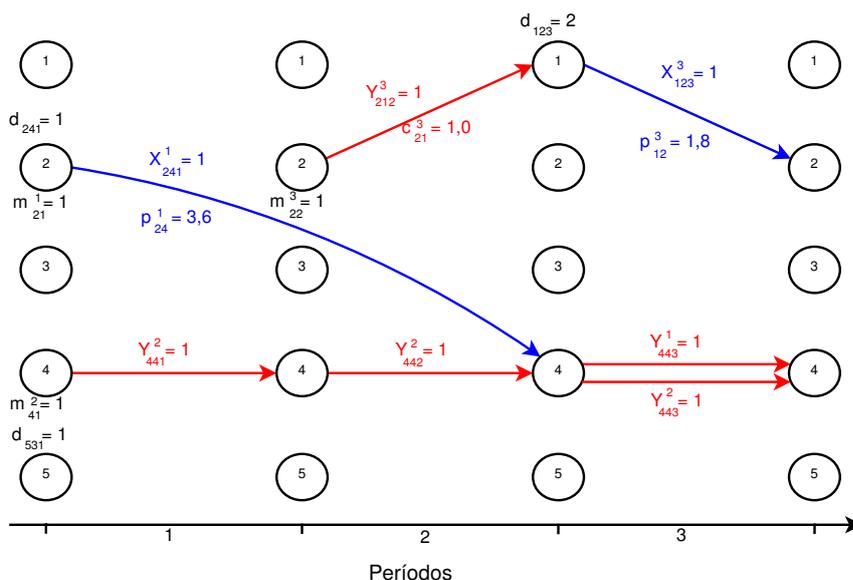


Figura 6.3: Representação gráfica da solução ótima do problema exemplo.

uma das cargas da demanda 3, contribuindo na função objetivo com o valor 0,8 ( $f = X_{123}^1 \times p_{12}^1 - Y_{211}^1 \times c_{21}^1 = 1,0 \times 1,8 - 1,0 \times 1,0 = 0,8$ ). Se o veículo for utilizado para atender a demanda 1, não há custo de deslocamento vazio, dado que o veículo entra no sistema no mesmo terminal e período que a demanda, temos somente o lucro  $f' = 3,6$ . De acordo com o procedimento de melhoria, dado que  $f' > f$ , a modificação na solução inicial é realizada, tendo agora a função objetivo ( $FO$ ) um novo valor:

$$\begin{aligned}
 FO &= X_{241}^1 \times p_{24}^1 + X_{123}^3 \times p_{12}^3 - Y_{212}^3 \times c_{21}^3 \\
 &= 1,0 \times 3,6 + 1,0 \times 1,8 - 1,0 \times 1,0 \\
 &= 4,4;
 \end{aligned}$$

que corresponde à solução ótima para o problema, conforme apresentado na Figura 6.3. Com as alterações realizadas na solução inicial, possivelmente outras cargas deixaram de ser atendidas, e os experimentos computacionais realizados mostraram que melhores resultados foram obtidos ao se executar esse procedimento de melhoria mais de uma vez.

### 6.3 Utilizando o GRASP para solução do PADV

Após o desenvolvimento da heurística construtiva gulosa, e o procedimento de melhoria, tentou-se verificar se a combinação dos dois procedimentos, juntamente com um

mecanismo aleatório para adicionar variabilidade na heurística gulosa, seriam capazes de obter soluções de boa qualidade na solução do PADV. Assim, foi desenvolvida uma aplicação da metaheurística GRASP para a solução do PADV, conforme descrito no pseudocódigo 6.3.1. Conforme Capítulo 3, o GRASP possui duas etapas básicas, sendo: (i) construção de soluções de forma gulosa e aleatória, e (ii) a execução de busca local na solução gulosa criada em (i).

**Pseudocódigo 6.3.1: METAHEURÍSTICA GRASP**(*cargas*, *veículos*)

- Ordena as cargas em ordem decrescente de lucro  $p_{ij}^v$  e armazena o índice das cargas ordenadas em um vetor  $V$

**Enquanto** A quantidade máxima de iterações não for alcançada

<b>Faça</b> {	{	<b>Enquanto</b> Solução gulosa não estiver completa
		- Inicie com o vetor de cargas ordenadas $V$
		<b>Para cada</b> Carga $C$ ainda não inserida na solução
		{
		- Verifica a contribuição na função objetivo caso a carga $C$ seja incluída na solução – $f_c$
		- Insere em um vetor a carga cand. $C$ e seu valor – $f_c$
		- Grava máximo e mínimo das contribuições dos
	<b>Faça</b> {	candidatos
		<b>se</b> $f_c > f_{max}$
		<b>então</b> $f_{max} \leftarrow f_c$
		<b>se</b> $f_c < f_{min}$
		<b>então</b> $f_{min} \leftarrow f_c$
		$\alpha \leftarrow UNIF[0, 1]$
		$cutoff \leftarrow f_{max} - \alpha \times (f_{max} - f_{min})$
		<b>Para cada</b> Candidato
		{
		<b>se</b> $f_c \geq cutoff$
		<b>então</b> - Insere candidato na lista restrita $RCL$
		- Sorteia aleatoriamente um candidato da RCL e insere na solução
		- Executa procedimento de melhoria na solução gulosa criada conforme pseudocódigo 6.2.1
		- Grava melhor solução encontrada até o momento

De acordo com o pseudocódigo 6.3.1, inicialmente todas as cargas são ordenadas em ordem decrescente de lucro e, enquanto a quantidade máxima de iterações não for

alcançada, são geradas soluções gulosas aleatórias a partir desse vetor ordenado, e o procedimento de melhoria descrito no pseudocódigo 6.2.1 é executado a cada solução gulosa gerada.

Na criação da solução gulosa aleatória, cada carga ainda não inserida na solução em construção é avaliada individualmente, e é calculada a sua contribuição na função objetivo, caso seja atendida, entendendo como contribuição a diferença entre o lucro obtido no transporte, e o custo de deslocamento de veículos vazios. Cada carga não atendida é uma candidata a ser inserida na solução em construção.

Após a avaliação da contribuição de cada carga na função objetivo, é criada uma lista restrita de candidatos (*RCL*), contendo todas as cargas candidatas que possuem contribuição  $f_c$  maior ou igual a um valor de corte, ou *cutoff*. O valor de *cutoff* é calculado a partir dos valores máximo e mínimo de contribuição de cada carga candidata, e definido como:  $cutoff = f_{max} - \alpha \times (f_{max} - f_{min})$ , onde  $f_{max}$ , e  $f_{min}$  representam os valores máximo e mínimo, respectivamente, de contribuição dos candidatos disponíveis.

O parâmetro  $\alpha$  assume um valor aleatório entre 0 e 1 ( $\alpha = UNIF[0, 1]$ ), e é definido a cada novo elemento adicionado a solução. O valor  $\alpha$  possui a função de balancear entre uma escolha puramente gulosa, quando  $\alpha = 0$ , e uma escolha puramente aleatória, quando  $\alpha = 1$ .

A carga candidata a ser inserida na solução em construção é escolhida aleatoriamente dentre todas as cargas candidatas contidas na lista restrita *RCL*. Uma vez construída a solução inicial, esta passa pelo procedimento de melhoria descrito no pseudocódigo 6.2.1 com o objetivo de se tentar obter uma solução de melhor qualidade. Em seguida é verificado se a solução corrente obtida, após o procedimento de melhoria, supera a melhor solução obtida até o momento, e a melhor solução é atualizada caso necessário.

Retomando o problema exemplo apresentado em Ghiani et al. (2003) e utilizado no Capítulo 4 na Subseção 4.2.1, temos as seguintes demandas a serem atendidas:

1.  $d_{241} = 1$ ;
2.  $d_{531} = 1$ ;
3.  $d_{123} = 2$ .

Nesse problema exemplo três veículos entram no sistema, o veículo 1 no terminal 2 e período 1 ( $m_{21}^1 = 1$ ); o veículo 2 no terminal 4 e no período 1 ( $m_{41}^2 = 1$ ), e o veículo 3 no

terminal 2 e período 2 ( $m_{22}^3 = 1$ ). Seguindo os passos apresentados no pseudocódigo 6.3.1, temos inicialmente que ordenar as demandas de forma cronológica, e em seguida em ordem decrescente de lucro, resultando em um vetor de demandas com a seguinte ordem:  $cargas = \{1, 2, 3\}$ , representando as demandas  $d_{241}$ ,  $d_{531}$ , e  $d_{123}$ , respectivamente. Seguindo a sequência do vetor  $cargas$ , temos inicialmente a carga 1, e para que a carga seja atendida temos sua contribuição calculada por:

$$\begin{aligned} f_1 &= X_{241}^1 \times p_{24}^1 \\ &= 1 \times 3,6 \\ &= 3,6; \end{aligned}$$

Como o veículo 1 entra no sistema no mesmo período da demanda ( $m_{21}^1 = 1$ ), não há custo de deslocamento vazio, tendo somente o lucro,  $f_1 = 3,6$ .

A demanda 2 ( $d_{531} = 1$ ) não pode ser atendida pois está no primeiro período e não há opção de veículo para atendimento. A demanda 3 possui duas cargas a serem transportadas ( $d_{123} = 2$ ) e possui três alternativas para atendimento: (i) o deslocamento vazio do veículo 1 do terminal 2 no período 1 ( $m_{21}^1 = 1$ ), e o veículo 3 do terminal 2 no período 2 ( $m_{22}^3 = 1$ ). Como o tempo de viagem de 1 para 2 é de 1 período ( $\tau_{21} = 1$ ), essa movimentação de vazios se torna viável; e (ii) o deslocamento do veículo 2 vazio de 4 ( $m_{41}^2 = 1$ ) tendo tempo de viagem igual a dois períodos ( $\tau_{41} = 2$ ).

Na primeira alternativa para a demanda 3 ( $d_{123} = 2$ ), temos a contribuição:

$$\begin{aligned} f_3^1 &= X_{123}^1 \times p_{12}^1 + X_{123}^3 \times p_{12}^3 - Y_{211}^1 \times c_{21}^1 - Y_{212}^3 \times c_{21}^3 \\ &= 1 \times 1,8 + 1 \times 1,8 - 1 \times 1,0 - 1 \times 1,0 \\ &= 1,6; \end{aligned}$$

e para a segunda alternativa, temos:

$$\begin{aligned} f_3^2 &= X_{123}^2 \times p_{12}^2 + X_{123}^3 \times p_{12}^3 - Y_{411}^2 \times c_{41}^2 - Y_{212}^3 \times c_{21}^3 \\ &= 1 \times 1,8 + 1 \times 1,8 - 1 \times 2,0 - 1 \times 1,0 \\ &= 0,6; \end{aligned}$$

Assim, temos as contribuições  $f_1 = 3,6$ ,  $f_2 = 0$ ,  $f_3^1 = 1,6$ , e  $f_3^2 = 0,6$ . No cálculo do *cutoff* temos os valores  $f_{max} = f_1$  e  $f_{min} = f_3^2$ . Supondo, para fins didáticos, o valor de  $\alpha = 1,0$ , temos o cálculo do *cutoff* como:

$$\begin{aligned}
 \textit{cutoff} &= f_{max} - \alpha \times (f_{max} - f_{min}) \\
 &= f_1 - \alpha \times (f_1 - f_3^2) \\
 &= 3,6 - 1,0 \times (3,6 - 0,6) \\
 &= 3,6 - 3,0 \\
 &= 0,6.
 \end{aligned}$$

Portanto, todas as cargas candidatas que possuírem valor de contribuição maior ou igual ao *cutoff* são inseridos na lista restrita *RCL*. Assim, *RCL* é formada pelo conjunto das demandas 1 e 3 ( $RCL = \{f_1, f_3^1, f_3^2\}$ ). De acordo com a metaheurística GRASP, é selecionado aleatoriamente um elemento da lista restrita para ser inserida na solução em construção.

Supondo que a demanda 3 ( $d_{123} = 2$ ), na sua primeira opção ( $f_3^1$ ) seja aleatoriamente escolhida para ser inserida na solução, temos na Figura 6.4 a solução parcial para o problema exemplo. Restam ainda para serem avaliadas, após a inclusão da demanda 3 ( $d_{123} = 2$ ) na solução, as demandas 1 e 2 ( $cargas = \{1, 2\}$ ). Como não há nenhum veículo disponível para o atendimento de nenhuma das demandas por conta da utilização dos veículos deslocados para o atendimento da demanda 3, a solução obtida é assumida como solução inicial para o problema, tendo a função objetivo um valor igual a  $FO = f_3^1 = 1,6$ .

Com a solução inicial criada, a próxima etapa do GRASP proposto consiste na execução do procedimento de melhoria, conforme descrito no pseudocódigo 6.2.1, sendo então avaliadas todas as cargas não atendidas, no caso as demandas 1 e 2 ( $d_{241} = 1$  e  $d_{531} = 1$ , respectivamente). Como a demanda 2 não será atendida por conta da indisponibilidade de veículo, é avaliada a possibilidade de se utilizar um dos veículos que foi deslocado para atender uma das cargas da demanda 3, para realizar o transporte da demanda 1 ( $d_{241} = 1$ ).

Atendendo a demanda 1 com um dos veículos deslocados inicialmente para atender uma das cargas da demanda 3 ( $d_{123} = 2$ ), especificamente o veículo que entra no sistema no terminal 2 e período 1 ( $m_{21}^1 = 1$ ), foi possível obter a solução ótima para o problema exemplo, conforme apresentado na Figura 6.5:

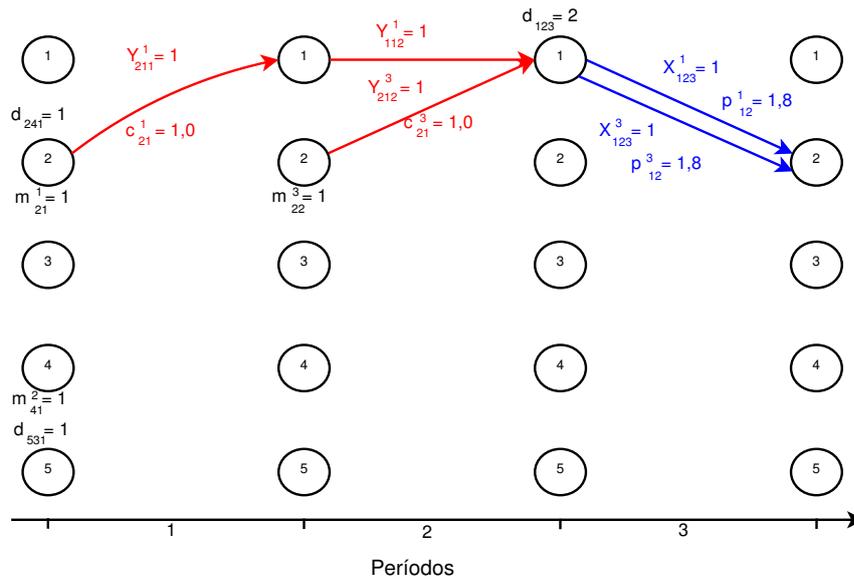


Figura 6.4: Representação gráfica da primeira etapa do GRASP.

$$\begin{aligned}
 FO &= X_{241}^1 \times p_{24}^1 + X_{123}^3 \times p_{12}^3 - Y_{212}^3 \times c_{21}^3 \\
 &= 1,0 \times 3,6 + 1,0 \times 1,8 - 1,0 \times 1,0 \\
 &= 4,4;
 \end{aligned}$$

A metaheurística GRASP, implementado conforme pseudocódigo 6.3.1, encontra esta solução ótima em menos de um segundo.

## 6.4 A metaheurística *Simulated Annealing* para solução do PADV

Como apresentado na Seção 6.2 que descreve o procedimento de melhoria para soluções iniciais geradas, se for alterada a sequencia com que as demandas são verificadas para a geração de uma solução inicial gulosa, obtemos soluções contendo diferentes configurações e movimentos realizados pela frota. Ou melhor, verificou-se que é possível explorar o espaço de soluções viáveis para o problema se for alterada a ordem com que as demandas são avaliadas na geração de soluções pela heurística gulosa apresentada no pseudocódigo 6.1.1.

Assim, foi proposta uma heurística utilizando o *Simulated Annealing* (SA) para explorar o espaço de soluções viáveis para o PADV. Conforme apresentado no Capítulo 3, o

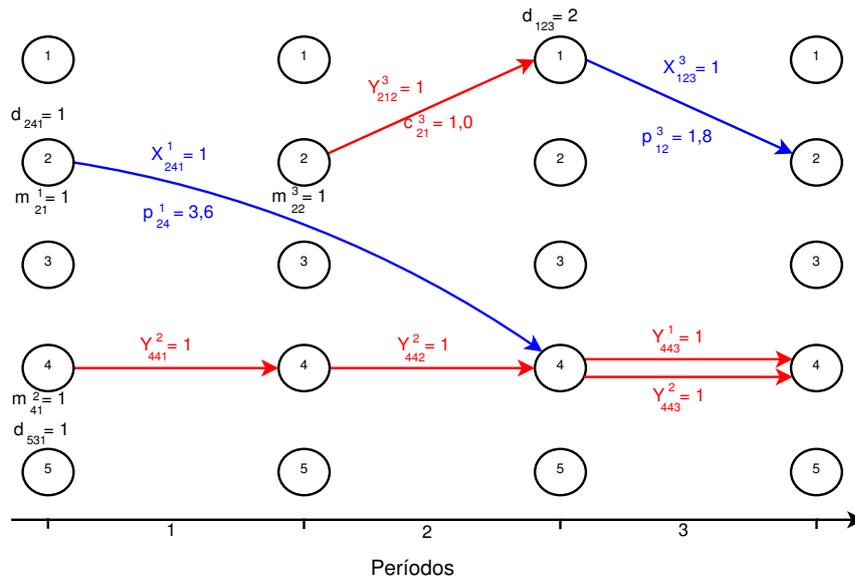


Figura 6.5: Representação gráfica da segunda etapa do GRASP.

SA consiste em um método probabilístico proposto em Kirkpatrick et al. (1983) e Cerny (1985), e visa encontrar o ótimo global de uma certa função de custo que pode possuir diversos ótimos locais. A metaheurística imita o processo físico em que um sólido é resfriado lentamente até que no final do processo sua estrutura encontra-se “congelada”, ocorrendo a uma configuração de mínima energia. Uma revisão do método SA e também uma revisão das provas de convergência do método são apresentadas em Bertsimas e Tsitsiklis (1993).

No pseudocódigo 6.4.1 é apresentada a metaheurística SA implementada para solução do PADV. Parte-se de uma solução inicial gulosa  $S$  e, em seguida, é realizada uma modificação no vetor de demandas a serem atendidas, que inicialmente estava ordenado em ordem cronológica e decrescente de lucro, com o objetivo de se gerar uma nova solução  $S'$  com esse vetor de demandas modificado. A modificação no vetor de demandas é do tipo *3-opt*, onde três demandas são sorteadas aleatoriamente para mudarem de posição no vetor, e com essa alteração a solução gulosa, a partir do vetor alterado, é diferente da solução corrente, permitindo que o espaço de soluções seja explorado.

O termo *3-opt* foi aqui emprestado da heurística de busca local proposta para a solução do problema do caixeiro viajante (TSP), e foi utilizada pela primeira vez por Bock (1958), e consiste na substituição de três arcos do roteiro corrente, alterando a sequência de cidades a serem visitadas.

**Pseudocódigo 6.4.1:** SA PARA O PADV(*demandas*, veículos,  $T, r$ )

- Ordenar demandas de forma cronológica e em seguida decrescente de lucro  $p_{ij}^v$
- Gera solução inicial gulosa  $S$  conforme pseudocódigo 6.1.1

**Enquanto** o resfriamento não estiver completo

<b>Faça</b>	{	<p><b>Enquanto</b> a quantidade máxima de iterações <math>L</math> não for alcançada</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- realize aleatoriamente o sorteio de 3 índices do vetor de demandas a serem atendidas: <math>i, j</math> e <math>k</math></li> <li>- execute a troca da sequencia de demandas</li> </ul> <p><math>tmp \leftarrow cargas[i]</math>  <math>cargas[i] \leftarrow cargas[j]</math>  <math>cargas[j] \leftarrow cargas[k]</math>  <math>cargas[k] \leftarrow tmp</math></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- gere uma solução gulosa conforme pseudocódigo 6.1.1</li> <li>- execute a melhoria conforme pseudocódigo 6.2.1</li> <li>- calcule o valor da função objetivo para a nova solução <math>S'</math></li> </ul> <p>- Seja <math>\Delta = f(S') - f(S)</math></p> <p><b>se</b> <math>\Delta \geq 0</math></p> <p style="padding-left: 40px;"><b>então</b> <math>S \leftarrow S'</math></p> <p><b>se</b> <math>\Delta &lt; 0</math></p> <p style="padding-left: 40px;"><b>então se</b> <math>random(0, 1) \leq e^{\Delta/T}</math></p> <p style="padding-left: 80px;"><b>então</b> <math>S \leftarrow S'</math></p> <p style="padding-left: 40px;"><b>senão</b></p> <table style="border-collapse: collapse; margin-left: 40px;"> <tr> <td style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">{</td> <td style="padding-left: 10px;"> <math>tmp \leftarrow cargas[k]</math>  <math>cargas[k] \leftarrow cargas[j]</math>  <math>cargas[j] \leftarrow cargas[i]</math>  <math>cargas[i] \leftarrow tmp</math> </td> </tr> </table>	{	$tmp \leftarrow cargas[k]$ $cargas[k] \leftarrow cargas[j]$ $cargas[j] \leftarrow cargas[i]$ $cargas[i] \leftarrow tmp$
{	$tmp \leftarrow cargas[k]$ $cargas[k] \leftarrow cargas[j]$ $cargas[j] \leftarrow cargas[i]$ $cargas[i] \leftarrow tmp$			
	}	<p><b>Faça</b> <math>T \leftarrow rT</math></p>		

Para exemplificar esse mecanismo, seja o problema exemplo apresentado em detalhes em Ghiani et al. (2003) e utilizado no Capítulo 4 na Subseção 4.2.1. O vetor de demandas a serem atendidas, já ordenado, pode ser representado por:  $\{1, 2, 3\}$ . Nessa sequencia é possível gerar uma solução gulosa conforme a Figura 6.6, obtendo um valor da função objetivo igual a 4, 2:

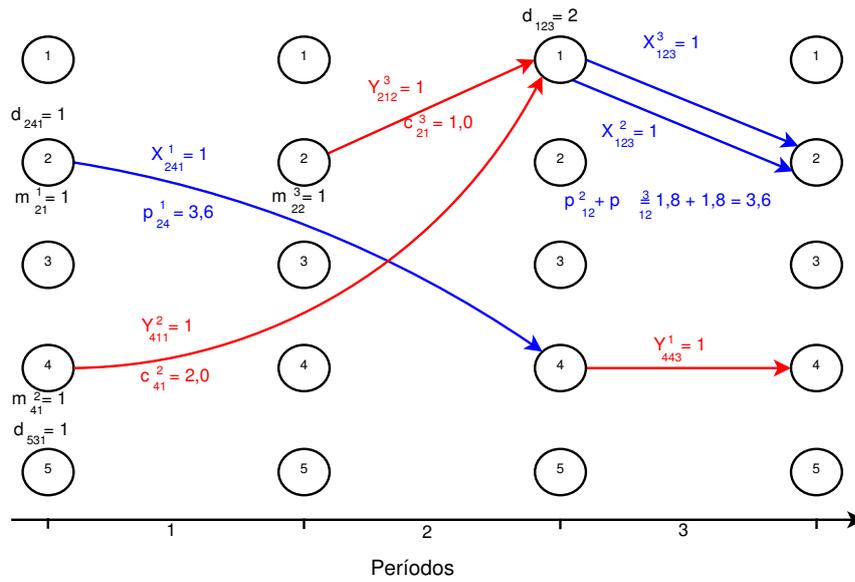


Figura 6.6: Representação gráfica da solução gulosa do problema exemplo.

$$\begin{aligned}
 FO &= X_{241}^1 \times p_{24}^1 + X_{123}^2 \times p_{12}^2 + X_{123}^3 \times p_{12}^3 - Y_{212}^3 \times c_{21}^3 - Y_{411}^2 \times c_{41}^2 \\
 &= 1,0 \times 3,6 + 1 \times 1,8 + 1 \times 1,8 - 1,0 \times 1,0 - 1,0 \times 2,0 \\
 &= 4,2.
 \end{aligned}$$

Mais detalhes para a geração dessa solução inicial são apresentados na Seção 6.1. Se for alterada a sequencia com que as demandas são avaliadas, por exemplo, de  $\{1, 2, 3\}$  para  $\{3, 1, 2\}$ , obtemos uma solução conforme apresentado na Figura 6.7, com valor da função objetivo igual a 1,6:

$$\begin{aligned}
 FO &= X_{123}^1 \times p_{12}^1 + X_{123}^3 \times p_{12}^3 - Y_{211}^1 \times c_{21}^1 - Y_{212}^3 \times c_{21}^3 \\
 &= 1 \times 1,8 + 1 \times 1,8 - 1,0 \times 1,0 - 1,0 \times 1,0 \\
 &= 1,6.
 \end{aligned}$$

A partir dessa nova solução, mesmo com um valor de função objetivo pior que a solução obtida com o vetor de demandas inicialmente ordenado, é possível obter-se a solução ótima do problema seguindo o procedimento de melhoria descrito no pseudocódigo 6.2.1. A solução ótima do problema é apresentada na Figura 6.8 com valor da função objetivo igual a 4,4:

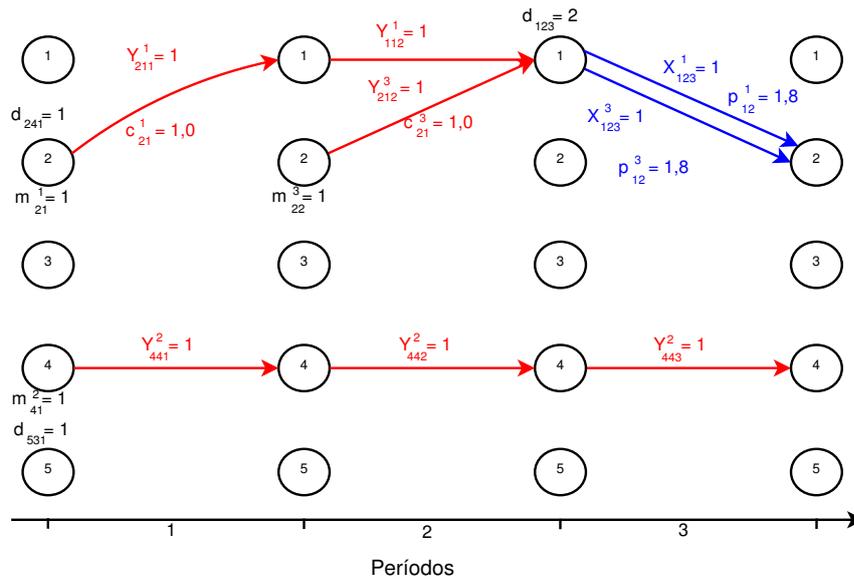


Figura 6.7: Solução gulosa alterando-se o vetor de cargas.

$$\begin{aligned}
 FO &= X_{241}^1 \times p_{24}^1 + X_{123}^3 \times p_{12}^3 - Y_{212}^3 \times c_{21}^3 \\
 &= 1,0 \times 3,6 + 1,0 \times 1,8 - 1,0 \times 1,0 \\
 &= 4,4;
 \end{aligned}$$

A metaheurística SA, implementada conforme pseudocódigo 6.4.1, encontrou esta solução ótima em menos de um segundo.

## 6.5 A metaheurística colônia de formigas para solução do PADV

Como outra alternativa para solução do PADV também foi utilizada a metaheurística colônia de formigas. Conforme discutido no Capítulo 3, colônia de formigas é uma metaheurística proposta para solução de problemas difíceis de otimização combinatória, tendo sido inspirada na trilha de feromônio deixada por formigas reais que utilizam o feromônio como meio de comunicação com as demais formigas. Analogamente ao exemplo biológico, a metaheurística colônia de formigas é baseada na comunicação indireta de uma colônia de agentes simples, chamados de formigas artificiais, mediados por uma trilha artificial de feromônio. A trilha de feromônio na metaheurística colônia de formigas serve como uma informação numérica distribuída no qual as formigas utilizam para construir

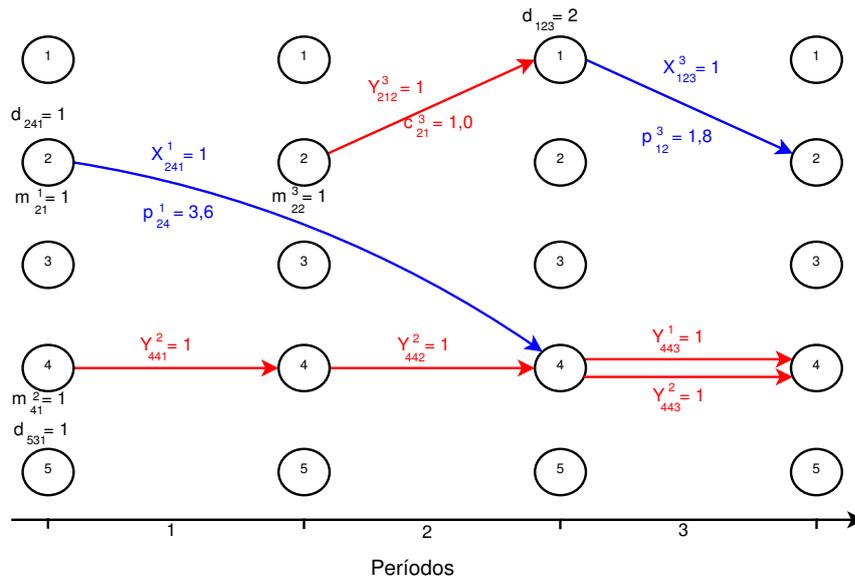


Figura 6.8: Solução ótima obtida após melhoria -  $FO = 4, 4$ .

probabilisticamente soluções para o problema a ser resolvido, e no qual as formigas se adaptam durante a execução da heurística para refletir sua experiência na busca.

Neste trabalho optou-se pela implementação do ACS (*Ant Colony System*) (GAMBARDELLA; DORIGO, 1996; DORIGO; GAMBARDELLA, 1997a, 1997b), por permitir controlar de forma mais simples a convergência para um ótimo local e também depositar feromônio ao longo da construção da solução pela formiga, o que se mostrou adequado para o PADV.

No ACS a decisão a ser tomada pela formiga sobre qual caminho seguir é realizada escolhendo com probabilidade  $q_0$  a aresta que maximiza a expressão  $\tau_{ij}\eta_{ij}^\beta$ . Nesse método existem ainda duas atualizações de feromônio, sendo (i) uma atualização local onde a cada iteração da construção, cada formiga atualiza o feromônio da última aresta pelo qual passou, utilizando a fórmula  $\tau_{ij} = (1 - \varphi)\tau_{ij} + \varphi\tau_0$ , onde  $\varphi$  é o parâmetro para evaporação local; e (ii) uma atualização global de feromônio realizado somente pela melhor formiga, ou seja, somente as arestas visitadas pela melhor formiga são atualizadas:  $\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \rho\Delta\tau_{ij}^{melhor}$ .

A analogia para se utilizar o ACS na solução do PADV foi considerar cada veículo do problema como sendo uma formiga artificial que necessita percorrer seu caminho desde a sua entrada no sistema ( $m_{it}^v$ ) até o último período, depositando uma quantidade maior de feromônio nos percursos realizados carregados e seu movimento anterior vazio, caso exista. Assim, a quantidade de formigas  $m$  de cada iteração do ACS é igual à quantidade de veículos do sistema, ou  $|E|$ , e uma iteração consiste na criação de uma solução completa

para o problema.

O pseudocódigo 6.5.1 descreve a implementação realizada para solução do PADV utilizando a metaheurística ACS. Da mesma forma que na heurística gulosa descrita no pseudocódigo 6.1.1, primeiramente as cargas são ordenadas em ordem cronológica e em seguida em ordem decrescente de lucro (para “desempate” caso exista mais de uma carga em um mesmo período). É gerada então uma solução inicial utilizando a heurística gulosa descrita no pseudocódigo 6.1.1 e realizado um depósito adicional de feromônio nos arcos utilizados para a geração da solução gulosa.

Inicialmente é depositada uma quantidade  $\tau_0$  de feromônio em todos os arcos possíveis do problema. O valor  $\tau_0$  é calculado como  $\tau_0 = 1/(FO_{gulosa} \times qtdNos)$ , onde  $FO_{gulosa}$  corresponde ao valor da função objetivo da solução inicial gulosa do problema, e  $qtdNos$  a quantidade de nós da rede, calculado como a quantidade de terminais multiplicado pela quantidade de períodos ( $qtdNos = N \times T$ ). Essa forma de cálculo do feromônio inicial  $\tau_0$  foi inspirado no cálculo para o TSP apresentada em Dorigo e Gambardella (1997a):  $\tau_0 = 1/(n \times L_{nn})$ , onde  $n$  representa a quantidade de nós da rede, e  $L_{nn}$  o tamanho do itinerário do TSP resolvido utilizando a heurística gulosa do vizinho mais próximo (*Nearest Neighbor Heuristic*).

É interessante destacar que cada terminal em um dado período representou um nó de uma rede, sendo que cada nó foi calculado da seguinte forma:

$$no = i + (n \times (t - 1))$$

onde  $no$  é o número do nó da rede que representa um terminal em um dado período;  $i$  é o número do terminal;  $n$  é a quantidade total de terminais; e  $t$  é o período em que o terminal se encontra. A título de ilustração, é apresentado na Figura 6.9 a forma equivalente do problema contendo uma numeração sequencial dos nós da rede nos diferentes períodos. Por exemplo, na representação equivalente do problema, de acordo com a figura, existe um arco do nó 7 para o nó 11 representando um movimento vazio do terminal 2 no período 2 ( $no = 2 + (5 \times (2 - 1)) = 7$ ) para o terminal 1 no período 3 ( $no = 1 + (5 \times (3 - 1)) = 11$ ). Assim, foi utilizada uma matriz bidimensional para representar a quantidade de feromônio entre os nós dessa rede.

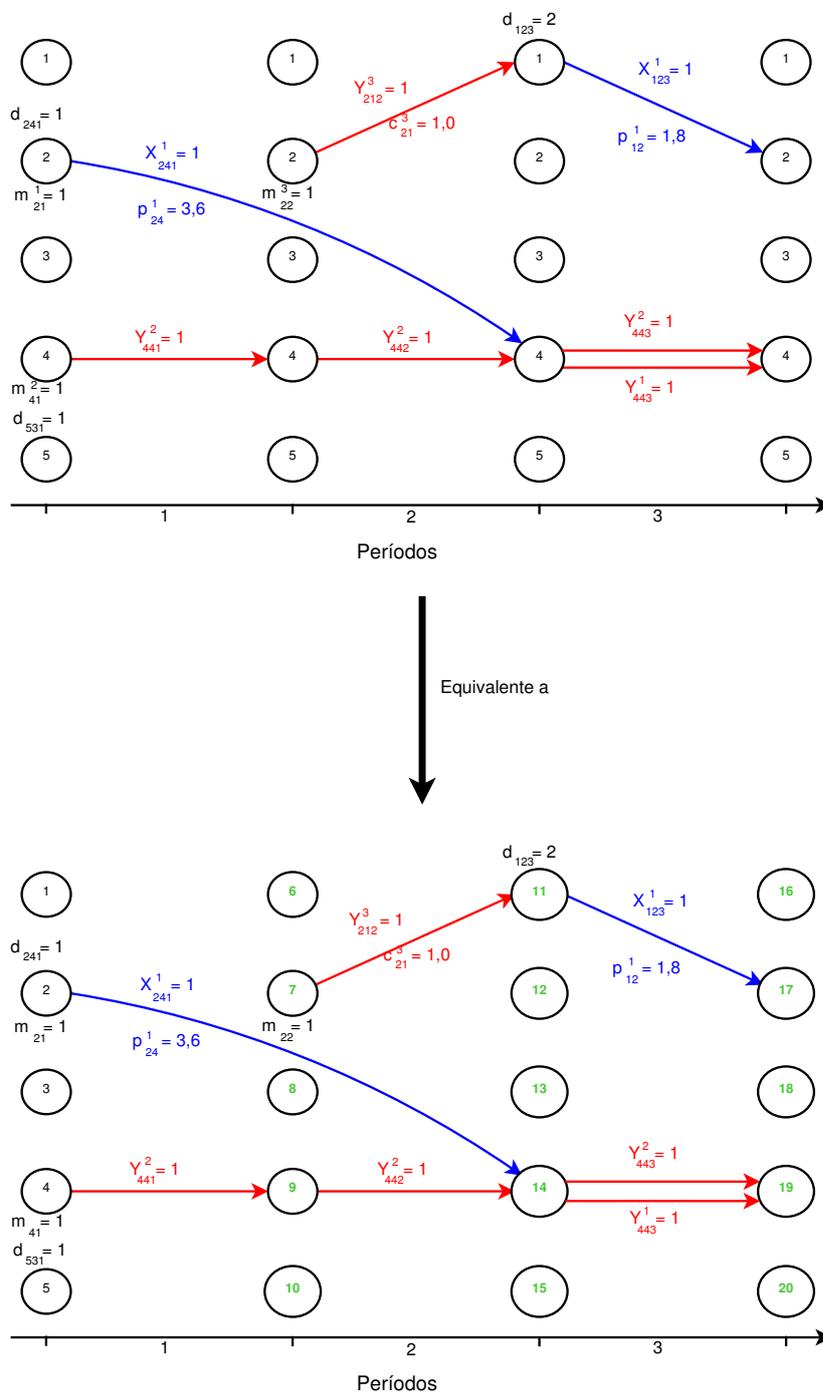


Figura 6.9: Representação equivalente do problema exemplo.

**Pseudocódigo 6.5.1: METAHEURÍSTICA ACS(*cargas*, veículos)**

- Gera solução inicial gulosa conforme pseudocódigo 6.1.1
- Deposita feromônio em todos arcos possíveis do problema
- Deposita feromônio adicional nos arcos utilizados na solução gulosa
- Apaga solução inicial criada

**Enquanto** o tempo limite não for alcançado

<b>Faça</b> {	{	<b>Para cada</b> carga não atendida	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>encontrou \leftarrow falso</math></li> <li><math>valor \leftarrow -\infty</math></li> </ul>
		<b>Para cada</b> veículo $v$ da frota	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Faça</b> {               <ul style="list-style-type: none"> <li>se veículo <math>v</math> pode chegar a tempo e pode realizar o percurso</li> <li><b>então</b> {                   <ul style="list-style-type: none"> <li>se <math>\tau_{ij}\eta_{ij}^\beta &gt; valor</math> e <math>q_0 &gt; rand(0, 1)</math></li> <li><b>então</b> {                       <ul style="list-style-type: none"> <li><math>encontrou \leftarrow verdadeiro</math></li> <li><math>valor \leftarrow \tau_{ij}\eta_{ij}^\beta</math></li> </ul> </li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>

- Executa busca local conforme pseudocódigo 6.2.1

- Atualização global do feromônio, incluindo  $\Delta\tau_{ij}^{melhor}$  nos arcos da melhor solução

- Atualiza melhor solução encontrada até o momento

- Apaga solução criada pelo ACS, incluindo movimentos realizados pela frota, e demandas atendidas

Para cada carga não atendida é verificado se uma formiga (veículo) pode se deslocar para atender uma demanda. A decisão se uma dada formiga será deslocada para atender uma demanda dependerá da quantidade de feromônio depositada no percurso e também

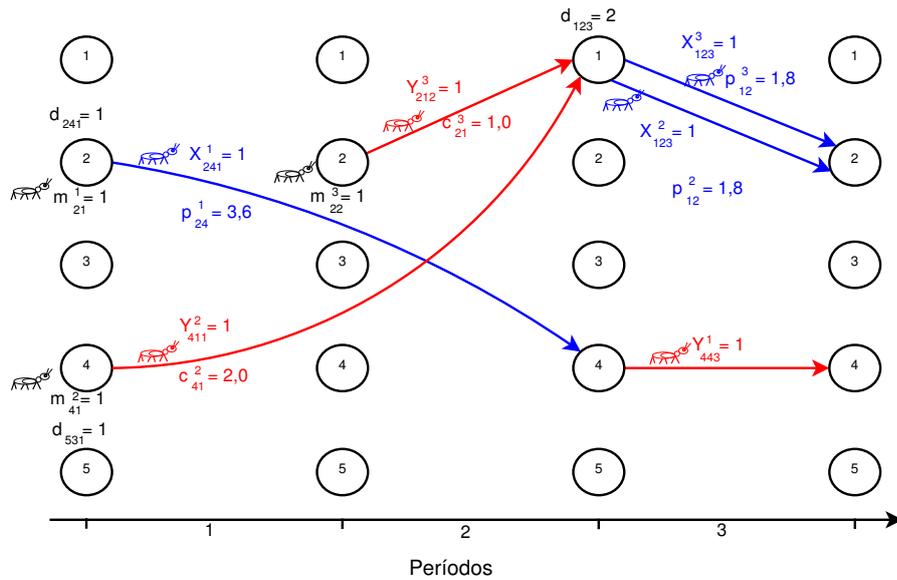


Figura 6.10: Solução gulosa inicial para o ACS.

da informação heurística. Para o PADV foi utilizada como sendo  $\eta_{ij} = 1/c_{ij}^v$ , de forma similar ao ACS para o TSP que utiliza  $1/d_{ij}$ , tentando priorizar cargas com menor custo de deslocamento vazio  $c_{ij}^v$ . A probabilidade de se aceitar um caminho que maximize o produto  $\tau_{ij}\eta_{ij}^\beta$  é de  $q_0\%$ , parâmetro esse em algumas aplicações na literatura fixado em 90% ou mesmo 100%.

Ao se deslocar uma formiga para se atender uma demanda, é realizada uma atualização local do feromônio no arco utilizado tanto no movimento vazio como também no movimento carregado, lembrando que essa atualização local do feromônio envolve a evaporação e depósito de feromônio no arco, e calculada como  $\tau_{ij} = (1 - \varphi)\tau_{ij} + \varphi\tau_0$ , onde  $\varphi$  é o parâmetro para evaporação local.

Após a construção de uma solução pelas formigas, é realizado o procedimento de melhoria descrito no pseudocódigo 6.2.1, e, por fim, é realizada a atualização global do feromônio somente nos arcos da melhor solução encontrada, de acordo com a fórmula:  $\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \rho\Delta\tau_{ij}^{melhor}$ , sendo o valor  $\Delta\tau_{ij}^{melhor}$  calculado como  $FO/Q$ , onde  $FO$  representa o valor da função objetivo da melhor solução encontrada na iteração, e  $Q$  uma constante a ser definida de acordo com o problema.

Utilizando o problema exemplo apresentado em Ghiani et al. (2003) e utilizado no Capítulo 4 na Subseção 4.2.1, e seguindo as etapas descritas no pseudocódigo 6.5.1, temos que o primeiro passo consiste na criação de uma solução inicial gulosa, conforme pseudocódigo 6.1.1 graficamente representada conforme a Figura 6.10

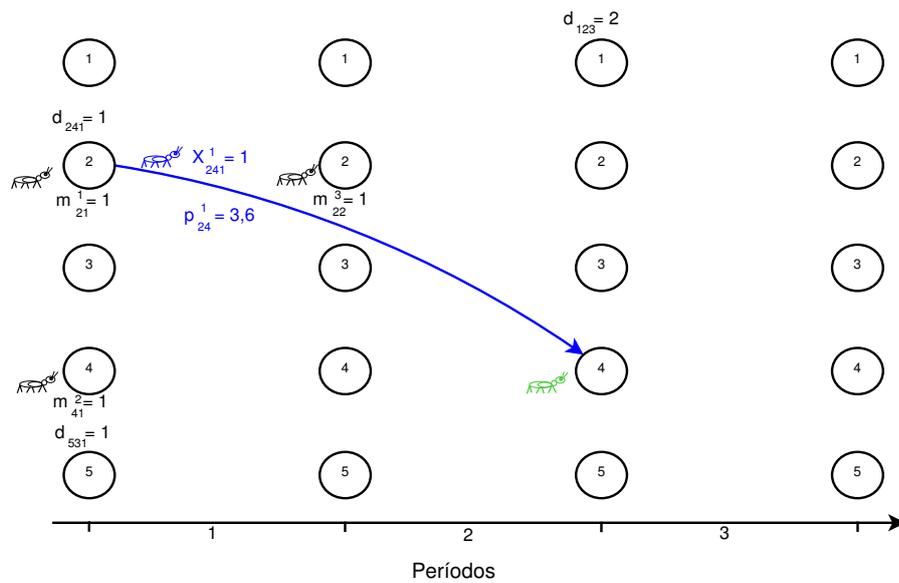


Figura 6.11: Atendendo a primeira demanda na primeira etapa do ACS.

Para a construção da solução do problema pelo ACS, as cargas são analisadas individualmente, sendo verificado todos os veículos disponíveis e viáveis para o atendimento. Começando pela primeira demanda do terminal 2 para o terminal 4 no período 1 ( $d_{241} = 1$ ), temos que existe um veículo (ou “formiga”) que entra no sistema no terminal 2 no período 1. Como na solução inicial gulosa inicialmente criada foi depositada uma quantidade adicional de feromônio nos arcos utilizados, esse percurso faz parte dessa solução gulosa e possui uma quantidade adicional de feromônio, e conseqüentemente uma maior probabilidade de ser inserido na solução. Supondo que essa demanda seja atendida, a representação gráfica do atendimento da primeira carga é apresentada na Figura 6.11. O valor parcial da função objetivo, com o atendimento dessa demanda é de:

$$\begin{aligned}
 FO &= X_{241}^1 \times p_{24}^1 \\
 &= 1,0 \times 3,6 \\
 &= 3,6.
 \end{aligned}$$

A segunda demanda, do terminal 5 para o terminal 3 no período 1, não pode ser atendida por conta da indisponibilidade de veículos para realizar o transporte. A terceira e última demanda possui duas cargas do terminal 1 para o terminal 2 no terceiro período ( $d_{123} = 2$ ). Analisando inicialmente uma das cargas, é possível verificar a possibilidade de deslocamento de um veículo (ou “formiga”) do terminal 2 no período 2. Como esse arco

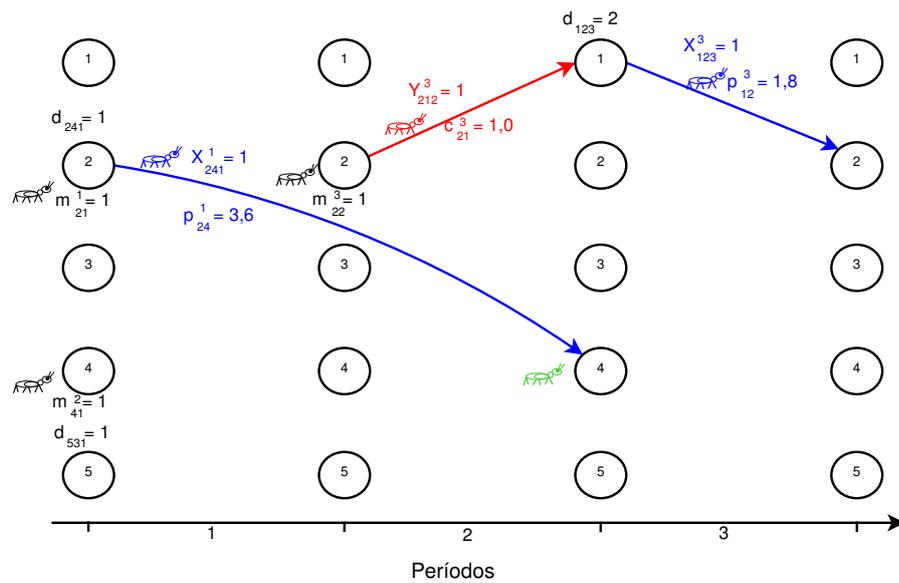


Figura 6.12: Atendendo uma das cargas da demanda  $d_{123} = 2$  pelo ACS.

também faz parte da solução inicial gulosa criada, ele também possui uma quantidade adicional de feromônio, tendo portanto uma maior probabilidade de ser escolhido para compor a solução em construção. Supondo que esse veículo seja escolhido para atendimento de uma das cargas, a representação gráfica dessa solução parcial é apresentada na Figura 6.12.

$$\begin{aligned}
 FO &= X_{241}^1 \times p_{24}^1 + X_{123}^3 \times p_{12}^3 - Y_{212}^3 \times c_{21}^3 \\
 &= 1,0 \times 3,6 + 1,0 \times 1,8 - 1,0 \times 1,0 \\
 &= 4,4;
 \end{aligned}$$

sendo esta a solução ótima do problema.

Como ainda existe uma das cargas da terceira demanda ( $d_{123} = 2$ ) a ser avaliada, existe um veículo (ou “formiga”) que pode ser deslocada do terminal 4 no primeiro período para o atendimento dessa demanda. Apesar desse arco fazer parte da solução inicial gulosa, possuindo uma quantidade adicional de feromônio, e conseqüentemente uma maior probabilidade de fazer parte da solução, podemos supor que o mesmo não é escolhido, devido à aleatoriedade da heurística ACS, permanecendo em estoque no terminal de origem. Assim a solução final obtida com o ACS, que também é a solução ótima do problema, é graficamente apresentada na Figura 6.13. A heurística ACS, implementada conforme pseudocódigo 6.5.1 encontra a solução ótima desse exemplo em menos de um segundo.

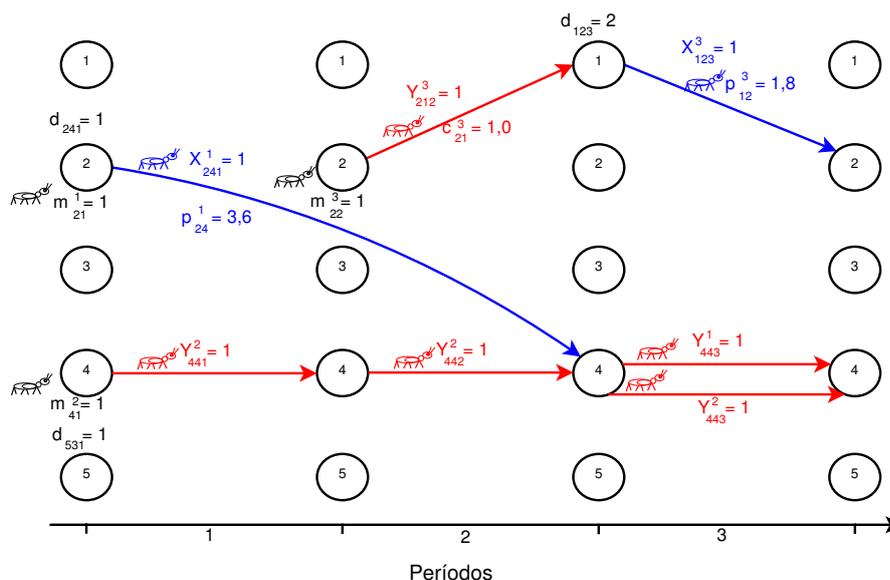


Figura 6.13: Solução final obtida ao se utilizar o ACS.

## 6.6 Conclusões do capítulo

Neste Capítulo foram discutidos métodos para a solução do PADV, especificamente o problema modelado matematicamente no Capítulo 4, e nomeado de  $M_1$  conforme apresentado na Seção 4.2, nos casos em que os veículos pertencem a muitos grupos e, em particular, no caso especial em que cada veículo pertence a um grupo, ou melhor, cada veículo é tratado individualmente e se necessita acompanhar os movimentos cheios e vazios, veículo a veículo. Situação essa muito comum em ambientes práticos onde os operadores do setor de tráfego de uma empresa de transportes necessitam definir qual veículo realizará cada rota.

Dada a dificuldade de se resolver problemas de tamanho e complexidades similares aos encontrados na prática utilizando pacotes comerciais de otimização, optou-se pela aplicação de heurísticas para solução, sendo desenvolvidas:

- uma heurística gulosa construtiva;
- uma heurística que opera como um mecanismo de busca local para melhoria;
- a aplicação da metaheurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*);
- a aplicação da metaheurística SA (*Simulated Annealing*); e

- a aplicação da metaheurística ACS (*Ant Colony System*), ou colônia de formigas.

As metaheurísticas desenvolvidas (GRASP, SA e ACS), utilizaram extensivamente a heurística gulosa construtiva e a busca local como heurística de melhoria, explorando o conhecimento específico do problema. O GRASP proposto nesta tese utiliza o valor obtido pela função objetivo da solução gerada pela construção gulosa aleatória para a inserção de soluções na lista restrita de candidatos *RCL* (*Restricted Candidate List*). Para o SA foi proposto um mecanismo simples para a exploração de vizinhanças do problema, sem a utilização de mecanismos sofisticados de reaquecimento. No caso da colônia de formigas, optou-se pela utilização de uma variante do método, conhecida por *Ant Colony System*.

No próximo capítulo são apresentados os resultados obtidos ao se resolver um conjunto de problemas com tamanhos e complexidades similares aos encontrados no dia a dia de uma transportadora, sendo também realizada uma análise de desempenho e comparação entre os métodos de solução aqui propostos.

## 7 Experimentos computacionais com heurísticas

Nesta seção são apresentados os experimentos computacionais realizados utilizando-se a heurística gulosa e o procedimento de melhoria descritos no Capítulo 6, e também as três metaheurísticas propostas para a solução do PADV: (i) GRASP, (ii) *simulated annealing*, e (iii) colônia de formigas. O desempenho das heurísticas foi comparado com a solução ótima obtida utilizando-se o pacote comercial de otimização CPLEX apenas para os problemas de tamanho que pudessem ser tratados pelo *software*. Foram gerados aleatoriamente 30 problemas de tamanho e complexidade comparáveis ao encontrado na prática, possuindo:

- 53 terminais;
- 36 períodos, tendo cada período 4 horas;
- 300 cargas a serem transportadas;
- 130 veículos.

Apesar da existência de 5 problemas, contendo dois grupos, já gerados para os experimentos com o modelo  $M_1$ , apresentado no Capítulo 5, optou-se por gerar 30 novos problemas para os experimentos deste capítulo, variando-se a quantidade de grupos  $E$  de 1 até 17, que foi o tamanho limite de problema possível de ser resolvido utilizando-se o CPLEX. Os parâmetros  $m_{it}^v$  e  $A_{ij}^v$  variaram convenientemente, de acordo com a quantidade de grupos  $v$ .

Portanto temos 30 problemas e 17 grupos, resultando em 510 problemas distintos. Cada problema foi resolvido em onze (11) rodadas independentes, utilizando em cada rodada um valor diferente de semente para geração de números aleatórios. Assim, no total, cada heurística resolveu 5.610 problemas, ou seja, foram 16.830 execuções no total.

Foram ainda gerados outros 30 problemas possuindo 130 grupos, exatamente a quantidade de veículos do problema real em que cada veículo pertence a um grupo, sendo também resolvidos utilizando as metaheurísticas GRASP, SA e ACS. Como para esses problemas a solução ótima não é conhecida, isto é, não foi possível a obtenção da solução ótima utilizando o CPLEX, nem a obtenção de limitantes inferiores ou superiores para essa solução via CPLEX dado que não há memória suficiente para compilar esses problemas no AMPL/CPLEX, foi utilizada a melhor solução obtida dentre as heurísticas como referência para comparação.

As implementações realizadas contaram com o apoio de um programador, sendo as heurísticas implementadas na linguagem de programação C, e os processamentos realizados em um *laptop* equipado com sistema operacional Linux, CPU Intel(R) Core (TM) 2 DUO T6600 2,2GHz, e 4 GB de memória RAM, sendo o mesmo computador utilizado em todos os experimentos anteriores apresentados no Capítulo 5, exceto pelo fato que o sistema operacional utilizado foi o *Windows 7 Ultimate*. Somente um processador foi utilizado para os experimentos, e o executável foi gerado utilizando-se o compilador Oracle Solaris Studio versão 12.3.

## 7.1 Resultados obtidos com as heurísticas gulosa e de melhoria

Tanto a heurística construtiva gulosa descrita no pseudocódigo 6.1.1, como também a heurística de melhoria, ou busca local, apresentada no pseudocódigo 6.2.1, foram utilizadas para se resolver os 540 problemas gerados. Estes 540 problemas referem-se ao conjunto de 30 problemas gerados aleatoriamente, variando-se a quantidade de grupos  $E$  de 1 até 17 (30 problemas para cada quantidade de grupos), resultando em  $30 \times 17 = 510$  problemas. Os 30 problemas restantes foram gerados para o caso em que cada veículo pertence a um grupo, sendo neste caso 130 grupos.

Na Tabelas 7.1 e 7.2 são apresentadas amostras dos resultados obtidos resolvendo os trinta problemas gerados para o caso em que existem 17 e 130 grupos de veículos, respectivamente. Em cada tabela deste Capítulo, temos as colunas:

- *Problema*: nome do problema no formato “ $pxr - vy$ ”, onde  $x$  representa o número do problema, e  $y$  a quantidade de grupos;
- *Sol. Ótima*: solução ótima obtida utilizando-se o CPLEX, para os casos em que

Tabela 7.1: Amostra de resultados obtidos com as heurística gulosa e busca local para  $|E| = 17$ 

Problema	CPLEX		Heurística Gulosa			Busca Local		
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v17	17.079,40	417,43	14.220,80	0,02	16,74	14.653,80	0,04	14,20
p2r-v17	18.906,80	239,68	16.768,40	0,02	11,31	16.914,40	0,05	10,54
p3r-v17	15.789,00	433,53	13.708,40	0,02	13,18	14.342,80	0,04	9,16
p4r-v17	19.352,00	283,05	17.674,00	0,02	8,67	17.674,00	0,04	8,67
p5r-v17	17.567,20	274,45	15.329,80	0,02	12,74	15.522,40	0,04	11,64
p6r-v17	19.298,00	325,37	17.540,20	0,02	9,11	17.667,80	0,04	8,45
p7r-v17	18.878,20	262,55	17.620,60	0,02	6,66	17.620,60	0,03	6,66
p8r-v17	17.609,20	246,76	15.516,00	0,02	11,89	15.825,40	0,04	10,13
p9r-v17	15.015,00	214,61	13.391,60	0,02	10,81	13.672,20	0,05	8,94
p10r-v17	18.093,80	244,48	15.406,00	0,02	14,85	16.377,80	0,05	9,48
p11r-v17	16.387,00	192,65	14.093,60	0,02	14,00	14.432,40	0,06	11,93
p12r-v17	21.729,80	342,13	20.542,60	0,01	5,46	20.566,40	0,03	5,35
p13r-v17	18.939,20	387,85	17.366,80	0,02	8,30	17.366,80	0,04	8,30
p14r-v17	19.241,80	278,88	17.833,00	0,02	7,32	17.872,20	0,05	7,12
p15r-v17	19.796,20	298,37	17.825,20	0,01	9,96	18.588,40	0,07	6,10
p16r-v17	17.294,60	275,78	15.338,20	0,02	11,31	15.476,40	0,04	10,51
p17r-v17	16.719,80	323,83	14.681,00	0,02	12,19	15.166,00	0,05	9,29
p18r-v17	17.435,40	359,55	16.145,80	0,02	7,40	16.208,20	0,05	7,04
p19r-v17	17.777,80	222,18	15.267,20	0,02	14,12	15.453,00	0,06	13,08
p20r-v17	19.878,60	357,98	16.868,40	0,02	15,14	17.108,80	0,05	13,93
p21r-v17	16.694,80	403,03	15.290,20	0,02	8,41	15.290,20	0,03	8,41
p22r-v17	18.541,60	547,59	17.397,20	0,02	6,17	17.397,20	0,03	6,17
p23r-v17	21.119,20	353,53	19.345,60	0,02	8,40	19.469,40	0,05	7,81
p24r-v17	17.489,40	236,83	15.487,20	0,02	11,45	16.533,20	0,06	5,47
p25r-v17	16.819,40	268,81	14.757,60	0,02	12,26	14.795,80	0,04	12,03
p26r-v17	19.995,40	293,20	17.934,20	0,02	10,31	18.106,80	0,06	9,45
p27r-v17	19.557,60	387,43	17.765,00	0,02	9,17	17.789,20	0,05	9,04
p28r-v17	17.807,60	324,72	15.324,80	0,02	13,94	15.799,00	0,05	11,28
p29r-v17	18.473,60	495,97	16.923,80	0,02	8,39	16.992,20	0,05	8,02
p30r-v17	16.288,60	276,32	14.867,80	0,02	8,72	14.972,00	0,05	8,08
	Média	318,95	Média	0,02	10,61	Média	0,05	9,21

$$1 \leq |E| \leq 17;$$

- $CPUt(s)$ : tempo de execução, em segundos, necessário para se obter a solução;
- $FO$ : valor obtido para a função objetivo, resolvendo-se o problema utilizando a heurística gulosa e busca local;
- $GAP$ : desvio percentual da solução ótima do problema, calculado como:

$$GAP = \frac{Sol.Otima - FO}{Sol.Otima} \times 100 \quad (7.1)$$

- $\sigma_{fo}$  e  $\sigma_t$ : desvio padrão da função objetivo e do tempo de processamento, respectivamente, nas onze rodadas independentes executadas para as metaheurísticas GRASP, SA e ACS.

Na Tabela 7.1 são apresentados os resultados dos 30 problemas gerados aleatoriamente para o caso em que a frota composta por 130 veículos foi distribuída em 17 grupos. Para

Tabela 7.2: Resultados obtidos com as heurística gulosa e busca local para  $|E| = 130$ 

Problema	Melhor Solução		Heurística Gulosa			Busca Local		
	FO	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v130	17.483,99	184,77	14.725,20	0,25	15,78	14.989,40	0,71	14,27
p2r-v130	18.859,01	212,46	16.556,40	0,27	12,21	16.755,80	0,83	11,15
p3r-v130	16.677,21	252,10	14.884,00	0,25	10,75	15.189,80	0,68	8,92
p4r-v130	19.356,62	251,13	17.043,20	0,23	11,95	17.048,20	0,68	11,93
p5r-v130	18.291,61	159,13	15.978,60	0,25	12,65	16.273,40	0,64	11,03
p6r-v130	19.690,81	164,86	18.377,40	0,24	6,67	18.398,40	0,64	6,56
p7r-v130	19.132,43	160,50	18.511,20	0,25	3,25	18.511,20	0,44	3,25
p8r-v130	18.156,21	135,70	16.050,00	0,28	11,60	16.450,20	0,68	9,40
p9r-v130	15.121,82	115,60	13.928,40	0,29	7,89	14.219,20	0,90	5,97
p10r-v130	18.321,02	149,61	14.957,80	0,24	18,36	16.587,20	0,81	9,46
p11r-v130	16.578,22	145,89	15.001,00	0,25	9,51	15.081,00	0,72	9,03
p12r-v130	21.617,22	230,84	20.596,20	0,23	4,72	20.596,20	0,36	4,72
p13r-v130	19.265,62	137,83	18.061,60	0,24	6,25	18.073,20	0,67	6,19
p14r-v130	19.258,01	170,79	17.597,00	0,30	8,63	17.630,40	0,78	8,45
p15r-v130	21.421,23	216,57	18.393,20	0,25	14,14	19.143,00	0,96	10,64
p16r-v130	17.072,01	178,40	15.964,00	0,25	6,49	16.102,20	0,62	5,68
p17r-v130	16.888,81	147,48	15.090,20	0,26	10,65	15.703,40	0,75	7,02
p18r-v130	17.597,41	208,81	16.610,40	0,24	5,61	16.610,40	0,93	5,61
p19r-v130	17.967,60	193,85	16.315,00	0,25	9,20	16.555,20	0,90	7,86
p20r-v130	19.689,61	145,04	17.764,60	0,26	9,78	18.243,00	0,70	7,35
p21r-v130	16.696,01	272,04	15.634,00	0,22	6,36	15.634,00	0,48	6,36
p22r-v130	18.527,39	190,04	17.437,00	0,25	5,89	17.444,80	0,50	5,84
p23r-v130	20.842,21	173,60	19.439,60	0,31	6,73	19.496,20	0,84	6,46
p24r-v130	18.652,43	214,61	15.927,40	0,25	14,61	17.106,20	0,91	8,29
p25r-v130	16.822,40	161,22	15.027,80	0,28	10,67	15.350,40	0,68	8,75
p26r-v130	20.046,02	177,04	18.321,60	0,25	8,60	18.352,40	0,72	8,45
p27r-v130	19.295,42	117,62	18.161,80	0,25	5,88	18.300,60	0,66	5,16
p28r-v130	17.951,61	161,39	15.893,80	0,26	11,46	16.086,00	0,66	10,39
p29r-v130	18.818,41	159,37	17.843,20	0,26	5,18	17.843,20	0,78	5,18
p30r-v130	16.208,22	167,31	15.075,20	0,26	6,99	15.104,60	0,82	6,81
	Média	178,52	Média	0,25	9,28	Média	0,72	7,87

Tabela 7.3: Valores médios obtidos com a heurística gulosa e busca local

Método	Gap (%)			CPUt (s)		
	máximo	mínimo	média	máximo	mínimo	média
Heurística Gulosa	18,66	1,97	10,64	0,03	0,01	0,02
Busca Local	16,54	1,97	9,17	0,08	0,02	0,05

esse caso, por exemplo, o desvio médio da solução ótima da heurística construtiva gulosa foi de 10,61%, com um tempo médio de 0,02 segundos para se obter cada uma das soluções. No caso da busca local, para o mesmo conjunto de dados, o desvio médio da solução ótima foi de 9,21%, com um tempo médio de 0,05 segundos por problema. Para o mesmo conjunto de dados o CPLEX necessitou em média de 318,95 segundos para se resolver cada problema.

Já para os problemas contendo 130 grupos, ou seja, o caso em que cada veículo é tratado placa a placa, a solução ótima não é conhecida pois, como já relatado, não foi possível a obtenção da solução ótima utilizando o CPLEX. Assim, na Tabela 7.2, a solução utilizada como referência foi a melhor solução obtida entre as heurísticas e metaheurísticas propostas neste trabalho. Nesse caso, o desvio médio da melhor solução para a heurística gulosa foi de 9,28% com um tempo médio de 0,25 segundos para cada problema, e a busca local ficou em média 7,87% distante da melhor solução obtida, com um tempo médio de processamento de 0,72 segundos para cada problema.

No Anexo E, são apresentados nas Tabelas E.1– E.18 os resultados obtidos com todos os 540 problemas resolvidos. Um resumo do desempenho dos dois procedimentos (heurística gulosa e busca local), levando-se em conta os 540 problemas, é apresentado na Tabela 7.3. Nessa tabela são apresentados os valores médio, mínimo e máximo dos tempos de processamento e desvio percentual da solução ótima para o conjunto de problemas resolvidos. Vale destacar que, para o problema contendo 130 grupos, o *Gap* percentual foi calculado com base na melhor solução obtida dentre os métodos de solução propostos, já que não foi possível obter a solução ótima para esses problemas.

A heurística gulosa ficou em média 10,64% distante da solução ótima (ou da melhor solução quando  $|E| = 130$ ) dos problemas resolvidos, enquanto que, para a busca local, esse desvio médio foi de 9,17%, evidenciando que a busca local foi eficaz na tarefa de melhoria da solução gulosa inicial criada, possibilitando um ganho percentual médio de 13,79%. Os tempos de processamentos foram, em média, de 0,02 segundos para a heurística gulosa, e de 0,05 segundos para a heurística de melhoria.

## 7.2 Parâmetros utilizados para as metaheurísticas

O ajuste fino de parâmetros para heurísticas e metaheurísticas é um fator crítico para o bom desempenho do método proposto para solução do problema em estudo. Não é tarefa fácil, e muitas vezes depende de exaustivos testes computacionais para se obter os melhores parâmetros que equilibram razoavelmente o tempo de processamento e a obtenção de soluções de boa qualidade.

Neste trabalho optou-se por utilizar uma ferramenta de suporte para o ajuste fino dos parâmetros das metaheurísticas desenvolvida por Adenso-Díaz e Laguna (2006) e nomeada pelos autores de CALIBRA. O CALIBRA é baseado na combinação de três técnicas: (i) projeto de experimentos fatoriais completos com  $k$  fatores com dois níveis cada ( $2^k$ ), (ii) experimentos fatoriais fracionados  $L_9(3^4)$  desenvolvidos por Taguchi (1987), e (iii) procedimento de busca local. O projeto de experimentos fatoriais fracionados fornece uma maneira de focar a busca local em regiões promissoras do espaço de soluções, isto é, em vez de iniciar a busca em um ponto arbitrário (um determinado conjunto de valores para os parâmetros), um projeto de experimentos é utilizado para encontrar um ponto de partida para a busca e estimar o efeito da mudança dos valores dos parâmetros.

O projeto de experimentos fatoriais fracionados é também utilizado após o estágio inicial para manter a busca focada ao redor dos valores dos parâmetros sugeridos pela análise dos resultados experimentais. Dada uma heurística  $H$  com um certo conjunto de parâmetros a serem ajustados, o CALIBRA consiste na preparação de uma série de experimentos baseados no método Taguchi (TAGUCHI, 1987), com o objetivo de encontrar o “melhor” valor para cada parâmetro em estudo em  $H$ . A noção de “melhor” depende de como a heurística  $H$  é medida. Se for medida pela qualidade das soluções obtidas para um dado conjunto de problemas, então os melhores valores para os parâmetros são aqueles que resultam em soluções de melhor qualidade. O CALIBRA controla as chamadas a heurística  $H$  e passa os valores apropriados dos parâmetros correspondentes a cada experimento.

A versão do CALIBRA disponibilizada pelos autores está limitada ao estudo de cinco parâmetros. Eles recomendam que se a heurística a ser calibrada possuir mais de cinco parâmetros, deve ser utilizada a matriz ortogonal de Taguchi  $L_{16}(2^{15})$  para determinar os cinco parâmetros mais significativos e fixar os parâmetros restantes com valores apropriados. A ferramenta foi desenvolvida para o sistema operacional Windows, possuindo versões contendo tanto uma interface gráfica com o usuário, como também uma versão

para linha de comando (*prompt* do DOS). Neste trabalho foi utilizada a versão contendo a interface gráfica com o usuário para o ajuste fino dos parâmetros das metaheurísticas propostas para a solução do PADV. Dado que o CALIBRA utiliza experimentos fatoriais completos ( $2^k$ ), experimento fatorial fracionado de Taguchi ( $L_9(3^4)$ ) e busca local, os autores definiram um critério de parada baseado na quantidade máxima de experimentos a serem realizados para o ajuste fino da heurística.

É interessante ressaltar que o tempo para execução de cada experimento pelo CALIBRA está diretamente relacionado à quantidade de problemas a serem resolvidos, ao tempo necessário para cada execução da heurística  $H$ , e obviamente à capacidade de processamento do computador utilizado. Adenso-Díaz e Laguna (2006) recomendam que a quantidade de problemas utilizados para ajuste fino dos parâmetros não deve exceder metade do número total de problemas disponíveis.

No caso do GRASP, como não há nenhum parâmetro a ser ajustado, lembrando que o parâmetro  $\alpha$  assume um valor aleatório a cada iteração, não houve a necessidade da utilização do CALIBRA. A quantidade máxima de iterações do GRASP, que é o seu critério de parada, foi controlada de tal forma a balancear o tempo de processamento com a qualidade da solução final.

Para o SA e ACS foram definidos 17 problemas a serem utilizadas para a calibração dos parâmetros, sendo escolhido aleatoriamente um problema para cada tamanho de grupo de veículos estudado, com  $|E|$  contendo de 1 até 17 elementos. Conforme mencionado, o CALIBRA trata simultaneamente até cinco parâmetros, sendo que para o SA foram estipulados os seguintes parâmetros para estudo:

- temperatura inicial,  $T_{ini}$ , no intervalo [100.000; 200.000];
- temperatura final,  $T_{fim}$ , que foi utilizada como critério de parada para o SA, e intervalo [0,001; 0,100]; e
- taxa de decaimento da temperatura (resfriamento)  $r$ , no intervalo [0,0009; 0,9999].

e para o ACS os seguintes parâmetros foram investigados:

- $\rho$ : parâmetro utilizado para regular a taxa de evaporação do feromônio, no intervalo [0,1; 1,0];
- $\alpha$ : parâmetro utilizado para representar a importância do feromônio, no intervalo [0,1; 1,0];

- $\beta$ : parâmetro que indica a importância da informação heurística, intervalo  $[0, 1; 2, 0]$ ;
- $q_0$  : probabilidade de se aceitar um caminho que maximize o produto  $\tau_{ij}\eta_{ij}^\beta$ , no intervalo  $[0, 5; 1, 0]$ ;
- $\varphi$  : parâmetro para evaporação local, no intervalo  $[0, 1; 0, 5]$ .

Mais detalhes sobre cada um dos parâmetros utilizados na implementação do ACS são apresentados na Seção 6.5. Foi definido um tempo máximo de vinte e quatro horas para a execução do CALIBRA, ajustando adequadamente a quantidade máxima de experimentos realizados (MAXEX) para esse tempo limite. Os parâmetros obtidos para cada heurística, após a execução do CALIBRA, foram:

- para o SA:
  - $T_{ini} = 100.000,0000$ ;
  - $T_{fim} = 0,001$ ;
  - $r = 0,9999$ .
- para o ACS:
  - $\rho = 0,01$ ;
  - $\alpha = 1,00$ ;
  - $\beta = 2,00$
  - $q_0 = 1,00$ ;
  - $\varphi = 0,20$ ;

As telas contendo o intervalo de parâmetros utilizados, bem como a saída do CALIBRA são apresentadas nas Figuras 7.1– 7.2, e 7.3– 7.4.

### 7.3 Resultados obtidos com as metaheurísticas GRASP, SA e ACS

Os resultados obtidos na solução dos 540 problemas utilizando as metaheurísticas GRASP, SA e ACS são apresentados nas Tabelas E.19– E.72 disponibilizadas no Anexo E. As Tabelas E.19– E.36 apresentam os resultados obtidos ao se resolver os problemas

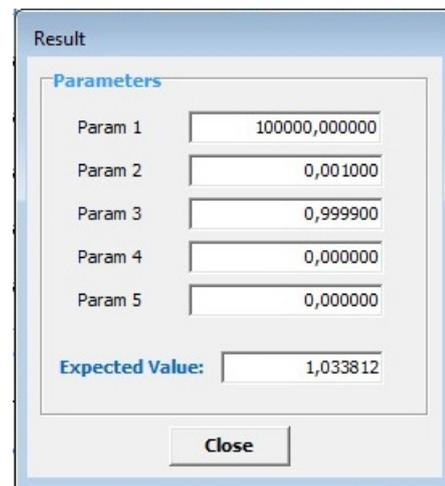
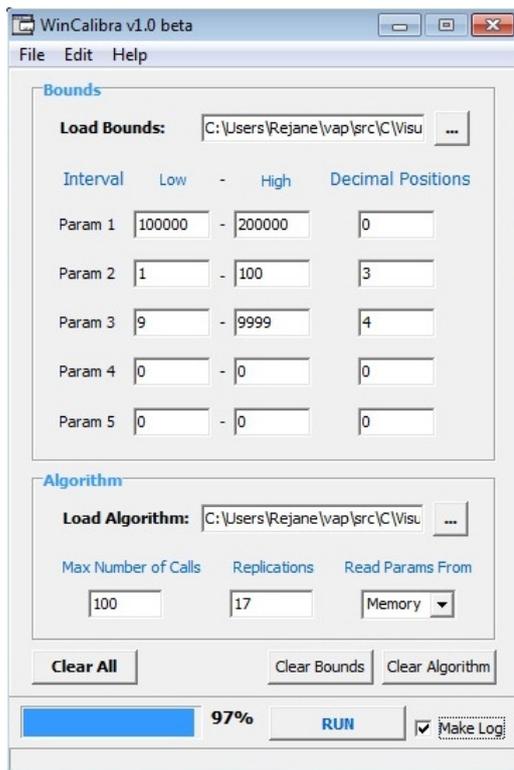


Figura 7.1: Intervalo dos parâmetros para o SA      Figura 7.2: Resultado obtido com o SA

utilizando a metaheurística GRASP. Já as Tabelas E.37– E.54 apresentam os resultados obtidos resolvendo-se os problemas utilizando o SA, e os resultados obtidos com o ACS podem ser visualizados nas Tabelas E.55– E.72. Em cada uma dessas tabelas, temos as mesmas colunas conforme já descritas na Seção 7.1

Adicionalmente, foi realizado ainda um experimento para verificar se, ao dobrar a quantidade de rodadas independentes executadas de 11 para 22 rodadas, a qualidade da solução obtida seria melhorada. Cabe lembrar que a cada rodada independente é utilizada uma diferente semente para geração de números aleatórios. Escolheu-se arbitrariamente um problema contendo 17 grupos para os experimentos. O resultado obtido com esse experimento mostrou que não houve nenhuma melhoria significativa no valor obtido com as heurísticas, sendo que para o GRASP e SA a melhor solução obtida não foi alterada, e para o caso do ACS a melhoria foi de somente 0,01%. Esse experimento preliminar não motivou experimentos adicionais com maior número de rodadas. É interessante ressaltar ainda que o desvio padrão entre as soluções obtidas em cada rodada foi reduzido, como era esperado, sendo para o SA o desvio padrão foi de 52,87 para 43,15, e no caso do ACS o desvio padrão foi de 39,84 para 35,55. No caso do GRASP o desvio padrão aumentou de 101,29 para 174,09, devido à aleatoriedade do método.

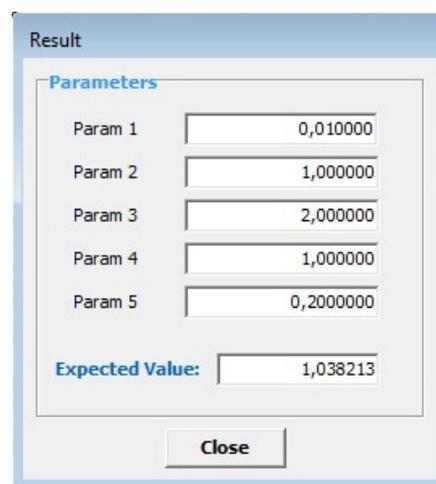
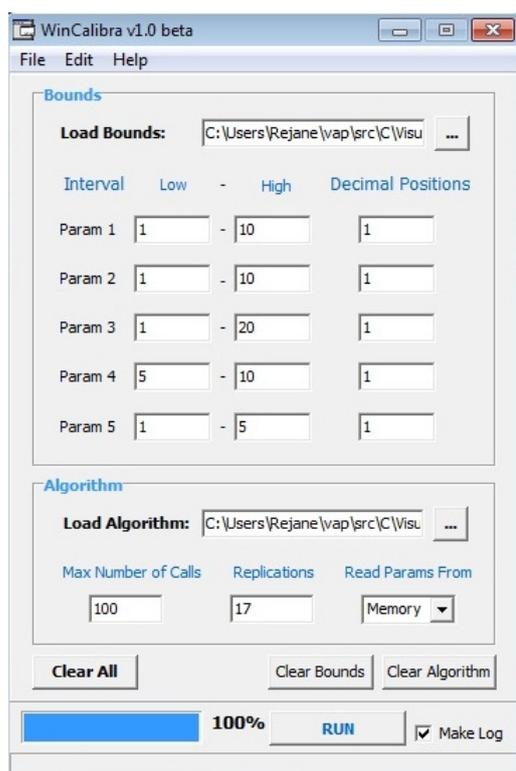


Figura 7.3: Intervalo dos parâmetros para o ACS

Figura 7.4: Resultado obtido com o ACS

### 7.3.1 Resultados obtidos com a metaheurística GRASP

Os resultados obtidos com a metaheurística GRASP para solução do conjunto de 540 problemas são apresentados na sua totalidade no Anexo E, nas Tabelas E.19– E.36.

Nas Tabelas 7.4 e 7.5 são apresentadas amostras dos resultados obtidos ao se resolver os conjuntos contendo 30 problemas, com a frota de 130 veículos dividida em 17 e 130 grupos, respectivamente (ou  $|E| = 17$  e  $|E| = 130$ ). Essas tabelas exemplificam as tabelas contidas no Anexo E, onde são apresentados os resultados para os 18 grupos estudados:

$$|E| = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 \text{ e } 130.$$

Para os problemas contendo 17 grupos, cujos resultados são apresentados na Tabela 7.4, pode-se verificar que o desvio médio da solução ótima, no melhor caso, foi de 3,57%, com um tempo de processamento médio de 22,78 segundos para cada problema. No pior caso, o desvio médio da solução ótima foi de 6,16%, e tempo médio de 21,70 segundos por problema. Na média, o desvio foi de 4,77%, e 22,24 segundos para se resolver cada problema. O desvio padrão da função objetivo e do tempo de processamento, para as 11 rodadas independentes executadas, foi de 145,76 ( $\sigma_{fo} = 145,76$ ) e 0,32 ( $\sigma_t = 0,32$ ),

respectivamente.

Para o caso em que cada veículo foi tratado individualmente placa a placa, ou seja, na situação em que existem 130 grupos ( $|E| = 130$ ), conforme apresentado na Tabela 7.5, no melhor caso o desvio médio da melhor solução obtida foi de 1,88% com tempo médio de 31,66 segundos, 4,50% no pior caso e tempo médio de 30,08 segundos, e 3,16% em média com tempo médio de 30,89 segundos. O desvio padrão da função objetivo e do tempo de processamento foram respectivamente de  $\sigma_{fo} = 147,18$  e  $\sigma_t = 0,49$ .

No geral, para os 540 problemas resolvidos, o GRASP ficou em média 3,45% distante (*Gap*) da solução ótima (ou da melhor solução quando  $|E| = 130$ ), tendo um tempo de processamento médio de 29,76 segundos para ser resolver cada problema. Pode-se verificar ainda que o GRASP pode ser considerado robusto no que diz respeito a dispersão da média dos valores obtidos com a função objetivo para as onze rodadas independentes, pois o desvio padrão das soluções obtidas foi considerado baixo. No caso do GRASP, o desvio padrão médio dos valores obtidos com a função objetivo ( $\sigma_{fo}$ ) foi de  $\sigma_{fo} = 141,18$ . O desvio padrão dos tempos de processamento foi praticamente inexistente, sendo  $\sigma_t = 0,42$  em média para o GRASP, e também a amplitude total, medida pela diferença entre o melhor e o pior valor, foi considerada pequena para cada problema resolvido.

### 7.3.2 Resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* (SA)

Nas Tabelas E.37– E.54 do Anexo E são apresentados os resultados obtidos com o SA ao se resolver os 540 problemas propostos para avaliação e testes. Nas Tabelas 7.6 e 7.7 são apresentadas amostras dos resultados obtidos ao se resolver os 30 problemas contendo 17 e 130 grupos, respectivamente.

De acordo com a Tabela 7.6, que apresenta os resultados para os 30 problemas contendo 17 grupos, no melhor caso o SA ficou em média 1,82% distante da solução ótima, com um tempo médio de 63,39 segundos para se encontrar a melhor solução. No pior caso o desvio médio da solução ótima foi de 2,90%, com um tempo médio de 62,81 segundos, e em média o *gap* em relação à solução ótima para esse conjunto de problemas foi de 2,24%, com um tempo médio de 63,07 segundos. O desvio padrão médio da função objetivo nas 11 rodadas independentes, para os 30 problemas, foi de  $\sigma_{fo} = 62,14$ , e o desvio padrão do tempo de processamento  $\sigma_t = 0,77$ .

No caso especial em que cada veículo pertence a um grupo, ou seja, na situação em que

Tabela 7.4: Amostra de resultados obtidos com as heurística GRASP para  $|E| = 17$

Problema	CPLEX			GRASP						$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$			
	Sol.	Obj.	CPUt (s)	Melhor caso			Pior caso					Média		
				FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)			FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v17	17.079,40	417,43	15.944,40	22,25	6,65	15.691,20	21,23	8,13	15.812,38	21,64	7,42	81,54	0,31	
p2r-v17	18.906,80	239,68	18.181,41	25,75	3,84	17.663,80	24,75	6,57	17.934,58	25,28	5,14	188,48	0,32	
p3r-v17	15.789,00	433,53	14.914,60	19,11	5,54	14.378,61	18,28	8,93	14.656,48	18,71	7,17	171,80	0,21	
p4r-v17	19.352,00	283,05	18.862,43	28,90	2,53	18.033,61	27,30	6,81	18.383,74	27,98	5,00	248,44	0,43	
p5r-v17	17.567,20	274,45	16.990,61	18,14	3,28	16.389,00	17,22	6,71	16.775,04	17,72	4,51	175,43	0,30	
p6r-v17	19.298,00	325,37	18.734,01	25,39	2,92	18.342,01	24,14	4,95	18.533,52	24,66	3,96	139,89	0,31	
p7r-v17	18.878,20	262,55	18.224,81	23,79	3,46	17.880,00	22,87	5,29	17.994,56	23,38	4,68	95,25	0,31	
p8r-v17	17.609,20	246,76	16.969,01	26,72	3,64	16.478,81	25,58	6,42	16.722,45	26,36	5,04	181,56	0,36	
p9r-v17	15.015,00	214,61	14.700,81	27,47	2,09	14.596,01	26,50	2,79	14.652,50	27,00	2,41	41,29	0,36	
p10r-v17	18.093,80	244,48	17.658,03	18,56	2,41	17.078,43	17,78	5,61	17.475,01	18,22	3,42	176,74	0,26	
p11r-v17	16.387,00	192,65	15.563,01	18,22	5,03	15.171,62	16,27	7,42	15.408,42	17,09	5,97	116,19	0,51	
p12r-v17	21.729,80	342,13	21.073,21	26,93	3,02	20.510,21	24,79	5,61	20.818,70	26,30	4,19	170,52	0,58	
p13r-v17	18.939,20	387,85	18.252,82	23,01	3,62	17.506,21	21,48	7,57	17.967,99	22,15	5,13	208,52	0,45	
p14r-v17	19.241,80	278,88	18.897,00	25,88	1,79	18.109,81	25,20	5,88	18.443,73	25,52	4,15	251,03	0,18	
p15r-v17	19.796,20	298,37	19.220,62	24,99	2,91	18.870,61	23,81	4,68	19.078,03	24,39	3,63	101,29	0,30	
p16r-v17	17.294,60	275,78	16.606,60	23,39	3,98	16.165,00	22,75	6,53	16.408,18	23,06	5,13	139,32	0,23	
p17r-v17	16.719,80	323,83	16.087,02	18,63	3,78	15.586,62	17,50	6,78	15.849,16	17,97	5,21	188,33	0,32	
p18r-v17	17.435,40	359,55	16.662,80	24,07	4,43	16.357,00	23,15	6,19	16.560,35	23,68	5,02	80,30	0,27	
p19r-v17	17.777,80	222,18	17.269,61	15,39	2,86	16.931,60	14,76	4,76	17.122,62	15,04	3,69	111,55	0,18	
p20r-v17	19.878,60	357,98	19.247,20	23,00	3,18	18.923,01	22,32	4,81	19.084,69	22,66	3,99	99,86	0,25	
p21r-v17	16.694,80	403,03	15.908,01	24,82	4,71	15.460,21	24,13	7,40	15.750,37	24,43	5,66	149,60	0,20	
p22r-v17	18.541,60	547,59	17.896,79	26,47	3,48	17.517,01	24,64	5,53	17.738,41	25,48	4,33	102,29	0,48	
p23r-v17	21.119,20	353,53	20.407,00	26,50	3,37	19.617,22	25,17	7,11	20.034,29	25,98	5,14	211,97	0,39	
p24r-v17	17.489,40	236,83	16.657,81	17,02	4,75	16.259,61	16,02	7,03	16.483,14	16,37	5,75	119,86	0,32	
p25r-v17	16.819,40	268,81	15.835,79	24,46	5,85	15.517,20	23,59	7,74	15.672,20	24,08	6,82	93,73	0,27	
p26r-v17	19.995,40	293,20	19.527,62	18,74	2,34	18.915,23	17,65	5,40	19.167,54	18,26	4,14	180,37	0,33	
p27r-v17	19.557,60	387,43	19.154,82	23,50	2,06	18.807,01	22,28	3,84	18.956,60	22,93	3,07	91,93	0,34	
p28r-v17	17.807,60	324,72	17.393,19	23,69	2,33	16.891,60	22,21	5,14	17.247,49	22,87	2,87	138,72	0,49	
p29r-v17	18.473,60	495,97	17.708,00	19,65	4,14	17.199,61	19,04	6,90	17.433,28	19,25	5,63	145,91	0,17	
p30r-v17	16.288,60	276,32	15.763,62	19,07	3,22	15.257,42	18,47	6,33	15.530,86	18,78	4,65	171,00	0,18	
	Média	318,95	Média	22,78	3,57	Média	21,70	6,16	Média	22,24	4,77	145,76	0,32	

Tabela 7.5: Amostra de resultados obtidos com a metaheurística GRASP para  $|E| = 130$

Problema	GRASP													
	Melhor Solução				Melhor caso				Pior caso				Média	
	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	$\sigma_{fo}$	$\sigma_t$
p1r-v130	17.483,99	184,77	3,24	16.918,21	31,19	1,48	16.663,40	29,17	4,69	16.778,04	30,22	4,04	94,84	0,51
p2r-v130	18.859,01	212,46	1,48	18.580,60	36,49	3,65	18.114,00	33,96	3,95	18.351,27	35,12	2,69	150,29	0,76
p3r-v130	16.677,21	252,10	3,65	16.068,41	25,88	1,71	15.783,81	25,11	5,36	15.918,85	25,50	4,55	92,80	0,27
p4r-v130	19.356,62	251,13	1,71	19.024,81	39,31	1,29	18.604,40	37,20	3,89	18.765,12	38,25	3,06	152,25	0,77
p5r-v130	18.291,61	159,13	1,14	18.055,42	25,68	1,14	17.479,02	24,39	4,44	17.807,60	25,21	2,65	195,30	0,35
p6r-v130	19.690,81	164,86	2,98	19.466,62	35,41	2,01	19.022,80	33,22	3,39	19.270,70	34,43	2,13	143,18	0,77
p7r-v130	19.132,43	160,50	2,01	18.562,62	34,36	1,45	18.398,02	32,50	3,84	18.466,04	33,32	3,48	53,01	0,58
p8r-v130	18.156,21	135,70	1,45	17.791,41	37,36	2,32	17.299,81	35,46	4,72	17.507,81	36,43	3,57	147,40	0,70
p9r-v130	15.121,82	115,60	1,09	14.902,61	37,85	1,09	14.720,21	36,56	2,66	14.812,28	37,23	2,05	62,48	0,41
p10r-v130	18.321,02	149,61	0,97	17.896,83	25,52	0,85	17.485,83	24,97	4,56	17.654,78	25,33	3,64	122,69	0,16
p11r-v130	16.578,22	145,89	1,20	16.396,82	24,27	1,51	15.928,21	23,16	3,92	16.136,09	23,65	2,67	170,72	0,33
p12r-v130	21.617,22	230,84	0,74	21.406,81	38,47	0,77	20.687,41	35,78	4,30	21.119,58	37,03	2,30	203,31	0,91
p13r-v130	19.265,62	137,83	1,07	19.102,81	30,97	1,07	18.644,00	29,54	3,23	18.781,26	30,07	2,51	119,88	0,45
p14r-v130	19.258,01	170,79	2,52	19.026,41	36,44	5,90	18.301,02	35,15	4,97	18.640,92	35,83	3,20	202,21	0,53
p15r-v130	21.421,23	216,57	1,51	20.156,81	33,65	0,77	19.672,82	32,81	8,16	19.854,20	33,27	7,32	138,27	0,22
p16r-v130	17.072,01	178,40	1,51	16.813,40	32,82	0,77	16.366,59	30,93	4,13	16.617,64	32,19	2,66	143,52	0,59
p17r-v130	16.888,81	147,48	1,07	16.758,62	25,90	1,07	15.991,22	24,48	5,31	16.432,27	25,06	2,70	195,73	0,38
p18r-v130	17.597,41	208,81	0,74	17.408,62	33,07	1,07	16.668,01	31,85	5,28	17.073,10	32,36	2,98	190,47	0,37
p19r-v130	17.967,60	193,85	0,74	17.835,21	21,77	0,74	17.580,01	20,97	2,16	17.732,17	21,40	1,31	81,17	0,26
p20r-v130	19.689,61	145,04	2,52	19.193,81	31,87	1,64	18.621,40	30,79	5,43	18.968,63	31,33	3,66	181,85	0,40
p21r-v130	16.696,01	272,04	1,64	16.423,01	34,36	1,45	15.821,01	32,10	5,24	16.107,10	33,24	3,53	184,66	0,68
p22r-v130	18.527,39	190,04	1,45	18.257,99	35,78	1,77	17.635,40	33,28	4,81	17.910,67	34,74	3,33	215,49	0,80
p23r-v130	20.842,21	173,60	1,77	20.473,79	37,63	5,94	19.977,00	35,70	4,15	20.274,88	36,45	2,72	159,99	0,50
p24r-v130	18.652,43	214,61	2,33	17.545,01	23,93	2,33	17.128,81	23,03	8,17	17.389,83	23,38	6,77	133,43	0,28
p25r-v130	16.822,40	161,22	2,30	16.436,00	33,01	2,30	15.929,60	30,74	5,31	16.222,04	32,18	3,57	155,53	0,59
p26r-v130	20.046,02	177,04	1,49	19.579,02	26,47	1,49	19.246,22	24,67	3,99	19.428,33	25,59	3,08	131,01	0,53
p27r-v130	19.295,42	117,62	0,30	19.007,82	32,64	0,30	18.466,41	30,45	4,30	18.813,03	31,76	2,50	145,62	0,59
p28r-v130	17.951,61	161,39	1,09	17.897,61	33,38	1,09	17.668,20	32,36	1,58	17.776,02	32,77	0,98	74,22	0,30
p29r-v130	18.818,41	159,37	0,28	18.613,41	27,74	0,28	17.895,81	26,41	4,90	18.230,34	27,09	3,12	214,85	0,48
p30r-v130	16.208,22	167,31	1,88	16.162,42	26,58	1,88	15.550,82	25,75	4,06	15.897,49	26,19	1,92	159,23	0,23
Média	178,52	Média	1,88	Média	31,66	1,88	Média	30,08	4,50	Média	30,89	3,16	147,18	0,49

cada veículo é tratado individualmente placa a placa, conforme apresentado na Tabela 7.7, o SA obteve a melhor solução em 29 dos 30 problemas resolvidos. No único problema em que o SA não pode obter a melhor solução (problema número 14), o desvio da melhor solução foi de 0,34% com um tempo médio de 177,34 segundos para se encontrar a melhor solução de cada problema. No pior caso, o desvio médio da melhor solução foi de 1,03% com um tempo médio de 174,48 segundos. Em média cada problema foi resolvido em 174,70 segundos, e desvio médio da melhor solução de 0,43%. O desvio padrão médio da função objetivo para esses 30 problemas, nas 11 rodadas independentes realizadas, foi de  $\sigma_{fo} = 57,67$ , e desvio padrão médio do tempo de processamento com valor  $\sigma_t = 9,93$ .

O valor médio do *gap* dos resultados obtidos com o SA, em relação a solução ótima, foi de 1,76%, com um tempo de processamento médio de 62,47 segundos para se resolver cada um dos 540 problemas, superando o GRASP no que diz respeito ao desvio médio da solução ótima, (ou da melhor solução quando  $|E| = 130$ ) que para o GRASP foi de 3,45%. Houve uma baixa dispersão dos valores obtidos com a função objetivo, sendo que o desvio padrão médio obtido foi de 52,14 ( $\sigma_{fo} = 52,14$ ). O desvio padrão médio do tempo de processamento foi de  $\sigma_t = 0,70$ , valor esse considerado insignificante dada a quantidade de rodadas e problemas resolvidos.

Para o SA foi realizado ainda um outro experimento, utilizando uma técnica de reaquecimento não-monotônico (*non-monotonic reheating*) (ANH; TRUNG, 2011), como uma tentativa para se obter soluções de melhor qualidade. Na técnica de resfriamento tradicionalmente utilizada, a temperatura é sempre reduzida, e quando o sistema atinge baixas temperaturas, a probabilidade de se aceitar soluções que pioram a solução corrente diminui, fazendo com que o SA fique preso em um ótimo local. A ideia do reaquecimento parte do princípio de que, se for detectado que o procedimento está preso em um ótimo local, o reaquecimento tenta escapar desse ótimo local ajustando a temperatura para o dobro do valor no ponto em que a melhor solução foi obtida.

Assim, alterou-se a heurística para tentar detectar o momento em que o SA ficou preso em um ótimo local, representado como uma certa quantidade de iterações sem melhoria e, se o ótimo local for encontrado, a temperatura é alterada para o dobro da temperatura em que o ótimo local foi obtido. Nos experimentos computacionais realizados com um certo conjunto de problemas, não foi possível obter soluções de melhor qualidade, quando comparado com as soluções do SA sem o procedimento de reaquecimento, fazendo com que somente o tempo de processamento seja aumentado, mesmo realizando com diferentes quantidades de reaquecimentos para um único problema. Esses resultados preliminares

Tabela 7.6: Amostra de resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* para  $|E| = 17$ 

Problema	CPLEX			Simulated Annealing						$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$		
	Sol.	Obj.	CPUt. (s)	Melhor caso			Pior caso					Média	
				FO	CPUt. (s)	Gap (%)	FO	CPUt. (s)	Gap (%)			FO	CPUt. (s)
p1r-v17	17.079,40	417,43	16.499,00	67,72	3,40	16.226,40	65,70	4,99	16.377,00	66,86	4,11	80,22	0,82
p2r-v17	18.906,80	239,68	18.614,41	62,89	1,55	18.497,01	61,73	2,17	18.559,03	61,98	1,84	37,55	0,55
p3r-v17	15.789,00	433,53	15.284,61	66,19	3,19	15.042,61	65,98	4,73	15.149,79	68,04	4,05	88,74	1,84
p4r-v17	19.352,00	283,05	19.087,22	73,63	1,37	18.861,22	72,88	2,54	18.978,78	72,49	1,93	63,33	1,00
p5r-v17	17.567,20	274,45	17.256,61	58,25	1,77	16.948,80	57,22	3,52	17.168,94	57,49	2,27	101,63	0,36
p6r-v17	19.298,00	325,37	19.118,61	63,41	0,93	18.899,40	63,90	2,07	19.030,41	63,54	1,39	66,77	0,36
p7r-v17	18.878,20	262,55	18.640,03	66,84	1,26	18.487,02	66,91	2,07	18.591,59	66,48	1,52	49,88	0,34
p8r-v17	17.609,20	246,76	17.412,21	59,77	1,12	17.199,41	60,05	2,33	17.334,08	59,92	1,56	58,02	0,51
p9r-v17	15.015,00	214,61	14.806,22	58,07	1,39	14.763,01	57,75	1,68	14.784,80	57,69	1,53	11,96	0,24
p10r-v17	18.093,80	244,48	17.709,24	58,51	2,13	17.355,43	57,41	4,08	17.616,67	58,05	2,64	97,61	0,53
p11r-v17	16.387,00	192,65	15.944,42	59,34	2,70	15.792,01	59,60	3,63	15.898,36	59,47	2,98	53,35	0,29
p12r-v17	21.729,80	342,13	21.516,40	72,42	0,98	21.416,80	74,55	1,44	21.474,04	73,32	1,18	25,88	1,45
p13r-v17	18.939,20	387,85	18.553,22	63,33	2,04	18.336,62	63,16	3,18	18.468,76	63,21	2,48	69,52	0,95
p14r-v17	19.241,80	278,88	19.034,21	59,42	1,08	18.590,21	59,06	3,39	18.939,19	58,98	1,57	123,77	0,58
p15r-v17	19.796,20	298,37	19.517,21	70,92	1,41	19.340,83	71,40	2,30	19.447,66	72,52	1,76	52,87	1,19
p16r-v17	17.294,60	275,78	17.029,20	66,35	1,53	16.870,01	65,62	2,46	16.964,53	65,35	1,91	54,13	0,59
p17r-v17	16.719,80	323,83	16.318,02	56,52	2,40	16.096,22	55,71	3,73	16.244,47	55,54	2,84	72,32	0,53
p18r-v17	17.435,40	359,55	17.076,41	73,46	2,06	16.913,01	67,72	3,00	17.012,37	69,38	2,43	49,17	2,16
p19r-v17	17.777,80	222,18	17.383,41	55,56	2,22	17.109,41	56,19	3,76	17.236,48	55,79	3,04	104,77	0,55
p20r-v17	19.878,60	357,98	19.495,22	59,65	1,93	19.400,62	59,21	2,40	19.466,04	59,29	2,08	37,14	0,63
p21r-v17	16.694,80	403,03	16.265,81	77,55	2,57	16.150,21	75,07	3,26	16.216,88	77,43	2,86	34,05	2,03
p22r-v17	18.541,60	547,59	18.322,19	68,81	1,18	18.108,99	69,12	2,33	18.234,32	68,96	1,66	69,08	0,48
p23r-v17	21.119,20	353,53	20.872,01	66,64	1,17	20.741,60	66,46	1,79	20.818,17	66,04	1,43	35,40	1,25
p24r-v17	17.489,40	236,83	17.165,21	65,05	1,85	16.879,21	63,64	3,49	17.059,52	64,59	2,46	104,20	1,03
p25r-v17	16.819,40	268,81	16.194,79	62,13	3,71	15.937,40	60,53	5,24	16.085,27	61,45	4,36	78,26	0,67
p26r-v17	19.995,40	293,20	19.711,41	59,88	1,42	19.477,42	59,55	2,59	19.595,22	59,85	2,00	91,62	0,23
p27r-v17	19.557,60	387,43	19.398,22	53,41	0,81	19.269,82	53,05	1,47	19.332,29	53,37	1,15	39,17	0,28
p28r-v17	17.807,60	324,72	17.611,81	57,83	1,10	17.494,41	56,55	1,76	17.578,64	57,38	1,29	38,05	0,48
p29r-v17	18.473,60	495,97	18.051,61	58,42	2,28	17.917,81	58,88	3,01	17.998,76	58,12	2,57	41,82	0,39
p30r-v17	16.288,60	276,32	15.949,82	59,76	2,08	15.841,02	59,76	2,75	15.897,75	59,59	2,40	34,02	0,83
	Média	318,95	Média	63,39	1,82	Média	62,81	2,90	Média	63,07	2,24	62,14	0,77

Tabela 7.7: Amostra de resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* para  $|E| = 130$

Problema	Simulated Annealing											
	Melhor Solução			Melhor caso			Pior caso			Média		
	FO	GPUt (s)	Gap (%)	FO	GPUt (s)	Gap (%)	FO	GPUt (s)	Gap (%)	FO	GPUt (s)	Gap (%)
p1r-v130	17,483,99	184,77	0,00	17,202,60	194,82	1,61	17,356,21	194,80	0,73	18,242	12,35	
p2r-v130	18,859,01	212,46	0,00	18,723,61	199,24	0,72	18,795,68	204,83	0,34	45,41	6,65	
p3r-v130	16,677,21	252,10	0,00	16,338,41	213,28	2,03	16,512,05	235,60	0,99	98,23	45,96	
p4r-v130	19,356,62	251,13	0,00	19,179,41	228,00	0,92	19,273,53	234,79	0,43	49,92	11,84	
p5r-v130	18,291,61	159,13	0,00	18,124,81	166,96	0,91	18,243,34	162,08	0,26	59,94	7,95	
p6r-v130	19,690,81	164,86	0,00	19,624,21	168,09	0,34	19,652,30	162,47	0,20	19,74	4,02	
p7r-v130	19,132,43	160,50	0,00	18,975,43	167,72	0,82	19,078,64	157,15	0,28	42,41	5,12	
p8r-v130	18,156,21	135,70	0,00	18,000,62	135,19	0,86	18,098,74	130,72	0,32	46,66	3,69	
p9r-v130	15,121,82	115,60	0,00	15,079,82	115,85	0,28	15,102,53	112,79	0,13	11,89	2,59	
p10r-v130	18,321,02	149,61	0,00	18,153,82	153,08	0,91	18,250,97	150,34	0,38	69,65	5,63	
p11r-v130	16,578,22	145,89	0,00	16,356,22	168,90	1,34	16,511,44	165,32	0,40	57,39	9,85	
p12r-v130	21,617,22	230,84	0,00	21,525,01	210,17	0,43	21,572,62	204,15	0,21	29,32	11,96	
p13r-v130	19,265,62	137,83	0,00	19,167,02	152,16	0,51	19,227,51	148,25	0,20	31,86	6,65	
p14r-v130	19,258,01	170,79	0,34	19,062,40	122,86	1,02	19,142,27	131,80	0,60	36,96	6,86	
p15r-v130	21,421,23	216,57	0,00	21,162,61	223,91	1,21	21,306,13	218,65	0,54	67,55	7,66	
p16r-v130	17,072,01	178,40	0,00	16,874,81	189,06	1,16	16,986,68	167,88	0,50	78,54	15,58	
p17r-v130	16,888,81	147,48	0,00	16,698,03	176,46	1,13	16,786,76	152,68	0,60	56,78	19,16	
p18r-v130	17,597,41	208,81	0,00	17,413,61	195,33	1,04	17,529,03	209,96	0,39	57,56	11,82	
p19r-v130	17,967,60	193,85	0,00	17,709,62	188,72	1,44	17,861,48	187,96	0,59	79,59	10,75	
p20r-v130	19,689,61	145,04	0,00	19,049,02	129,20	3,25	19,478,90	146,99	1,07	170,86	6,76	
p21r-v130	16,696,01	272,04	0,00	16,499,61	248,45	1,18	16,622,45	269,11	0,44	54,26	16,02	
p22r-v130	18,527,39	190,04	0,00	18,386,80	195,69	0,76	18,443,76	187,74	0,45	50,05	13,25	
p23r-v130	20,842,21	173,60	0,00	20,632,41	164,33	1,01	20,751,99	175,30	0,43	66,46	9,59	
p24r-v130	18,652,43	214,61	0,00	18,230,22	166,27	2,26	18,480,79	186,50	0,92	139,73	14,61	
p25r-v130	16,822,40	161,22	0,00	16,724,00	167,42	0,58	16,778,51	159,20	0,26	28,99	6,39	
p26r-v130	20,046,02	177,04	0,00	19,884,03	172,50	0,81	20,010,21	178,41	0,18	45,21	4,29	
p27r-v130	19,295,42	117,62	0,00	19,084,02	117,50	1,10	19,188,75	117,55	0,55	69,10	2,04	
p28r-v130	17,951,61	161,39	0,00	17,897,41	154,30	0,30	17,916,70	160,11	0,19	20,30	3,30	
p29r-v130	18,818,41	159,37	0,00	18,738,42	168,78	0,43	18,788,48	157,52	0,16	25,14	6,12	
p30r-v130	16,208,22	167,31	0,00	16,092,82	180,25	0,71	16,165,57	170,30	0,26	38,14	9,31	
Média	Média	Média	0,01	Média	Média	1,03	Média	Média	0,43	Média	9,93	

não motivaram pesquisa adicional com outras estratégias de reaquecimento para o SA.

### 7.3.3 Resultados obtidos com a metaheurística Colônia de Formigas (ACS)

Os resultados completos obtidos com a metaheurística ACS são apresentados no Anexo E, nas Tabelas E.55– E.72. Como exemplo, nas Tabelas 7.8 e 7.9 são apresentados os resultados obtidos ao se resolver os 30 problemas contendo 17 e 130 grupos respectivamente ( $|E| = 17$  e  $|E| = 130$ ).

Para os 30 problemas contendo 17 grupos, conforme apresentado na Tabela 7.8, o ACS no melhor caso ficou em média 2,16% distante da solução ótima, e tempo médio de 82,31 segundos para encontrar a melhor solução de cada problema. No pior caso, o desvio médio da solução ótima foi de 2,83% e tempo médio de 82,23 segundos. Em média, o *gap* da solução ótima foi de 2,49%, e tempo médio de 82,16 segundos para se resolver cada problema. O desvio padrão médio da função objetivo nas 11 rodadas independentes realizadas foi de  $\sigma_{f_o} = 38,17$ , e o desvio padrão médio do tempo de processamento foi de  $\sigma_t = 0,41$ .

Para os 30 problemas contendo 130 grupos ( $|E| = 130$ ), no melhor caso, o ACS ficou em média 0,95% distante da melhor solução, com um tempo médio de processamento de 171,55 segundos. No pior caso, o desvio médio da melhor solução foi de 1,51%, e tempo médio de 171,30 segundos para se resolver cada problema. Em média, o ACS ficou 1,24% distante da melhor solução, e com um tempo médio de 171,41 segundos para se resolver cada um dos problemas. O desvio padrão médio da função objetivo para as 11 rodadas independentes realizadas para cada problema foi de  $\sigma_{f_o} = 32,35$ , enquanto que o desvio padrão médio do tempo de processamento foi de  $\sigma_t = 0,71$ .

O ACS ficou em média 2,05% distante (*Gap*) da solução ótima, (ou da melhor solução quando  $|E| = 130$ ) e um tempo de processamento médio de 82,65 segundos para ser resolver cada um dos 540 problemas, sendo nesse critério superior ao GRASP, que obteve desvio médio de 3,45%, e inferior ao SA que obteve um desvio médio da solução ótima de 1,76%. O ACS pode também ser considerado robusto, pois o desvio padrão médio das soluções obtidas, nas 11 rodadas independentes executadas para cada problema resolvido, foi de  $\sigma_{f_o} = 31,76$ . Da mesma forma, o desvio padrão médio do tempo de processamento para se resolver cada rodada independente de cada problema foi de  $\sigma_t = 0,40$ , sendo esse um valor desprezível face a quantidade de problemas e rodadas independentes executadas.

Tabela 7.8: Amostra de resultados obtidos com a metaheurística colônia de formigas para  $|E| = 17$ 

Problema	CPLEX			Melhor caso			Pior caso			Colônia de Formigas		
	Sol. Ótima	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
				Média			Média			Média		
p1r-v17	17.079,40	417,43	3,98	16.399,60	84,08	4,88	16.245,80	83,96	4,88	16.317,29	82,64	4,46
p2r-v17	18.906,80	239,68	1,72	18.582,20	80,77	2,06	18.516,60	80,82	2,06	18.546,81	80,86	1,90
p3r-v17	15.789,00	433,53	3,77	15.194,01	82,71	4,72	15.044,21	82,68	4,72	15.117,66	82,59	4,25
p4r-v17	19.352,00	283,05	1,88	18.987,61	84,00	2,51	18.867,02	80,56	2,51	18.919,23	82,10	2,24
p5r-v17	17.567,20	274,45	2,01	17.213,80	81,18	2,58	17.114,20	81,13	2,58	17.157,60	81,44	2,33
p6r-v17	19.298,00	325,37	1,39	19.029,80	81,96	2,04	18.904,20	81,78	2,04	18.962,98	81,53	1,74
p7r-v17	18.878,20	262,55	1,70	18.557,21	83,53	2,16	18.470,62	83,87	2,16	18.517,89	83,62	1,91
p8r-v17	17.609,20	246,76	1,50	17.345,60	81,49	1,88	17.279,01	81,60	1,88	17.309,53	81,77	1,70
p9r-v17	15.015,00	214,61	1,40	14.805,02	83,12	1,71	14.758,81	83,63	1,71	14.789,07	83,33	1,50
p10r-v17	18.093,80	244,48	2,48	17.644,22	82,33	3,07	17.537,83	82,63	3,07	17.588,18	82,25	2,79
p11r-v17	16.387,00	192,65	2,70	15.944,41	82,63	3,52	15.810,61	83,01	3,52	15.873,41	82,75	3,13
p12r-v17	21.729,80	342,13	1,12	21.486,80	82,92	1,48	21.407,22	82,53	1,48	21.445,62	82,74	1,31
p13r-v17	18.939,20	387,85	2,31	18.502,42	80,40	3,04	18.362,62	80,64	3,04	18.433,34	80,64	2,67
p14r-v17	19.241,80	278,88	1,20	18.861,20	81,63	1,98	18.861,20	81,63	1,98	18.937,04	81,89	1,58
p15r-v17	19.796,20	298,37	2,26	19.348,20	81,99	2,81	19.240,81	81,84	2,81	19.296,57	81,50	2,52
p16r-v17	17.294,60	275,78	1,43	17.047,79	81,63	2,77	16.815,00	81,99	2,77	16.928,00	81,78	2,12
p17r-v17	16.719,80	323,83	2,67	16.274,02	81,44	3,24	16.178,82	81,23	3,24	16.214,00	81,24	3,03
p18r-v17	17.435,40	359,55	2,64	16.975,40	81,24	3,72	16.786,00	82,11	3,72	16.890,18	81,47	3,13
p19r-v17	17.777,80	222,18	2,61	17.313,80	82,34	3,67	17.124,60	82,26	3,67	17.213,49	82,44	3,17
p20r-v17	19.878,60	357,98	1,98	19.484,61	82,61	2,42	19.396,61	82,39	2,42	19.437,74	82,46	2,22
p21r-v17	16.694,80	403,03	2,83	16.223,01	82,67	3,56	16.100,41	82,31	3,56	16.174,16	82,47	3,12
p22r-v17	18.541,60	547,59	1,55	18.254,38	82,21	2,09	18.153,39	82,14	2,09	18.212,44	82,33	1,78
p23r-v17	21.119,20	353,53	1,64	20.771,99	80,58	2,34	20.624,80	80,64	2,34	20.703,81	80,87	1,97
p24r-v17	17.489,40	236,83	2,51	17.050,61	81,27	3,54	16.870,20	81,67	3,54	16.953,42	81,54	3,06
p25r-v17	16.819,40	268,81	4,58	16.048,59	83,80	5,33	15.922,39	83,58	5,33	16.011,61	83,65	4,80
p26r-v17	19.995,40	293,20	1,79	19.638,21	82,53	2,77	19.441,01	83,14	2,77	19.533,72	82,67	2,31
p27r-v17	19.557,60	387,43	1,04	19.354,21	82,73	1,49	19.266,22	82,98	1,49	19.305,08	82,82	1,29
p28r-v17	17.807,60	324,72	1,41	17.557,39	83,88	1,70	17.504,39	83,54	1,70	17.543,51	82,94	1,48
p29r-v17	18.473,60	495,97	2,49	18.012,80	81,49	2,86	17.944,61	81,30	2,86	17.985,16	81,56	2,64
p30r-v17	16.288,60	276,32	2,29	15.915,02	83,64	2,90	15.816,22	83,84	2,90	15.874,00	82,96	2,55
Média		318,95	2,16	Média	82,31	2,83	Média	82,23	2,83	Média	82,16	2,49



### 7.3.4 Análise comparativa entre as metaheurísticas

Para facilitar a comparação entre os diferentes métodos de solução propostos para o PADV, são apresentados no Anexo E, nas Tabelas E.73– E.90, os resultados obtidos utilizando a heurísticas gulosa e busca local, lado a lado com as melhores soluções obtidas para cada problema utilizando as metaheurísticas GRASP, SA e ACS. Como cada problema foi resolvido mais de uma vez para uma mesma metaheurística, são apresentados nessas tabelas somente a melhor solução obtida dentre as rodadas independentes realizadas para a solução de cada problema, com seu respectivo tempo de processamento e desvio percentual da solução ótima (*Gap*). Nas Tabelas 7.10 e 7.11 são apresentados exemplos dessa tabela comparativa para os casos onde existem 17 e 130 grupos, respectivamente ( $|E| = 17$  e  $|E| = 130$ ).

Na Tabela 7.10 são apresentados, para cada um dos 30 problemas contendo 17 grupos, os resultados obtidos com a heurística construtiva gulosa, a busca local, juntamente com as metaheurísticas GRASP, SA e ACS. Nessa tabela pode-se verificar, através do desvio percentual da solução ótima, a evolução dos métodos de solução propostos, tanto para cada problema resolvido, como também na média final dos *gaps* em relação à solução ótima. A heurística construtiva gulosa ficou em média 10,61% distante da solução ótima, a busca local 9,21%, o GRASP 3,57%, o SA 1,82% e o ACS 2,16%. Na Figura 7.5 é apresentado graficamente a melhor solução obtida por cada heurística, contendo os valores da função objetivo para cada um dos 30 problemas resolvidos, onde é possível também visualizar o desempenho de cada uma das heurísticas na solução de cada um dos problemas.

A Tabela 7.11 apresenta os resultados obtidos com as heurísticas para problemas contendo 130 grupos, ou melhor, o caso em que cada veículo é tratado placa a placa. A heurística gulosa ficou em média 9,28% distante da melhor solução obtida, já para a busca local esse valor foi de 7,87%. O GRASP ficou em média 1,88% distante da melhor solução, o SA 0,01% e o ACS 0,95%. É possível visualizar graficamente na Figura 7.6 os valores obtidos com a função objetivo para cada uma das heurísticas propostas. Nesse gráfico pode-se verificar a superioridade do SA frente as outras heurísticas, obtendo a melhor solução em 29 dos 30 problemas resolvidos.

Para os 540 problemas resolvidos, no que diz respeito à qualidade das soluções obtidas ao se resolver os problemas propostos, pode-se afirmar que o SA obteve um desempenho ligeiramente superior quando comparado com as heurísticas GRASP e ACS pois, em média, para o SA o desvio da solução ótima (ou da melhor solução quando  $|E| = 130$ ) foi de 1,76%, enquanto que nos casos do GRASP e ACS, o desvio foi de 3,45% e 2,05%,

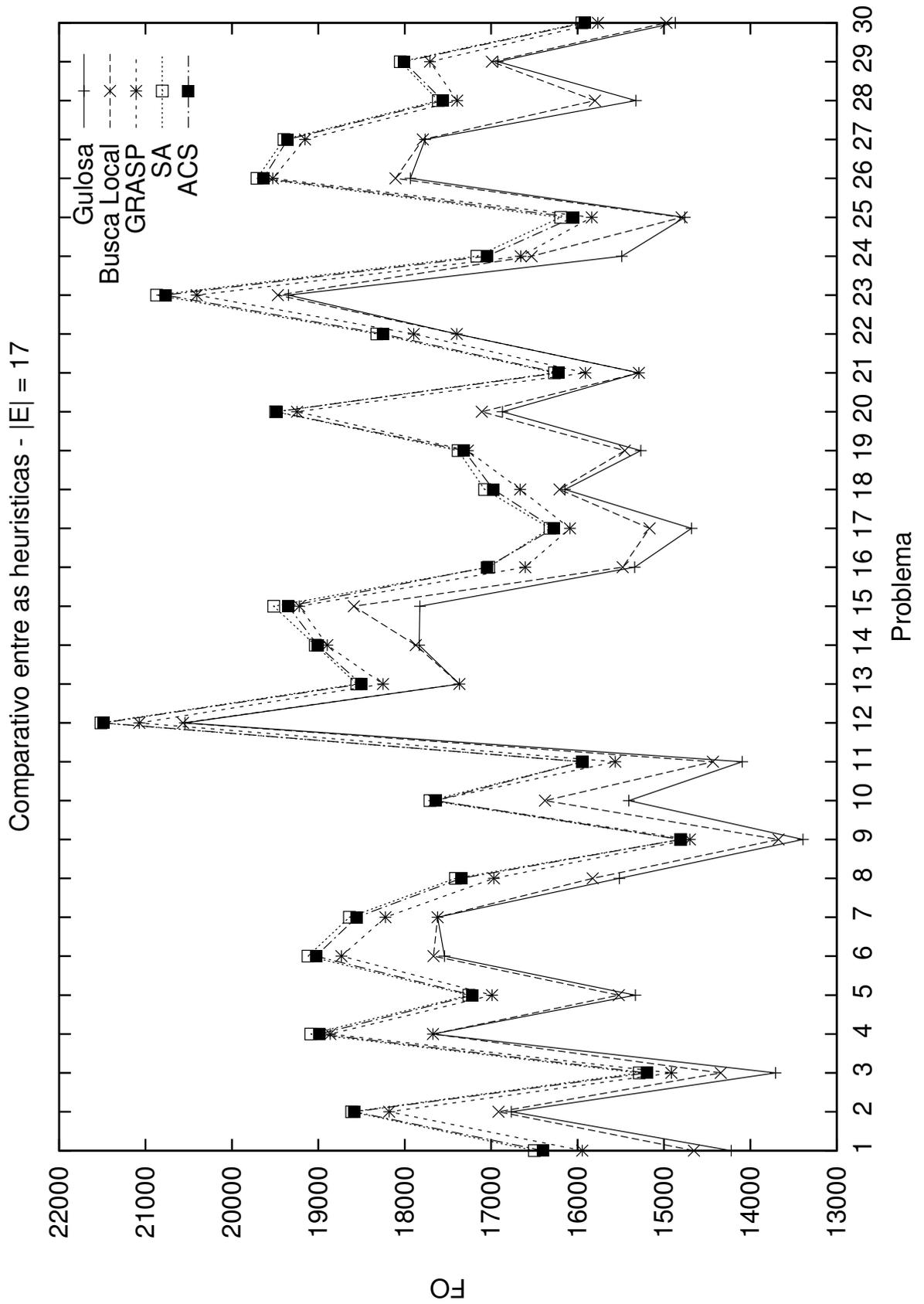


Figura 7.5: Comparativo entre as heurísticas para problemas contendo 17 grupos ( $|E| = 17$ ).

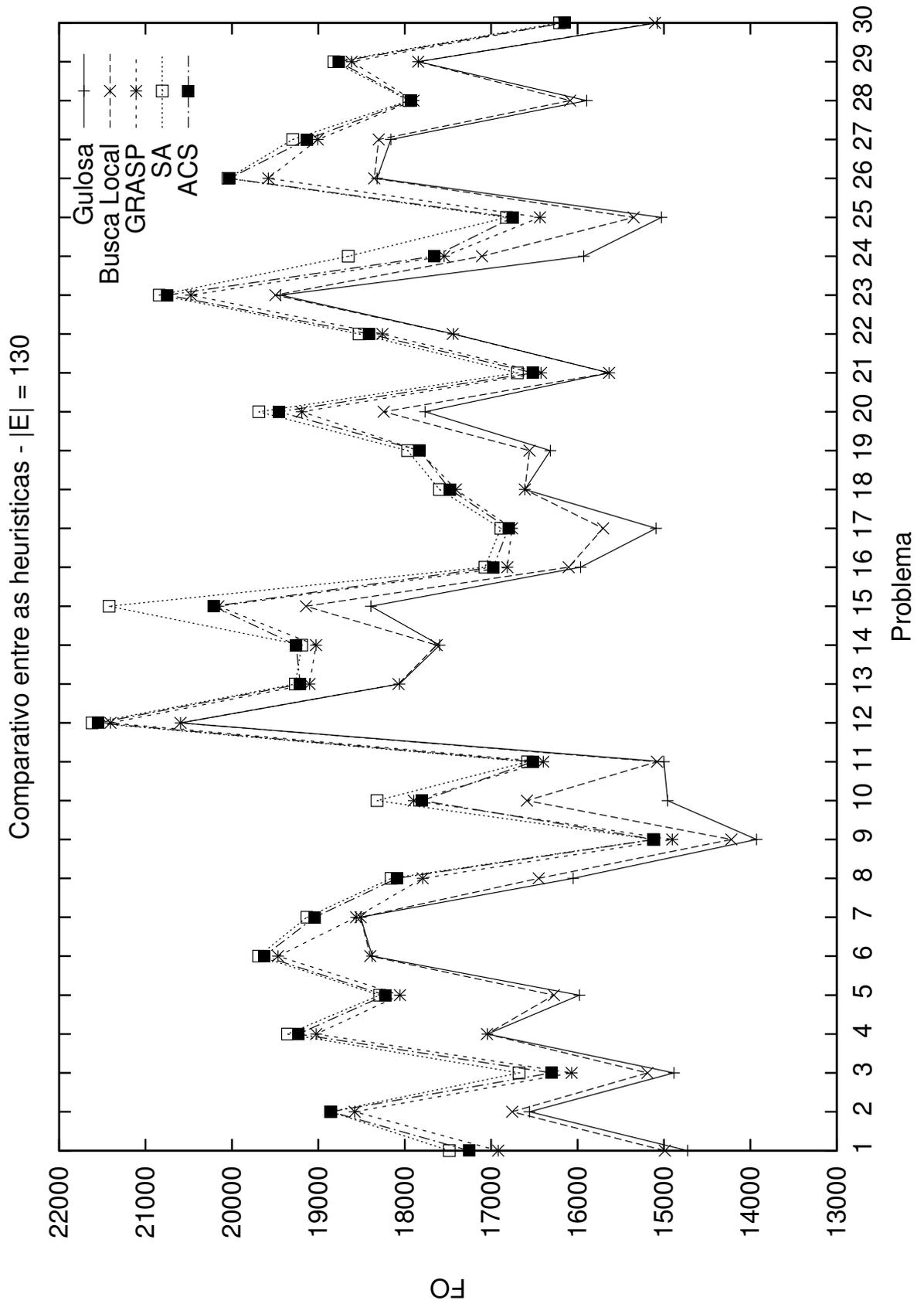


Figura 7.6: Comparativo entre as heurísticas para problemas contendo 130 grupos ( $|E| = 130$ ).

Tabela 7.10: Exemplo de tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV  $|E| = 17$ 

Problema	Heurística Gulosa			Busca Local			GRASP			Simulated Annealing			Colônia de Formigas		
	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v17	14.220,80	0,02	16,74	14.653,80	0,04	14,20	15.944,40	22,25	6,65	16.499,00	68,38	3,40	16.399,60	84,08	3,98
p2r-v17	16.768,40	0,02	11,31	16.914,40	0,05	10,54	18.181,41	25,75	3,84	18.614,41	62,89	1,55	18.582,20	81,04	1,72
p3r-v17	13.708,40	0,02	13,18	14.342,80	0,04	9,16	14.914,60	19,11	5,54	15.284,61	71,43	3,19	15.194,01	82,95	3,77
p4r-v17	17.674,00	0,02	8,67	17.674,00	0,04	8,67	18.862,43	28,90	2,53	19.087,22	74,26	1,37	18.987,61	84,15	1,88
p5r-v17	15.329,80	0,02	12,74	15.522,40	0,04	11,64	16.990,61	18,14	3,28	17.256,61	58,25	1,77	17.213,80	81,52	2,01
p6r-v17	17.540,20	0,02	9,11	17.667,80	0,04	8,45	18.734,01	25,39	2,92	19.118,61	64,14	0,93	19.029,80	81,06	1,39
p7r-v17	17.620,60	0,02	6,66	17.620,60	0,03	6,66	18.224,81	23,79	3,46	18.640,03	66,91	1,26	18.557,21	80,66	1,70
p8r-v17	15.516,00	0,02	11,89	15.825,40	0,04	10,13	16.969,01	26,72	3,64	17.412,21	61,33	1,12	17.345,60	82,67	1,50
p9r-v17	13.391,60	0,02	10,81	13.672,20	0,05	8,94	14.700,81	27,47	2,09	14.806,22	58,07	1,39	14.805,02	83,12	1,40
p10r-v17	15.406,00	0,02	14,85	16.377,80	0,05	9,48	17.658,03	18,56	2,41	17.709,24	58,70	2,13	17.644,22	83,52	2,48
p11r-v17	14.093,60	0,02	14,00	14.432,40	0,06	11,93	15.563,01	18,22	5,03	15.944,42	59,99	2,70	15.944,41	83,01	2,70
p12r-v17	20.542,60	0,01	5,46	20.566,40	0,03	5,35	21.073,21	26,93	3,02	21.516,40	75,00	0,98	21.486,80	83,23	1,12
p13r-v17	17.366,80	0,02	8,30	17.366,80	0,04	8,30	18.252,82	23,01	3,62	18.553,22	65,02	2,04	18.502,42	81,58	2,31
p14r-v17	17.833,00	0,02	7,32	17.872,20	0,05	7,12	18.897,00	24,99	1,79	19.034,21	59,55	1,08	19.010,20	82,30	1,20
p15r-v17	17.825,20	0,01	9,96	18.588,40	0,07	6,10	18.897,00	24,99	2,91	19.517,21	74,72	1,41	19.348,20	81,99	2,26
p16r-v17	15.338,20	0,02	11,31	15.476,40	0,04	10,51	16.606,60	23,39	3,98	17.029,20	66,35	1,53	17.047,79	82,05	1,43
p17r-v17	14.681,00	0,02	12,19	15.166,00	0,05	9,29	16.087,02	18,63	3,78	16.318,02	56,52	2,40	16.274,02	81,56	2,67
p18r-v17	16.145,80	0,02	7,40	16.208,20	0,05	7,04	16.662,80	24,07	4,43	17.076,41	73,46	2,06	16.975,40	82,11	2,64
p19r-v17	15.267,20	0,02	14,12	15.453,00	0,06	13,08	17.269,61	15,39	2,86	17.383,41	56,97	2,22	17.313,80	82,85	2,61
p20r-v17	16.868,40	0,02	15,14	17.108,80	0,05	13,93	19.247,20	23,00	3,18	19.495,22	60,65	1,93	19.484,61	82,61	1,98
p21r-v17	15.290,20	0,02	8,41	15.290,20	0,03	8,41	15.908,01	24,82	4,71	16.265,81	80,35	2,57	16.223,01	82,78	2,83
p22r-v17	17.397,20	0,02	6,17	17.397,20	0,03	6,17	17.896,79	26,47	3,48	18.322,19	70,16	1,18	18.254,38	82,64	1,55
p23r-v17	19.345,60	0,02	8,40	19.469,40	0,05	7,81	20.407,00	26,50	3,37	20.872,01	67,86	1,17	20.771,99	81,32	1,64
p24r-v17	15.487,20	0,02	11,45	16.533,20	0,06	5,47	16.657,81	17,02	4,75	17.165,21	66,60	1,85	17.050,61	81,95	2,51
p25r-v17	14.757,60	0,02	12,26	14.795,80	0,04	12,03	15.835,79	24,46	5,85	16.194,79	62,52	3,71	16.048,59	83,88	4,58
p26r-v17	17.934,20	0,02	10,31	18.106,80	0,06	9,45	19.527,62	18,74	2,34	19.711,41	60,36	1,42	19.638,21	83,14	1,79
p27r-v17	17.765,00	0,02	9,17	17.789,20	0,05	9,04	19.154,82	23,50	2,06	19.398,22	53,99	0,81	19.354,21	83,05	1,04
p28r-v17	15.324,80	0,02	13,94	15.799,00	0,05	11,28	17.393,19	23,69	2,33	17.611,81	58,35	1,10	17.557,39	83,88	1,41
p29r-v17	16.923,80	0,02	8,39	16.992,20	0,05	8,02	17.708,00	19,65	4,14	18.051,61	58,88	2,28	18.012,80	82,03	2,49
p30r-v17	14.867,80	0,02	8,72	14.972,00	0,05	8,08	15.763,62	19,07	3,22	15.949,82	61,10	2,08	15.915,02	83,84	2,29
Média	Média	0,02	10,61	Média	0,05	9,21	Média	22,78	3,57	Média	64,43	1,82	Média	82,70	2,16

Tabela 7.11: Exemplo de abela comparativa entre as heurísticas para o PADV  $|E| = 130$ 

Problema	Heurística Gulosa			Busca Local			GRASP			Simulated Annealing			Colônia de Formigas		
	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v130	14.725,20	0,25	15,78	14.989,40	0,71	14,27	16.918,21	31,19	3,24	17.483,99	184,77	0,00	17.256,00	172,49	1,30
p2r-v130	16.556,40	0,27	12,21	16.755,80	0,83	11,15	18.580,60	36,49	1,48	18.859,01	212,46	0,00	18.853,40	172,03	0,03
p3r-v130	14.884,00	0,25	10,75	15.189,80	0,68	8,92	16.068,41	25,88	3,65	16.677,21	252,10	0,00	16.302,41	171,23	2,25
p4r-v130	17.043,20	0,23	11,95	17.048,20	0,68	11,93	19.024,81	39,31	1,71	19.356,62	251,13	0,00	19.231,81	171,06	0,64
p5r-v130	15.978,60	0,25	12,65	16.273,40	0,64	11,03	18.055,42	25,68	1,29	18.291,61	159,13	0,00	18.227,02	170,28	0,35
p6r-v130	18.377,40	0,24	6,67	18.398,40	0,64	6,56	19.466,62	35,41	1,14	19.690,81	164,86	0,00	19.628,60	171,48	0,32
p7r-v130	18.511,20	0,25	3,25	18.511,20	0,44	3,25	18.562,62	34,36	2,98	19.132,43	160,50	0,00	19.041,01	170,76	0,48
p8r-v130	16.050,00	0,28	11,60	16.450,20	0,68	9,40	17.791,41	37,36	2,01	18.156,21	135,70	0,00	18.092,80	172,09	0,35
p9r-v130	13.928,40	0,29	7,89	14.219,20	0,90	5,97	14.902,61	37,85	1,45	15.121,82	115,60	0,00	15.111,81	170,50	0,07
p10r-v130	14.957,80	0,24	18,36	16.587,20	0,81	9,46	17.896,83	25,52	2,32	18.321,02	149,61	0,00	17.801,42	170,27	2,84
p11r-v130	15.001,00	0,25	9,51	15.081,00	0,72	9,03	16.396,82	24,27	1,09	16.578,22	145,89	0,00	16.518,02	170,87	0,36
p12r-v130	20.596,20	0,23	4,72	20.596,20	0,36	4,72	21.406,81	38,47	0,97	21.617,22	230,84	0,00	21.547,39	172,76	0,32
p13r-v130	18.061,60	0,24	6,25	18.073,20	0,67	6,19	19.102,81	30,97	0,85	19.265,62	137,83	0,00	19.211,00	172,26	0,28
p14r-v130	17.597,00	0,30	8,63	17.630,40	0,78	8,45	19.026,41	36,44	1,20	19.192,22	135,30	0,34	19.258,01	170,79	0,00
p15r-v130	18.393,20	0,25	14,14	19.143,00	0,96	10,64	20.156,81	33,65	5,90	21.421,23	216,57	0,00	20.213,01	170,42	5,64
p16r-v130	15.964,00	0,25	6,49	16.102,20	0,62	5,68	16.813,40	32,82	1,51	17.072,01	178,40	0,00	16.975,79	171,39	0,56
p17r-v130	15.090,20	0,26	10,65	15.703,40	0,75	7,02	16.758,62	25,90	0,77	16.888,81	147,48	0,00	16.800,61	171,45	0,52
p18r-v130	16.610,40	0,24	5,61	16.610,40	0,93	5,61	17.408,62	33,07	1,07	17.597,41	208,81	0,00	17.475,81	171,57	0,69
p19r-v130	16.315,00	0,25	9,20	16.555,20	0,90	7,86	17.835,21	21,77	0,74	17.967,60	193,85	0,00	17.827,00	172,54	0,78
p20r-v130	17.764,60	0,26	9,78	18.243,00	0,70	7,35	19.193,81	31,87	2,52	19.689,61	145,04	0,00	19.455,40	171,51	1,19
p21r-v130	15.634,00	0,22	6,36	15.634,00	0,48	6,36	16.423,01	34,36	1,64	16.696,01	272,04	0,00	16.513,82	170,67	1,09
p22r-v130	17.437,00	0,25	5,89	17.444,80	0,50	5,84	18.257,99	35,78	1,45	18.527,39	190,04	0,00	18.414,19	171,49	0,61
p23r-v130	19.439,60	0,31	6,73	19.496,20	0,84	6,46	20.473,79	37,63	1,77	20.842,21	173,60	0,00	20.747,18	171,36	0,46
p24r-v130	15.927,40	0,25	14,61	17.106,20	0,91	8,29	17.545,01	23,93	5,94	18.652,43	214,61	0,00	17.656,41	171,62	5,34
p25r-v130	15.027,80	0,28	10,67	15.350,40	0,68	8,75	16.436,00	33,01	2,30	16.822,40	161,22	0,00	16.748,40	171,27	0,44
p26r-v130	18.321,60	0,25	8,60	18.352,40	0,72	8,45	19.579,02	26,47	2,33	20.046,02	177,04	0,00	20.031,02	172,44	0,07
p27r-v130	18.161,80	0,25	5,88	18.300,60	0,66	5,16	19.007,82	32,64	1,49	19.295,42	117,62	0,00	19.134,81	172,31	0,83
p28r-v130	15.893,80	0,26	11,46	16.086,00	0,66	10,39	17.897,61	33,38	0,30	17.951,61	161,39	0,00	17.928,39	172,42	0,13
p29r-v130	17.843,20	0,26	5,18	17.843,20	0,78	5,18	18.613,41	27,74	1,09	18.818,41	159,37	0,00	18.768,20	170,93	0,27
p30r-v130	15.075,20	0,26	6,99	15.104,60	0,82	6,99	16.162,42	26,58	0,28	16.208,22	167,31	0,00	16.148,81	171,41	0,37
Média		0,25	9,28	Média	0,72	7,87	Média	31,66	1,88	Média	177,34	0,01	Média	171,55	0,95

Tabela 7.12: Desvio padrão médio da função objetivo ( $\sigma_{fo}$ ) e do tempo de processamento ( $\sigma_t$ )

Heurística	$\sigma_{fo}$	$\sigma_t$
GRASP	141,18	0,42
SA	52,14	0,70
ACS	31,76	0,40

respectivamente. Com relação ao tempo de processamento, o GRASP necessitou em média 29,76 segundos para resolver cada um dos 540 problemas, enquanto que o SA necessitou em média 62,47 segundos, e o ACS em média 82,65 segundos.

Pode-se afirmar ainda que as metaheurísticas propostas são robustas do ponto de vista da dispersão da média de valores obtidos com a função objetivo, pois, para as onze rodadas independentes, o desvio padrão das soluções obtidas foi considerado baixo, conforme apresentado na Tabela 7.12. Considerando os 540 problemas resolvidos, no caso do GRASP, o desvio padrão médio dos valores obtidos com a função objetivo ( $\sigma_{fo}$ ) foi de  $\sigma_{fo} = 141,18$ , enquanto que para o SA desvio padrão médio foi de  $\sigma_{fo} = 52,14$ . Para o ACS o desvio padrão foi ainda menor, em média  $\sigma_{fo} = 31,76$ . O desvio padrão dos tempos de processamento foi pequeno, sendo  $\sigma_t = 0,42$  para o GRASP,  $\sigma_t = 0,70$  para o SA, e  $\sigma_t = 0,40$  para o ACS. A amplitude total, medida pela diferença entre o melhor e o pior valor, também foi pequena para cada problema resolvido.

## 7.4 Conclusões do capítulo

Neste Capítulo foi tratada a solução do PADV, através do modelo nomeado neste trabalho de  $M_1$  conforme apresentado na Seção 4.2, nos casos em que os veículos pertencem a muitos grupos e, no caso especial em que cada veículo é tratado individualmente e se necessita acompanhar os movimentos cheios e vazios, veículo a veículo. Situação essa muito comum em ambientes práticos onde os operadores do setor de tráfego de uma empresa de transportes necessitam definir qual veículo realizará cada rota.

Dada a dificuldade de se resolver problemas de tamanho e complexidades similares ao encontrado na prática utilizando pacotes comerciais de otimização, como o CPLEX, optou-se pelo desenvolvimento de heurísticas para sua solução:

1. heurística gulosa;

2. busca local;
3. GRASP (*Greedy Randomized Adaptative Search Procedure*);
4. SA (*Simulated Annealing*);
5. ACS (*Ant Colony System*).

As metaheurísticas desenvolvidas (GRASP, SA e ACS) utilizaram extensivamente a heurística gulosa construtiva e o procedimento de melhoria (busca local) desenvolvidas especificamente para o problema. O GRASP foi implementado utilizando-se o valor da função objetivo obtida pela construção gulosa aleatória, na inserção dessas soluções na lista restrita de candidatos *RCL* (*Restricted Candidate List*).

No caso do SA, apesar dos testes realizados com diferentes formas de reaquecimento, a implementação tradicional do método foi a mais eficiente, tanto do ponto de vista da qualidade da solução final obtida, como também no reduzido tempo de processamento. Já para a metaheurística colônia de formigas, optou-se pela implementação de uma variante do método, conhecida por *Ant Colony System* (ACS).

Foram gerados 30 problemas de tamanho similar ao encontrado na prática, e para diferentes quantidades de grupos de veículos  $1 \leq E \leq 17$ . A escolha do número 17 deve-se ao fato de ter sido possível se obter a solução ótima para problemas até essa quantidade de grupos, possibilitando assim uma referência ao se comparar com as metaheurísticas testadas. Foram resolvidos no total 540 problemas, sendo 30 problemas com a quantidade de grupos variando de 1 a 17 ( $30 \times 17 = 510$ ), e outros 30 problemas com 130 grupos, totalizando 540 problemas. Cada problema foi resolvido onze (11) vezes, sendo que a cada rodada um diferente valor de semente para geração de números aleatórios foi utilizado.

As heurísticas implementadas obtiveram desempenhos similares, sendo que o SA obteve um desempenho ligeiramente superior, ficando em média 1,76% distante da solução ótima, (ou da melhor solução quando  $|E| = 130$ ) enquanto que para o GRASP o desvio médio foi de 3,45%, já para o ACS esse valor foi de 2,05%. O tempo médio de processamento para se resolver cada um desses problemas foi de 29,76 segundos utilizando o GRASP, para o SA foi de 62,47 segundos, e de 82,65 segundos para o ACS. Para os problemas com 130 grupos, o SA novamente obteve desempenho superior no que diz respeito ao valor final obtido pela função objetivo, encontrando a melhor solução para 29 dos 30 problemas resolvidos.

Pode-se concluir ainda que tanto o GRASP como também o SA e o ACS são robustos,

pois o desvio padrão nas onze rodadas independentes realizadas foi pequeno, tendo em média o valor de 141,18 para o GRASP, para o SA 52,14, e 31,76 para o ACS. A amplitude total, medida pela diferença entre a melhor e a pior solução, foi também pequena, e o tempo de processamento utilizado para solução de cada problema foi considerado aceitável para o caso prático, tendo um valor inferior a três minutos para a obtenção de um ótimo local.

É interessante salientar que, apesar do bom desempenho das heurísticas, não foi possível obter a solução ótima em nenhum dos 510 problemas iniciais resolvidos, em que a solução ótima foi possível de ser obtida utilizando o CPLEX, oferecendo indícios de que talvez as heurísticas gulosa e de busca local, apesar do seu papel fundamental para o desenvolvimento do SA e do ACS, possam influenciar negativamente na solução final obtida, fazendo com que a solução se inicie em um local desfavorável no espaço de soluções, e ainda no caso da busca local, modificar significativamente a solução corrente, eliminando movimentos que a primeira vista não se mostraram tão imprescindíveis, mas que podem ser essenciais para o resultado final. Esses resultados indicam oportunidades para se melhorar os métodos heurísticos aqui propostos.

É interessante ressaltar que, a medida que a quantidade de grupos  $|E|$  aumenta, maior a dificuldade do CPLEX em se obter a solução ótima. Na Figura 7.7 são apresentados os tempos médios, em segundos, para se obter a solução ótima para  $|E|$  variando de 1 a 17. Nessa figura pode-se evidenciar que, quanto maior a quantidade de grupos, maior o tempo necessário para que o CPLEX obtenha a solução ótima, pois o problema fica mais distante de um problema de rede mono-fluxo (isto é, a característica do problema multi-fluxo começa a ficar mais marcante).

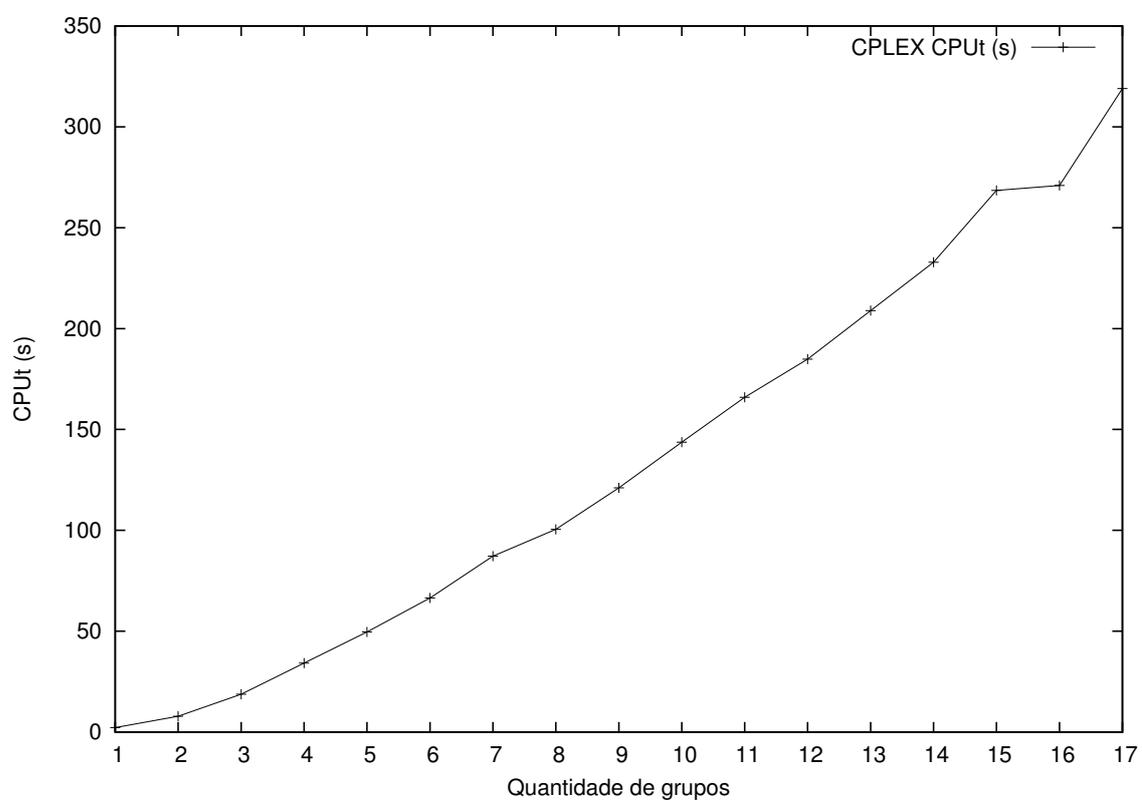


Figura 7.7: Tempo de processamento do CPLEX para diferentes quantidades de grupos  $|E|$ .

## 8 Validação prática

Segundo a literatura estudada e revisada no Capítulo 3, não há na literatura uma definição objetiva de como deve ser realizado o processo de validação. Conclui-se que a análise pode fundamentar-se nas categorias teóricas elaboradas por estudiosos da pesquisa operacional e de relações entre a lógica, linguagem e pensamento, e também nas suas aplicações no estudo de processos cognitivos da abstração e argumentação. Neste capítulo, é apresentado um desenvolvimento relativo à validação do modelo conceitual e do modelo formal para apoio às decisões em gestão operacional de frota de veículos em empresas de transporte de cargas. Na tentativa de melhor entendimento sobre questões de validação para modelos quantitativos em pesquisa operacional, buscou-se fundamentos teóricos, e optou-se pelo uso do processo de validação proposto por Oral e Kettani (1993).

Esses autores apresentam uma interpretação para o processo de modelagem – validação por meio de uma representação tridimensional, um tetraedro, e exploram as questões de validação de modelos através das facetas (ou faces) desse tetraedro formado dos vértices: *situação gerencial*, *modelo conceitual*, *modelo formal* e *decisão*. Esse tetraedro já foi discutido no Capítulo 3, e é aqui rerepresentado (por conveniência) na Figura 8.1.

A faceta “Descritiva”, cujas validades relacionadas entre si referem-se à existência de

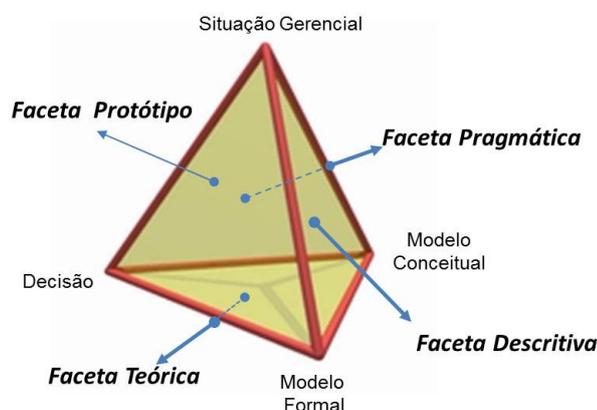


Figura 8.1: Tetraedro de Oral e Kettani (1993).

legitimidade e da apropriada relação entre a situação gerencial e o modelo conceitual e da adequada transformação do modelo conceitual no modelo formal, diz respeito aos atributos de: utilidade, benefício, caráter representativo, sinergia, e custo de se usar o modelo formal.

A faceta “Teórica” diz respeito à validação de verificação, e está conectada com a justificativa da teoria ou trabalho científico feito isoladamente das situações gerenciais no mundo real. A validação de verificação é mais de natureza técnica e está relacionada com a verificação da proposta feita pelos modeladores, considerando os valores do modelo formal construído e as técnicas de soluções desenvolvidas para este propósito.

A faceta “Protótipo” apresenta um conjunto de validades relacionadas entre si referentes, principalmente ao grau de relevância das hipóteses e teorias que embasam o modelo formal e dos benefícios previstos para a situação gerencial. Referem-se também *à qualidade, tipo, natureza técnica da solução e da eficiência do método de solução*. Diz respeito também aos atributos como: utilidade, oportunidade, sinergia e custo de implementação das soluções fornecidas por um modelo formal e, ainda, adequação, exatidão, conveniência, viabilidade, manutenção, confiança e custo de dados.

A faceta “Pragmática” está relacionada com validação conceitual, validação operacional, validação de dados e validação de legitimidade. Em essência, validação de legitimidade substitui a validação lógica e validação experimental na ausência de um “modelo formal”. De qualquer maneira, ainda que menos formal, necessita ser realizada com validação qualitativa. É necessário ilustrar se as hipóteses e prescrições formuladas para a tomada de decisão estão em conformidade com o modelo conceitual.

Nesta tese estudou-se o desenvolvimento de um modelo formal para apoiar decisões de nível operacional em gestão de frotas em empresas de transporte de cargas. Com base no processo de validação sugerido por Oral e Kettani (1993), buscou-se a validação de alguns dos conceitos relacionados às quatro facetas do tetraedro. Não foi possível realizar um estudo mais profundo, ou seja, a validação de todos os atributos conceituais oferecidos pelos autores. O escopo deste trabalho não contemplou a implementação da solução na prática da empresa, ou seja, não houve o desenvolvimento e implantação de um sistema traduzindo assim o resultado do modelo em decisões. A realização dessa fase pode requerer bastante tempo, pois envolve a implantação *in loco* de um sistema computacional integrado ao sistema corporativo da empresa, que, acredita-se, seja interessante para desenvolvimentos futuros.

Com relação à faceta teórica, a pesquisa desenvolvida nesta tese, juntamente com

os modelos e métodos de solução propostos, incluindo os experimentos computacionais realizados, e apresentados nos Capítulos 5 e 7, apoiam a validação dessa faceta do estudo.

A validação das demais facetas foi realizada através de três fases, envolvendo equipe técnica e prática da empresa parceira, e a relação dessas fases com as facetas do tetraedro de Oral e Kettani (1993). São elas:

**Fase 1:** a aplicação de um exemplo prático, a obtenção da sua solução empírica por parte do tomador da decisão (gerente de frotas da empresa parceira). A solução pôde ser comparada com a solução exata do exemplo proposto obtido pelo AMPL/CPLEX. Essa fase refere-se à validação da faceta protótipo e pragmática do tetraedro.

**Fase 2:** a aplicação de um questionário estruturado, a alguns gerentes experientes, selecionados da empresa parceira, sendo essa fase também relacionada à faceta pragmática do tetraedro.

**Fase 3:** a aplicação de um questionário estruturado a um membro específico da equipe, com formação adequada para avaliar o modelo formal e a qualidade das soluções, apoiando assim a validação das facetas: descritiva, protótipo e pragmática do tetraedro.

A seguir, é descrito o desenvolvimento e a análise dos resultados do teste prático (Fase 1), e das opiniões dos gerentes selecionados (grau de concordância e justificativas da Fase 2), sobre realidades gerenciais na gestão de frota de veículos. Essa abordagem vai ao encontro com o pensamento de Finlay (1988): “o processo de validação pode ser expresso como sendo o modelo mais apropriado de se testar a realidade percebida do sistema do mundo real”.

## 8.1 Fase 1: teste prático e solução de problema exemplo

Considerou-se como início do processo de validação a Fase 1, ou seja, a aplicação do teste exemplo e a conseqüente análise do resultado obtido pelo desenvolvimento empírico gerencial. Foi realizada a comparação do resultado obtido de forma empírica com a solução ótima do problema exemplo.

Foi desenvolvido um problema exemplo, que possui similaridades com o problema real da empresa, contudo, simplificações foram julgadas como necessárias, pois não havia interesse na possibilidade da não resolução por parte do tomador de decisão. Como

exemplo de simplificação foi realizada a redução da quantidade de terminais envolvidos, a redução na quantidade de períodos e também da frota envolvida. A documentação completa, contendo o enunciado do problema exemplo proposto para validação, encontra-se no Anexo F.

Apresentou-se o problema exemplo e os dados suficientes para a proposta de planejamento, neste caso empírico como na prática da gestão de frotas atualmente. Cabe ressaltar que foi apresentado o modelo conceitual previamente ao tomador de decisão, mais não foi apresentado nem o modelo formal e tampouco a solução exata obtida pelo modelo formal.

Resumidamente, o problema exemplo consistiu em: dada uma semana de planejamento de tráfego, considerar 6 dias consecutivos, divididos em períodos de 6 horas (24 períodos). Pede-se programar quais movimentos os veículos disponíveis irão realizar. A cada movimento cheio de um veículo, obtém-se uma receita da carga atendida menos o custo para movimentar esse veículo por período. Os movimentos de estoque dos veículos nos períodos, ou seja, se o veículo permanece parado em um terminal em determinado(s) período(s), considera-se, a título de simplificação, como custo zero. Os movimentos vazios dos veículos geram custo por período. Estes custos relativos ao movimento vazio devem ser somados aos custos operacionais, também por período, do movimento da carga que o veículo foi programado a atender. No final da resolução do problema o objetivo é o de se verificar o saldo desta programação de veículos: positivo ou negativo.

Foi fornecida a quantidade de 8 terminais de cargas interagindo entre si. O horizonte de planejamento de 6 dias, correspondente a 24 períodos ( $24\text{h}/6\text{h} = 4$  períodos por dia). Foi solicitado que o plano fosse único para todo o horizonte de planejamento, e desenvolvido de uma única vez, sem considerar quebras de veículos, acidentes ou outras ocorrências. As informações das cargas (demanda por veículos) e dos veículos foram fornecidas, por origem, destino e período. Os veículos foram considerados como idênticos.

O resultado esperado é o de atender a maior quantidade de cargas possível, maximizando a diferença entre o lucro obtido e o custo para operação. Não foi solicitada ou imposta qualquer metodologia, ou forma de representação da solução. O tomador de decisão realizou a solução do problema exemplo proposto no tempo total de aproximadamente uma hora e quarenta minutos. Na solução do problema, o tomador de decisão utilizou um “controle logístico”, apresentado na Figura 8.2, assim denominado por ele por se tratar de uma planilha eletrônica.

Na Tabela 8.1 é apresentado o controle da quantidade de veículos, segundo as ori-

gens e destinos, em atendimento às demandas nos períodos correspondentes. No final do desenvolvimento da solução do problema exemplo, o tomador de decisão apresenta um resumo, com a potencial receita obtida através do planejamento realizado por ele. Esse resumo está apresentado na Tabela 8.2.

O mesmo problema foi resolvido utilizando o modelo  $M_1$  e o CPLEX e a solução ótima foi obtida em menos de um segundo. O valor da função objetivo na solução ótima foi de R\$ 654,00, versus R\$ 630,00 obtido pelo tomador de decisão, o que corresponde a uma diferença de 3,7%. Em seguida, foi apresentada a solução ótima para o tomador de decisão na forma de relatório, conforme Anexo F.2, incluindo também uma apresentação gráfica. Após a apresentação da solução ótima, o tomador de decisão confirmou a sua utilidade prática, ficando também surpreso com a velocidade com que o problema foi resolvido, e vislumbrou ainda a possibilidade de utilização imediata do modelo, podendo, na sua opinião, compor com as práticas atuais de gestão da frota.

## 8.2 Fase 2: aplicação de questionário

Após a criação do questionário estruturado, foi realizada a apresentação do modelo conceitual a todos os gerentes selecionados, integrantes da equipe de gestão operacional, incluindo o tomador de decisão (gestor de frotas) após a solução do problema exemplo da Fase 1. Na Tabela 8.3 têm-se um resumo da qualificação dos tomadores de decisão, e também as suas respectivas experiências profissionais no setor de transporte rodoviário de cargas (TRC).

Observa-se que a equipe possui formação acadêmica superior diversificada, e experiência no setor de transporte de cargas entre 4 até 30 anos. No Anexo F, nas Tabelas F.1– F.5, podem ser verificadas as respostas completas fornecidas pelos avaliadores participantes do processo de validação. Nesse questionário pode ser verificado o padrão de questões utilizadas, assim como uma escala proposta para a atribuição do grau de concordância a estas questões. A escala variou de 1 (baixo/pouco/não concordo) até 5 (alto/muito/concordo plenamente). Em seguida, são apresentadas as justificativas sobre a escolha do grau de concordância para cada questão pelos tomadores de decisão.

Na Tabela 8.4, verifica-se a soma do total dos pontos atribuídos pelos tomadores de decisão para cada questão. Observa-se que todas as questões foram respondidas por todos os tomadores de decisão. O valor total possível para a concordância máxima em cada questão corresponde a 20 pontos ( $5 \text{ pontos} \times 4 \text{ avaliadores} = 20 \text{ pontos}$ ). Atenção

CONTROLE LOGÍSTICO

Períodos	CON			SÃO			CPQ			RIO			SSA			VIX			RAO			JDF		
	N	D	S	N	D	S	N	D	S	N	D	S	N	D	S	N	D	S	N	D	S	N	D	S
1o Período			0	4	2	-2			0			0			0			0			0			0
2o Período	2		2			0			0			0			0			0			0			0
3o Período	4		6	3		3		2	2		2			0		2		2			0			0
4o Período	2	2	6	1		2		2	1		1			0		0		0			0			0
5o Período			6			2			0		1			0		0		0			0			0
6o Período	1	7				2			0		1			0		0		0			1		1	1
7o Período	1	2	10	1	2	3		2	2		1		1	1	2		3	1	4		1		1	1
8o Período	2		8	3		0	3	1	0	1			1	2	2		1	4			1		1	1
9o Período	1		7			0			0				1	3	2		1	4			1		1	1
10o Período			7			0			0		2			3	4		1	3			1		1	2
11o Período	3	10				0		1	1					3			4			1			2	2
12o Período	1		9	4		4	0	1	1	1			1	4	1		3	1			0	1	1	1
13o Período	5		4			0		1	1				3				3				0		1	1
14o Período			4			0		1	1	1			1	3			3			1	1		1	1
15o Período			6			0		1	1				3				4				1		1	1
16o Período			6	4		4	0	3	-2	2			1	1	3		4				1		1	0
17o Período	2		4			0		0	0				1	2	5		3	1			1	1	1	1
18o Período			6			0		0	0				1	5			5				1		1	1
19o Período	3	9				0		0	0	1			1	6			6			1			1	1
20o Período	3	1	7	3		3	0	0	0	1			0	6	1		6	1		2	7	1	0	0
21o Período			7			0		0	0				0	6			6				0		0	0
22o Período			8			0		0	0				1	6			6				0		0	0
23o Período	2	10		1		1	0	1	0	1			0	6			6				1	1	1	1
24o Período			10			0		1	1				0	7			7				1		1	1

N NECESSIDADE  
D DISPONIBILIDADE  
C CHEGANDO  
S SALDO

Figura 8.2: Controle logístico criado pelo tomador de decisão

Tabela 8.1: Tabela auxiliar criada pelo tomador de decisão para solução do problema exemplo

1o. Período	Origem	Destino	C / V	Períodos	Custo	Receita
	SAO	CON	C	2	6	20
	SAO	CON	C	2	6	20
	SAO	RIO				
	SAO	SSA				
2o. Período	Origem	Destino	C / V	Períodos	Custo	Receita
3o. Período	Origem	Destino	C / V	Períodos	Custo	Receita
4o. Período	Origem	Destino	C / V	Períodos	Custo	Receita
	CPQ	CON	C	2	6	20
	CPQ	VIX	C	3	9	20
	VIX	SSA	C	2	6	20
	VIX	CON	C	2	6	20
	SAO	SSA	C	4	12	20
	CON	VIX	C	2	6	20
	CON	RIO	C	1	3	20
	RIO	CON	C	1	3	20
...	...	...	...	...	...	...
13o. Período	Origem	Destino	C / V	Períodos	Custo	Receita
	CON	SAO	V	2	6	
	CON	SAO	V	2	6	
	CON	SAO	V	2	6	
	CON	SAO	V	2	6	
	CON	SAO	V	2	6	
...	...	...	...	...	...	...
23o. Período	Origem	Destino	C / V	Períodos	Custo	Receita
	SAO	CON	C	2	6	20
	CPQ	RIO	C	1	3	20
	RIO	VIX	C	2	6	20
24o. Período	Origem	Destino	C / V	Períodos	Custo	Receita

Tabela 8.2: Resultado obtido pelo tomador de decisão

<b>Demonstrativo</b>	
Receita total	R\$ 1.020,00
Despesa carregado	R\$ 300,00
Despesa vazio	R\$ 90
% Despesa / Receita	38%

Tabela 8.3: Tomadores de Decisão que colaboraram com a pesquisa estruturada

<b>Escolaridade</b>	<b>Cargo Atual</b>	<b>Experiência no TRC</b>
Pós-Graduado em Gestão de Projetos	Gerente de Frota	17 anos
Superior - Adm. de Empresas	Gerente Geral de Operações	30 anos
Superior - Ciência da Computação	Gerente de TI e Telecom.	4 anos
Superior Incompleto (cur-sando)	Gerente de Operações	10 anos

especial deve ser dada à questão de número 3, cuja forma do questionamento sugere uma pontuação mais baixa, diferente das demais questões.

As questões 1, 2 e 3 iniciais referem-se ao alinhamento sobre o reconhecimento que de fato existe um problema de planejamento na gestão de frotas, que o problema ainda é tratado de forma empírica e que não há atualmente uma maneira mais formal de resolvê-lo. Com relação às justificativas para cada grau de concordância, optou-se por um quadro resumo para cada questão, condensando as quatro repostas nesse único quadro.

Nas Tabelas 8.5– 8.7 pôde se evidenciar que o problema de alocação de veículos é considerado pelos tomadores de decisão como um problema relevante, seja com relação ao custo operacional envolvido, ou ainda na busca constante e necessária por melhor rentabilidade. A gestão da frota disponível atual baseia-se em um controle obtido através de informações em planilhas, denominado internamente na empresa de “Radar”, que possui interface informacional com o sistema de rastreamento de veículos (GPS - *Global Positioning System*). Esta forma gerencial tem atendido satisfatoriamente, porém, não há um princípio formal que maximize o uso dos recursos disponíveis. Ações gerenciais e corretivas pontuais auxiliam na tentativa de dominar o gerenciamento pleno da alocação da frota. As justificativas e discussões apontam para a necessidade de uma ferramenta de apoio com tempo de resposta satisfatório.

Tabela 8.4: Resumo da pontuação atribuída pelos tomadores de decisão

Questões	Total Pontos
1 - O problema de alocação de veículos vazios nas transferências entre terminais é relevante para o negócio da empresa?	20
2 - Na empresa o problema é tratado de forma empírica?	17
3 - Na empresa há como resolver o problema com algumas ações específicas?	13
4 - Você acredita que o conceito técnico apresentado pode representar corretamente o problema?	18
5 - A modelagem apresentada, na sua opinião, representa a realidade com relação ao problema em questão? (alocação de veículos vazios) ?	20
6 - Para a empresa, no seu entendimento, seria interessante desenvolver um <i>software</i> utilizando a ferramenta apresentada?	20
7 - Você acredita ser viável de fato a empresa investir no desenvolvimento da ferramenta, para apoio nas decisões de frota?	20
8 - Qual sua atribuição de utilidade para a modelagem apresentada?	20
9 - Sobre a apresentação das soluções da modelagem, você acredita ser satisfatória? Ou seja, tem relação direta com o problema?	19
10 - Do ponto de vista de dados de entrada para o modelo, na sua opinião, são viáveis, estão adequados para os resultados esperados para solução?	18

As questões 4 e 5 compiladas a seguir, Tabelas 8.8– 8.9, referem-se ao entendimento do modelo conceitual apresentado e também do conhecimento da solução obtida com o mesmo. Foram apresentados os resultados da solução ótima do problema exemplo da empresa, assim como o exemplo ilustrativo Ghiani et al. (2003), utilizado e acrescido conceitualmente neste trabalho. Conclui-se uma caracterização da validação da faceta pragmática, com destaque a aresta que conecta a situação gerencial e modelo conceitual. A validade operacional da faceta pragmática, também é percebida através do atributo de utilidade, que está evidenciado através do resumo das justificativas da questão 4 apresentada na Tabela 8.8.

Segundo os tomadores de decisão, como apresentado na Tabela 8.10 (questão 6), pode ser interessante o desenvolvimento de um sistema a exemplo de um DSS – *Decision Support System*, ou *Expert Systems - ES*, devido à complexidade da rede de conexões entre terminais, o estágio atual de decisões parciais e o alto custo envolvido nas operações de transferências de cargas.

Com relação à disposição em investir no desenvolvimento da ferramenta de apoio à

Tabela 8.5: Resumo referente a questão 1

1 - O problema de alocação de veículos vazios nas transferências entre terminais é relevante para o negócio da empresa?						
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“A alocação de veículos vazios é um dos maiores custos do nosso negócio, totalmente relevante a discussão em busca de um modelo que nos ajude a reduzir custos.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Sim, devido à crescente busca por ter uma melhor rentabilidade, rodar entre terminais com veículos vazios termina sendo um desperdício, impactando diretamente no resultado da empresa.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Com certeza, pois além de representatividade eminente do prejuízo em transitar com o veículo vazio, podemos agravar a situação operacional em decorrência de não conseguirmos atender uma solicitação do cliente ou de uma determinada unidade. Outro ponto importante para afirmação da relevância do problema é o constante crescimento da frota própria que aumenta a possibilidade da tomada errônea de decisão.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Sim, pois os veículos são o maior componente de custo do nosso negócio e minimizar o desperdício com o deslocamento de veículos vazios terá impacto direto, positivo, no nosso resultado.”					

decisão, como pode ser visto na Tabela 8.11 (questão 7), de maneira geral, conclui-se que há concordância e interesse. Devido à estrutura interna de profissionais nas áreas de pesquisa operacional, tecnologia da informação e outros com muita experiência no gerenciamento do problema, acredita-se ser viável o desenvolvimento interno da ferramenta. Outra consideração é sobre o crescimento constante da empresa, e o conseqüente aumento da complexidade do problema, o que pode oferecer um desafio maior a cada ano para os gestores.

Sobre o atributo utilidade, apresentado na Tabela 8.12 (questão 8), referente à validação operacional e de competência (faceta pragmática do tetraedro), conforme o processo de validação admitido neste trabalho, conclui-se que há um consenso de que é interessante o uso de uma ferramenta baseada na abstração realizada e na modelagem conceitual desenvolvida. Observa-se que no entendimento geral a modelagem representou diretamente o problema real, conforme evidenciado nas respostas obtidas apresentadas na Tabela 8.13 (questão 9). Esta validação refere-se à legitimidade da faceta pragmática.

Por fim, na questão 10 apresentada na Tabela 8.14, os tomadores de decisão, com base na apresentação do modelo conceitual e da solução (decisão), juntamente com o

Tabela 8.6: Resumo referente a questão 2

<b>2 - Na empresa o problema é tratado de forma empírica?</b>						
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“A forma empírica de tratar o problema tem mudado mas ainda está longe de uma solução técnica e científica, o que justifica a aproximação acadêmica.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Positivo. Entendo que devido à enorme quantidade de variáveis que existe, termina a ficar quase impossível fazer as alocações de veículos em tempo e com uma melhor ocupação em todos os casos. Assim terminamos a atender de forma pontual a real necessidade de melhor aproveitamento de cada veículo em cada local desejado.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Sim, em minha opinião o problema é tratamento mais no campo da observação do que a utilização de uma teoria ou método que pudesse resolver de modo mais racional e científico a questão da alocação de veículos vazios.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Temos algumas iniciativas através de planilhas e relatórios para evitar desperdícios, mas sempre atuamos de forma corretiva.”					

conhecimento que possuem sobre as informações disponíveis na empresa, salientaram que há necessidade de um melhor aprofundamento nas informações, dos dados disponíveis, principalmente aqueles relacionados às informações de demandas por veículos. Clientes nem sempre compartilham informações com a empresa de transporte sobre seu plano de distribuição dos produtos. Uma melhor utilização da frota disponível pode ser alcançada se todos os veículos possuírem equipamento de monitoramento via satélite (GPS).

Com essas duas fases (1 e 2), finalizamos o que se pretende conceituar como validação da faceta pragmática – situação gerencial, modelo conceitual e decisão.

### 8.3 Fase 3: validação técnica

A Fase 3, que conclui o processo de validação proposto neste trabalho, refere-se à aplicação de questionário estruturado submetido a um colaborador técnico qualificado, para apoiar partes das validações previstas nas facetas descritiva, protótipo e pragmática. Abaixo os dados do colaborador técnico:

- Escolaridade: Doutor em Engenharia de Transportes

Tabela 8.7: Resumo referente a questão 3

3 - Na empresa há como resolver o problema com algumas ações específicas?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“Este é um problema que está sustentado em várias raízes (origens). Temos que atacar várias frentes, como comercial, estrutural e operacional. O modelo apresentado vai diretamente de encontro à gestão operacional, que com certeza é uma dessas raízes.”				
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“Parcialmente sim, mas não totalmente. Devido à alta complexidade de todo o processo e suas variáveis e à necessidade de tempo de resposta, com certeza não teríamos como atender todas as demandas e situações impostas pela legislação de cada local.”				
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“Sim. Para podermos resolver a questão sem correr o risco do “erro humano” nossa empresa necessitará investir num <i>software</i> que estivesse integrado a toda frota de transferência e o setor de tráfego central tomasse as decisões baseadas nas conclusões apresentadas pelo sistema.”				
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“Quando os relatórios e planilhas apontam um aumento nas despesas com viagens vazias atuamos corretivamente. Porém, não temos como garantir que a ação causa o efeito desejado, pois os embarques são dinâmicos e o cenário passado nem sempre reflete a realidade atual e das próximas semanas.”				

Tabela 8.8: Resumo referente a questão 4

<b>4</b> - Você acredita que o conceito técnico apresentado pode representar corretamente o problema?						
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“O conceito técnico sobre o problema apresentado é perfeito, ele tira a decisão da mão do Analista de Tráfego e traz ela para uma decisão lógica e técnica, com menor distância, menor custo e total transparência.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Ótimo. Quando tratamos de maneira sistêmica o problema, conseguimos alcançar melhores formas de atender a demanda, sem prejudicar a rentabilidade e atingindo, assim, mais rápido todos os objetivos propostos.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Em meu entendimento o conceito consegue após receber todas as informações necessárias para análise, otimizar, analisar e reduzir consideravelmente os prejuízos eminentes às transferências com veículos vazios.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Entendo o modelo utilizado e percebo o alinhamento com o nosso problema real. Todos os dados são factíveis e já existentes no nosso banco de dados.”					

Tabela 8.9: Resumo referente a questão 5

<b>5</b> - A modelagem apresentada, na sua opinião, representa a realidade com relação ao problema em questão? (alocação de veículos vazios) ?						
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Sim. A modelagem trata com perfeição a alocação de veículos, ela consegue utilizar a matriz de distâncias entre as unidades da empresa e indicar a decisão que traz o menor custo para a empresa.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Positivo. Mostra que é muito difícil fazermos cálculos infundáveis e manualmente, para achar uma melhor situação de alocação veicular. Assim a ferramenta poderá ajudar em tempo real uma melhor tomada de decisão, além de ser mais ágil e confiável.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Chega a ser surpreendente quando analisamos as simulações apresentadas com a realidade de nossos dias de trabalhos na empresa. A modelagem apresentada consegue além de determinar a melhor solução, auxiliar na tomada de decisão.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Sim, plenamente.”					

Tabela 8.10: Resumo referente a questão 6

<b>6</b> - Para a empresa, no seu entendimento, seria interessante desenvolver um <i>software</i> utilizando a ferramenta apresentada?						
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Sim. Com toda a certeza é justificável o desenvolvimento de um <i>software</i> com a ferramenta apresentada, pois ela agrega muito valor ao negócio.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Sim, devido a melhorarmos a visualização de situações e entender a demanda mais rápido e com menor custo.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Como atendemos uma região considerável do território brasileiro e nem sempre temos condições de efetuar uma logística de retorno favorável as nossas necessidades, o que nos obriga a rodar com veículos vazios, deveríamos iniciar o mais urgente possível o desenvolvimento do sistema.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Sim, pois já temos os dados, mas nos falta o modelo de como utilizar as informações para minimizar as viagens vazias.”					

Tabela 8.11: Resumo referente a questão 7

<b>7</b> - Você acredita ser viável de fato a empresa investir no desenvolvimento da ferramenta, para apoio nas decisões de frota?						
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Sim. Esta ferramenta pode ser agregada a outras ferramentas de gestão para tornar o processo de decisão de deslocamento de veículos vazios uma tarefa transparente e com aporte técnico, e não mais empírico.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Positivo. Pois este investimento terá retorno em muito pouco tempo, já que o desperdício é muito alto.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Sim, pois com o constante crescimento de mais de 20% ao ano e como consequência aquisição de mais veículos de transferências, a possibilidade de rodarmos com veículos vazios é elevada, então precisamos ter auxílio de sistemas inteligentes de TI para a tomada de decisão correta.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Sim, pois temos uma equipe de TI interna que pode executar a tarefa com baixo investimento, ampliando ainda mais o retorno financeiro.”					

- Cargo atual: Engenheiro de Transportes
- Experiência no TRC: 15 anos

Tabela 8.12: Resumo referente a questão 8

<b>8 - Qual sua atribuição de utilidade para a modelagem apresentada?</b>						
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“As decisões de movimentações de veículos já possuem uma avaliação lógica antes de sua execução, mas ela ainda é feita de forma manual, por pessoas. A utilização do modelo apresentado vem para trazer maior segurança as decisões e também permitir uma forma de auditar as decisões tomadas pelos Analistas de Tráfego.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Entendo que poderia facilitar nossa área de tráfego, onde é composto a alocação e atendimento às filiais de toda nossa frota de veículos.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“A maior possível, pois como a empresa tem metas audaciosas de redução de custos e comercialmente de termos o melhor atendimento operacional do mercado no ramo que atuamos, a modelagem apresentada seria de muita valia e propriedade para alcançarmos os objetivos.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Extremamente útil, com relação direta e positiva no resultado da empresa.”					

Tabela 8.13: Resumo referente a questão 9

<b>9 - Sobre a apresentação das soluções da modelagem, você acredita ser satisfatória? Ou seja, tem relação direta com o problema?</b>						
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“A apresentação é totalmente satisfatória e possui relação direta com o problema enfrentado por esta e por outras tantas empresas que necessitam realizar deslocamento de veículos vazios entre as suas unidades.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Sim. Mas lembrando que o usuário tem que ser uma pessoa com bom conhecimento para poder estar atento a todas variáveis que poderão aparecer no transcorrer da utilização da ferramenta. Lembrando que a ferramenta não trabalha sozinha, precisando assim ser sempre alimentada com as mais ricas informações possíveis.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“100%, pois apresentou cientificamente as melhores soluções para otimização dos recursos e atendimento as demandas.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Sim, atua exatamente no problema que enfrentamos.”					

Na Tabela 8.15 é apresentado o questionário aplicado, juntamente com as respostas fornecidas. Na sequência apresenta-se a conclusão da Fase 3.

Tabela 8.14: Resumo referente a questão 10

<b>10</b> - Do ponto de vista de dados de entrada para o modelo, na sua opinião, são viáveis, estão adequados para os resultados esperados para solução?						
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Em todo projeto é necessário adequações para a prática, e aqui no modelo apresentado não seria diferente. A empresa necessita rever alguns processos para que possa permitir a geração de demanda e a posição atual dos veículos. Desta forma o modelo apresentado pode fazer o processamento e sugerir as melhores opções em distância e custo para a empresa.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Sim. A partir do momento que for feita a inclusão pelo usuário de maneira correta, a ferramenta poderá nos auxiliar, de maneira rápida e eficaz, com o melhor aproveitamento de todos os veículos com custo satisfatório.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Para o melhor aproveitamento do sistema e aplicação da modelagem, necessitamos melhorar nosso sistema de informações e banco de dados para que o sistema tenha todas as informações em tempo real da situação da frota e suas disponibilidades.”					
Escala	1	2	3	4	5	
Justifique	“Sim, pois o modelo utiliza dados que já possuímos no nosso sistema e são relevantes para o resultado final.”					

<b>5</b> - Sobre a qualidade da solução? Natureza técnica da solução?						
Escala	1	2	3	4	5	Atributo: Experimental
Justifique	“A solução obtida se mostrou adequada à realidade do problema tratado, sendo coerente e aplicável na prática. Os movimentos da frota sugeridos são coerentes e bastante interessantes.”					
<b>6</b> - Sobre a eficiência do método de solução?						
Escala	1	2	3	4	5	Atributo: Experimental
Justifique	“O método se mostrou eficiente, obtendo soluções ótimas ou aproximadas em questão de segundos.”					
<b>7</b> - Sobre utilidade, oportunidade do uso, benefícios?						
Escala	1	2	3	4	5	Atributo: Operacional
Justifique	“Dado que atualmente não existe nenhuma ferramenta para planejamento da frota de transferência e redução de movimentos vazios, entendo que seria útil, possibilitando grandes oportunidades de ganhos no que diz respeito à redução de custos e produtividade da frota.”					
<b>8</b> - Validação conceitual, justificativa da teoria?						
Escala	1	2	3	4	5	Atributo: Verificação
Justifique	“A abordagem se mostrou adequada, contribuindo para o correto entendimento					

Tabela 8.15: Resposta ao questionário referente a Fase 3

<b>Questionário para validação – PADV (Tomadores de Decisão)</b>	
Escolaridade:	Doutor em Eng. de Transportes
Cargo Atual:	Engenheiro de Transportes
Há quanto tempo trabalha no transporte de cargas:	15 anos
<p>Caro <b>Gerente</b>, gentileza responder as questões abaixo através da atribuição do grau de concordância e justificativas, o quanto possível. <b>Escala</b> de 1 (baixo / pouco / não concordo) até 5 (alto / muito / concordo plenamente).</p> <p><b>Assinale</b> sua opção e busque em seguida <b>justificar</b> a sua opinião</p> <p><b>Obrigada!</b></p>	
<b>1 - O problema de alocação de veículos vazios nas transferências entre terminais é relevante para o nosso negócio?</b>	
Escala   1   2   3   4   5	
Justifique	“Sim, pois trata de um custo significativo para a operação, e ainda imprescindível por conta do desbalanceamento do fluxo de carga nas diferentes regiões do Brasil.”
<b>2 - Na empresa o problema é tratado de forma empírica?</b>	
Escala   1   2   3   4   5	
Justifique	“Não há ferramenta para apoio a decisão e, por conta do tamanho da rede, as decisões de reposicionamento são tomadas analisando-se localmente, caso a caso, não sendo possível uma visão mas abrangente do sistema, possibilitando a visão somente de curto prazo.”
<b>3 - O modelo formal apresenta relação com o modelo conceitual?</b>	
Escala   1   2   3   4   5   Atributo: Lógica	
Justifique	“Como ferramenta de planejamento acredito que seja perfeitamente adequada, principalmente pela possibilidade de se tratar veículo a veículo, placa a placa, pois na operação do dia a dia os veículos são tratados dessa forma, não em grandes grupos.”
<b>4 - O modelo formal, descreve corretamente o problema?</b>	
Escala   1   2   3   4   5   Atributo: Formulação	
Justifique	“Várias restrições práticas para planejamento foram incorporadas no modelo formal. Do meu ponto de vista talvez a função objetivo do modelo 1 deva ser melhor detalhada / refinada. E ainda, o modelo $M_1$ permite que cargas sejam rejeitadas, não correspondendo com a realidade atual da empresa.”

Devido ao colaborador também fazer parte da equipe de tomadores de decisão na área de operações atual (convivência com o problema prático), e com a referida competência técnica para análise do modelo formal, pode-se concluir que as validações referentes à faceta pragmática também foram contempladas por meio das respostas desse questionário. Exemplos: validação operacional, conceitual e dados.

Com relação à faceta protótipo, são apresentadas justificativas que apoiam as validações através dos atributos: formulação, experimental, operacional e dados (questões 4, 5, 6, 7 e 9). O colaborador também comenta sobre a necessidade de uma melhor formulação da função objetivo do modelo  $M_1$ , pois na prática atual da empresa cargas não são rejeitadas. A validação experimental, validação da qualidade das soluções e a validação da forma de representação da solução foram evidenciadas nas justificativas para a atribuição do grau 5 para as questões 5 e 6.

Com relação à faceta descritiva, são apresentadas justificativas que apoiam a validação através dos atributos: lógica e de dados (questões 3 e 9). O grau 5 de concordância e a justificativa na questão de número 3 apoiam a validação do modelo formal. O apoio nas validações de atributos: verificação, lógica, experimental e de dados, com relação a faceta teórica, pode ser evidenciado por meio das respostas (grau de concordância e justificativas) das questões 3, 5, 6, 8 e 9.

## 8.4 Conclusão do capítulo

Uma vez que ficou evidenciada na revisão bibliográfica que não há consenso sobre processos de validação, optou-se pelo uso do processo apresentado em Oral e Kettani (1993) para apoiar as validações realizadas neste trabalho. A verificação, ou fase de avaliação/julgamento, apresentada no processo de modelagem (MORABITO; PUREZA, 2010), preenche parcialmente a ausência de validações mais abrangentes.

Por ocasião da disponibilidade de informações reais (empresa parceira) para o problema em questão (gestão de frotas, alocação dinâmica e necessidades de frota), buscou-se uma validação mais participativa, envolvendo os tomadores de decisão dessa empresa. O desenvolvimento ocorreu através de três fases: (i) aplicação de teste prático, (ii) aplicação de questionário estruturado aos tomadores de decisão e (iii) questionário estruturado aplicado a um tomador de decisão da empresa, que também é um pesquisador da área de pesquisa operacional.

Com o desenvolvimento das fases 1 e 2 (problema exemplo prático e questionário es-

truturado, respectivamente), acredita-se ter sido possível realizar as validações relativas à faceta “pragmática” do tetraedro proposto por Oral e Kettani (1993), e apresentado na Figura 8.1. Através da fase 3, pode-se verificar validações nas facetas protótipo, descritiva e pragmática do tetraedro de Oral e Kettani (1993). A aplicação do questionário estruturado nessa fase foi útil para validação do modelo conceitual e modelo formal, assim como a validação da qualidade da solução. Os resultados dos capítulos anteriores, principalmente os Capítulos 5 e 7, apoiam a validação da faceta teórica do estudo.

Na opinião dos tomadores de decisão o problema de gestão de frotas é relevante, de alto custo operacional e tratado de forma empírica, sendo considerado complexo e difícil de ser planejado de maneira sistêmica. O modelo conceitual criado para representar o problema foi também considerado como representativo do problema real. O desenvolvimento de uma ferramenta para apoio às decisões nesse sentido é entendido como interessante, devido à segurança nas informações, e também como viável, uma vez que a empresa possui atualmente recursos internos capazes de fazer a implementação e implantação da abordagem, com a interface com banco de dados e sistema corporativo. Foram destacadas ainda preocupações com relação à qualidade e exatidão dos dados de entrada para o modelo.

De forma geral, todas as facetas do tetraedro proposto por Oral e Kettani (1993) foram contempladas no processo de validação apresentado neste capítulo. Entende-se que as validações pertencentes às facetas protótipo e descritiva foram apenas parcialmente realizadas. Por fim, o fato desta tese tratar da modelagem matemática do problema, do desenvolvimento e estudo de modelos e métodos de solução, e da realização de experimentos computacionais com o estudo de caso, pode ser também considerado como uma validação da faceta teórica.

## 9 *Conclusões e sugestões para estudos futuros*

O problema de alocação dinâmica (multi-períodos) de veículos (PADV) é de considerável interesse teórico e prático, pois trata da otimização do gerenciamento operacional de uma frota de veículos que devem ser reposicionados para o atendimento a demandas futuras. O estudo e desenvolvimento de abordagens de solução eficazes para o problema têm relevância científica devido às dificuldades dos métodos exatos em obter soluções ótimas em tempos computacionais aceitáveis na prática.

Em situações práticas esse problema surge no transporte rodoviário de cargas, como o caso estudado nesta tese, como também em outros modais e aplicações. Independente do modal e da aplicação, o problema pode ser considerado relevante do ponto de vista técnico e econômico, pois o veículo, seja ele qual for, em geral é um ativo de alto valor, e que consome recursos importantes (energéticos, financeiros, etc) para sua movimentação. Dependendo das características da aplicação, o problema pode ser formulado como um modelo de multi-fluxos em redes (*multicommodity*), de difícil solução exata dependendo do tamanho dos dados, como é o caso do presente estudo. Abordagens para otimizar esses movimentos, visando a redução dos recursos necessários para operação, podem ser de grande valia, pois não somente visam reduzir custos e aumentar a lucratividade, mas também a utilização racional de recursos energéticos, como é o caso de combustíveis fósseis, contribuindo também para a redução da emissão de gases do efeito estufa.

### 9.1 Conclusões

Diversas conclusões foram destacadas ao final de cada capítulo desta tese. As principais conclusões desta tese podem ser classificadas em três categorias: (i) modelagem matemática, (ii) métodos de solução, e (iii) aplicação prática.

#### **Modelagem matemática**

Nesta tese foram desenvolvidos e propostos modelos matemáticos baseados em programação linear inteira, que são extensões do modelo de programação linear tradicionalmente utilizado na literatura para representar o PADV, e que incorporaram aspectos relevantes do ponto de vista prático para o transporte rodoviário de cargas (TRC), podendo citar:

- a possibilidade de se utilizar mais de um tipo ou grupo de veículos, podendo diferenciar, por exemplo, os diferentes custos para diferentes veículos, ou grupos de veículos (caso exista), e ainda permitir a definição de percursos (cheios e vazios) individualmente para cada veículo (placa a placa);
- a inclusão de restrições práticas de que certos veículos (ou grupos de veículos) não podem realizar determinadas rotas;
- a incorporação de restrições de capacidade nos terminais, traduzido neste estudo pela quantidade de docas e equipes para descarga de veículos que realizam a transferência de cargas entre terminais;
- a representação da situação em que cargas nem sempre são atendidas exatamente no período demandado (*backlog*), mas podem aguardar por um veículo no terminal de origem, atribuindo penalizações por possíveis atrasos;
- o dimensionamento da frota adicional necessária para operação, levando em conta as alterações já citadas, por exemplo, por meio da contratação de veículos agregados (terceiros).

Convém ressaltar que os modelos são razoavelmente flexíveis para se incluir outras restrições práticas, além das referidas acima. Estes modelos propostos se mostraram adequados, podendo representar situações reais que são relevantes para a operação e gerenciamento de uma frota de veículos de transferência para empresas transportadoras de cargas do modal rodoviário no Brasil.

### **Métodos de solução**

Os modelos propostos foram utilizados para a solução de problemas de tamanho similar ao encontrado na prática de uma transportadora, com várias dezenas ou centenas de tipos de veículos. Problemas com poucos grupos foram resolvidos utilizando-se o pacote de otimização CPLEX. No caso particular em que cada veículo pertence a um grupo, ou seja, a situação em que os veículos são tratados placa a placa, devido ao tamanho do problema, o CPLEX apresentou dificuldade para resolvê-lo, sendo então propostas

três metaheurísticas para solução do problema nomeado de  $M_1$ , conforme apresentado na Seção 4.2.

Primeiramente foi desenvolvida uma heurística “gulosa” construtiva para a geração de uma solução inicial para o problema, em seguida foi desenvolvida uma heurística de melhoria para, a partir da solução inicial, realizar modificações na solução corrente. Além das heurísticas “gulosa” e de melhoria, foram também utilizadas as metaheurísticas GRASP, *simulated annealing* (SA) e colônia de formigas (ACS), sendo que todas se mostraram eficientes para a solução do problema, com desempenhos similares, sendo o SA ligeiramente superior no que diz respeito a qualidade das soluções obtidas, seguido pelo ACS e GRASP. Os métodos propostos são de fácil compreensão e implementação computacional, e também flexíveis e rápidos, sendo essas características desejáveis na prática.

### **Aplicação prática**

Complementando este trabalho, foi incluída ainda a proposta de validação dos modelos utilizados para representar o caso real de uma típica empresa transportadora de carga parcelada no Brasil. Foi adotada uma metodologia proposta por Oral e Kettani (1993) baseada numa interpretação para o processo de modelagem – validação através de uma representação tridimensional, um tetraedro. Esta metodologia explora as questões de validação de modelos através das facetas desse tetraedro formado pelos vértices: situação gerencial, modelo conceitual, modelo formal e decisão.

Inicialmente o processo de validação utilizado consistiu em avaliar se o tomador de decisão seria capaz de entender o que estava sendo proposto como objeto para estudo, e ainda resolver um problema exemplo simplificado de pequeno porte, porém capturando o realismo da operação. O tomador de decisão, sem o conhecimento prévio da solução, tampouco da modelagem matemática envolvida, desenvolveu um mecanismo utilizando planilha de cálculo e resolveu o problema exemplo, obtendo uma solução 3,7% distante da solução ótima. Esse exercício foi de grande valia para sensibilizar e auxiliar no entendimento do problema tratado, e da sua relevância prática, dado que no dia a dia essa abordagem não é utilizada para a solução desse problema.

A etapa seguinte consistiu na apresentação formal do problema e modelos matemáticos envolvidos (modelo conceitual) a este e outros tomadores de decisão e integrantes da equipe de gestão operacional da empresa, incluindo um especialista com conhecimentos em engenharia de transportes e pesquisa operacional. Em seguida foi aplicado um questionário estruturado cujo objetivo foi tentar captar a opinião dos envolvidos no que diz respeito à aplicabilidade prática e uma possível utilização de uma ferramenta formal

para o planejamento da gestão da frota, auxiliando na definição da alocação de veículos a cargas e no reposicionamento de veículos vazios para a operação. As respostas foram tabuladas e os resultados foram considerados positivos, pois foi unânime a opinião de que uma ferramenta de suporte e apoio à decisão, baseada nos modelos propostos, seria de grande utilidade na operacionalização da frota de veículos de transferência, definindo individualmente os movimentos cheios e vazios a serem realizados pelos veículos em um certo horizonte de planejamento.

## 9.2 Sugestões para estudos futuros

Como sugestão para estudos futuros, há a possibilidade de melhoria dos métodos de solução aqui propostos e do desenvolvimento de novos métodos de solução para o problema de alocação dinâmica de veículos, principalmente no que diz respeito a heurísticas para solução do problema em que cada veículo é tratado individualmente, placa a placa, tais como heurísticas populacionais (algoritmos genéticos), busca tabu e outros. Esse problema se mostrou complexo para ser resolvido de forma exata para situações realistas, utilizando linguagens de modelagem e pacotes comerciais de otimização, como, por exemplo, o AMPL/CPLEX. Existe também a oportunidade de desenvolvimento de métodos de solução e heurísticas para os outros modelos propostos neste estudo (além do modelo  $M_1$ ), que envolvem a definição de frota adicional necessária para que toda a demanda seja atendida, o *backlog* de demandas não atendidas no período solicitado e restrições de capacidade nos terminais (modelos  $M_2$ – $M_5$ ).

Do ponto de vista de aplicação prática, existe a oportunidade de desenvolvimento de uma ferramenta de apoio a decisão (*Decision Support System* – DSS) e sua aplicação em um ambiente real de operação, definindo ainda a interface gráfica com o usuário, interações com o banco de dados e integração com o sistema corporativo da empresa. Pode-se avaliar ainda a integração também com *softwares* que realizam o monitoramento de veículos via satélite para fins de segurança, para a obtenção automática do posicionamento do veículo no momento do planejamento e/ou possível replanejamento da alocação dos veículos.

Há ainda a possibilidade de se desenvolver outros estudos de caso em outras transportadoras (incluindo possivelmente outros modais), e comparar e analisar as vantagens e desvantagens da aplicação destas abordagens. Outra linha de pesquisa interessante seria estender as abordagens para considerar incertezas nos parâmetros do problema, como nas demandas futuras, tempos de viagem, por meio de técnicas de programação estocás-

tica, otimização robusta e outras baseadas em heurísticas de alocação dinâmica. Outra oportunidade de pesquisa seria o tratamento simultâneo da alocação dinâmica de veículos juntamente com a programação (*scheduling*) dos motoristas, levando em conta restrições práticas e particulares do transporte rodoviário de cargas no Brasil.

O PADV tem como demanda uma carga completa a ser transportada entre dois terminais em um dado período, porém, em empresas transportadoras de carga parcelada, são utilizadas estratégias de consolidação para a formação da carga, e cumprimento do prazo acordado com o cliente, pois são raras as situações em que existe fluxo suficiente para a formação de carregamentos diretos (sem paradas intermediárias) para todos os destinos operados. O objetivo é reduzir o custo por unidade transportada, definindo o percurso que cada carga deve seguir até chegar ao seu destino, incluindo as paradas intermediárias, caso existam, permitindo ainda a realização de roteiros entre terminais com cargas não completas. Outra perspectiva interessante para pesquisa futura seria integrar o PADV com o problema de consolidação de cargas para que a demanda também seja uma variável do problema, definida conforme a estratégia de consolidação empregada.

Por fim, seria interessante ainda investigar formas alternativas para se modelar o problema de alocação dinâmica (multi-período) de veículos, pois, conforme apresentado nesta tese, cada terminal em um dado período pode ser identificado como um único nó em uma rede, definindo os movimentos cheios e vazios entre esses nós, levando em conta um conjunto de arcos possíveis entre os nós. Esse conjunto de arcos possíveis pode ser criado considerando-se os tempos de viagem entre terminais, e também a restrição de que não é possível “voltar no tempo”, ou seja, a cronologia deve ser respeitada para evitar a ligação de um certo terminal de origem  $i$  a outro terminal de destino  $j$ , em um período anterior ao que o terminal de origem  $i$  se encontra.

## *Referências*

- ADENSO-DÍAZ, B.; LAGUNA, M. Fine-tuning of algorithms using fractional experimental designs and local search. *Operations Research*, v. 54, n. 1, p. 99–114, 2006.
- ANH, D. T.; TRUNG, N. T. Three improved variants of simulated annealing for optimising dorm room assignments. *International Journal of Intelligent Information and Database Systems*, Inderscience Publishers, Inderscience Publishers, Geneva, SWITZERLAND, v. 5, n. 3, p. 296–312, maio 2011.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. *Pesquisa Operacional*. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2007.
- ASLOG. *Glossário Logístico*. [S.l.], 2009.
- BANDEIRA, D. L.; BECKER, J. L.; BORENSTEIN, D. Sistema para distribuição integrada de contêineres cheios e vazios. *Produção*, scielo, v. 18, p. 452 – 468, 12 2008. ISSN 0103-6513.
- BANDEIRA, D. L.; BECKER, J. L.; BORENSTEIN, D. A DSS for integrated distribution of empty and full containers. *Decision Support Systems*, v. 47, n. 4, p. 383 – 397, 2009.
- BANG-JENSEN, J.; GUTIN, G.; YEO, A. When the greedy algorithm fails. *Discrete Optimization*, v. 1, n. 2, p. 121 – 127, 2004.
- BARCO, B. L. *A logística do contêiner vazio*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Naval da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- BEAUJON, G. J.; TURNQUIST, M. A. A model for fleet sizing and vehicle allocation. *Transportation Science*, v. 25, n. 1, p. 19–45, 1991.
- BERTSIMAS, D.; TSITSIKLIS, J. Simulated annealing. *Statistical Science*, v. 8, n. 1, p. 10–15, 1993.
- BESTEN, M. d.; STÜTZLE, T.; DORIGO, M. Ant colony optimization for the total weighted tardiness problem. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*. London, UK, UK: Springer-Verlag, 2000. (PPSN VI), p. 611–620.
- BIRGE, J. R.; LOUVEAUX, F. *Introduction to Stochastic Programming*. [S.l.]: Springer, 1997. (Springer Series in Operations Research and Financial Engineering).
- BLUM, C. Beam-ACO: hybridizing ant colony optimization with beam search: an application to open shop scheduling. *Computers & Operations Research*, Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, UK, v. 32, n. 6, p. 1565–1591, jun. 2005.

- BLUM, C.; SAMPELS, M. An Ant Colony Optimization Algorithm for Shop Scheduling Problems. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, v. 3, n. 3, p. 285–308, 2004.
- BOCK, F. An algorithm for solving “traveling-salesman” and related network optimization problems. In: *14th ORSA National Meeting*. [S.l.]: ORSA, 1958.
- BOJOVIC, N. J. A general system theory approach to rail freight car fleet sizing. *European Journal of Operational Research*, v. 136, n. 1, p. 136 – 172, 2002.
- BORENSTEIN, D. Towards a practical method to validate decision support systems. *Decision Support Systems*, v. 23, p. 227–239, 1998.
- BORGES, M. S. *Implementação da Logistics Queueing Network aplicada a alocação dinâmica de veículos*. 168 p. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ), Rio de Janeiro, 2002.
- BOTTER, R. C.; TACLA, D.; HINO, C. M. Estudo e aplicação de transporte colaborativo para cargas de grande volume. *Pesquisa Operacional*, v. 26, p. 25 – 49, 04 2006.
- BRAKLOW, J. W.; GRAHAM, W. W.; HASSLER, S. M.; PECK, K. E.; POWELL, W. B. Interactive Optimization Improves Service and Performance for Yellow Freight System. *Interfaces*, v. 22, n. 1, p. 147–172, 1992.
- BROWN, G. G.; GRAVES, G. W.; RONEN, D. Scheduling Ocean Transportation of Crude Oil. *Management Science*, v. 33, n. 3, p. 335–346, 1987.
- CALISKAN, C.; HALL, R. W. A dynamic empty equipment and crew allocation model for long-haul networks. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 37, n. 5, p. 405 – 418, 2003.
- CARACIK-JR, R. CSCMP - Annual Global Conference 2010. *Revista Tecnológica*, p. 80 – 82, 12 2010.
- CERNY, V. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications*, v. 45, n. 1, p. 41–51, 1985.
- CHASE, R. B.; JACOBS, F. R.; AQUILANO, N. J. *Administração da Produção para a vantagem competitiva*. Porto Alegre: Editora Bookman., 2006.
- CHEUNG, R. K.; CHEN, C. Y. A two-stage stochastic network model and solution methods for the dynamic empty container allocation problem. *Transportation Science*, v. 32, n. 2, p. 142–162, 1998.
- CHIH, K. *A real time dynamic optimal freight car management simulation model of the multiple railroad, multicommodity, temporal spatial network flow problem*. Tese (Doutorado) — Department of Civil Engineering and Operations Research, Princeton University, 1986.

- CHIH, K.; HORNING, M.; ROTHENBERG, M.; KORNHAUSER, A. Implementation of a real time locomotive distribution system. In: MURTHY, T.; RIVIER, R.; LIST, G.; MIKOLAJ, J. (Ed.). *Computer Applications in Railway Planning and Management*. [S.l.], 1990. p. 39–50.
- CHOONG, S. T.; COLE, M. H.; KUTANOGLU, E. Empty container management for intermodal transportation networks. *Transportation Research Part E*, v. 38, n. 6, p. 423–438, 2002.
- CNT. *Boletim Estatístico*. Outubro 2010. 73–76 p.
- COSTA, D.; HERTZ, A. Ants can colour graphs. *The Journal of the Operational Research Society*, Palgrave Macmillan Journals on behalf of the Operational Research Society, v. 48, n. 3, p. 295–305, 1997.
- CRAINIC, T.; FERLAND, J.-A.; ROUSSEAU, J.-M. A Tactical Planning Model for Rail Freight Transportation. *Transportation Science*, v. 18, n. 2, p. 165–184, 1984.
- CRAINIC, T. G. A survey of optimization models for long-haul freight transportation. *Départament des sciences administratives - Université du Québec a Montreal*, Montreal, Canada, 1998.
- CRAINIC, T. G.; GENDREAU, M.; DEJAX, P. Dynamic and Stochastic Models for the Allocation of Empty Containers. *Operations Research*, v. 41, n. 1, p. 102–126, 1993.
- CRAINIC, T. G.; GENDREAU, M.; POTVIN, J.-Y. Intelligent freight-transportation systems: Assessment and the contribution of operations research. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 17, n. 6, p. 541 – 557, 2009.
- DANTZIG, G.; FULKERSON, D. Minimizing the number of tankers to meet a fixed schedule. *Naval Research Logistics Quarterly*, v. 1, n. 1, p. 217–222, 1954.
- DEJAX, P. J.; CRAINIC, T. G. A review of empty flows and fleet management models in freight transportation. *Transportation Science*, v. 21, n. 4, p. 227–247, 1987.
- DENEUBOURG; ARON, S.; GOSS, S.; PASTEELS, J. M. The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant. *Journal of Insect Behavior*, v. 3, n. 2, p. 159–168, mar. 1990.
- DONG, J.-X.; SONG, D.-P. Container fleet sizing and empty repositioning in liner shipping systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 45, n. 6, p. 860 – 877, 2009.
- DORIGO, M. *Optimization, Learning and Natural Algorithms (em Italiano)*. 140 p. Tese (Doutorado) — Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italia, 1992.
- DORIGO, M.; GAMBARDELLA, L. M. Ant colonies for the traveling salesman problem. *BioSystems*, v. 43, p. 73–81, 1997.
- DORIGO, M.; GAMBARDELLA, L. M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 1, n. 1, p. 53–66, 1997.

- DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. *The Ant System: An autocatalytic optimizing process*. Italia, 1991.
- DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B*, v. 26, n. 1, p. 29–41, 1996.
- DORIGO, M.; STÜTZLE, T. *Ant Colony Optimization*. [S.l.]: The MIT Press, 2004.
- DÉRY, R.; LANDRY, M.; BANVILLE, C. Revisiting the issue of model validation in OR: An epistemological view. *European Journal of Operational Research*, v. 66, p. 168–183, 1996.
- ERMOL'EV, Y. M.; KRIVETS, T. A.; PETUKHOV, V. S. Planning of shipping empty seaborne containers. *Cybernetics and Systems Analysis*, Springer New York, v. 12, p. 644–646, 1976.
- FEENEY, G. Controlling the distribution of empty cars. In: OPERATIONS RESEARCH SOCIETY OF AMERICA, 1957. *10th National Meeting*. [S.l.], 1957.
- FELTRIN, A. *Coleção Memórias*. 1. ed. São Paulo: NTC & Logística, 2007. (i) Os primeiros tempos; (ii) Um exemplo de perseverança e caráter; (iii) DNA do desbravador; (iv) Lições de sobrevivência.
- FEO, T.; RESENDE, M. A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *Operations Research Letters*, v. 8, p. 67–71, 1989.
- FEO, T.; RESENDE, M. Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of Global Optimization*, v. 6, p. 109–133, 1995.
- FESTA, P.; RESENDE, M. G. C. GRASP: An annotated bibliography. In: *Essays and Surveys in Metaheuristics*. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2002. p. 325–367.
- FINLAY, P. N. Model validation in decision support systems. *British Accounting Review*, v. 20, p. 175–186, 1988.
- FISHER, M. L.; ROSENWEIN, M. B. An interactive optimization system for bulk-cargo ship scheduling. *Naval Research Logistics*, v. 36, n. 1, p. 27–42, 1989.
- FLOREZ, H. *Empty-container repositioning and leasing: An optimization model*. Tese (Doutorado) — Polytechnic Institute of New York, 1986.
- FOURER, R.; GAY, D. M.; KERNIGHAN, B. W. *AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming*. [S.l.]: Duxbury Press, 2002. ISBN 0534388094.
- FRANCESCO, M. D.; CRAINIC, T. G.; ZUDDAS, P. The effect of multi-scenario policies on empty container repositioning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 45, n. 5, p. 758 – 770, 2009.
- FRANK, M.; WOLFE, P. An algorithm for quadratic programming. *Naval Research Logistics Quarterly*, v. 3, n. 1–2, p. 95–110, 1956.

- FRANTZESKAKIS, L. F.; POWELL, W. B. A successive linear approximation procedure for stochastic, dynamic vehicle allocation problems. *Transportation Science*, v. 24, n. 1, p. 40–57, 1990.
- GAGNE, C.; PRICE, W. L.; GRAVEL, M. Comparing an ACO Algorithm with Other Heuristics for the Single Machine Scheduling Problem with Sequence-Dependent Setup Times. *The Journal of the Operational Research Society*, Palgrave Macmillan Journals on behalf of the Operational Research Society, v. 53, n. 8, p. 895–906, 2002.
- GAMBARDELLA, L. M.; DORIGO, M. Solving symmetric and asymmetric tsps by ant colonies. In: *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC96)*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1996. p. 622–627.
- GAMBARDELLA, L. M.; DORIGO, M. An ant colony system hybridized with a new local search for the sequential ordering problem. *INFORMS J. on Computing*, INFORMS, Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS), Linthicum, Maryland, USA, v. 12, n. 3, p. 237–255, jul. 2000.
- GAMBARDELLA, L. M.; TAILLARD, . e.; AGAZZI, G. MACS-VRPTW: a multiple ant colony system for vehicle routing problems with time windows. McGraw-Hill Ltd., UK, Maidenhead, UK, England, p. 63–76, 1999.
- GAO, Q. An operational approach for container control in liner shipping. *Logistic & Transportation Review*, v. 30, n. 3, p. 267–282, 1994.
- GASS, S. . Managing the modeling process: A personal reflection. *European Journal of Operational Research*, v. 31, n. 1, p. 1–8, 1987.
- GASS, S. I. Model accreditation: a rationale and process for determining a numerical rating. *European Journal of Operational Research*, v. 66, p. 250–258, 1993.
- GHIANI, G.; LAPORTE, G.; MUSMANNO, R. *Introduction to logistics systems planning and control*. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd., 2003. (Wiley-Interscience series in systems and optimization).
- GLICKMAN, T.; SHERALI, H. Large-scale network distribution of pooled empty freight cars over time, with limited distribution and equitable benefits. *Transportation Research*, v. 19, p. 85–94, 1985.
- GLOVER, F.; LAGUNA, M. *Tabu Search*. Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 1997.
- GLOVER, F.; LAGUNA, M.; MARTÍ, R. Fundamentals of scatter search and path relinking. *Control and Cybernetics*, v. 39, p. 653–684, 2000.
- GONÇALVES, N.; SCHLÜTER, M. R.; FERNANDES, R.; OLIVEIRA, A.; OLIVEIRA, L. O peso da volta. *Revista Entre Vias a voz da estrada*, p. 26 – 30, 10 2010.
- GORENSTEIN, S.; POLEY, S.; WHITE, W. *On the scheduling of the railroad freight operations*. [S.l.], 1971.

- HAGHANI, A. E. Formulation and solution of a combined train routing and makeup, and empty car distribution model. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 23, n. 6, p. 433 – 452, 1989.
- HALL, R. W. Stochastic freight flow patterns: implications for fleet optimization. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 33, n. 6, p. 449 – 465, 1999.
- HALL, R. W.; ZHONG, H. Decentralized inventory control policies for equipment management in a many-to-many network. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 36, n. 10, p. 849 – 865, 2002.
- HART, J.; SHOGAN, A. Semi-greedy heuristics: An empirical study. *Operations Research Letters*, v. 6, p. 107–114, 1987.
- HERREN, H. The distribution of empty wagons by means of computer: An analytical model for the swiss federal railways. *Rail International*, v. 4, n. 1, p. 1005–1010, 1973.
- HERREN, H. Computer controlled empty wagon distribution on the ssb. *Rail International*, v. 8, n. 1, p. 25–32, 1977.
- HIJJAR, M. F. Prêmio ILOS destaca os melhores da logística em 2009. *Revista Tecnológica*, p. 74 – 76, 05 2010.
- HILL, A. Central de Tráfego: evolução no modelo de gerenciamento de transportes. *Revista Tecnológica*, p. 50 – 55, 10 2009.
- HOLMBERG, K.; JOBORN, M.; LUNDGREN, J. T. Improved Empty Freight Car Distribution. *Transportation Science*, v. 32, n. 2, p. 163–173, 1998.
- ILOG. *ILOG CPLEX User's Manual*. 2008. V. 11.1.1.
- IMAI, A.; RIVERA, F. Strategic fleet size planning for maritime refrigerated containers. *Maritime Policy and Management*, v. 28, n. 4, p. 361–374, 2001.
- JOBORN, M.; CRAINIC, T. G.; GENDREAU, M.; HOLMBERG, K.; LUNDGREN, J. T. Economies of scale in empty freight car distribution in scheduled railways. *Transportation Science*, v. 1, n. 2, p. 121–134, 2004.
- JORDAN, W.; TURNQUIST, M. A. A stochastic dynamic network model for railroad car distribution. *Transportation Science*, n. 17, p. 123–145, 1983.
- KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. *Science*, v. 220, p. 671–680, 1983.
- KRAAY, D.; HARKER, P.; CHEN, B. Optimal pacing of trains in freight railroads: Model formulation and solution. *Operations Research*, v. 39, n. 1, p. 82–99, 1991.
- KREHER, D. L.; STINSON, D. R. Combinatorial algorithms: generation, enumeration, and search. *SIGACT News*, v. 30, n. 1, p. 33–35, 1999.
- LABYS, W. C. Evaluation of models. *Energy*, v. 15, n. 3/4, p. 155–162, 1990.
- LAGUNA, M.; MARTÍ, R. GRASP and path relinking for 2-layer straight line crossing minimization. *INFORMS Journal on Computing*, v. 11, p. 44–52, 1999.

- LAI, K. K.; LAM, K.; CHAM, W. K. Shipping container logistics and allocation. *Journal of the Operational Research Society*, v. 46, n. 6, p. 687–697, 1995.
- LAM, S.-W.; LEE, L.-H.; TANG, L.-C. An approximate dynamic programming approach for the empty container allocation problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 15, n. 4, p. 265 – 277, 2007. Modeling and Optimization for Transportation Logistics.
- LANDRY, M.; MALOUIN, J. L.; ORAL, M. Model validation in operations research. *European Journal of Operational Research*, v. 14, p. 207–220, 1983.
- LANDRY, M.; ORAL, M. In search of a valid view of model validation for operations research. *European Journal of Operational Research*, v. 66, p. 161–167, 1993.
- LAWLER, E. *Combinatorial optimization, networks and matroids*. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1976.
- LEAL, J. E.; DALL'ORTO, L. C. L. Abordagens para o tratamento da alocação dinâmica de veículos. In: XXX1 SBPO - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, XXX1., 1999, Juiz de Fora - MG. *Anais*. [S.l.]: SOBRAPO, 1999. p. 1125–1136.
- LEAL, J. E.; DALL'ORTO, L. C. L. Programação dinâmica aplicada ao problema de alocação dinâmica de veículos. In: XIII ANPET - CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 1999, São Carlos - SP. *Anais*. [S.l.]: ANPET, 1999. v. 1, p. 357–369.
- LEAL, J. E.; DALL'ORTO, L. C. L. Estudos dos gradientes na formulação lqn. In: XI CONGRESSO PANAMERICANO DE ENGENHARIA DE TRANSITO E TRANSPORTES, 2000, Rio de Janeiro - RJ. *Anais*. [S.l.]: ANPET, 2000. v. 1, p. 901–910.
- LEAL, J. E.; DALL'ORTO, L. C. L.; SOUZA, F. C. G. Modelo de alocação dinâmica de veículos aplicado no gerenciamento de contêineres. In: XI CONGRESSO PANAMERICANO DE ENGENHARIA DE TRÂNSITO E TRANSPORTES, 2000, Rio de Janeiro - RJ. *Anais*. [S.l.]: ANPET, 2000. v. 1, p. 845–857.
- LEDDON, C.; WRATHALL, E. Scheduling empty freight car fleets on the louisville and nashville railroad. In: SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE USE OF CYBERNETICS ON THE RAILWAYS. Montreal, Canada, 1967. p. 1–6.
- LI, J. A.; LEUNG, S. C. H.; WU, Y.; LIU, K. Allocation of empty containers between multi-ports. *European Journal of Operational Research*, v. 182, n. 1, p. 400–412, 2007.
- LI, J. A.; LIU, K.; LEUNG, S. C. H.; LAI, K. K. Empty container management in a port with long-run average criterion. *Mathematical and Computer Modelling*, v. 40, n. 1, p. 85–100, 2004.
- LIU, R.; JIANG, Z.; FUNG, R. Y. K.; CHEN, F.; LIU, X. Two-phase heuristic algorithms for full truckloads multi-depot capacitated vehicle routing problem in carrier collaboration. *Computers and Operations Research*, Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, UK, v. 37, p. 950–959, May 2010.

- MANIEZZO, V. Exact and approximate nondeterministic tree-search procedures for the quadratic assignment problem. *INFORMS Journal on Computing*, v. 11, n. 4, p. 358–369, 1999.
- MANIEZZO, V.; COLORNI, A. The Ant System Applied to the Quadratic Assignment Problem. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA, v. 11, n. 5, p. 769–778, 1999.
- MARTINS, R. S.; FILHO, O. V. S.; MARTINS, G. S. Colaboração em processos logísticos entre empresas de arranjos produtivos. *Revista Tecnológica*, p. 62 – 68, 02 2010.
- MENDIRATTA, V. *A dynamic optimization model of the empty car distribution process*. Tese (Doutorado) — Department of Civil Engineering, Northwestern University, 1981.
- MENDIRATTA, V.; TURNQUIST, M. A. A model for the management of empty freight cars. *Trans. Res. Rec.*, n. 838, p. 50–55, 1982.
- MERKLE, D.; MIDDENDORF, M.; SCHMECK, H. Ant colony optimization for resource-constrained project scheduling. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, v. 6, n. 4, p. 333–346, 2002.
- METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A. W.; ROSENBLUTH, M. N.; TELLER, A. H.; TELLER, E. Equation of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics*, v. 21, p. 1087–1092, 1953.
- MIGUEL, P. A. C.; FLEURY, A.; MELLO, C. H. P.; NAKANO, D. N.; TURRIONI, J. B.; HO, L. L.; MORABITO, R.; MARTINS, R. a; PUREZA, V. *Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações*. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2010.
- MISER, H. J. A foundational concept of science appropriate for validation in operational research. *European Journal of Operational Research*, v. 66, p. 204–215, 1993.
- MISRA, S. Linear programming of empty wagon disposition. *Rail International*, v. 3, n. 1, p. 151–158, 1972.
- MOHAN, B. C.; BASKARAN, R. A survey: Ant colony optimization based recent research and implementation on several engineering domain. *Expert Systems with Applications*, v. 39, n. 4, p. 4618–4627, 2012.
- MORABITO, R.; PUREZA, V. Modelagem e simulação. In: MIGUEL, P. A. C. (Ed.). *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. cap. 8, p. 165–194.
- NETO, R. F. T.; FILHO, M. G. An ant colony optimization approach to a permutational flowshop scheduling problem with outsourcing allowed. *Computers & Operations Research*, v. 38, n. 9, p. 1286–1293, 2011.
- NOVAES, A. G. *Sistemas Logísticos: Transporte, Armazenagem e Distribuição Física de Produtos*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 2008.

- OLIVEIRA, P. F. de; PIZZOLATO, N. D. A eficiência da distribuição através da prática do *cross docking*. In: *Anais do XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. Curitiba, PR: ABEPRO, 2002. p. 1–8.
- ORAL, M.; KETTANI, O. The facets of the modeling and validation process in operations research. *European Journal of Operational Research*, v. 66, p. 216–234, 1993.
- PAPADIMITRIOU, C. H.; STEIGLITZ, K. *Combinatorial optimization – algorithms and complexity*. Holt, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1982.
- PERAKIS, A. N.; PAPADAKIS, N. A. Minimal Time Vessel Routing in a Time-Dependent Environment. *Transportation Science*, v. 23, n. 4, p. 266–276, 1989.
- PNLT. *Plano Nacional de Logística e Transporte - Sumário Executivo*. [http://www.transportes.gov.br/PNLT/Sumario\\_Executivo.pdf](http://www.transportes.gov.br/PNLT/Sumario_Executivo.pdf), Novembro 2009.
- POWELL, W. B. A stochastic model of the dynamic vehicle allocation problem. *Transportation Science*, v. 20, p. 117–129, 1986.
- POWELL, W. B. An operacional planning model for the dynamic vehicle allocation problem with uncertain demands. *Transportation Research Part B*, v. 21, n. 3, p. 217–232, 1987.
- POWELL, W. B. A comparative review of alternative algorithms for the dynamic vehicle allocation problem. *Vehicle Routing: Methods and Studies, Elsevier Science Publisher B. V.*, 1988.
- POWELL, W. B. A stochastic formulation of the dynamic assignment problem, with an application to truckload motor carrier. *Transportation Science*, v. 30, n. 3, p. 195–219, 1996.
- POWELL, W. B.; CARVALHO, T. A. Dynamic control of logistics queueing networks for large-scale fleet management. *Transportation Science*, v. 32, n. 2, p. 90–109, 1998.
- POWELL, W. B.; CARVALHO, T. A. Real-time optimization of containers and flatcars for intermodal operations. *Transportation Science*, v. 32, n. 2, p. 110–126, 1998.
- POWELL, W. B.; JAILLET, P.; ODoni, A. R. Stochastic and dynamic networks and routing. In: BALL, M. O.; MAGNANTI, T. L.; MONNA, C. L.; NEMHAUSER, G. L. (Ed.). Amsterdam: Elsevier Science, 1995. (Handbooks in Operations Research and Management Science, v. 8), p. 141–295.
- POWELL, W. B.; SHEFFI, Y.; NICKERSON, K. S.; BUTTERBAUGH, K.; ATHERTON, S. Maximizing profits for north american van lines truckload division: A new framework for pricing and operations. *Interfaces*, v. 18, n. 1, p. 21–41, 1988.
- POWELL, W. B.; SHEFFI, Y.; THIRIEZ, S. The dynamic vehicle allocation problem with uncertain demands. In: *Ninth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*. [S.l.: s.n.], 1984. p. 357–374.
- PRAIS, M.; RIBEIRO, C. C. Parameter variation in GRASP procedures. *Investigación Operativa*, v. 9, p. 1–20, 2000.

- PRAIS, M.; RIBEIRO, C. C. Reactive GRASP: An application to a matrix decomposition problem in TDMA traffic assignment. *INFORMS Journal on Computing*, v. 12, p. 164–176, 2000.
- PUREZA, V.; MORABITO, R.; REIMANN, M. Vehicle routing with multiple deliverymen: Modeling and heuristic approaches for the VRPTW. *European Journal of Operational Research*, v. 218, n. 3, p. 636–647, 2012.
- RATCLIFFE, L. L.; VINOD, B.; SPARROW, F. T. Optimal prepositioning of empty freight cars. *Simulation*, v. 42, n. 6, p. 269–275, 1984.
- REIMANN, M.; DOERNER, K.; HARTL, R. F. D-ants: savings based ants divide and conquer the vehicle routing problem. *Comput. Oper. Res.*, Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, UK, v. 31, n. 4, p. 563–591, abr. 2004.
- RESENDE, M. G.; PITSOULIS, L. S.; PARDALOS, P. M. Fortran subroutines for computing approximate solutions of weighted MAX-SAT problems using grasp. *Discrete Applied Mathematics*, v. 100, n. 1–2, p. 95–113, 2000.
- REZENDE, L. B. *A logística do contêiner vazio. Uma nova abordagem*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Naval da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- SAYARSHAD, H. R.; GHOSEIRI, K. A simulated annealing approach for the multi-periodic rail-car fleet sizing problem. *Computers & Operations Research*, v. 36, n. 6, p. 1789 – 1799, 2009.
- SAYARSHAD, H. R.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R. Solving a multi periodic stochastic model of the rail-car fleet sizing by two-stage optimization formulation. *Applied Mathematical Modelling*, v. 34, n. 5, p. 1164 – 1174, 2010.
- SHAN, Y. *A dynamic multicommodity network flow model for real-time optimal rail freight car management*. Tese (Doutorado) — Princeton University, 1985.
- SHEN, W. S.; KHOONG, C. M. A dss for empty container distribution planning. *Decision Support Systems*, v. 15, p. 75–82, 1995.
- SHI, N. *Dynamic resource allocation problems with uncertainties and complex work rules*. Tese (Doutorado) — Hong Kong University of Science and Technology, 2007.
- SHINTANI, K.; IMAI, A.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. The container shipping network design problem with empty container repositioning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 43, n. 1, p. 39 – 59, 2007.
- SILVA, M. R. *Uma contribuição ao projeto de redes de transporte de carga parcelada*. 219 p. Tese (Doutorado) — Departamento de Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. *Administração da produção*. 2. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2002.
- SMITH, J. H. Modeling muddles: validation beyond the numbers. *European Journal of Operational Research*, v. 66, p. 235–249, 1993.

- SOCHA, K.; SAMPELS, M.; MANFRIN, M. Ant algorithms for the university course timetabling problem with regard to the state-of-the-art. In: *Proceedings of the 2003 international conference on Applications of evolutionary computing*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. (EvoWorkshops'03), p. 334–345.
- SOUZA, F. C. G. *Procedimentos para alocação de contêineres vazios no transporte marítimo*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Industrial. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- SPIECKERMANN, S.; VOß, S. A case study in empty railcar distribution. *European Journal of Operational Research*, v. 87, n. 3, p. 586 – 598, 1995. Operational Research in Europe.
- STÜTZLE, T. *Local Search Algorithms for Combinatorial Problems: Analysis, Improvements, and New Applications*. Sankt Augustin, Germany: Infix, 1997.
- STÜTZLE, T. An ant approach to the flow shop problem. In: *Proceedings of the 6th European Congress on Intelligent Techniques & Soft Computing (EUFIT'98)*. Aachen, Germany: Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag, 1998. v. 3, p. 1560–1564.
- STÜTZLE, T.; HOOS, H. H. Ant system and local search for the traveling salesman problem. In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC97)*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1997. p. 309–314.
- STÜTZLE, T.; HOOS, H. H. Max-min ant system. *Future Generation Computer Systems*, v. 16, n. 8, p. 889–914, 2000.
- SUZUKI, Y.; CRUM, M. R.; PAUTSCH, G. R. Predicting truck driver turnover. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 45, n. 4, p. 538 – 550, 2009.
- TAGUCHI, G. *System of experimental design: engineering methods to optimize quality and minimize costs*. White Plains, NY: UNIPUB / Kraus International Publications, 1987.
- TEIXEIRA, R. B.; CUNHA, C. B. da; ZAMBUZI, N. C. Modelo integrado para a seleção de cargas e reposicionamento de contêineres vazios no transporte marítimo. In: XXIV ANPET - CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2010, Salvador - BA. *Anais*. [S.l.]: ANPET, 2010.
- TILANUS, C. B. Failures and successes of quantitative methods in management. *European Journal of Operational Research*, v. 19, n. 2, p. 170–175, 1985.
- TOPALOGLU, H. A parallelizable dynamic fleet management model with random travel times. *European Journal of Operational Research*, v. 175, n. 2, p. 782 – 805, 2006.
- TOULMIN, S. E. *The Uses of Argument*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2003. Paperback.
- TURNQUIST, M. A. *Mov-em: a network optimization model for empty freight car distribution*. [S.l.], 1986.

- TURNQUIST, M. A.; MARKOWICZ, B. P. *An interactive computer-based planning model for railroad car distribution*. [S.l.], 1989.
- VALENTE, A. M.; NOVAES, A. G.; PASSAGLIA, E.; VIEIRA, H. *Gerenciamento de Transporte e Frotas*. 2. ed. São Paulo: CENGAGE Learning, 2008. 2a. edição revisada.
- VINCE, A. A framework for the greedy algorithm. *Discrete Applied Mathematics*, v. 121, n. 1-3, p. 247 – 260, 2002.
- VITASEK, K. *Supply Chain Terms and Glossary*. [S.l.]: Council of Supply Chain Management Professionals, 2010. Paperback.
- WANG, B.; WANG, Z. Research on the optimization of intermodal empty container reposition of land-carriage. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, v. 7, n. 3, p. 29–33, 2007.
- WHITE, W. Dynamic transshipment networks: An algorithm and its application to the distribution of empty containers. *Networks*, v. 2, n. 3, p. 211–236, 1972.
- WHITE, W.; BOMBERAULT, A. A network algorithm for empty freight car allocation. *IBM Systems Journal*, v. 8, n. 2, p. 147–171, 1969.
- WINSTON, W. L. *Operations Research: Applications and Algorithms (with CD-ROM and InfoTrac®)*. 4. ed. [S.l.]: Duxbury Press, 2003.
- ZAMBUZI, N. C.; CUNHA, C. B. da. Modelo de decisão para o planejamento da movimentação de contêineres vazios. In: XXIII ANPET - CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2009, Vitória - ES. *Anais*. [S.l.]: ANPET, 2009. v. 1, p. 1–12.
- ZAMBUZI, N. de C. *Modelo de decisão para o planejamento da movimentação de contêineres vazios*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2010.

## *ANEXO A – Breve histórico do transporte de cargas no Brasil*

No final da década de 40, o Brasil possuía somente 423 quilômetros de estradas pavimentadas. Em 1950 o caminhão participava em 38% da carga transportada, pouco à frente da cabotagem com 32% e do modal ferroviário com 29% (FELTRIN, 2007). A criação da Petrobrás, que abastecia o país com o asfalto, e a inauguração da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), contribuíram para o crescimento da participação do modal rodoviário de cargas. O País importava petróleo, mas já refinava e produzia o aço, fatores que ajudaram a impulsionar a indústria de veículos e de autopeças. No final da década de 60, a importação de caminhões estavam sendo substituídas por veículos feitos no Brasil.

A falta de regulamentação na atividade do TRC (Transporte Rodoviário de Cargas) levou em 1963 à criação da Associação Nacional do Transporte de Cargas (NTC), atual NTC & Logística - Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística (FELTRIN, 2007). A falta de regulamentação dificultava o transportador a contratar seguro de responsabilidade civil. Várias empresas de transportes fecharam nos anos 50, por terem sido legalmente responsabilizadas pelos danos e perdas de cargas de clientes. Uma das primeiras ações da NTC foi a criação de um método de cálculo profissional para o custo do transporte, considerando a base do sistema composto do *ad valorem* (frete cobrado sob a forma de percentagem do valor da mercadoria), o frete peso (frete cobrado com base no peso da mercadoria), e os seguros adicionais.

O grande eixo do transporte de São Paulo ao Nordeste era até Recife, seguindo pela BR-2 com duração de 15 dias. Devido à necessidade e dificuldade de encontrar carga (frete de retorno), uma viagem de ida e volta ao Nordeste poderia chegar a um mês. Viagens de São Paulo a Goiás podiam durar até 15 dias. Naquela época, a comprovação da entrega da carga era via assinaturas nos canhotos das notas fiscais e informação via telegrama. Os veículos em viagem podiam ficar incomunicáveis por dias, devido a diversos problemas. Predominava a contratação de carreteiros que detinham seu próprio veículo,

e a garantia de um serviço qualificado estava baseada na manutenção do equipamento e responsabilidade do proprietário do veículo. Com a evolução da pavimentação e melhoria das rodovias, e do desenvolvimento da comunicação, as empresas passaram a investir em frota própria.

Na década de 70, apesar da duplicação da Via Dutra, BR 101, Rodovia Fernão Dias e BR 116, a malha viária ainda era precária. Segundo Feltrin (2007), o primeiro trecho a ser construído da BR116 foi de São Paulo até Curitiba. O Brasil estava na fase do chamado “milagre econômico”, com taxas elevadas de crescimento do PIB, como os 10,4% de 1970, ou os 14% de 1973, contudo períodos de muita inflação. A expansão e conservação da malha viária utilizava recursos provenientes do licenciamento de veículos e compra de combustíveis, administrados pelo Ministério dos Transportes. A partir dos anos 90 essas verbas foram estadualizadas, ocasionando uma diminuição dos investimentos nesse sentido. Nessa mesma época, a Confederação Nacional dos Transportes Terrestres (CNTT) transformou-se na Confederação Nacional do Transporte (CNT). Foi criada a Federação Nacional das Empresas de Transportes de Cargas (FENATAC), separando, portanto, o transporte de cargas do transporte de passageiros.

Apesar de ainda ser o mais utilizado dos modais, no Brasil, o transporte rodoviário de cargas também necessita, e muito, de investimentos na infraestrutura até os dias atuais. É consensual no Brasil que se deve investir em outros modais. O Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), lançado em 28 de janeiro de 2007, é um programa do governo federal brasileiro que engloba um conjunto de políticas econômicas, planejadas para os quatro anos seguintes, com o objetivo de acelerar o crescimento econômico do Brasil. O PAC prevê um total de investimentos em infraestrutura da ordem de R\$ 503,9 bilhões, nas áreas de transporte, energia, saneamento, habitação e recursos hídricos.

Através do Ministério dos Transportes (MT), em parceria com o Ministério da Defesa (MD), foi lançado o Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT). Importa ressaltar que o PAC está integrado ao PNL, no que diz respeito ao seu horizonte 2008-2011. Um primeiro e fundamental objetivo do PNL é a retomada do processo de planejamento no Setor dos Transportes. Um segundo objetivo é a consideração dos custos de toda a cadeia logística que permeia o processo que se estabelece entre as origens e os destinos dos fluxos de transporte. Um terceiro objetivo é a necessidade de efetiva mudança, com melhor equilíbrio, na atual matriz de transportes de cargas do País. Na medida em que os projetos e ações sejam concretizados, será possível alterar, em um horizonte entre 15 e 20 anos, a participação do modal ferroviário dos atuais 25% para 35% e do aquaviário de 13%

para 29%. Os modais dutoviário e aéreoaviário evoluiriam para 5% e 1%, respectivamente. O modal rodoviário, hoje com 61,1%, participaria então com 30% na matriz brasileira de transporte de cargas, integrando-se ao sistema multimodal de transportes através do carregamento e distribuição de ponta, nos terminais de integração e transbordo, bem como para o transporte de cargas de maior valor específico, a distâncias pequenas e médias e para a distribuição urbana e metropolitana (PNLT, 2009).

## *ANEXO B – Programa em C para geração de problemas aleatórios do PADV*

Neste anexo é apresentado o programa desenvolvido, utilizando-se a linguagem de programação C, para a geração de problemas aleatórios do PADV. Os parâmetros de entrada do programa são:

- 1.quantidade de períodos do problema a ser gerado;
- 2.quantidade de terminais;
- 3.quantidade de demandas a serem geradas;
- 4.quantidade de veículos inicialmente no problema;
- 5.quantidade de tipos (ou grupos) de veículos no problema;

Um exemplo de chamada para geração de um problema aleatório pode ser:

```
prompt> generator.exe 7 10 9 8 2 > dados.dat
```

Nesse exemplo é gerado um problema aleatório contendo 7 períodos, 10 terminais, 9 cargas a serem transportadas, 8 veículos, e 2 grupos de veículo. É importante ressaltar que, caso a quantidade de veículos for igual a cardinalidade do conjunto de grupos de veículos  $E$ , as variáveis de decisão tornam-se binárias, aumentando significativamente a dificuldade para solução dos problemas. A saída foi direcionada para o arquivo dados.dat, no formato AMPL (FOURER et al., 2002).

---

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <ctype.h>
#include <time.h>

/*****/
#define MAX_SIZE (10000)

typedef struct demanda_info                                10
{
    int origem;
    int destino;
    int periodo;
    int quantidade;
    int validado;
} demanda;

typedef struct mitv_info                                  20
{
    int origem;
    int periodo;
    int veiculo;
    int quantidade;
    int validado;
} mitv;

/*****/

int irand(int range);                                    30
double drand(double range);
void nrerror(char *error_text);

void geraNVT(int qtd_periodos, int qtd_tipos_veic, int qtd_terminais);
void geraTravel(int n, int **tau);
void gerac(int n, float **c, int qtd_tipos_veic);
void gerap(int n, float **c, int qtd_tipos_veic);
void gerad(int qtd_demandas, int qtd_periodos, int qtd_terminais, int minimum);
void geram(int qtd_veiculos, int qtd_periodos, int qtd_terminais,
            int qtd_tipos_veic, int minimum);            40
void geraPontos(int n, int *x, int *y);
```

```

void imprimePontos(int n, int *x, int *y);
void criaMatrizDistancias(int n, int *x, int *y, float **m, int **tau);
int **imatriz(int nrl, int nrh, int ncl, int nch);
void free_imatrix(int **m, int nrl, int nrh, int ncl);
float **fmatrix(int nrl, int nrh, int ncl, int nch);
void free_fmatrix(float **m, int nrl, int nrh, int ncl);
void criaNovoCusto(int n, float **c);
void criaNovoLucro(int n, float **c);
void geraAijv(int n, int qtd_tipos_veic);
void geraC(int qtd_tipos_veic);
void geraK(int qtd_periodos, int qtd_terminais);
void geraH(int qtd_periodos, int qtd_terminais);

```

```

/*****

```

```

int main(int argc, char *argv[])
{
    int qtd_periodos = 0;
    int qtd_terminais = 0;
    int qtd_demandas = 0;
    int qtd_veiculos = 0;
    int qtd_tipos_veic = 0;
    int minimum = 1;
    time_t aTime;
    int *x, *y; /* coordenadas dos terminais */
    float **m; /* matriz de distancia entre os pontos */
    int **tau; /* matriz de tempos de viagem */

    srand(time(&aTime));

    if(argc == 6)
    {
        qtd_periodos = atoi(argv[1]);
        qtd_terminais = atoi(argv[2]);
        qtd_demandas = atoi(argv[3]);
        qtd_veiculos = atoi(argv[4]);
        qtd_tipos_veic = atoi(argv[5]);
    }
    else{
        printf("Uso: generator.exe + argumentos\n");
        printf("<qtd_periodos>\n<qtd_terminais>\n<qtd_demandas>\n");
        printf("<qtd_veiculos>\n<qtd_tipos_veic>\n");
        printf("\n* Verifique por favor os argumentos utilizados *\n");
    }
}

```

```

        printf("Tente novamente!!\n");
        exit(1);
    }

    x = (int *) malloc(sizeof(int) * qtd_terminais);
    y = (int *) malloc(sizeof(int) * qtd_terminais);
    m = fmatrix(0, qtd_terminais, 0, qtd_terminais);
    tau = imatrix(0, qtd_terminais, 0, qtd_terminais);
    geraPontos(qtd_terminais, x, y);
    /* imprimePontos(qtd_terminais, x, y); */
    criaMatrizDistancias(qtd_terminais, x, y, m, tau);

    geraNVT(qtd_periodos, qtd_tipos_veic, qtd_terminais);
    geraTravel(qtd_terminais, tau);
    gerac(qtd_terminais, m, qtd_tipos_veic);
    gerap(qtd_terminais, m, qtd_tipos_veic);
    gerad(qtd_demandas, qtd_periodos, qtd_terminais, minimum);
    geram(qtd_veiculos, qtd_periodos, qtd_terminais, qtd_tipos_veic, minimum);
    geraAijv(qtd_terminais, qtd_tipos_veic);
    geraC(qtd_tipos_veic);
    geraK(qtd_periodos, qtd_terminais);
    gerah(qtd_periodos, qtd_terminais);
    printf("end;\n");

    free(x);
    free(y);
    free_fmatrix(m, 0, qtd_terminais, 0);
    free_imatrix(tau, 0, qtd_terminais, 0);
    return 0;
}

/*****
void geraNVT(int qtd_periodos, int qtd_tipos_veic, int qtd_terminais)
{
    int i;
    printf("data;\n");
    printf("param T := %d;\n", qtd_periodos);

    printf("set N := ");
    for(i=1; i<= qtd_terminais; i++){
        printf("%d ", i);
    }
}

```

90

100

110

120

```

printf("; \n");

printf("set V := ");
for(i=1; i<= qtd_tipos_veic; i++){
    printf("%d ", i);
}
printf("; \n");
}

/*****/
void geraTravel(int n, int **tau)
{
    int i, j;
    FILE *fp;
    fp = fopen("dist.csv", "w");

    if(fp==NULL)
    {
        fprintf(stderr, "Impossivel abrir o arquivo para escrita\n");
        exit(1);
    }

    printf("param Travel : ");
    for(i=1; i<= n; i++){
        printf("%d ", i);
    }
    printf(":=\n");

    for(i=1; i<= n; i++){
        printf("%d ", i);

        for(j=1; j<= n; j++){
            printf("%d ", tau[i-1][j-1]);
            fprintf(fp, "%d ", tau[i-1][j-1]);
        }
        printf("\n");
        fprintf(fp, "\n");
    }
    printf("; \n\n");
    fclose(fp);
}

```

130

140

150

160

170

```
/*
void gerac(int n, float **c, int qtd_tipos_veic)
{
    int i, j, k;
    FILE *fp;
    fp = fopen("cij.csv","w");

    if(fp==NULL)
    {
        fprintf(stderr, "Impossivel abrir o arquivo para escrita\n");
        exit(1);
    }

    printf("param c := \n");

    for(k=1; k<=qtd_tipos_veic; k++)
    {
        printf("[*,*,%d]:\n", k);

        criaNovoCusto(n, c);

        for(i=1; i<= n; i++){
            printf("%d ", i);
        }
        printf(" :=\n");

        for(i=1; i<= n; i++){
            printf("%d ", i);

            for(j=1; j<= n; j++){
                printf("%.6f ", c[i-1][j-1] * drand(1.0));
                fprintf(fp, "%.6f ", c[i-1][j-1] * drand(1.0));
            }
            printf("\n");
            fprintf(fp, "\n");
        }

        printf("\n\n");
        fclose(fp);
    }
}
*/
```

```

void gerap(int n, float **c, int qtd_tipos_veic)
{
    int i, j, k;
    FILE *fp;
    fp = fopen("pij.csv","w");

    if(fp==NULL)
    {
        fprintf(stderr, "Impossivel abrir o arquivo para escrita\n");
        exit(1);
    }

    printf("param p := \n");

    for(k=1; k<=qtd_tipos_veic; k++)
    {
        printf("[*,*,%d]:\n", k);
        criaNovoLucro(n, c);

        for(i=1; i<= n; i++){
            printf("%d ", i);
        }
        printf(":=\n");

        for(i=1; i<= n; i++){
            printf("%d ", i);

            for(j=1; j<= n; j++){
                printf("%.6f ", c[i-1][j-1]);
                fprintf(fp, "%.6f ", c[i-1][j-1]);
            }
            printf("\n");
            fprintf(fp, "\n");
        }
        printf(";\n\n");
        fclose(fp);
    }

    /*****/
    void gerad(int qtd_demandas, int qtd_periodos, int qtd_terminais, int minimum)
    {

```

```
int i, j;
FILE *fp;
int range_periodos = qtd_periodos-1;
int range_terminais= qtd_terminais-1;
int q = 0;
int total=0;
int diferenca=0;
demanda d[MAX_SIZE];

fp = fopen("dem.csv","w");
if(fp==NULL)
{
    fprintf(stderr, "Impossível abrir o arquivo para escrita\n");
    exit(1);
}

for(i=0; i<MAX_SIZE; i++){
    d[i].origem = 0; d[i].destino = 0;
    d[i].periodo=0; d[i].quantidade=0;
    d[i].validado = 0;
}

printf("param d default 0 := \n");
for(i=1; i<= qtd_demandas; i++){

    d[i].origem = irand(range_terminais) + minimum;

    do{
        d[i].destino = irand(range_terminais) + minimum;
    } while(d[i].origem == d[i].destino);

    d[i].periodo = irand(range_periodos) + minimum;
    d[i].quantidade = irand(9) + minimum;
    total += d[i].quantidade;
    if(total > qtd_demandas)
    {
        diferenca = total - qtd_demandas;
        d[i].quantidade -= diferenca;
        break;
    }
}

for(i=1; i <= qtd_demandas; i++){
```

```

        if(!d[i].validado && d[i].origem){
            printf("[%d, %d, %d]", d[i].origem, d[i].destino, d[i].periodo);
            fprintf(fp, "%d;%d;%d;", d[i].origem, d[i].destino, d[i].periodo);
            q = d[i].quantidade;
            d[i].validado = 1;
            for(j=1; j<=qtd_demandas; j++){
                if(!d[j].validado)
                {
                    if(d[j].origem == d[i].origem &&
                       d[j].destino == d[i].destino &&
                       d[j].periodo == d[i].periodo)
                    {
                        q += d[j].quantidade;
                        d[j].validado = 1;
                    }
                }
            }
            printf(" %d\n", q);
            fprintf(fp, "%d\n", q);
        }
        q = 0;
    }
    printf(";\n\n");
    fclose(fp);
}

/*****
void geram(int qtd_veiculos, int qtd_periodos, int qtd_terminais,
           int qtd_tipos_veic, int minimum)
{
    int i, j;
    int range_periodos = qtd_periodos-1;
    int range_terminais= qtd_terminais-1;
    int rand_origem, rand_periodo, rand_qtd, q;
    FILE *fp;
    fp = fopen("mitv.csv", "w");

    q = 0;

    if(fp==NULL)
    {

```

```

        fprintf(stderr, "Impossível abrir o arquivo para escrita\n");
        exit(1);
    }

    printf("param m default 0 := \n");

    if(qtd_tipos_veic == qtd_veiculos)
    {
        for(i=1; i<= qtd_tipos_veic; i++){
            rand_origem = irand(range_terminais) + minimum;
            rand_periodo = irand(range_periodos) + minimum;
            printf("[%d, %d, %d] 1\n", rand_origem, rand_periodo, i);
            fprintf(fp, "%d;%d;%d;1\n", rand_origem, rand_periodo, i);
        }
    } else {
        for(i=1; i<=qtd_tipos_veic; i++)
        {
            rand_origem = irand(range_terminais) + minimum;
            rand_periodo = irand(range_periodos) + minimum;
            rand_qtd = (int)(qtd_veiculos / qtd_tipos_veic) + 1;
            if(q + rand_qtd <= qtd_veiculos)
            {
                q += rand_qtd;
                printf("[%d, %d, %d] %d\n", rand_origem, rand_periodo, i, rand_qtd);
                fprintf(fp, "%d;%d;%d;%d\n", rand_origem, rand_periodo, i, rand_qtd);
            } else if (qtd_veiculos - q > 0){
                printf("[%d, %d, %d] %d\n", rand_origem, rand_periodo, i, qtd_veiculos - q);
                fprintf(fp, "%d;%d;%d;%d\n", rand_origem, rand_periodo, i, qtd_veiculos - q);
            }
        }
    }
    printf("\n\n");
    fclose(fp);
}

/*****
/* Generate a random integer. */
int irand(int range)
{
    int j;
    j=(int) ((double) range * (double) rand() / (RAND_MAX + 1.0));

```

350

360

370

380

```

        return (j);
    }

    /* Generate a random double. */
    double drand(double range)
    {
        double j;
        j=(range * (double) rand() / (RAND_MAX + 1.0));
        return (j);
    }

void nerror(char *error_text)

{
    fprintf(stderr, "\n%s\n", error_text);
    fprintf(stderr, "... now exiting to system ... \n");
    exit(1);
}

/*****
void geraPontos(int n, int *x, int *y)
{
    int i, j;
    int dim = 100;
    int ponto[dim][dim];
    for(i=0; i<n; i++)
    {
        for(j=0; j<n; j++)
        {
            ponto[i][j] = 0;
        }
    }

    for(i=0; i<n; i++)
    {
again: x[i] = irand(dim);
        y[i] = irand(dim);
        if(!ponto[x[i]][y[i]])
            ponto[x[i]][y[i]] = 1;
        else
            goto again;
    }
}

```

```

}
430
/*****/
void imprimePontos(int n, int *x, int *y)
{
    int i;
    for(i=0; i<n; i++)
        printf("(%d, %d)\n", x[i], y[i]);
    printf("\n");
}

/*****/
440
void criaMatrizDistancias(int n, int *x, int *y, float **m, int **tau)
{
    int i, j;
    double d = 0.0;
    int t = 0.0;

    for(i=0; i<n; i++)
    {
        for(j=i+1; j<n; j++)
        {
            d = sqrt(pow((x[i] - x[j]),2.0) + pow((y[i] - y[j]), 2.0));
            m[i][j] = d;
            m[j][i] = m[i][j];
        }
    }

    for(i=0; i<n; i++)
    {
        for(j=0; j<n; j++)
        {
            t = lround(m[i][j]/15.0);
            t == 0 ? t = 1 : t;
            i == j ? t = 0 : t;
            tau[i][j] = t;
        }
    }
}

/*****/
450
460
470
int **imatriz(int nrl, int nrh, int ncl, int nch)
{

```

```

    int i;
    int **m;

    m = (int **)malloc((unsigned)(nrh - nrl + 1)*sizeof(int*));
    if (!m)
    {
        printf("allocation failure 1 in imatrix()");
        exit(1);
    }
    m -= nrl;
    for(i = nrl; i <= nrh ; i++) {
        m[i]= (int*)malloc((unsigned)(nch - ncl + 1)*sizeof(int));
        if (!m[i])
        {
            printf("allocation failure 2 in imatrix()");
            exit(1);
        }
        m[i] -= ncl;
    }
    return m;
}
}

/*****/
void free_imatrix(int **m, int nrl, int nrh, int ncl)
{
    int i;

    for (i = nrh; i >= nrl; i--)
        free((char*) (m[i] + ncl));
    free((char *) (m + nrl));
}

/*****/
float **fmatrix(int nrl, int nrh, int ncl, int nch)
{
    int i;
    float **m;

    m = (float **)malloc((unsigned)(nrh - nrl + 1)*sizeof(float*));
    if (!m){ printf("allocation failure 1 in imatrix()"); exit(1); }
    m -= nrl;
    for(i = nrl; i <= nrh ; i++)
    {
        m[i]= (float*)malloc((unsigned)(nch - ncl + 1)*sizeof(float));

```

```

    if (!m[i]){ printf("allocation failure 2 in imatrix()"); exit(1); }
    m[i] -= ncl;
}
return m;
}
/*****/
void free_fmatrix(float **m, int nrl, int nrh, int ncl)
{
    int i;

    for (i = nrh; i >= nrl; i--)
        free((char*) (m[i] + ncl));
    free((char *) (m + nrl));
}
/*****/
void criaNovoCusto(int n, float **c)
{
    int i, j;
    double d = 0.0;
    int *x, *y;
    x = (int *) malloc(sizeof(int) * n);
    y = (int *) malloc(sizeof(int) * n);

    geraPontos(n, x, y);

    for(i=0; i<n; i++)
    {
        for(j=i+1; j<n; j++)
        {
            d = sqrt(pow((x[i] - x[j]),2.0) + pow((y[i] - y[j]), 2.0));
            c[i][j] = d;
            c[j][i] = c[i][j];
        }
    }

    free(x); free(y);
}
/*****/
void criaNovoLucro(int n, float **c)
{
    int i, j;
    double d = 0.0;
    int *x, *y;

```

```

x = (int *) malloc(sizeof(int) * n);
y = (int *) malloc(sizeof(int) * n);
560

geraPontos(n, x, y);

for(i=0; i<n; i++)
{
    for(j=i+1; j<n; j++)
    {
        d = sqrt(pow((x[i] - x[j]),2.0) + pow((y[i] - y[j]), 2.0));
        d *= 1.123456789;
        c[i][j] = d;
        c[j][i] = c[i][j];
570
    }
}

free(x); free(y);
}
/*****/
void geraAijv(int n, int qtd_tipos_veic)
{
    int i, j, v;
    double p = 0.9;
580

    printf("param A default 1 := \n");
    for(v=1; v<=qtd_tipos_veic; v++)
        for(i=1; i<=n; i++)
            for(j=1; j<=n; j++)
                if(drand(1.0) > p)
                    printf("[%d,%d,%d] 0\n", i, j, v);

    printf("; \n");
}
/*****/
590
void geraC(int qtd_tipos_veic)
{
    int i;
    double custo;
    printf("param C := ");
    for(i=1; i<= qtd_tipos_veic; i++){
        custo = drand(10.0) + 0.5;
        printf("%d %.2f ", i, custo);
    }
    printf("; \n");
600

```

```
}
/*****/
void geraK(int qtd_periodos, int qtd_terminais)
{
    int rand_int, i, j;

    printf("param K : ");
    for(i=1; i<= qtd_periodos; i++){
        printf("%d ", i);
    }
    printf(" :=\n");

    for(i=1; i<= qtd_terminais; i++){
        printf("%d ", i);

        for(j=1; j<=qtd_periodos; j++){
            rand_int = irand(9) + 9;
            printf("%d ", rand_int);
        }
        printf("\n");
    }
    printf(" ;\n\n");
}
/*****/
void gerah(int qtd_periodos, int qtd_terminais)
{
    int i, j, k;
    double h;
    printf("param h := \n");

    for(k=1; k<=qtd_periodos; k++)
    {
        printf(" [* , * , %d] :\n", k);

        for(i=1; i<= qtd_terminais; i++){
            printf("%d ", i);
        }
        printf(" :=\n");

        for(i=1; i<=qtd_terminais; i++){
            printf("%d ", i);
        }
    }
}
```

```
        h = drand(1.0) + 0.1;

        for(j=1; j<=qtd_terminais; j++)
            printf("%.6f ", h);
        printf("\n");
    }

}
printf("; \n \n");

}
/*****/
```

---

## *ANEXO C – Código em AMPL do exemplo ilustrativo do PADV*

Neste anexo é apresentado o código em AMPL (FOURER et al., 2002) do problema exemplo ilustrativo apresentado em Ghiani et al. (2003).

---

```

/* Vehicle Assignment Problem (VAP) */

param T, integer, > 0;
# tamanho do horizonte de planejamento

param n, integer, > 0;
# quantidade de terminais da rede

set N := 1..n;
# conjunto de terminais da rede

param d {i in N, j in N, t in 1..T} >= 0;
# num. de cargas disponiveis no periodo t de i -> j

param Travel {i in N, j in N} >= 0;
# tempo de viagem de i -> j

param p {i in N, j in N} >= 0;
# lucro (receita-custos operacionais diretos) de i -> j

param c {i in N, j in N} >= 0;
# custo ao se mover um veiculo vazio de i -> j

param m {i in N, t in 1..T}, integer, >= 0;
# num. de veiculos que entram no sistema no ponto i no periodo t

var X {i in N, j in N, t in 1..T} >= 0;
# qtd. de veic. que inicia o transp. de uma carga de i -> j em t

var Y {i in N, j in N, t in 1..T} >= 0;
# qtd. de veic. que inicia o transp. vazio de i -> j em t

maximize z : sum{t in 1..T, i in N, j in N: j<>i} ( p[i,j]*X[i,j,t] - c[i,j]*Y[i,j,t] );

s.t. r1 {i in N, t in 1..T} : sum{j in N} (X[i,j,t] + Y[i,j,t])
    - sum{k in N: k<>i and t>Travel[k,i]} (X[k,i,t-Travel[k,i]]
    + Y[k,i,t-Travel[k,i]])
    = (if t>1 then m[i,t] + Y[i,i,t-1] else m[i,t]);

s.t. r2 {i in N, j in N, t in 1..T} : X[i,j,t] <= d[i,j,t];

end;

```

---

Figura C.1: Modelo matemático em AMPL

---

```
data;
param T := 3;
param n := 5;
param Travel : 1 2 3 4 5 :=
1 0 1 2 2 2
2 1 0 2 2 2
3 2 2 0 2 1
4 2 2 2 0 2
5 2 2 1 2 0;

param m : 1 2 3 :=
1 0 0 0
2 1 1 0
3 0 0 0
4 1 0 0
5 0 0 0;

param d default 0 :=
[2,4,1] 1
[5,3,1] 1
[1,2,3] 2;

param c : 1 2 3 4 5 :=
1 0 1 2 2 2
2 1 0 2 2 2
3 2 2 0 2 1
4 2 2 2 0 2
5 2 2 1 2 0 ;

param p : 1 2 3 4 5 :=
1 0 1.8 3.6 3.6 3.6
2 1.8 0 3.6 3.6 3.6
3 3.6 3.6 0 3.6 1.8
4 3.6 3.6 3.6 0 3.6
5 3.6 3.6 3.6 3.6 0;
end;
```

---

Figura C.2: Dados em AMPL do exemplo *Murty*

*ANEXO D - Representação gráfica da solução  
obtida com o modelo  $M_1$ .*

Versão final impressa em uma folha no formato A0 para facilitar a visualização.

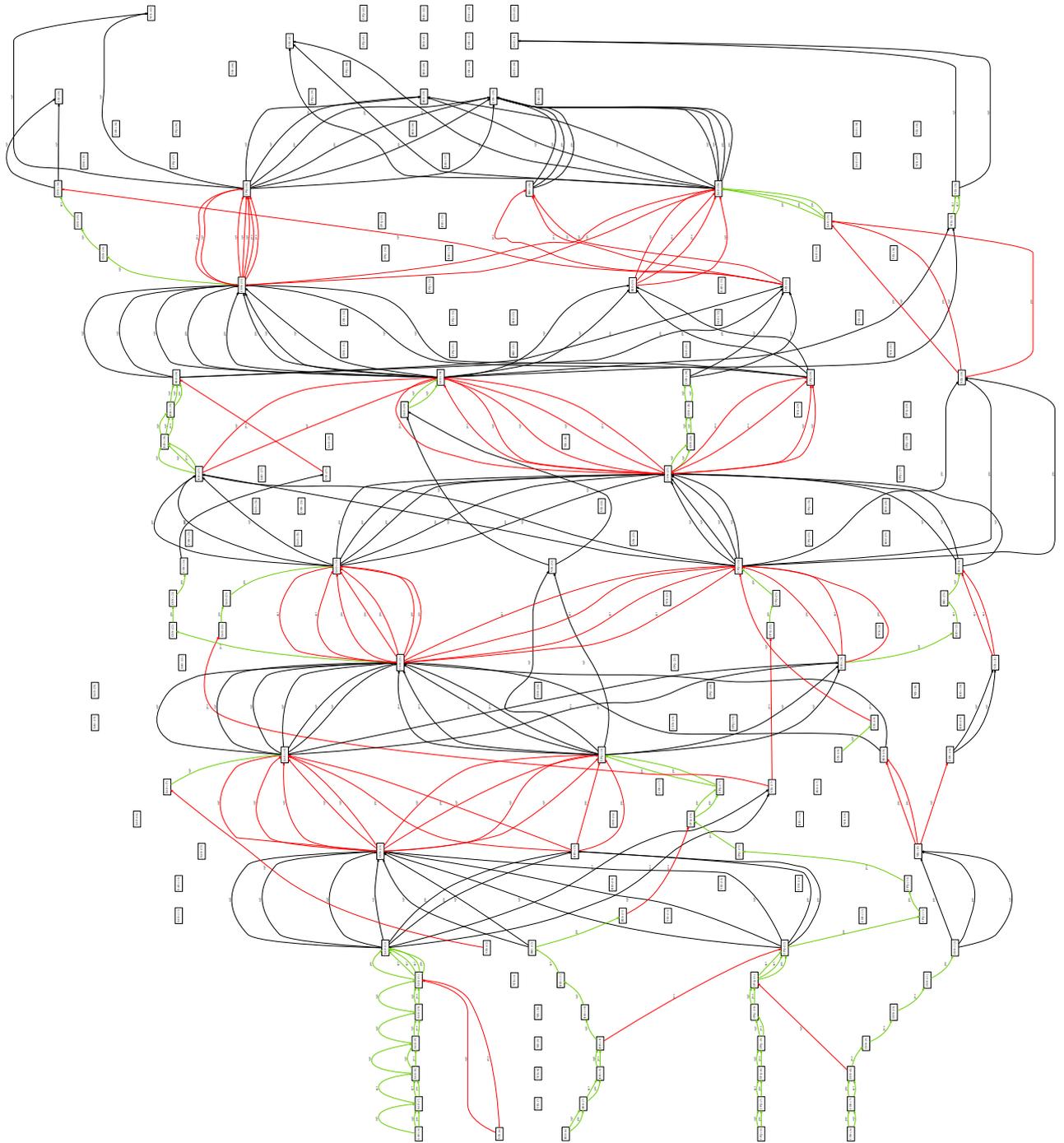


Figura D.1: Representação gráfica da solução obtida com o modelo  $M_1$ .

## *ANEXO E – Resultados obtidos com as heurísticas e metaheurísticas propostas*

Os resultados obtidos na solução de 540 problemas, gerados aleatoriamente de tamanho e complexidade similares ao encontrado na prática, são apresentados nas tabelas a seguir, sendo:

- heurística gulosa e busca local: apresentados nas Tabelas E.1– E.18;
- GRASP: Tabelas E.19– E.36;
- SA (*Simulated Annealing*): Tabelas E.37– E.54;
- ACS (Colônia de Formigas): Tabelas E.55– E.72.
- Comparativo entre as heurísticas propostas: Tabelas E.73– E.90.

Em cada tabela, temos as colunas:

- Problema*: nome do problema no formato “ $pxr - vy$ ”, onde  $x$  representa o número do problema, e  $y$  a quantidade de grupos;
- Sol. Ótima*: solução ótima obtida utilizando-se o CPLEX, para os casos em que  $1 \leq |E| \leq 17$ ;
- CPUt(s)*: tempo de execução, em segundos, necessário para se obter a solução reportada;
- FO*: valor obtido para a função objetivo, reportando para as onze rodadas independentes, o melhor valor obtido, o pior valor obtido e a média aritmética dos valores obtidos;

- $GAP$ : desvio percentual da solução ótima do problema, calculado como:

$$GAP = \frac{Sol.Otima - FO}{Sol.Otima} \times 100 \quad (E.1)$$

- $\sigma_{fo}$  e  $\sigma_t$ : desvio padrão da função objetivo e do tempo de processamento, respectivamente, nas onze rodadas independentes executadas com as metaheurísticas.

Tabela E.1: Resultados obtidos com as heurística gulosa e busca local para  $|E| = 1$ 

Problema	CPLEX		Heurística Gulosa			Busca Local		
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v1	14.558,40	2,42	12.372,80	0,02	15,01	12.928,60	0,05	11,19
p2r-v1	16.994,40	2,54	15.149,60	0,02	10,86	16.141,20	0,06	5,02
p3r-v1	11.675,80	2,11	11.079,60	0,02	5,11	11.079,60	0,07	5,11
p4r-v1	14.012,80	2,20	12.718,40	0,02	9,24	12.718,40	0,05	9,24
p5r-v1	16.548,00	2,45	15.112,80	0,02	8,67	15.112,80	0,05	8,67
p6r-v1	18.842,00	2,45	17.715,60	0,02	5,98	17.793,00	0,05	5,57
p7r-v1	12.766,60	1,84	12.514,80	0,02	1,97	12.514,80	0,05	1,97
p8r-v1	12.675,20	2,20	11.328,20	0,02	10,63	11.772,00	0,05	7,13
p9r-v1	12.964,00	2,15	11.836,80	0,02	8,69	12.240,00	0,06	5,58
p10r-v1	14.177,20	2,28	12.699,40	0,02	10,42	13.505,80	0,06	4,74
p11r-v1	13.721,60	2,17	12.882,00	0,02	6,12	12.926,60	0,06	5,79
p12r-v1	16.866,40	2,12	16.389,80	0,02	2,83	16.389,80	0,04	2,83
p13r-v1	13.421,80	2,50	12.498,80	0,02	6,88	12.528,20	0,07	6,66
p14r-v1	16.327,60	2,03	15.349,60	0,02	5,99	15.405,40	0,06	5,65
p15r-v1	14.431,60	2,04	13.195,60	0,02	8,56	13.541,20	0,06	6,17
p16r-v1	15.097,20	2,36	14.302,60	0,02	5,26	14.302,60	0,04	5,26
p17r-v1	13.126,60	2,34	12.215,00	0,02	6,94	12.215,00	0,06	6,94
p18r-v1	13.957,20	2,25	13.491,60	0,02	3,34	13.501,60	0,05	3,26
p19r-v1	14.088,60	2,09	12.718,40	0,02	9,73	12.994,20	0,06	7,77
p20r-v1	17.898,40	2,42	16.052,00	0,02	10,32	16.292,20	0,06	8,97
p21r-v1	11.287,80	2,07	10.496,20	0,01	7,01	10.529,00	0,05	6,72
p22r-v1	12.848,60	1,86	12.346,60	0,01	3,91	12.474,00	0,05	2,92
p23r-v1	14.503,40	1,93	13.759,60	0,02	5,13	13.949,60	0,06	3,82
p24r-v1	16.031,80	2,62	14.446,00	0,02	9,89	14.821,40	0,05	7,55
p25r-v1	12.462,20	2,29	11.608,00	0,02	6,85	11.622,80	0,05	6,74
p26r-v1	14.928,60	2,29	14.086,80	0,02	5,64	14.151,00	0,06	5,21
p27r-v1	13.930,20	2,14	13.035,60	0,02	6,42	13.252,80	0,06	4,86
p28r-v1	11.527,80	1,92	10.454,60	0,02	9,31	10.826,20	0,06	6,09
p29r-v1	14.161,40	2,29	13.241,40	0,02	6,50	13.290,60	0,05	6,15
p30r-v1	14.005,60	2,64	12.746,60	0,02	8,99	12.831,40	0,05	8,38
	Média	2,23	Média	0,02	7,41	Média	0,05	6,07

Tabela E.2: Resultados obtidos com as heurística gulosa e busca local para  $|E| = 2$ 

Problema	CPLEX		Heurística Gulosa			Busca Local		
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v2	16.784,60	11,09	14.725,80	0,01	12,27	15.238,20	0,05	9,21
p2r-v2	17.179,40	7,11	15.622,20	0,02	9,06	16.271,00	0,06	5,29
p3r-v2	15.383,00	8,89	14.219,40	0,02	7,56	14.287,60	0,05	7,12
p4r-v2	15.579,20	8,27	13.742,80	0,01	11,79	13.772,40	0,05	11,60
p5r-v2	17.161,00	7,96	14.596,40	0,02	14,94	15.369,40	0,04	10,44
p6r-v2	18.176,60	7,89	16.698,40	0,02	8,13	16.896,00	0,04	7,05
p7r-v2	18.094,60	7,86	16.879,40	0,01	6,72	17.102,80	0,04	5,48
p8r-v2	16.486,60	5,77	15.192,80	0,02	7,85	15.308,20	0,04	7,15
p9r-v2	11.652,20	5,24	10.759,80	0,02	7,66	10.971,40	0,05	5,84
p10r-v2	16.580,00	6,19	13.720,20	0,02	17,25	14.547,00	0,05	12,26
p11r-v2	15.650,20	6,30	14.091,00	0,01	9,96	14.269,80	0,04	8,82
p12r-v2	17.610,40	7,36	16.438,60	0,01	6,65	16.438,60	0,04	6,65
p13r-v2	17.614,00	8,72	16.670,40	0,02	5,36	16.670,40	0,05	5,36
p14r-v2	19.224,80	8,13	17.443,20	0,02	9,27	17.470,60	0,05	9,12
p15r-v2	20.322,00	7,41	18.324,40	0,02	9,83	19.019,40	0,06	6,41
p16r-v2	15.629,20	8,70	13.976,20	0,02	10,58	14.062,00	0,07	10,03
p17r-v2	16.599,60	9,73	14.824,00	0,02	10,70	14.885,20	0,06	10,33
p18r-v2	15.785,80	8,38	14.447,20	0,01	8,48	14.538,00	0,05	7,90
p19r-v2	15.884,60	5,73	14.230,40	0,02	10,41	14.593,40	0,05	8,13
p20r-v2	18.166,40	8,10	16.185,60	0,02	10,90	16.392,20	0,06	9,77
p21r-v2	14.553,80	7,71	13.374,20	0,01	8,11	13.453,20	0,05	7,56
p22r-v2	17.623,20	10,86	16.185,00	0,01	8,16	16.185,00	0,04	8,16
p23r-v2	19.222,40	7,41	16.833,60	0,02	12,43	17.282,60	0,06	10,09
p24r-v2	15.134,80	7,22	13.486,00	0,02	10,89	14.624,20	0,05	3,37
p25r-v2	15.304,80	5,79	14.182,20	0,02	7,33	14.241,80	0,03	6,95
p26r-v2	19.042,00	8,61	17.049,40	0,01	10,46	17.287,80	0,04	9,21
p27r-v2	16.504,00	6,86	15.295,20	0,02	7,32	15.512,80	0,04	6,01
p28r-v2	17.249,20	7,64	15.574,00	0,02	9,71	15.664,40	0,05	9,19
p29r-v2	17.381,60	8,25	16.289,80	0,01	6,28	16.311,40	0,06	6,16
p30r-v2	15.325,00	8,72	13.957,40	0,02	8,92	14.216,60	0,05	7,23
	Média	7,80	Média	0,02	9,50	Média	0,05	7,93

Tabela E.3: Resultados obtidos com as heurística gulosa e busca local para  $|E| = 3$ 

Problema	CPLEX		Heurística Gulosa			Busca Local		
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v3	16.333,60	28,94	14.226,00	0,02	12,90	14.417,60	0,06	11,73
p2r-v3	18.240,40	16,36	15.746,40	0,02	13,67	16.290,60	0,04	10,69
p3r-v3	16.281,60	24,71	14.057,00	0,01	13,66	14.320,60	0,03	12,04
p4r-v3	17.046,40	16,40	14.904,20	0,02	12,57	15.283,00	0,05	10,34
p5r-v3	17.643,80	26,75	16.039,80	0,02	9,09	16.294,60	0,06	7,65
p6r-v3	18.134,80	16,11	15.754,60	0,02	13,13	16.079,20	0,04	11,34
p7r-v3	18.630,00	14,74	17.135,40	0,01	8,02	17.135,40	0,05	8,02
p8r-v3	17.283,60	16,24	15.810,20	0,01	8,52	15.833,60	0,05	8,39
p9r-v3	14.316,80	9,30	12.922,20	0,02	9,74	13.484,20	0,06	5,82
p10r-v3	17.760,20	12,99	14.749,60	0,01	16,95	15.261,00	0,06	14,07
p11r-v3	15.964,40	14,20	13.870,40	0,02	13,12	14.099,40	0,05	11,68
p12r-v3	20.755,40	16,80	18.981,00	0,01	8,55	19.076,40	0,03	8,09
p13r-v3	19.133,00	26,54	17.251,40	0,02	9,83	17.303,20	0,04	9,56
p14r-v3	18.435,40	15,63	15.914,40	0,02	13,67	16.088,60	0,08	12,73
p15r-v3	19.724,40	16,69	17.315,80	0,02	12,21	18.262,40	0,06	7,41
p16r-v3	16.129,20	15,23	14.702,40	0,02	8,85	14.737,40	0,04	8,63
p17r-v3	15.857,60	19,98	13.603,20	0,02	14,22	13.734,60	0,05	13,39
p18r-v3	17.193,00	32,50	15.142,40	0,02	11,93	15.187,40	0,06	11,67
p19r-v3	17.354,20	14,55	15.419,00	0,02	11,15	15.518,80	0,06	10,58
p20r-v3	19.978,40	20,08	16.710,00	0,02	16,36	16.851,40	0,05	15,65
p21r-v3	15.725,60	17,89	14.059,20	0,02	10,60	14.142,00	0,04	10,07
p22r-v3	18.338,60	30,75	17.103,00	0,02	6,74	17.146,20	0,04	6,50
p23r-v3	19.077,20	16,55	17.305,20	0,01	9,29	17.358,60	0,05	9,01
p24r-v3	17.084,80	16,10	14.621,80	0,02	14,42	15.876,00	0,06	7,08
p25r-v3	16.691,20	15,82	14.893,80	0,02	10,77	15.121,40	0,04	9,40
p26r-v3	19.502,40	17,97	17.906,20	0,02	8,18	18.007,20	0,04	7,67
p27r-v3	18.978,40	16,52	16.707,40	0,02	11,97	17.122,60	0,05	9,78
p28r-v3	17.280,60	17,97	14.839,00	0,02	14,13	15.034,60	0,05	13,00
p29r-v3	17.334,20	18,72	15.690,40	0,02	9,48	15.817,60	0,04	8,75
p30r-v3	15.168,20	20,72	13.474,80	0,02	11,16	13.562,60	0,04	10,59
	Média	18,79	Média	0,02	11,50	Média	0,05	10,04

Tabela E.4: Resultados obtidos com as heurística gulosa e busca local para  $|E| = 4$ 

Problema	CPLEX		Heurística Gulosa			Busca Local		
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v4	16.298,80	53,12	13.790,80	0,02	15,39	13.888,20	0,05	14,79
p2r-v4	18.373,80	29,31	16.718,40	0,01	9,01	17.000,40	0,06	7,47
p3r-v4	15.834,40	43,66	13.345,20	0,02	15,72	14.248,80	0,05	10,01
p4r-v4	18.535,80	27,10	15.965,40	0,02	13,87	16.404,40	0,04	11,50
p5r-v4	17.832,40	34,69	15.900,80	0,02	10,83	16.314,60	0,04	8,51
p6r-v4	18.808,80	26,60	15.814,40	0,02	15,92	16.978,80	0,04	9,73
p7r-v4	18.315,00	37,91	17.065,40	0,01	6,82	17.086,40	0,03	6,71
p8r-v4	16.764,00	19,13	14.376,20	0,02	14,24	14.717,80	0,05	12,21
p9r-v4	14.953,00	24,63	13.254,00	0,02	11,36	13.509,60	0,05	9,65
p10r-v4	18.448,40	24,99	15.476,20	0,01	16,11	16.437,40	0,05	10,90
p11r-v4	16.588,00	23,81	15.277,40	0,02	7,90	15.282,60	0,04	7,87
p12r-v4	21.674,20	83,01	20.248,20	0,02	6,58	20.248,20	0,02	6,58
p13r-v4	19.184,80	40,64	18.025,60	0,01	6,04	18.025,60	0,05	6,04
p14r-v4	18.641,20	27,05	17.113,20	0,02	8,20	17.113,20	0,05	8,20
p15r-v4	20.000,00	29,70	17.649,20	0,02	11,75	18.323,40	0,06	8,38
p16r-v4	16.547,20	26,49	14.660,60	0,02	11,40	14.799,60	0,05	10,56
p17r-v4	16.090,80	29,47	14.076,40	0,02	12,52	14.302,80	0,06	11,11
p18r-v4	16.774,80	32,76	14.567,40	0,02	13,16	14.980,20	0,05	10,70
p19r-v4	17.457,60	25,10	15.589,60	0,02	10,70	15.762,40	0,06	9,71
p20r-v4	19.331,80	31,15	15.844,80	0,01	18,04	16.230,60	0,05	16,04
p21r-v4	16.564,40	41,01	14.618,20	0,02	11,75	14.691,20	0,04	11,31
p22r-v4	17.525,20	58,94	15.103,80	0,01	13,82	15.405,80	0,03	12,09
p23r-v4	20.463,20	35,77	18.551,80	0,01	9,34	18.691,20	0,06	8,66
p24r-v4	17.627,00	27,14	15.613,00	0,02	11,43	16.889,20	0,07	4,19
p25r-v4	16.943,80	29,06	15.159,40	0,02	10,53	15.233,00	0,04	10,10
p26r-v4	19.383,00	33,21	18.040,60	0,02	6,93	18.122,80	0,05	6,50
p27r-v4	19.496,80	31,03	18.176,40	0,02	6,77	18.224,80	0,04	6,52
p28r-v4	17.419,00	28,13	14.628,60	0,02	16,02	15.163,40	0,04	12,95
p29r-v4	17.895,20	39,78	15.814,60	0,02	11,63	15.929,60	0,05	10,98
p30r-v4	15.743,20	30,86	14.368,00	0,02	8,74	14.520,00	0,05	7,77
	Média	34,18	Média	0,02	11,42	Média	0,05	9,59

Tabela E.5: Resultados obtidos com as heurística gulosa e busca local para  $|E| = 5$ 

Problema	CPLEX		Heurística Gulosa			Busca Local		
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v5	16.530,60	62,49	13.612,00	0,02	17,66	13.795,80	0,04	16,54
p2r-v5	18.248,80	44,44	16.243,80	0,02	10,99	16.569,00	0,05	9,20
p3r-v5	16.194,40	71,40	14.101,20	0,02	12,93	14.173,00	0,04	12,48
p4r-v5	19.082,00	39,22	16.662,00	0,02	12,68	16.791,00	0,05	12,01
p5r-v5	17.608,00	51,87	15.030,00	0,02	14,64	15.283,60	0,05	13,20
p6r-v5	19.514,00	44,60	17.912,80	0,02	8,21	17.932,20	0,06	8,11
p7r-v5	18.573,20	54,79	17.370,00	0,02	6,48	17.370,00	0,03	6,48
p8r-v5	17.793,00	37,63	15.724,40	0,02	11,63	16.126,80	0,05	9,36
p9r-v5	14.941,20	29,47	13.460,80	0,02	9,91	13.613,20	0,06	8,89
p10r-v5	18.312,00	54,85	15.215,60	0,02	16,91	16.352,20	0,04	10,70
p11r-v5	15.807,00	34,04	14.126,00	0,02	10,63	14.126,00	0,06	10,63
p12r-v5	21.666,20	48,30	19.886,80	0,02	8,21	19.911,80	0,03	8,10
p13r-v5	19.397,60	52,68	18.038,80	0,01	7,00	18.038,80	0,04	7,00
p14r-v5	18.842,00	39,05	17.061,80	0,02	9,45	17.167,60	0,05	8,89
p15r-v5	20.398,60	41,39	18.623,80	0,02	8,70	19.231,60	0,04	5,72
p16r-v5	17.208,80	44,79	15.569,00	0,02	9,53	15.632,80	0,03	9,16
p17r-v5	16.391,20	69,42	13.944,40	0,02	14,93	14.440,80	0,04	11,90
p18r-v5	17.461,00	52,99	15.870,40	0,02	9,11	15.968,80	0,05	8,55
p19r-v5	17.706,00	33,01	16.244,00	0,02	8,26	16.244,00	0,06	8,26
p20r-v5	19.982,00	60,33	16.733,20	0,03	16,26	17.137,40	0,04	14,24
p21r-v5	16.578,20	60,39	14.545,20	0,02	12,26	14.769,00	0,03	10,91
p22r-v5	18.240,40	82,56	16.397,60	0,02	10,10	16.404,20	0,03	10,07
p23r-v5	20.363,80	59,22	18.783,00	0,02	7,76	18.783,80	0,06	7,76
p24r-v5	17.359,60	40,45	14.793,20	0,02	14,78	16.115,40	0,06	7,17
p25r-v5	16.493,60	45,61	14.550,80	0,02	11,78	14.796,60	0,04	10,29
p26r-v5	18.742,80	44,37	16.727,40	0,02	10,75	17.081,20	0,05	8,87
p27r-v5	19.351,80	49,12	17.693,40	0,02	8,57	17.777,60	0,04	8,13
p28r-v5	17.656,60	42,68	15.800,40	0,02	10,51	15.864,80	0,04	10,15
p29r-v5	18.087,40	48,28	15.994,60	0,02	11,57	16.106,40	0,05	10,95
p30r-v5	15.899,80	48,50	14.285,40	0,01	10,15	14.496,40	0,05	8,83
	Média	49,60	Média	0,02	11,08	Média	0,05	9,75

Tabela E.6: Resultados obtidos com as heurística gulosa e busca local para  $|E| = 6$ 

Problema	CPLEX		Heurística Gulosa			Busca Local		
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v6	17.112,00	87,33	14.899,00	0,02	12,93	15.239,80	0,05	10,94
p2r-v6	18.734,20	56,19	16.321,60	0,01	12,88	17.077,60	0,06	8,84
p3r-v6	15.805,40	87,16	13.629,60	0,02	13,77	13.924,40	0,04	11,90
p4r-v6	18.970,00	72,37	16.718,80	0,02	11,87	16.774,20	0,04	11,58
p5r-v6	18.103,80	68,62	16.105,60	0,02	11,04	16.403,60	0,04	9,39
p6r-v6	18.771,40	81,17	16.472,20	0,02	12,25	16.533,40	0,05	11,92
p7r-v6	18.963,60	45,02	17.544,40	0,02	7,48	17.544,40	0,03	7,48
p8r-v6	17.474,20	46,93	15.137,40	0,02	13,37	15.386,40	0,05	11,95
p9r-v6	14.492,20	37,81	13.089,80	0,02	9,68	13.253,20	0,05	8,55
p10r-v6	17.963,60	68,30	14.727,00	0,02	18,02	15.915,20	0,06	11,40
p11r-v6	16.566,60	53,71	14.876,00	0,02	10,20	14.912,20	0,05	9,99
p12r-v6	21.572,60	91,01	19.791,60	0,02	8,26	19.869,80	0,03	7,89
p13r-v6	18.940,20	70,22	16.953,60	0,02	10,49	16.977,40	0,04	10,36
p14r-v6	18.951,80	48,55	16.913,20	0,02	10,76	17.379,20	0,05	8,30
p15r-v6	20.126,40	85,04	17.804,40	0,01	11,54	18.633,00	0,07	7,42
p16r-v6	17.147,00	86,86	15.425,60	0,02	10,04	15.565,80	0,04	9,22
p17r-v6	16.173,80	72,06	13.753,00	0,02	14,97	14.166,00	0,05	12,41
p18r-v6	17.375,20	88,72	15.785,60	0,02	9,15	15.785,60	0,06	9,15
p19r-v6	17.771,40	49,47	15.963,00	0,02	10,18	16.177,20	0,07	8,97
p20r-v6	19.878,00	61,46	16.366,20	0,02	17,67	16.892,00	0,06	15,02
p21r-v6	15.979,20	74,08	14.710,80	0,02	7,94	14.791,00	0,03	7,44
p22r-v6	18.603,00	52,26	17.117,20	0,02	7,99	17.117,20	0,03	7,99
p23r-v6	21.005,80	63,43	18.768,60	0,02	10,65	18.800,60	0,06	10,50
p24r-v6	17.436,40	64,69	15.407,20	0,02	11,64	16.453,20	0,07	5,64
p25r-v6	16.966,60	57,22	14.740,60	0,02	13,12	14.922,60	0,05	12,05
p26r-v6	19.733,80	70,12	17.419,00	0,01	11,73	17.630,40	0,06	10,66
p27r-v6	19.221,60	61,09	17.645,20	0,02	8,20	17.686,00	0,06	7,99
p28r-v6	17.712,60	63,60	15.603,00	0,02	11,91	15.635,40	0,04	11,73
p29r-v6	18.358,20	62,73	17.012,80	0,02	7,33	17.028,20	0,04	7,24
p30r-v6	15.891,20	66,47	14.005,60	0,02	11,87	14.184,60	0,05	10,74
	Média	66,46	Média	0,02	11,30	Média	0,05	9,82

Tabela E.7: Resultados obtidos com as heurística gulosa e busca local para  $|E| = 7$ 

Problema	CPLEX		Heurística Gulosa			Busca Local		
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v7	16.792,40	107,69	14.265,80	0,02	15,05	14.516,40	0,05	13,55
p2r-v7	18.666,20	68,09	16.097,80	0,02	13,76	16.636,20	0,04	10,88
p3r-v7	15.939,80	127,16	13.224,80	0,02	17,03	14.298,80	0,04	10,29
p4r-v7	19.262,60	67,38	16.821,60	0,02	12,67	17.055,20	0,04	11,46
p5r-v7	18.254,00	74,97	16.103,60	0,02	11,78	16.549,60	0,05	9,34
p6r-v7	19.218,20	97,91	17.309,80	0,02	9,93	17.354,60	0,06	9,70
p7r-v7	18.953,60	54,41	17.926,40	0,02	5,42	17.926,40	0,04	5,42
p8r-v7	17.940,20	73,23	15.804,40	0,02	11,91	16.041,60	0,04	10,58
p9r-v7	15.228,40	51,96	13.430,40	0,02	11,81	13.720,80	0,07	9,90
p10r-v7	17.864,20	69,72	15.199,60	0,02	14,92	16.069,40	0,06	10,05
p11r-v7	16.390,80	64,21	14.282,80	0,01	12,86	14.348,80	0,06	12,46
p12r-v7	21.407,40	118,50	19.846,00	0,02	7,29	19.846,00	0,03	7,29
p13r-v7	19.217,00	103,30	17.612,80	0,02	8,35	17.712,00	0,05	7,83
p14r-v7	19.091,00	85,55	16.930,60	0,02	11,32	17.101,40	0,07	10,42
p15r-v7	19.673,20	78,91	17.892,80	0,01	9,05	18.660,40	0,08	5,15
p16r-v7	17.728,40	91,35	15.726,60	0,02	11,29	15.769,80	0,04	11,05
p17r-v7	16.782,80	86,08	14.605,20	0,02	12,98	15.182,80	0,05	9,53
p18r-v7	17.403,40	107,11	15.124,40	0,02	13,10	15.288,20	0,06	12,15
p19r-v7	17.377,60	51,76	14.831,20	0,02	14,65	15.689,40	0,07	9,71
p20r-v7	19.235,20	99,76	16.543,60	0,02	13,99	17.187,20	0,07	10,65
p21r-v7	16.766,60	88,80	15.018,20	0,01	10,43	15.126,20	0,03	9,78
p22r-v7	18.405,20	106,07	16.799,20	0,01	8,73	16.830,20	0,03	8,56
p23r-v7	21.313,60	84,54	19.704,00	0,01	7,55	19.704,00	0,06	7,55
p24r-v7	17.633,80	82,26	15.206,60	0,02	13,76	16.671,40	0,06	5,46
p25r-v7	16.400,00	98,86	14.179,60	0,02	13,54	14.329,80	0,05	12,62
p26r-v7	19.645,40	102,38	17.793,00	0,01	9,43	17.846,00	0,05	9,16
p27r-v7	19.412,60	83,38	17.751,20	0,02	8,56	17.757,00	0,04	8,53
p28r-v7	17.938,60	76,75	15.929,20	0,02	11,20	16.161,40	0,04	9,91
p29r-v7	18.695,00	143,26	17.519,40	0,02	6,29	17.519,40	0,05	6,29
p30r-v7	16.204,60	69,98	14.315,20	0,02	11,66	14.517,80	0,05	10,41
	Média	87,18	Média	0,02	11,34	Média	0,05	9,52

Tabela E.8: Resultados obtidos com as heurística gulosa e busca local para  $|E| = 8$ 

Problema	CPLEX		Heurística Gulosa			Busca Local		
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v8	16.602,80	144,50	14.172,40	0,02	14,64	14.409,00	0,04	13,21
p2r-v8	18.630,80	114,91	16.295,40	0,02	12,54	16.541,80	0,05	11,21
p3r-v8	16.145,40	170,96	14.355,20	0,02	11,09	14.787,80	0,05	8,41
p4r-v8	19.158,80	89,00	17.305,60	0,02	9,67	17.305,60	0,04	9,67
p5r-v8	17.211,40	98,55	15.334,00	0,02	10,91	15.686,40	0,04	8,86
p6r-v8	19.316,80	102,41	17.275,60	0,02	10,57	17.477,00	0,05	9,52
p7r-v8	18.657,40	71,20	17.492,20	0,02	6,25	17.492,20	0,04	6,25
p8r-v8	17.930,20	75,10	15.792,40	0,01	11,92	15.956,00	0,04	11,01
p9r-v8	15.005,80	46,11	13.819,20	0,02	7,91	13.955,80	0,05	7,00
p10r-v8	18.381,00	71,50	15.455,40	0,02	15,92	16.300,60	0,05	11,32
p11r-v8	16.733,40	80,57	14.973,00	0,02	10,52	15.395,80	0,04	7,99
p12r-v8	21.913,20	98,02	20.648,00	0,01	5,77	20.648,00	0,02	5,77
p13r-v8	19.007,00	110,14	17.161,40	0,02	9,71	17.217,60	0,04	9,41
p14r-v8	18.985,20	80,32	17.199,20	0,02	9,41	17.233,00	0,05	9,23
p15r-v8	20.439,00	98,11	18.532,20	0,01	9,33	19.457,00	0,05	4,80
p16r-v8	17.393,20	106,33	15.915,60	0,02	8,50	15.918,00	0,04	8,48
p17r-v8	16.825,00	114,43	14.782,40	0,01	12,14	15.192,40	0,04	9,70
p18r-v8	17.012,40	97,56	14.874,80	0,02	12,56	15.159,80	0,06	10,89
p19r-v8	17.706,80	98,94	15.084,80	0,02	14,81	15.205,00	0,06	14,13
p20r-v8	19.159,40	112,01	16.183,80	0,02	15,53	16.462,20	0,04	14,08
p21r-v8	16.748,80	113,83	15.147,20	0,02	9,56	15.147,20	0,04	9,56
p22r-v8	18.311,20	135,17	16.782,60	0,02	8,35	16.954,60	0,03	7,41
p23r-v8	20.995,40	110,45	19.051,80	0,01	9,26	19.078,20	0,05	9,13
p24r-v8	17.657,80	102,54	15.584,00	0,02	11,74	16.594,60	0,05	6,02
p25r-v8	16.967,00	85,04	15.640,60	0,02	7,82	15.667,80	0,04	7,66
p26r-v8	20.079,80	104,26	18.006,80	0,02	10,32	18.268,80	0,05	9,02
p27r-v8	19.443,60	117,58	16.887,60	0,02	13,15	17.079,40	0,04	12,16
p28r-v8	17.760,00	77,17	15.784,20	0,02	11,13	16.145,40	0,05	9,09
p29r-v8	18.402,00	96,74	16.684,60	0,02	9,33	16.728,20	0,04	9,10
p30r-v8	15.949,00	90,25	14.449,20	0,02	9,40	14.487,40	0,05	9,16
	Média	100,46	Média	0,02	10,66	Média	0,05	9,31

Tabela E.9: Resultados obtidos com as heurística gulosa e busca local para  $|E| = 9$ 

Problema	CPLEX		Heurística Gulosa			Busca Local		
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v9	16.825,00	173,43	14.056,20	0,02	16,46	14.309,20	0,04	14,95
p2r-v9	18.686,20	93,46	16.290,40	0,02	12,82	17.059,80	0,06	8,70
p3r-v9	16.510,80	208,60	14.469,00	0,02	12,37	14.944,00	0,05	9,49
p4r-v9	19.045,60	117,84	15.986,20	0,02	16,06	16.549,60	0,04	13,11
p5r-v9	18.087,20	126,24	15.314,00	0,02	15,33	15.718,40	0,05	13,10
p6r-v9	19.432,80	113,10	17.539,00	0,01	9,75	17.784,80	0,04	8,48
p7r-v9	18.814,00	120,20	17.699,00	0,01	5,93	17.699,00	0,03	5,93
p8r-v9	17.881,20	80,50	16.146,40	0,02	9,70	16.455,60	0,04	7,97
p9r-v9	15.061,40	66,27	14.055,60	0,02	6,68	14.132,60	0,05	6,17
p10r-v9	18.094,60	86,85	15.501,20	0,02	14,33	16.257,80	0,05	10,15
p11r-v9	16.258,60	106,16	14.235,00	0,02	12,45	14.275,80	0,05	12,20
p12r-v9	21.678,40	106,85	20.528,20	0,01	5,31	20.528,20	0,03	5,31
p13r-v9	19.256,20	176,95	17.588,40	0,01	8,66	17.608,60	0,04	8,56
p14r-v9	19.488,00	94,91	17.576,40	0,02	9,81	17.678,20	0,05	9,29
p15r-v9	20.238,40	116,83	18.004,20	0,02	11,04	18.714,80	0,06	7,53
p16r-v9	17.344,00	140,45	15.545,00	0,01	10,37	15.671,60	0,04	9,64
p17r-v9	16.748,20	117,36	14.477,00	0,02	13,56	14.631,40	0,05	12,64
p18r-v9	17.380,00	135,72	16.062,20	0,02	7,58	16.119,80	0,06	7,25
p19r-v9	17.537,00	91,74	15.035,20	0,02	14,27	15.081,80	0,07	14,00
p20r-v9	19.807,60	114,72	17.077,80	0,01	13,78	17.301,40	0,04	12,65
p21r-v9	16.796,80	140,67	15.488,40	0,02	7,79	15.488,40	0,03	7,79
p22r-v9	18.561,80	110,39	16.465,60	0,02	11,29	16.496,40	0,03	11,13
p23r-v9	20.841,40	117,70	18.105,00	0,01	13,13	18.256,80	0,06	12,40
p24r-v9	17.186,80	148,58	15.130,20	0,02	11,97	16.090,60	0,06	6,38
p25r-v9	16.535,40	110,89	14.476,20	0,02	12,45	14.632,40	0,04	11,51
p26r-v9	19.688,60	133,35	17.569,20	0,01	10,76	17.706,20	0,06	10,07
p27r-v9	18.886,60	116,83	17.399,00	0,02	7,88	17.399,00	0,04	7,88
p28r-v9	17.470,20	107,06	15.331,00	0,02	12,24	15.615,80	0,04	10,61
p29r-v9	18.202,20	126,70	15.870,20	0,02	12,81	16.049,00	0,05	11,83
p30r-v9	16.052,20	131,07	14.515,20	0,02	9,58	14.538,60	0,05	9,43
	Média	121,05	Média	0,02	11,21	Média	0,05	9,87

Tabela E.10: Resultados obtidos com as heurística gulosa e busca local para  $|E| = 10$ 

Problema	CPLEX		Heurística Gulosa			Busca Local		
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v10	16.891,40	219,95	14.819,20	0,02	12,27	14.841,60	0,05	12,14
p2r-v10	18.797,20	113,97	16.782,60	0,02	10,72	17.100,80	0,05	9,02
p3r-v10	16.288,00	177,95	14.216,80	0,01	12,72	14.464,80	0,05	11,19
p4r-v10	19.389,60	158,11	17.240,40	0,02	11,08	17.240,40	0,04	11,08
p5r-v10	18.055,20	153,07	15.757,20	0,02	12,73	16.325,20	0,05	9,58
p6r-v10	19.189,40	160,31	17.546,80	0,02	8,56	17.686,20	0,04	7,83
p7r-v10	18.297,60	112,49	16.847,20	0,02	7,93	16.879,80	0,03	7,75
p8r-v10	17.908,20	113,97	15.797,00	0,02	11,79	15.968,80	0,04	10,83
p9r-v10	15.122,00	78,78	13.724,00	0,02	9,24	13.992,60	0,05	7,47
p10r-v10	18.381,00	124,54	15.508,00	0,02	15,63	17.201,40	0,06	6,42
p11r-v10	16.223,80	124,82	14.532,80	0,02	10,42	14.616,80	0,04	9,91
p12r-v10	21.688,60	131,66	20.050,80	0,02	7,55	20.050,80	0,02	7,55
p13r-v10	19.365,20	200,12	17.989,40	0,02	7,10	18.022,60	0,04	6,93
p14r-v10	19.217,40	112,40	17.263,80	0,02	10,17	17.263,80	0,05	10,17
p15r-v10	19.674,00	127,75	17.331,40	0,01	11,91	18.255,80	0,05	7,21
p16r-v10	17.258,20	167,95	15.708,80	0,02	8,98	15.762,20	0,05	8,67
p17r-v10	16.684,80	139,82	14.319,20	0,02	14,18	14.734,00	0,06	11,69
p18r-v10	17.325,00	185,77	15.579,00	0,01	10,08	15.666,60	0,05	9,57
p19r-v10	17.566,80	119,29	15.426,20	0,02	12,19	15.596,20	0,06	11,22
p20r-v10	19.942,60	168,39	17.282,60	0,02	13,34	17.523,60	0,05	12,13
p21r-v10	16.634,40	157,34	15.049,60	0,02	9,53	15.049,60	0,03	9,53
p22r-v10	18.466,20	138,48	16.908,40	0,02	8,44	16.979,60	0,03	8,05
p23r-v10	21.104,00	143,26	19.719,60	0,01	6,56	19.721,60	0,05	6,55
p24r-v10	17.354,40	119,89	14.780,20	0,02	14,83	16.113,60	0,06	7,15
p25r-v10	16.594,20	116,55	14.713,00	0,02	11,34	14.899,40	0,04	10,21
p26r-v10	19.719,80	164,60	17.808,20	0,02	9,69	18.086,00	0,06	8,29
p27r-v10	19.473,20	138,14	17.233,40	0,02	11,50	17.239,60	0,05	11,47
p28r-v10	17.647,80	124,63	15.489,00	0,02	12,23	15.831,80	0,04	10,29
p29r-v10	18.607,60	178,11	16.858,40	0,02	9,40	16.967,20	0,05	8,82
p30r-v10	15.858,20	138,17	14.499,00	0,02	8,57	14.509,40	0,05	8,51
	Média	143,68	Média	0,02	10,69	Média	0,05	9,24

Tabela E.11: Resultados obtidos com as heurística gulosa e busca local para  $|E| = 11$ 

Problema	CPLEX		Heurística Gulosa			Busca Local		
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v11	17.030,60	281,66	14.549,20	0,01	14,57	14.934,80	0,05	12,31
p2r-v11	18.873,40	123,72	16.733,80	0,02	11,34	16.997,40	0,06	9,94
p3r-v11	16.360,60	222,46	14.705,20	0,02	10,12	15.042,20	0,05	8,06
p4r-v11	18.979,00	141,84	16.858,80	0,02	11,17	16.858,80	0,04	11,17
p5r-v11	17.920,60	158,72	16.491,00	0,02	7,98	16.556,80	0,05	7,61
p6r-v11	19.494,20	156,72	17.599,80	0,02	9,72	17.714,80	0,04	9,13
p7r-v11	18.948,80	181,85	17.419,80	0,02	8,07	17.432,20	0,03	8,00
p8r-v11	17.948,00	111,81	15.759,40	0,02	12,19	15.946,80	0,05	11,15
p9r-v11	14.837,60	91,53	13.408,60	0,02	9,63	13.766,80	0,05	7,22
p10r-v11	18.391,40	129,89	15.077,40	0,02	18,02	16.517,40	0,05	10,19
p11r-v11	16.483,40	140,12	14.670,00	0,02	11,00	14.773,80	0,06	10,37
p12r-v11	21.659,60	192,04	20.030,00	0,02	7,52	20.030,00	0,03	7,52
p13r-v11	19.485,20	241,74	18.055,60	0,02	7,34	18.073,00	0,05	7,25
p14r-v11	19.223,40	124,19	17.532,80	0,02	8,79	17.532,80	0,06	8,79
p15r-v11	19.956,00	164,96	17.748,00	0,02	11,06	18.651,60	0,05	6,54
p16r-v11	17.435,20	168,22	15.605,00	0,02	10,50	15.778,60	0,04	9,50
p17r-v11	16.928,20	167,89	14.916,80	0,02	11,88	15.310,00	0,04	9,56
p18r-v11	17.112,00	239,15	15.101,20	0,02	11,75	15.203,80	0,06	11,15
p19r-v11	17.853,80	116,64	15.870,80	0,02	11,11	16.296,60	0,06	8,72
p20r-v11	20.008,40	175,83	17.388,00	0,02	13,10	17.694,80	0,05	11,56
p21r-v11	16.598,60	203,27	15.063,20	0,01	9,25	15.063,20	0,04	9,25
p22r-v11	18.490,40	181,38	16.797,80	0,02	9,15	16.797,80	0,03	9,15
p23r-v11	21.147,80	169,87	19.694,80	0,02	6,87	19.788,60	0,05	6,43
p24r-v11	17.450,80	125,22	14.982,20	0,01	14,15	16.268,80	0,07	6,77
p25r-v11	16.820,60	143,36	15.159,20	0,02	9,88	15.275,20	0,04	9,19
p26r-v11	19.769,00	156,91	17.826,60	0,02	9,83	17.969,00	0,04	9,11
p27r-v11	19.150,40	186,31	17.668,00	0,02	7,74	17.701,00	0,05	7,57
p28r-v11	17.708,20	167,73	15.869,60	0,02	10,38	16.006,20	0,05	9,61
p29r-v11	18.788,20	157,92	16.842,00	0,01	10,36	17.075,00	0,06	9,12
p30r-v11	16.313,60	155,50	14.768,20	0,02	9,47	14.999,40	0,05	8,06
	Média	165,95	Média	0,02	10,46	Média	0,05	9,00

Tabela E.12: Resultados obtidos com as heurística gulosa e busca local para  $|E| = 12$ 

Problema	CPLEX		Heurística Gulosa			Busca Local		
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v12	16.605,40	259,52	14.385,20	0,02	13,37	14.681,20	0,04	11,59
p2r-v12	19.038,40	185,41	17.058,60	0,02	10,40	17.384,20	0,05	8,69
p3r-v12	16.484,40	298,37	14.269,80	0,02	13,43	14.680,00	0,04	10,95
p4r-v12	18.974,80	165,30	16.204,40	0,02	14,60	16.706,80	0,05	11,95
p5r-v12	17.802,20	183,55	15.681,80	0,02	11,91	16.017,20	0,04	10,03
p6r-v12	19.603,00	157,62	17.926,20	0,02	8,55	18.080,40	0,04	7,77
p7r-v12	18.715,60	154,39	17.139,40	0,01	8,42	17.139,40	0,03	8,42
p8r-v12	17.753,40	155,35	15.551,80	0,02	12,40	15.786,80	0,05	11,08
p9r-v12	14.996,40	99,01	13.433,60	0,02	10,42	13.610,40	0,05	9,24
p10r-v12	17.931,60	155,19	14.989,20	0,02	16,41	16.130,20	0,05	10,05
p11r-v12	16.197,40	149,81	13.984,80	0,02	13,66	14.306,40	0,04	11,67
p12r-v12	21.762,00	245,47	20.230,40	0,02	7,04	20.230,40	0,03	7,04
p13r-v12	19.356,60	238,43	17.818,20	0,01	7,95	17.818,20	0,04	7,95
p14r-v12	19.311,20	157,64	17.632,80	0,02	8,69	17.897,60	0,05	7,32
p15r-v12	19.999,60	165,27	17.839,80	0,02	10,80	18.713,00	0,07	6,43
p16r-v12	17.247,00	192,68	15.777,20	0,02	8,52	15.874,80	0,04	7,96
p17r-v12	16.621,00	158,34	14.286,00	0,02	14,05	14.484,20	0,04	12,86
p18r-v12	17.350,00	222,66	15.671,80	0,02	9,67	15.694,80	0,06	9,54
p19r-v12	17.976,60	126,72	16.029,40	0,02	10,83	16.356,80	0,06	9,01
p20r-v12	19.834,80	179,92	16.804,00	0,02	15,28	17.340,40	0,04	12,58
p21r-v12	16.637,00	218,23	15.110,00	0,02	9,18	15.137,00	0,03	9,02
p22r-v12	18.481,80	232,38	17.304,00	0,02	6,37	17.304,00	0,03	6,37
p23r-v12	20.938,20	206,20	19.107,40	0,02	8,74	19.170,80	0,05	8,44
p24r-v12	17.662,20	143,18	15.287,20	0,01	13,45	16.379,80	0,06	7,26
p25r-v12	16.764,20	159,76	15.336,00	0,02	8,52	15.596,80	0,04	6,96
p26r-v12	19.294,00	182,80	17.370,80	0,02	9,97	17.376,60	0,05	9,94
p27r-v12	19.680,80	178,81	18.245,60	0,02	7,29	18.245,60	0,05	7,29
p28r-v12	17.837,00	163,97	15.927,40	0,02	10,71	16.142,00	0,04	9,50
p29r-v12	18.576,80	226,45	16.318,00	0,02	12,16	16.515,40	0,06	11,10
p30r-v12	16.344,60	182,19	14.756,80	0,02	9,71	14.785,60	0,05	9,54
	Média	184,82	Média	0,02	10,75	Média	0,05	9,25

Tabela E.13: Resultados obtidos com as heurística gulosa e busca local para  $|E| = 13$ 

Problema	CPLEX		Heurística Gulosa			Busca Local		
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v13	17.084,40	328,27	14.128,80	0,01	17,30	14.708,80	0,05	13,91
p2r-v13	18.881,60	185,67	17.072,00	0,01	9,58	17.266,00	0,05	8,56
p3r-v13	16.175,40	353,81	14.403,00	0,01	10,96	14.793,20	0,04	8,55
p4r-v13	19.266,40	200,45	17.101,60	0,02	11,24	17.101,60	0,04	11,24
p5r-v13	17.824,80	193,99	15.464,60	0,02	13,24	15.989,60	0,04	10,30
p6r-v13	18.960,80	175,50	17.149,40	0,02	9,55	17.389,60	0,05	8,29
p7r-v13	19.037,20	192,24	17.853,80	0,02	6,22	17.853,80	0,03	6,22
p8r-v13	18.039,80	146,86	15.834,40	0,02	12,23	16.236,40	0,04	10,00
p9r-v13	14.840,80	130,56	13.116,60	0,02	11,62	13.438,80	0,06	9,45
p10r-v13	18.188,40	160,32	14.794,80	0,01	18,66	16.302,00	0,05	10,37
p11r-v13	16.262,40	169,67	14.633,20	0,02	10,02	14.662,00	0,05	9,84
p12r-v13	21.590,00	184,72	20.274,80	0,01	6,09	20.274,80	0,02	6,09
p13r-v13	19.212,00	261,02	17.675,40	0,02	8,00	17.675,40	0,04	8,00
p14r-v13	19.131,60	149,98	16.820,20	0,02	12,08	17.097,00	0,05	10,63
p15r-v13	19.631,00	276,73	17.679,40	0,02	9,94	18.705,00	0,06	4,72
p16r-v13	17.577,80	225,72	15.634,00	0,02	11,06	15.738,80	0,04	10,46
p17r-v13	16.835,60	185,78	14.376,00	0,02	14,61	14.882,60	0,05	11,60
p18r-v13	17.186,20	335,34	15.127,60	0,02	11,98	15.185,00	0,07	11,64
p19r-v13	17.554,80	167,01	15.679,00	0,02	10,69	15.698,80	0,05	10,57
p20r-v13	20.213,80	206,64	16.894,60	0,01	16,42	17.408,40	0,05	13,88
p21r-v13	16.666,80	271,60	15.285,40	0,02	8,29	15.413,60	0,03	7,52
p22r-v13	18.502,20	187,61	17.077,80	0,02	7,70	17.077,80	0,03	7,70
p23r-v13	21.122,40	203,63	19.243,60	0,02	8,89	19.412,00	0,05	8,10
p24r-v13	17.185,00	167,59	14.551,60	0,02	15,32	15.729,40	0,07	8,47
p25r-v13	16.717,80	185,49	14.814,00	0,02	11,39	14.925,40	0,03	10,72
p26r-v13	19.868,00	186,25	18.140,40	0,02	8,70	18.403,20	0,05	7,37
p27r-v13	19.679,80	214,63	18.034,80	0,02	8,36	18.202,40	0,04	7,51
p28r-v13	17.322,40	187,17	14.815,60	0,02	14,47	15.016,20	0,05	13,31
p29r-v13	19.002,80	232,27	17.819,20	0,02	6,23	17.836,00	0,05	6,14
p30r-v13	15.943,00	199,92	14.381,80	0,02	9,79	14.384,40	0,04	9,78
	Média	208,88	Média	0,02	11,02	Média	0,05	9,36

Tabela E.14: Resultados obtidos com as heurística gulosa e busca local para  $|E| = 14$ 

Problema	CPLEX		Heurística Gulosa			Busca Local		
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v14	16.966,40	333,87	14.164,80	0,02	16,51	14.373,20	0,04	15,28
p2r-v14	18.537,60	165,61	15.861,60	0,02	14,44	16.211,60	0,05	12,55
p3r-v14	16.407,00	393,23	14.869,60	0,02	9,37	15.124,60	0,05	7,82
p4r-v14	18.950,60	226,72	16.201,00	0,02	14,51	16.327,80	0,04	13,84
p5r-v14	17.766,00	222,82	15.524,80	0,02	12,62	16.103,60	0,05	9,36
p6r-v14	19.219,40	220,23	17.345,40	0,02	9,75	17.484,40	0,05	9,03
p7r-v14	18.697,20	225,61	17.261,40	0,01	7,68	17.306,40	0,03	7,44
p8r-v14	18.235,20	145,61	16.480,20	0,02	9,62	16.672,60	0,04	8,57
p9r-v14	15.274,40	112,84	13.552,40	0,02	11,27	13.706,80	0,06	10,26
p10r-v14	18.078,40	158,59	15.228,20	0,02	15,77	16.544,40	0,05	8,49
p11r-v14	16.540,40	188,61	14.743,40	0,02	10,86	14.759,00	0,05	10,77
p12r-v14	21.658,40	238,17	20.042,60	0,01	7,46	20.042,60	0,02	7,46
p13r-v14	19.043,00	297,68	17.467,00	0,02	8,28	17.526,00	0,04	7,97
p14r-v14	19.527,60	176,78	17.639,40	0,02	9,67	17.647,80	0,06	9,63
p15r-v14	20.238,80	197,20	18.048,80	0,02	10,82	18.941,80	0,06	6,41
p16r-v14	17.280,20	251,22	15.648,80	0,02	9,44	15.765,60	0,04	8,76
p17r-v14	16.905,40	263,00	14.428,40	0,02	14,65	14.821,00	0,05	12,33
p18r-v14	17.370,80	275,87	15.613,80	0,02	10,11	15.623,20	0,06	10,06
p19r-v14	17.780,40	171,04	15.461,00	0,02	13,04	15.551,00	0,06	12,54
p20r-v14	19.651,60	276,78	17.368,00	0,01	11,62	17.665,00	0,04	10,11
p21r-v14	16.532,00	254,20	14.904,80	0,02	9,84	14.904,80	0,03	9,84
p22r-v14	18.501,60	278,54	17.325,00	0,02	6,36	17.325,00	0,03	6,36
p23r-v14	21.017,60	243,56	19.244,20	0,02	8,44	19.314,00	0,05	8,11
p24r-v14	17.424,40	222,33	15.105,60	0,02	13,31	16.116,60	0,07	7,51
p25r-v14	16.733,80	192,83	14.841,20	0,02	11,31	14.878,60	0,04	11,09
p26r-v14	19.843,60	243,35	17.911,40	0,02	9,74	18.077,40	0,05	8,90
p27r-v14	19.342,20	302,38	17.386,20	0,02	10,11	17.386,20	0,05	10,11
p28r-v14	17.992,20	194,69	15.880,80	0,02	11,74	16.374,60	0,04	8,99
p29r-v14	18.408,40	284,45	16.571,00	0,02	9,98	16.656,00	0,04	9,52
p30r-v14	16.017,40	229,68	14.720,80	0,02	8,09	14.743,40	0,05	7,95
	Média	232,92	Média	0,02	10,88	Média	0,05	9,57

Tabela E.15: Resultados obtidos com as heurística gulosa e busca local para  $|E| = 15$ 

Problema	CPLEX		Heurística Gulosa			Busca Local		
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v15	16.619,00	328,35	14.486,00	0,02	12,83	14.889,60	0,06	10,41
p2r-v15	18.544,80	179,17	16.446,00	0,02	11,32	16.870,00	0,05	9,03
p3r-v15	16.251,00	428,88	14.181,20	0,02	12,74	14.378,20	0,04	11,52
p4r-v15	19.325,20	244,09	17.216,80	0,02	10,91	17.216,80	0,04	10,91
p5r-v15	17.818,60	263,02	15.976,20	0,02	10,34	16.143,00	0,05	9,40
p6r-v15	18.940,40	297,87	17.488,40	0,02	7,67	17.545,60	0,04	7,36
p7r-v15	18.835,00	255,90	17.453,60	0,02	7,33	17.514,80	0,03	7,01
p8r-v15	18.072,40	324,83	15.760,40	0,02	12,79	16.182,00	0,04	10,46
p9r-v15	14.906,20	122,38	13.461,20	0,02	9,69	13.726,40	0,05	7,91
p10r-v15	18.213,60	186,02	15.514,40	0,02	14,82	16.349,60	0,05	10,23
p11r-v15	16.415,00	192,24	14.913,40	0,02	9,15	14.927,60	0,04	9,06
p12r-v15	21.609,20	276,23	20.233,40	0,01	6,37	20.233,40	0,03	6,37
p13r-v15	19.318,00	372,41	17.595,80	0,02	8,92	17.595,80	0,04	8,92
p14r-v15	19.229,20	190,52	17.684,40	0,02	8,03	17.684,40	0,05	8,03
p15r-v15	19.911,20	230,77	17.186,40	0,01	13,68	18.082,20	0,05	9,19
p16r-v15	17.338,20	325,89	15.551,80	0,01	10,30	15.777,20	0,04	9,00
p17r-v15	16.949,00	208,70	14.869,80	0,02	12,27	14.916,60	0,05	11,99
p18r-v15	16.874,60	262,52	15.307,60	0,02	9,29	15.347,60	0,05	9,05
p19r-v15	17.585,80	173,47	15.713,60	0,02	10,65	15.870,40	0,05	9,75
p20r-v15	19.639,00	293,31	16.987,60	0,01	13,50	17.203,80	0,05	12,40
p21r-v15	16.548,00	361,47	15.012,60	0,01	9,28	15.039,60	0,03	9,12
p22r-v15	18.239,20	244,28	16.616,40	0,02	8,90	16.724,40	0,03	8,31
p23r-v15	20.943,60	244,63	19.291,40	0,02	7,89	19.291,40	0,05	7,89
p24r-v15	17.542,80	278,62	14.964,80	0,02	14,70	16.454,80	0,06	6,20
p25r-v15	16.886,20	228,15	14.825,00	0,02	12,21	15.039,40	0,04	10,94
p26r-v15	20.242,00	248,49	17.992,00	0,01	11,12	18.421,20	0,06	9,00
p27r-v15	19.149,60	339,16	17.406,20	0,02	9,10	17.443,60	0,05	8,91
p28r-v15	17.668,80	237,17	15.875,60	0,02	10,15	15.983,00	0,05	9,54
p29r-v15	18.771,40	425,09	17.419,40	0,02	7,20	17.512,20	0,05	6,71
p30r-v15	16.209,60	290,88	14.616,40	0,02	9,83	14.620,60	0,05	9,80
	Média	268,48	Média	0,02	10,43	Média	0,05	9,15

Tabela E.16: Resultados obtidos com as heurística gulosa e busca local para  $|E| = 16$ 

Problema	CPLEX		Heurística Gulosa			Busca Local		
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v16	16.874,80	391,06	14.353,20	0,02	14,94	14.714,60	0,05	12,80
p2r-v16	18.911,20	224,47	16.978,60	0,02	10,22	17.304,20	0,05	8,50
p3r-v16	16.300,80	346,68	14.026,20	0,02	13,95	14.464,20	0,04	11,27
p4r-v16	19.098,00	279,59	16.930,00	0,01	11,35	16.930,00	0,04	11,35
p5r-v16	17.769,60	304,89	15.643,60	0,02	11,96	15.821,40	0,04	10,96
p6r-v16	19.135,20	274,45	17.233,80	0,02	9,94	17.413,00	0,04	9,00
p7r-v16	18.890,20	260,07	17.187,80	0,02	9,01	17.289,00	0,03	8,48
p8r-v16	17.958,80	251,97	15.824,00	0,02	11,89	16.245,60	0,04	9,54
p9r-v16	15.105,40	147,23	13.486,00	0,02	10,72	13.706,80	0,06	9,26
p10r-v16	18.008,00	218,84	14.907,00	0,02	17,22	16.071,40	0,06	10,75
p11r-v16	16.538,80	199,68	14.482,00	0,02	12,44	14.513,20	0,05	12,25
p12r-v16	21.847,00	314,45	20.465,00	0,01	6,33	20.465,00	0,02	6,33
p13r-v16	18.810,80	360,83	17.235,80	0,02	8,37	17.289,60	0,04	8,09
p14r-v16	19.257,60	187,83	17.393,60	0,02	9,68	17.405,00	0,06	9,62
p15r-v16	19.927,60	229,51	17.784,40	0,02	10,75	18.668,40	0,05	6,32
p16r-v16	17.379,40	305,86	15.315,20	0,02	11,88	15.587,20	0,04	10,31
p17r-v16	17.011,00	261,38	14.509,20	0,02	14,71	14.660,60	0,04	13,82
p18r-v16	17.169,00	310,64	15.237,40	0,02	11,25	15.524,80	0,05	9,58
p19r-v16	17.835,20	198,29	15.635,00	0,02	12,34	15.792,80	0,06	11,45
p20r-v16	19.706,00	260,58	17.218,80	0,02	12,62	17.582,20	0,04	10,78
p21r-v16	16.805,00	325,84	15.501,60	0,01	7,76	15.501,60	0,03	7,76
p22r-v16	18.476,00	286,84	17.313,60	0,02	6,29	17.313,60	0,03	6,29
p23r-v16	21.070,40	331,89	19.331,40	0,02	8,25	19.432,80	0,06	7,77
p24r-v16	17.351,20	222,74	15.632,20	0,02	9,91	16.747,40	0,06	3,48
p25r-v16	16.764,00	188,40	15.126,00	0,02	9,77	15.204,20	0,04	9,30
p26r-v16	19.945,00	275,39	18.514,80	0,02	7,17	18.514,80	0,05	7,17
p27r-v16	19.686,40	349,55	18.185,60	0,02	7,62	18.192,40	0,06	7,59
p28r-v16	17.794,00	257,11	15.741,40	0,02	11,54	15.963,60	0,04	10,29
p29r-v16	18.527,40	291,71	16.795,80	0,01	9,35	16.955,40	0,05	8,48
p30r-v16	16.302,60	270,97	14.843,60	0,02	8,95	14.913,60	0,06	8,52
	Média	270,96	Média	0,02	10,61	Média	0,05	9,24

Tabela E.17: Resultados obtidos com as heurística gulosa e busca local para  $|E| = 17$ 

Problema	CPLEX		Heurística Gulosa			Busca Local		
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v17	17.079,40	417,43	14.220,80	0,02	16,74	14.653,80	0,04	14,20
p2r-v17	18.906,80	239,68	16.768,40	0,02	11,31	16.914,40	0,05	10,54
p3r-v17	15.789,00	433,53	13.708,40	0,02	13,18	14.342,80	0,04	9,16
p4r-v17	19.352,00	283,05	17.674,00	0,02	8,67	17.674,00	0,04	8,67
p5r-v17	17.567,20	274,45	15.329,80	0,02	12,74	15.522,40	0,04	11,64
p6r-v17	19.298,00	325,37	17.540,20	0,02	9,11	17.667,80	0,04	8,45
p7r-v17	18.878,20	262,55	17.620,60	0,02	6,66	17.620,60	0,03	6,66
p8r-v17	17.609,20	246,76	15.516,00	0,02	11,89	15.825,40	0,04	10,13
p9r-v17	15.015,00	214,61	13.391,60	0,02	10,81	13.672,20	0,05	8,94
p10r-v17	18.093,80	244,48	15.406,00	0,02	14,85	16.377,80	0,05	9,48
p11r-v17	16.387,00	192,65	14.093,60	0,02	14,00	14.432,40	0,06	11,93
p12r-v17	21.729,80	342,13	20.542,60	0,01	5,46	20.566,40	0,03	5,35
p13r-v17	18.939,20	387,85	17.366,80	0,02	8,30	17.366,80	0,04	8,30
p14r-v17	19.241,80	278,88	17.833,00	0,02	7,32	17.872,20	0,05	7,12
p15r-v17	19.796,20	298,37	17.825,20	0,01	9,96	18.588,40	0,07	6,10
p16r-v17	17.294,60	275,78	15.338,20	0,02	11,31	15.476,40	0,04	10,51
p17r-v17	16.719,80	323,83	14.681,00	0,02	12,19	15.166,00	0,05	9,29
p18r-v17	17.435,40	359,55	16.145,80	0,02	7,40	16.208,20	0,05	7,04
p19r-v17	17.777,80	222,18	15.267,20	0,02	14,12	15.453,00	0,06	13,08
p20r-v17	19.878,60	357,98	16.868,40	0,02	15,14	17.108,80	0,05	13,93
p21r-v17	16.694,80	403,03	15.290,20	0,02	8,41	15.290,20	0,03	8,41
p22r-v17	18.541,60	547,59	17.397,20	0,02	6,17	17.397,20	0,03	6,17
p23r-v17	21.119,20	353,53	19.345,60	0,02	8,40	19.469,40	0,05	7,81
p24r-v17	17.489,40	236,83	15.487,20	0,02	11,45	16.533,20	0,06	5,47
p25r-v17	16.819,40	268,81	14.757,60	0,02	12,26	14.795,80	0,04	12,03
p26r-v17	19.995,40	293,20	17.934,20	0,02	10,31	18.106,80	0,06	9,45
p27r-v17	19.557,60	387,43	17.765,00	0,02	9,17	17.789,20	0,05	9,04
p28r-v17	17.807,60	324,72	15.324,80	0,02	13,94	15.799,00	0,05	11,28
p29r-v17	18.473,60	495,97	16.923,80	0,02	8,39	16.992,20	0,05	8,02
p30r-v17	16.288,60	276,32	14.867,80	0,02	8,72	14.972,00	0,05	8,08
	Média	318,95	Média	0,02	10,61	Média	0,05	9,21

Tabela E.18: Resultados obtidos com as heurística gulosa e busca local para  $|E| = 130$ 

Problema	Melhor Solução		Heurística Gulosa			Busca Local		
	FO	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v130	17.483,99	184,77	14.725,20	0,25	15,78	14.989,40	0,71	14,27
p2r-v130	18.859,01	212,46	16.556,40	0,27	12,21	16.755,80	0,83	11,15
p3r-v130	16.677,21	252,10	14.884,00	0,25	10,75	15.189,80	0,68	8,92
p4r-v130	19.356,62	251,13	17.043,20	0,23	11,95	17.048,20	0,68	11,93
p5r-v130	18.291,61	159,13	15.978,60	0,25	12,65	16.273,40	0,64	11,03
p6r-v130	19.690,81	164,86	18.377,40	0,24	6,67	18.398,40	0,64	6,56
p7r-v130	19.132,43	160,50	18.511,20	0,25	3,25	18.511,20	0,44	3,25
p8r-v130	18.156,21	135,70	16.050,00	0,28	11,60	16.450,20	0,68	9,40
p9r-v130	15.121,82	115,60	13.928,40	0,29	7,89	14.219,20	0,90	5,97
p10r-v130	18.321,02	149,61	14.957,80	0,24	18,36	16.587,20	0,81	9,46
p11r-v130	16.578,22	145,89	15.001,00	0,25	9,51	15.081,00	0,72	9,03
p12r-v130	21.617,22	230,84	20.596,20	0,23	4,72	20.596,20	0,36	4,72
p13r-v130	19.265,62	137,83	18.061,60	0,24	6,25	18.073,20	0,67	6,19
p14r-v130	19.258,01	170,79	17.597,00	0,30	8,63	17.630,40	0,78	8,45
p15r-v130	21.421,23	216,57	18.393,20	0,25	14,14	19.143,00	0,96	10,64
p16r-v130	17.072,01	178,40	15.964,00	0,25	6,49	16.102,20	0,62	5,68
p17r-v130	16.888,81	147,48	15.090,20	0,26	10,65	15.703,40	0,75	7,02
p18r-v130	17.597,41	208,81	16.610,40	0,24	5,61	16.610,40	0,93	5,61
p19r-v130	17.967,60	193,85	16.315,00	0,25	9,20	16.555,20	0,90	7,86
p20r-v130	19.689,61	145,04	17.764,60	0,26	9,78	18.243,00	0,70	7,35
p21r-v130	16.696,01	272,04	15.634,00	0,22	6,36	15.634,00	0,48	6,36
p22r-v130	18.527,39	190,04	17.437,00	0,25	5,89	17.444,80	0,50	5,84
p23r-v130	20.842,21	173,60	19.439,60	0,31	6,73	19.496,20	0,84	6,46
p24r-v130	18.652,43	214,61	15.927,40	0,25	14,61	17.106,20	0,91	8,29
p25r-v130	16.822,40	161,22	15.027,80	0,28	10,67	15.350,40	0,68	8,75
p26r-v130	20.046,02	177,04	18.321,60	0,25	8,60	18.352,40	0,72	8,45
p27r-v130	19.295,42	117,62	18.161,80	0,25	5,88	18.300,60	0,66	5,16
p28r-v130	17.951,61	161,39	15.893,80	0,26	11,46	16.086,00	0,66	10,39
p29r-v130	18.818,41	159,37	17.843,20	0,26	5,18	17.843,20	0,78	5,18
p30r-v130	16.208,22	167,31	15.075,20	0,26	6,99	15.104,60	0,82	6,81
	Média	178,52	Média	0,25	9,28	Média	0,72	7,87

Tabela E.19: Resultados obtidos com as metaheurística GRASP para  $|E| = 1$

Problema	CPLEX				GRASP				$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$			
	Melhor caso		Pior caso		Média		Gap (%)	Gap (%)					
	Sol.	Obj.	FO	GPUt (s)	FO	GPUt (s)					FO	GPUt (s)	
p1r-v1	14.558,40	2,42	14.154,80	30,61	2,77	13.756,40	29,96	5,51	13.934,80	30,28	4,28	128,51	0,23
p2r-v1	16.994,40	2,54	16.698,81	33,03	1,74	16.217,21	31,76	4,57	16.461,92	32,34	3,13	143,02	0,45
p3r-v1	11.675,80	2,11	11.486,61	27,24	1,62	11.184,21	25,53	4,21	11.394,12	26,18	2,41	84,07	0,59
p4r-v1	14.012,80	2,20	13.542,01	37,41	3,36	13.374,41	36,01	4,56	13.450,01	36,92	4,02	44,99	0,44
p5r-v1	16.548,00	2,45	16.351,01	24,21	1,19	16.074,21	23,70	2,86	16.232,08	23,99	1,91	102,91	0,16
p6r-v1	18.842,00	2,45	18.680,41	33,31	0,86	18.197,61	31,77	3,42	18.422,36	32,37	2,23	166,36	0,45
p7r-v1	12.766,60	1,84	12.657,61	32,69	0,85	12.466,40	31,24	2,35	12.517,57	31,75	1,95	76,44	0,43
p8r-v1	12.675,20	2,20	12.537,01	36,58	1,09	12.278,81	35,26	3,13	12.440,39	35,77	1,85	80,55	0,47
p9r-v1	12.964,00	2,15	12.751,01	36,11	1,64	12.694,40	34,93	2,08	12.707,17	35,64	1,98	18,37	0,33
p10r-v1	14.177,20	2,28	13.918,42	26,20	1,83	13.806,82	25,31	2,61	13.862,26	25,73	2,22	29,25	0,28
p11r-v1	13.721,60	2,17	13.505,61	23,61	1,57	13.199,62	22,84	3,80	13.372,81	23,23	2,54	87,67	0,23
p12r-v1	16.866,40	2,12	16.712,21	37,56	0,91	16.465,40	36,36	2,38	16.642,80	37,14	1,33	69,17	0,34
p13r-v1	13.421,80	2,50	13.049,41	30,61	2,77	12.778,21	29,13	4,80	12.924,79	30,08	3,70	88,25	0,39
p14r-v1	16.327,60	2,03	16.114,41	34,01	1,31	15.737,61	32,36	3,61	15.924,92	33,12	2,47	124,36	0,48
p15r-v1	14.431,60	2,04	14.082,41	32,92	2,42	13.920,81	32,28	3,54	14.035,61	32,59	2,74	67,47	0,21
p16r-v1	15.097,20	2,36	14.872,81	30,83	1,49	14.626,81	29,31	3,12	14.748,75	30,14	2,31	81,50	0,39
p17r-v1	13.126,60	2,34	12.689,22	24,75	3,33	12.556,21	24,24	4,35	12.597,90	24,49	4,03	46,57	0,17
p18r-v1	13.957,20	2,25	13.799,40	31,24	1,13	13.424,40	30,11	3,82	13.649,55	30,71	2,20	125,73	0,41
p19r-v1	14.088,60	2,09	13.545,20	22,39	3,86	13.276,40	20,92	5,76	13.383,20	21,51	5,01	90,25	0,51
p20r-v1	17.898,40	2,42	17.704,00	30,58	1,09	17.586,20	29,92	1,74	17.643,99	30,18	1,42	33,53	0,19
p21r-v1	11.287,80	2,07	11.068,21	33,95	1,95	10.829,40	32,26	4,06	10.954,24	33,07	2,96	86,07	0,60
p22r-v1	12.848,60	1,86	12.750,81	33,48	0,76	12.611,60	32,65	1,84	12.684,77	33,13	1,28	53,95	0,33
p23r-v1	14.503,40	1,93	14.389,00	36,58	0,79	14.205,40	35,51	2,05	14.322,47	36,15	1,25	56,34	0,36
p24r-v1	16.031,80	2,62	15.834,41	22,59	1,23	15.737,00	21,83	1,84	15.781,34	22,18	1,56	29,65	0,22
p25r-v1	12.462,20	2,29	12.055,00	30,94	3,27	11.839,80	29,25	4,99	11.927,33	30,09	4,29	82,40	0,47
p26r-v1	14.928,60	2,29	14.734,41	24,64	1,30	14.501,40	24,00	2,86	14.644,28	24,33	1,90	68,67	0,21
p27r-v1	13.930,20	2,14	13.618,00	31,60	2,24	13.433,80	28,65	3,56	13.515,98	30,04	2,97	56,69	0,77
p28r-v1	11.527,80	1,92	11.398,21	32,53	1,12	11.353,00	30,66	1,52	11.383,19	31,73	1,25	14,44	0,67
p29r-v1	14.161,40	2,29	13.908,80	26,99	1,78	13.867,60	26,26	2,07	13.892,98	26,55	1,90	15,90	0,21
p30r-v1	14.005,60	2,64	13.664,81	24,70	2,43	13.358,02	24,05	4,62	13.505,51	24,37	3,57	103,50	0,18
	Média	2,23	Média	30,46	1,79	Média	29,27	3,39	Média	29,86	2,56	75,22	0,37

Tabela E.20: Resultados obtidos com as metaheurística GRASP para  $|E| = 2$

Problema	CPLEX				GRASP											
	Sol. Ótima		GPUt (s)		Melhor caso				Pior caso				Média		$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$
	Sol.	Ótima	GPUt (s)	Gap (%)	FO	GPUt (s)	Gap (%)	FO	GPUt (s)	Gap (%)	FO	GPUt (s)	Gap (%)	FO		
p1r-v2	16.784,60	11,09	16.090,00	30,84	4,14	15.745,60	29,27	6,19	15.904,40	29,95	5,24	106,69	0,50			
p2r-v2	17.179,40	7,11	16.724,01	33,99	2,65	16.165,21	32,75	5,90	16.355,54	33,16	4,80	193,23	0,39			
p3r-v2	15.383,00	8,89	14.628,41	25,40	4,91	14.382,61	24,47	6,50	14.503,83	24,81	5,72	82,51	0,29			
p4r-v2	15.579,20	8,27	14.925,41	39,88	4,20	14.614,01	37,85	6,20	14.782,36	38,73	5,11	101,94	0,55			
p5r-v2	17.161,00	7,96	16.616,80	24,74	3,17	16.355,60	23,84	4,69	16.494,40	24,30	3,88	84,52	0,30			
p6r-v2	18.176,60	7,89	17.883,01	34,98	1,62	17.551,60	33,41	3,44	17.732,57	34,13	2,44	83,77	0,47			
p7r-v2	18.094,60	7,86	17.970,62	33,18	0,69	17.769,22	31,89	1,80	17.873,73	32,63	1,22	56,11	0,43			
p8r-v2	16.486,60	5,77	16.119,81	36,34	2,22	15.713,21	34,93	4,69	15.963,36	35,64	3,17	126,10	0,43			
p9r-v2	11.652,20	5,24	11.408,41	37,46	2,09	11.202,01	36,02	3,86	11.288,36	36,81	3,12	56,77	0,40			
p10r-v2	16.580,00	6,19	16.017,22	25,86	3,39	15.859,21	24,03	4,35	15.946,00	24,86	3,82	55,19	0,56			
p11r-v2	15.650,20	6,30	15.093,81	24,66	3,56	14.717,61	23,46	5,96	14.898,99	24,06	4,80	111,50	0,38			
p12r-v2	17.610,40	7,36	17.299,62	37,99	1,76	16.520,21	34,61	6,19	16.892,74	36,22	4,08	240,17	1,02			
p13r-v2	17.614,00	8,72	16.837,62	30,23	4,41	16.370,21	29,22	7,06	16.593,63	29,58	5,79	155,94	0,29			
p14r-v2	19.224,80	7,41	18.799,01	35,70	2,21	18.467,21	34,30	3,94	18.623,92	35,15	3,13	98,52	0,41			
p15r-v2	20.322,00	7,41	19.692,42	33,74	3,10	19.238,22	32,37	5,33	19.487,58	33,26	4,11	154,89	0,39			
p16r-v2	15.629,20	8,70	15.315,79	32,35	2,01	14.998,00	31,34	4,04	15.168,99	31,66	2,94	84,36	0,37			
p17r-v2	16.599,60	9,73	15.672,02	25,44	5,59	15.446,82	24,26	6,94	15.526,07	24,87	6,47	84,65	0,45			
p18r-v2	15.785,80	8,38	15.126,01	32,68	4,18	14.754,41	31,52	6,53	14.981,95	32,36	5,09	92,57	0,33			
p19r-v2	15.884,60	5,73	15.774,20	22,42	0,70	15.328,00	21,60	3,50	15.567,18	21,92	2,00	140,81	0,23			
p20r-v2	18.166,40	8,10	17.731,21	32,10	2,40	17.486,21	30,56	3,74	17.602,46	31,47	3,10	82,14	0,48			
p21r-v2	14.553,80	7,71	14.014,01	34,31	3,71	13.267,61	32,13	8,84	13.522,66	33,18	7,08	199,52	0,70			
p22r-v2	17.623,20	10,86	17.410,40	34,90	1,21	16.807,22	33,33	4,63	17.039,46	34,25	3,31	201,12	0,41			
p23r-v2	19.222,40	7,41	18.621,40	35,67	3,13	18.128,81	34,17	5,69	18.443,71	34,76	4,05	160,67	0,53			
p24r-v2	15.134,80	7,22	14.802,21	23,00	2,20	14.572,40	22,32	3,72	14.688,15	22,64	2,95	88,48	0,22			
p25r-v2	15.304,80	5,79	14.668,19	31,58	4,16	14.233,00	30,53	7,00	14.480,65	31,14	5,38	143,62	0,33			
p26r-v2	19.042,00	8,61	18.534,61	26,14	2,66	17.976,42	24,87	5,60	18.243,27	25,52	4,19	202,89	0,45			
p27r-v2	16.504,00	6,86	16.079,40	33,26	2,57	15.893,40	32,35	3,70	15.996,47	32,69	3,08	56,15	0,27			
p28r-v2	17.249,20	7,64	16.950,60	33,45	1,73	16.759,20	31,84	2,89	16.851,73	32,65	2,30	72,41	0,47			
p29r-v2	17.381,60	8,25	16.901,21	28,19	2,76	16.549,62	26,31	4,79	16.723,90	27,51	3,78	115,14	0,47			
p30r-v2	15.325,00	8,72	14.994,01	26,70	2,16	14.307,21	25,47	6,64	14.758,60	26,08	3,70	222,01	0,36			
Média		7,80	Média	31,24	2,84	Média	29,83	5,15	Média	30,53	4,00	121,81	0,43			

Tabela E.21: Resultados obtidos com as metaheurística GRASP para  $|E| = 3$

Problema	CPLEX				GRASP				$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$	
	Melhor caso		Pior caso		Média		Gap (%)	Gap (%)			
	Sol.	Obj.	FO	GPUt (s)	FO	GPUt (s)					FO
p1r-v3	16.333,60	28,94	15.283,60	31,25	14.726,40	29,83	14.951,82	30,35	8,46	189,65	0,39
p2r-v3	18.240,40	16,36	17.385,81	35,45	16.969,00	34,20	17.153,66	34,72	5,96	145,68	0,40
p3r-v3	16.281,60	24,71	15.323,41	26,59	15.080,01	25,36	15.188,61	25,96	6,71	85,03	0,35
p4r-v3	17.046,40	16,40	16.240,01	39,75	15.749,61	36,66	16.057,55	38,17	5,80	162,54	0,95
p5r-v3	17.643,80	26,75	17.128,61	25,12	16.571,21	24,01	16.896,50	24,68	4,24	186,14	0,29
p6r-v3	18.134,80	16,11	17.491,21	35,01	17.212,01	33,27	17.365,59	34,30	4,24	95,85	0,52
p7r-v3	18.630,00	14,74	17.949,02	32,47	17.770,22	31,72	17.883,69	32,08	4,01	55,86	0,28
p8r-v3	17.283,60	16,24	16.918,21	37,12	16.489,41	35,69	16.702,81	36,33	3,36	140,16	0,41
p9r-v3	14.316,80	9,30	14.058,41	37,51	13.964,40	36,75	14.017,90	37,15	2,09	31,36	0,21
p10r-v3	17.760,20	12,99	17.130,43	25,12	16.857,23	23,89	17.027,63	24,69	4,12	85,62	0,37
p11r-v3	15.964,40	14,20	15.196,81	24,27	14.977,22	23,56	15.082,56	23,85	5,52	75,10	0,25
p12r-v3	20.755,40	16,80	19.983,39	36,71	19.596,62	35,07	19.819,68	36,15	4,51	126,94	0,56
p13r-v3	19.133,00	26,54	18.407,00	31,24	17.967,62	30,18	18.222,19	30,73	4,76	131,64	0,31
p14r-v3	18.435,40	15,63	17.845,81	36,93	17.371,41	35,47	17.647,74	36,12	4,27	176,36	0,46
p15r-v3	19.724,40	16,69	19.113,22	33,73	18.792,81	32,28	18.979,22	33,31	3,78	95,45	0,42
p16r-v3	16.129,20	15,23	15.492,80	32,90	15.129,00	32,17	15.315,71	32,60	5,04	122,84	0,23
p17r-v3	15.857,60	19,98	15.013,42	25,98	14.447,61	25,14	14.666,31	25,58	7,51	166,64	0,25
p18r-v3	17.193,00	32,50	16.452,40	32,65	15.943,40	31,87	16.182,87	32,25	5,88	143,81	0,27
p19r-v3	17.354,20	14,55	16.864,80	21,93	16.595,60	20,66	16.738,00	21,63	3,55	73,48	0,35
p20r-v3	19.978,40	20,08	19.181,62	31,56	18.737,41	30,46	19.080,39	31,11	4,49	138,52	0,31
p21r-v3	15.725,60	17,89	14.954,81	32,95	14.372,61	32,14	14.492,54	32,54	7,84	158,39	0,21
p22r-v3	18.338,60	30,75	17.951,59	36,25	17.506,00	33,64	17.719,38	35,50	3,38	125,61	0,73
p23r-v3	19.077,20	16,55	18.711,40	37,63	18.404,01	36,43	18.518,19	37,03	2,93	101,44	0,39
p24r-v3	17.084,80	16,10	16.563,00	23,54	16.246,41	22,39	16.455,15	22,92	3,69	99,17	0,35
p25r-v3	16.691,20	15,82	16.167,80	33,38	15.750,20	31,90	15.995,11	32,71	4,17	121,01	0,41
p26r-v3	19.502,40	17,97	18.981,81	26,51	18.565,43	25,10	18.735,40	25,82	3,93	130,84	0,54
p27r-v3	18.978,40	16,52	18.504,02	34,13	18.214,62	31,86	18.378,11	33,05	3,16	116,79	0,60
p28r-v3	17.280,60	17,97	16.830,60	32,27	16.706,00	31,27	16.763,60	32,05	2,99	52,69	0,29
p29r-v3	17.334,20	18,72	16.837,01	28,43	16.073,01	26,75	16.439,54	27,49	5,16	265,06	0,52
p30r-v3	15.168,20	20,72	14.394,42	26,29	14.002,81	25,58	14.213,01	25,89	6,30	130,23	0,19
	Média	18,79	Média	31,49	Média	30,18	Média	30,89	4,73	124,33	0,39

Tabela E.22: Resultados obtidos com as metaheurística GRASP para  $|E| = 4$

Problema	CPLEX				GRASP				$\sigma_{fo}$	$\sigma_t$		
	Melhor caso		Pior caso		Média		Gap (%)	Gap (%)				
	Sol.	Obj.	Obj.	Obj.	FO	FO						
p1r-v4	16.298,80	53,12	15.474,41	31,42	14.910,40	30,14	8,52	15.203,17	30,72	6,72	169,85	0,39
p2r-v4	18.373,80	29,31	17.764,61	35,36	17.161,21	33,75	6,60	17.583,81	34,50	4,30	176,54	0,47
p3r-v4	15.834,40	43,66	14.724,81	26,75	14.164,20	25,52	10,55	14.590,88	25,96	7,85	161,41	0,37
p4r-v4	18.535,80	27,10	18.004,61	38,65	17.597,01	37,19	5,06	17.750,96	37,93	4,23	118,35	0,48
p5r-v4	17.832,40	34,69	17.240,41	25,23	16.950,42	24,92	4,95	17.048,38	25,07	4,40	79,59	0,11
p6r-v4	18.808,80	26,60	18.072,40	34,18	17.505,61	32,99	6,93	17.747,01	33,72	5,65	158,65	0,33
p7r-v4	18.315,00	37,91	17.643,03	33,29	17.318,82	32,10	5,44	17.485,09	32,73	4,53	111,34	0,37
p8r-v4	16.764,00	19,13	16.290,81	36,72	15.897,01	34,80	5,17	16.100,67	35,70	3,96	132,19	0,46
p9r-v4	14.953,00	24,63	14.525,81	38,00	14.226,01	37,19	4,86	14.426,32	37,55	3,52	88,73	0,26
p10r-v4	18.448,40	24,99	18.011,83	25,88	17.579,63	24,77	4,71	17.910,81	25,17	2,91	118,27	0,31
p11r-v4	16.588,00	23,81	15.923,03	24,14	15.676,82	23,54	5,49	15.778,88	23,88	4,88	93,36	0,17
p12r-v4	21.674,20	83,01	20.993,22	37,09	20.568,39	35,85	5,10	20.769,39	36,63	4,17	121,44	0,38
p13r-v4	19.184,80	40,64	18.607,81	30,75	18.186,01	29,37	5,21	18.396,01	30,17	4,11	148,77	0,39
p14r-v4	18.641,20	27,05	18.172,01	36,92	17.863,41	34,69	4,17	18.028,39	36,17	3,29	102,85	0,80
p15r-v4	20.000,00	29,70	19.264,44	35,10	18.766,43	33,77	6,17	19.064,63	34,48	4,68	195,75	0,44
p16r-v4	16.547,20	26,49	15.979,60	32,46	15.675,80	30,89	5,27	15.848,82	31,53	4,22	96,28	0,45
p17r-v4	16.090,80	29,47	15.375,82	26,71	15.093,42	24,96	6,20	15.229,00	25,90	5,36	82,53	0,45
p18r-v4	16.774,80	32,76	16.079,40	33,90	15.565,60	32,45	7,21	15.752,56	33,11	6,09	187,21	0,47
p19r-v4	17.457,60	25,10	17.069,01	21,99	16.392,00	21,30	6,10	16.789,58	21,59	3,83	173,48	0,25
p20r-v4	19.331,80	31,15	18.112,01	31,40	17.764,21	30,72	8,11	17.976,75	31,11	7,01	94,64	0,23
p21r-v4	16.564,40	41,01	15.663,01	34,27	15.201,61	31,83	8,23	15.400,88	32,92	7,02	146,62	0,85
p22r-v4	17.525,20	58,94	16.789,61	36,32	16.433,80	34,90	6,23	16.587,62	35,70	5,35	122,96	0,46
p23r-v4	20.463,20	35,77	19.693,81	36,44	19.220,20	35,33	6,07	19.478,13	36,07	4,81	155,77	0,30
p24r-v4	17.627,00	27,14	17.220,81	24,08	16.760,41	23,19	4,92	16.932,65	23,66	3,94	149,02	0,32
p25r-v4	16.943,80	29,06	16.082,60	33,04	15.358,00	31,31	9,36	15.812,73	32,18	6,68	197,02	0,46
p26r-v4	19.383,00	33,21	18.783,82	26,57	18.310,23	25,84	5,53	18.499,91	26,29	4,56	168,73	0,21
p27r-v4	19.496,80	31,03	18.937,00	34,13	18.506,62	32,03	5,08	18.671,23	32,79	4,23	127,71	0,62
p28r-v4	17.419,00	28,13	17.045,00	34,15	16.603,80	32,07	4,68	16.779,98	33,08	3,67	143,61	0,69
p29r-v4	17.895,20	39,78	17.346,01	27,57	16.729,40	26,53	6,51	17.011,41	27,17	4,94	181,37	0,31
p30r-v4	15.743,20	30,86	15.082,81	26,83	14.550,62	24,83	7,58	14.788,81	25,92	6,06	187,70	0,60
	Média		Média		Média			Média			Média	
		34,18		31,64		30,29	6,20		30,98	4,90	139,72	0,41

Tabela E.23: Resultados obtidos com as metaheurística GRASP para  $|E| = 5$

Problema	CPLEX			GRASP						$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$		
	Sol.	Obj.	CPUt. (s)	Melhor caso			Pior caso					Média	
				FO	CPUt. (s)	Gap (%)	FO	CPUt. (s)	Gap (%)			FO	CPUt. (s)
p1r-v5	16.530,60	62,49	15.459,00	32,44	6,48	14.925,20	31,38	9,71	15.204,04	31,93	8,02	166,67	0,34
p2r-v5	18.248,80	44,44	17.680,40	36,16	3,11	17.129,60	34,41	6,13	17.439,56	35,46	4,43	174,05	0,51
p3r-v5	16.194,40	71,40	15.210,01	25,68	6,08	14.875,80	25,30	8,14	15.025,15	25,53	7,22	115,93	0,14
p4r-v5	19.082,00	39,22	18.146,42	39,11	4,90	17.801,22	37,10	6,71	17.998,42	38,05	5,68	118,23	0,66
p5r-v5	17.608,00	51,87	16.992,20	25,91	3,50	16.680,81	25,18	5,27	16.848,08	25,56	4,32	92,30	0,21
p6r-v5	19.514,00	44,60	19.088,01	34,81	2,18	18.401,21	33,12	5,70	18.692,83	33,91	4,21	232,92	0,54
p7r-v5	18.573,20	54,79	18.137,41	33,91	2,35	17.520,21	32,31	5,67	17.748,80	33,13	4,44	183,57	0,45
p8r-v5	17.793,00	37,63	17.281,21	38,53	2,88	16.900,01	36,99	5,02	17.146,17	37,64	3,64	125,54	0,48
p9r-v5	14.941,20	29,47	14.601,41	39,22	2,27	14.400,61	38,23	3,62	14.486,32	38,72	3,04	65,13	0,27
p10r-v5	18.312,00	54,85	17.584,03	25,88	3,98	17.144,82	24,36	6,37	17.372,12	25,32	5,13	142,95	0,46
p11r-v5	15.807,00	34,04	15.132,42	23,87	4,27	14.923,02	23,32	5,59	15.022,60	23,55	4,96	77,34	0,19
p12r-v5	21.666,20	48,30	21.159,40	36,95	2,34	20.642,21	34,79	4,73	20.879,31	36,13	3,63	145,02	0,72
p13r-v5	19.397,60	52,68	18.712,61	31,50	3,53	18.370,81	29,72	5,29	18.518,34	30,34	4,53	106,53	0,61
p14r-v5	18.842,00	39,05	18.494,41	36,93	1,84	18.138,41	35,39	3,73	18.318,67	36,40	2,78	125,57	0,38
p15r-v5	20.398,60	41,39	19.966,82	34,16	2,12	19.774,80	32,98	3,06	19.833,03	33,77	2,77	58,18	0,41
p16r-v5	17.208,80	44,79	16.479,60	33,31	4,24	15.965,60	31,34	7,22	16.290,24	32,32	5,34	157,59	0,54
p17r-v5	16.391,20	69,42	15.601,42	26,49	4,82	14.973,82	25,66	8,65	15.393,75	26,06	6,09	221,36	0,25
p18r-v5	17.461,00	52,99	16.853,20	34,28	3,48	16.186,21	32,85	7,30	16.460,62	33,45	5,73	178,85	0,41
p19r-v5	17.706,00	33,01	17.236,40	21,97	2,65	16.847,80	21,13	4,85	17.041,80	21,72	3,75	128,52	0,25
p20r-v5	19.982,00	60,33	19.143,40	33,00	4,20	18.902,61	31,54	5,40	19.054,01	32,14	4,64	77,53	0,41
p21r-v5	16.578,20	60,39	15.797,62	34,92	4,71	15.134,21	32,90	8,71	15.499,65	33,79	6,51	181,04	0,72
p22r-v5	18.240,40	82,56	17.681,21	36,41	3,07	17.094,00	34,05	6,28	17.377,79	34,96	4,73	198,22	0,69
p23r-v5	20.363,80	59,22	19.167,21	38,14	5,88	18.479,62	36,69	9,25	18.926,82	37,43	7,06	207,12	0,51
p24r-v5	17.359,60	40,45	16.964,21	24,31	2,28	16.490,21	23,44	5,01	16.748,32	23,80	3,52	151,37	0,27
p25r-v5	16.493,60	45,61	15.704,59	33,81	4,78	15.197,80	30,79	7,86	15.496,30	31,91	6,05	195,66	0,79
p26r-v5	18.742,80	44,37	18.184,62	26,22	2,98	17.780,22	25,04	5,14	18.009,62	25,66	3,91	138,74	0,37
p27r-v5	19.351,80	49,12	18.826,21	33,19	2,72	18.421,61	31,95	4,81	18.633,00	32,47	3,71	148,95	0,36
p28r-v5	17.656,60	42,68	17.317,39	34,07	1,92	17.062,80	31,56	3,36	17.128,16	32,65	2,99	72,88	0,65
p29r-v5	18.087,40	48,28	17.501,41	27,60	3,24	16.821,01	26,83	7,00	17.168,56	27,23	5,08	219,35	0,29
p30r-v5	15.899,80	48,50	15.418,82	26,72	3,03	15.097,42	25,80	5,05	15.237,60	26,31	4,16	94,65	0,27
Média		49,60	Média	31,98	3,53	Média	30,54	6,02	Média	31,24	4,74	143,39	0,44

Tabela E.24: Resultados obtidos com as metaheurística GRASP para  $|E| = 6$

Problema	CPLEX				GRASP				$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$		
	Melhor caso		Pior caso		Média		Gap (%)	Gap (%)				
	Sol.	Obj.	Obj.	Gap (%)	Obj.	Gap (%)						
p1r-v6	17.112,00	87,33	16.075,41	31,97	15.433,20	30,04	9,81	15.773,16	30,71	7,82	203,25	0,47
p2r-v6	18.734,20	56,19	18.003,40	34,50	17.628,40	33,05	5,90	17.800,84	33,79	4,98	113,22	0,52
p3r-v6	15.805,40	87,16	14.905,41	26,44	14.355,61	25,28	9,17	14.597,43	25,96	7,64	161,47	0,38
p4r-v6	18.970,00	72,37	18.359,42	39,80	17.643,01	37,43	7,00	18.007,31	38,44	5,07	219,54	0,63
p5r-v6	18.103,80	68,62	17.536,01	26,38	17.171,38	25,27	5,15	17.368,44	25,87	4,06	106,18	0,36
p6r-v6	18.771,40	81,17	17.924,21	34,37	17.432,81	32,73	7,13	17.690,49	33,70	5,76	146,16	0,51
p7r-v6	18.963,60	45,02	18.473,62	33,81	18.014,61	32,33	5,00	18.294,32	33,28	3,53	181,99	0,50
p8r-v6	17.474,20	46,93	16.655,21	36,53	16.538,02	34,56	5,36	16.589,59	35,32	5,06	52,13	0,68
p9r-v6	14.492,20	37,81	14.011,81	39,48	13.756,41	37,87	5,08	13.912,65	38,82	4,00	76,46	0,46
p10r-v6	17.963,60	68,30	17.282,63	26,20	16.939,04	25,50	5,70	17.178,32	25,86	4,37	84,88	0,23
p11r-v6	16.566,60	53,71	16.161,22	24,71	15.314,62	23,46	7,56	15.627,49	24,14	5,67	227,82	0,31
p12r-v6	21.572,60	91,01	20.916,80	38,42	20.375,20	35,22	5,55	20.649,81	36,58	4,28	176,81	1,06
p13r-v6	18.940,20	70,22	18.247,42	31,52	17.596,40	30,14	7,09	17.943,32	30,79	5,26	222,81	0,41
p14r-v6	18.951,80	48,55	18.409,21	37,20	17.887,61	35,58	5,62	18.155,07	36,22	4,20	154,58	0,50
p15r-v6	20.126,40	85,04	19.503,80	34,71	18.924,02	33,84	5,97	19.214,52	34,13	4,53	164,45	0,27
p16r-v6	17.147,00	86,86	16.566,80	33,07	16.158,40	31,28	5,77	16.357,11	32,19	4,61	126,52	0,52
p17r-v6	16.173,80	72,06	15.176,42	26,59	14.880,62	25,48	8,00	15.052,77	26,06	6,93	102,44	0,36
p18r-v6	17.375,20	88,72	16.281,40	33,75	15.611,00	32,50	10,15	16.105,80	33,18	7,31	185,60	0,41
p19r-v6	17.771,40	49,47	17.411,80	22,10	17.242,80	21,38	2,97	17.318,24	21,75	2,55	58,94	0,26
p20r-v6	19.878,00	61,46	19.101,61	32,34	18.684,02	31,35	6,01	18.943,36	32,03	4,70	116,40	0,29
p21r-v6	15.979,20	74,08	15.293,22	34,71	14.518,82	32,55	9,14	14.980,79	33,58	6,25	229,93	0,80
p22r-v6	18.603,00	52,26	18.200,19	37,17	17.594,60	35,60	5,42	17.939,16	36,37	3,57	202,31	0,53
p23r-v6	21.005,80	63,43	20.185,41	37,76	19.256,40	35,73	8,33	19.882,21	36,81	5,35	322,27	0,74
p24r-v6	17.436,40	64,69	16.841,60	24,50	16.268,81	23,35	6,70	16.596,03	23,71	4,82	195,49	0,35
p25r-v6	16.966,60	57,22	16.018,60	33,24	15.668,99	31,69	7,65	15.873,43	32,59	6,44	99,25	0,54
p26r-v6	19.733,80	70,12	19.213,41	26,53	18.501,80	25,22	6,24	18.832,89	25,96	4,57	195,33	0,40
p27r-v6	19.221,60	61,09	18.675,01	33,60	18.152,01	32,00	5,56	18.489,10	32,69	3,81	153,26	0,55
p28r-v6	17.712,60	63,60	17.275,79	33,36	16.897,39	31,44	4,60	17.142,96	32,60	3,22	123,07	0,55
p29r-v6	18.358,20	62,73	17.799,39	28,00	17.251,01	27,03	6,03	17.590,40	27,40	4,18	186,99	0,29
p30r-v6	15.891,20	66,47	15.359,62	27,99	14.694,62	26,59	7,53	15.113,73	27,08	4,89	222,36	0,45
Média			Média		Média			Média				
			66,46	32,03	3,72	30,52	6,57	31,25	4,98		160,40	0,48

Tabela E.25: Resultados obtidos com as metaheurística GRASP para  $|E| = 7$

Problema	CPLEX				GRASP				$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$			
	Melhor caso		Pior caso		Média		Gap (%)	Gap (%)					
	Sol.	Obj.	Obj.	Obj.	Obj.	Obj.							
p1r-v7	16.792,40	107,69	15.821,00	32,51	5,78	15.221,60	30,08	9,35	15.481,37	31,08	7,81	185,00	0,72
p2r-v7	18.666,20	68,09	18.023,00	36,84	3,45	17.373,60	34,15	6,92	17.751,31	35,41	4,90	194,30	0,73
p3r-v7	15.939,80	127,16	14.915,61	25,94	6,43	14.347,01	25,14	9,99	14.730,77	25,55	7,58	198,11	0,30
p4r-v7	19.262,60	67,38	18.652,82	40,18	3,17	18.221,81	38,28	5,40	18.453,69	38,96	4,20	173,93	0,59
p5r-v7	18.254,00	74,97	17.438,41	26,04	4,47	17.087,80	24,66	6,39	17.310,19	25,17	5,17	100,20	0,38
p6r-v7	19.218,20	97,91	18.607,40	35,09	3,18	18.014,00	33,16	6,27	18.181,58	34,10	5,39	184,40	0,64
p7r-v7	18.953,60	54,41	18.550,01	34,23	2,13	17.982,61	33,24	5,12	18.276,00	33,76	3,58	177,83	0,30
p8r-v7	17.940,20	73,23	17.472,60	37,58	2,61	16.866,80	35,69	5,98	17.172,26	36,32	4,28	201,27	0,62
p9r-v7	15.228,40	51,96	14.799,21	39,50	2,82	14.570,41	37,28	4,32	14.677,04	38,24	3,62	82,96	0,63
p10r-v7	17.864,20	69,72	17.444,03	26,22	2,35	17.045,23	25,23	4,58	17.231,88	25,79	3,54	147,26	0,36
p11r-v7	16.390,80	64,21	15.826,23	24,72	3,44	15.658,02	23,54	4,47	15.780,48	24,10	3,72	58,94	0,35
p12r-v7	21.407,40	118,50	20.676,61	38,44	3,41	20.245,21	34,99	5,43	20.483,38	36,10	4,32	159,80	1,05
p13r-v7	19.217,00	103,30	18.391,61	31,49	4,30	17.912,20	30,03	6,79	18.208,06	30,87	5,25	164,68	0,44
p14r-v7	19.091,00	85,55	18.524,81	36,77	2,97	18.030,21	35,33	5,56	18.284,85	36,08	4,22	165,53	0,51
p15r-v7	19.673,20	78,91	19.039,43	34,67	3,22	18.493,42	33,68	6,00	18.811,12	34,31	4,38	173,89	0,32
p16r-v7	17.728,40	91,35	17.094,61	32,85	3,57	16.697,20	31,58	5,82	16.933,03	32,13	4,49	114,16	0,37
p17r-v7	16.782,80	86,08	16.038,22	26,30	4,44	15.672,22	24,46	6,62	15.804,87	25,41	5,83	117,76	0,52
p18r-v7	17.403,40	107,11	16.681,80	33,66	4,15	16.110,20	32,12	7,43	16.434,17	32,82	5,57	180,47	0,46
p19r-v7	17.377,60	51,76	16.929,20	22,59	2,58	16.507,20	21,69	5,01	16.712,33	22,07	3,83	130,79	0,31
p20r-v7	19.235,20	99,76	18.767,01	33,16	2,43	18.019,21	31,73	6,32	18.401,34	32,42	4,34	231,59	0,43
p21r-v7	16.766,60	88,80	16.134,42	34,80	3,77	15.246,81	33,68	9,06	15.575,30	34,19	7,11	290,98	0,44
p22r-v7	18.405,20	106,07	17.884,60	36,55	2,83	17.401,00	33,85	5,46	17.624,80	35,24	4,24	151,36	0,79
p23r-v7	21.313,60	84,54	20.503,79	37,67	3,80	19.765,60	35,97	7,26	20.086,18	36,62	5,76	254,22	0,57
p24r-v7	17.633,80	82,26	17.260,00	23,93	2,12	16.783,61	23,22	4,82	17.020,86	23,51	3,48	148,67	0,23
p25r-v7	16.400,00	98,86	15.158,00	33,45	7,57	14.654,00	30,83	10,65	14.948,09	32,12	8,85	155,37	0,80
p26r-v7	19.645,40	102,38	19.118,02	27,12	2,68	18.419,42	25,82	6,24	18.813,51	26,53	4,23	219,36	0,42
p27r-v7	19.412,60	83,38	18.914,40	33,31	2,57	18.497,41	32,20	4,71	18.642,56	32,87	3,97	128,73	0,32
p28r-v7	17.938,60	76,75	17.460,79	34,44	2,66	17.236,20	32,73	3,92	17.368,00	33,23	3,18	66,49	0,52
p29r-v7	18.695,00	143,26	18.021,20	28,45	3,60	17.652,61	27,21	5,58	17.817,21	28,03	4,70	120,65	0,38
p30r-v7	16.204,60	69,98	15.689,82	27,87	3,18	15.340,22	26,34	5,33	15.565,44	27,05	3,94	103,79	0,48
	Média	87,18	Média	32,21	3,52	Média	30,60	6,23	Média	31,34	4,85	159,42	0,50

Tabela E.26: Resultados obtidos com as metaheurística GRASP para  $|E| = 8$

Problema	CPLEX				GRASP				$\sigma_{fo}$	$\sigma_t$			
	Melhor caso		Pior caso		Média		Gap (%)	Gap (%)					
	Sol.	Obj.	Obj.	Gap (%)	Obj.	Gap (%)							
p1r-v8	16.602,80	144,50	15.680,20	31,57	5,56	15.212,20	30,06	8,38	15.442,53	30,90	6,99	146,95	0,44
p2r-v8	18.630,80	114,91	18.301,80	35,11	1,77	17.801,00	33,53	4,45	18.034,97	34,35	3,20	129,09	0,38
p3r-v8	16.145,40	170,96	14.996,41	26,42	7,12	14.722,21	25,32	8,81	14.887,52	26,09	7,79	80,68	0,34
p4r-v8	19.158,80	89,00	18.390,41	40,67	4,01	18.128,61	37,72	5,38	18.264,67	38,93	4,67	91,62	0,85
p5r-v8	17.211,40	98,55	16.477,40	25,12	4,26	16.004,81	24,66	7,01	16.273,62	24,92	5,45	157,14	0,19
p6r-v8	19.316,80	102,41	18.705,81	35,48	3,16	18.271,82	33,56	5,41	18.421,85	34,61	4,63	129,89	0,50
p7r-v8	18.657,40	71,20	17.938,61	34,42	3,85	17.585,42	33,27	5,75	17.772,63	33,71	4,74	119,89	0,35
p8r-v8	17.930,20	75,10	17.344,61	36,64	3,27	16.795,41	34,25	6,33	17.050,38	35,51	4,91	169,33	0,88
p9r-v8	15.005,80	46,11	14.782,21	38,63	1,49	14.627,01	37,49	2,52	14.671,12	38,07	2,23	53,81	0,39
p10r-v8	18.381,00	71,50	17.728,44	26,05	3,55	17.528,43	25,05	4,64	17.625,54	25,54	4,11	72,42	0,30
p11r-v8	16.733,40	80,57	16.332,82	24,56	2,39	15.939,42	23,62	4,74	16.144,75	24,20	3,52	119,82	0,28
p12r-v8	21.913,20	98,02	21.291,00	37,97	2,84	20.826,39	35,75	4,96	21.073,56	36,89	3,83	152,00	0,61
p13r-v8	19.007,00	110,14	18.167,82	31,75	4,42	17.813,20	30,79	6,28	18.058,50	31,20	4,99	111,68	0,28
p14r-v8	18.985,20	80,32	18.509,01	36,69	2,51	17.983,81	35,40	5,27	18.228,12	36,22	3,99	195,59	0,40
p15r-v8	20.439,00	98,11	19.679,63	34,66	3,72	19.384,83	33,69	5,16	19.510,69	34,36	4,54	101,32	0,31
p16r-v8	17.393,20	106,33	16.817,61	33,65	3,31	16.552,21	32,07	4,84	16.688,42	32,43	4,05	95,91	0,45
p17r-v8	16.825,00	114,43	16.017,21	26,71	4,80	15.283,42	25,33	9,16	15.704,49	26,18	6,66	231,88	0,38
p18r-v8	17.012,40	97,56	15.972,81	33,81	6,11	15.495,20	32,60	8,92	15.705,98	33,39	7,68	159,49	0,38
p19r-v8	17.706,80	98,94	17.327,20	22,56	2,14	16.921,60	21,79	4,43	17.060,85	22,23	3,65	112,05	0,26
p20r-v8	19.159,40	112,01	18.529,60	32,40	3,29	17.821,40	31,32	6,98	18.276,22	31,90	4,61	225,19	0,35
p21r-v8	16.748,80	113,83	15.962,81	34,11	4,69	15.668,21	33,03	6,45	15.823,06	33,62	5,53	96,51	0,34
p22r-v8	18.311,20	135,17	17.699,99	37,04	3,34	17.118,40	35,00	6,51	17.468,29	35,78	4,60	196,18	0,55
p23r-v8	20.995,40	110,45	20.405,21	37,04	2,81	19.501,20	35,84	7,12	19.880,07	36,29	5,31	238,27	0,45
p24r-v8	17.657,80	102,54	17.161,01	23,84	2,81	16.859,81	22,92	4,52	17.014,18	23,34	3,64	106,01	0,29
p25r-v8	16.967,00	85,04	16.314,00	33,23	3,85	15.806,19	32,26	6,84	16.105,39	32,69	5,08	180,69	0,37
p26r-v8	20.079,80	104,26	19.259,42	26,69	4,09	18.545,03	25,08	7,64	18.906,19	25,91	5,84	225,11	0,50
p27r-v8	19.443,60	117,58	19.034,82	33,65	2,10	18.610,62	31,35	4,28	18.868,45	32,71	2,96	135,30	0,67
p28r-v8	17.760,00	77,17	17.361,60	34,35	2,24	17.209,20	33,18	3,10	17.281,54	33,75	2,69	61,27	0,35
p29r-v8	18.402,00	96,74	17.676,20	28,51	3,94	17.290,22	27,21	6,04	17.415,75	27,88	5,36	135,43	0,33
p30r-v8	15.949,00	90,25	15.372,42	27,57	3,62	14.954,62	26,77	6,23	15.212,37	27,17	4,62	122,64	0,28
Média	100,46	Média	Média	32,03	3,57	Média	30,66	5,94	Média	31,36	4,73	138,44	0,42

Tabela E.27: Resultados obtidos com as metaheurística GRASP para  $|E| = 9$

Problema	CPLEX				GRASP				$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$		
	Melhor caso		Pior caso		Média		Gap (%)	CPUt (s)				
	Sol.	Obj.	FO	CPUt (s)	FO	CPUt (s)					Gap (%)	
p1r-v9	16.825,00	173,43	15.563,60	31,42	7,50	14.711,80	30,36	15.126,20	30,73	10,10	280,66	0,33
p2r-v9	18.686,20	93,46	18.133,60	36,02	2,96	17.481,00	34,76	17.773,04	35,32	4,89	185,93	0,38
p3r-v9	16.510,80	208,60	15.711,81	26,38	4,84	15.130,81	25,33	15.412,53	25,73	6,65	153,64	0,33
p4r-v9	19.045,60	117,84	18.187,41	40,87	4,51	17.582,61	38,49	17.893,63	40,09	6,05	156,94	0,73
p5r-v9	18.087,20	126,24	17.391,81	26,17	3,84	16.971,01	25,41	17.122,07	25,83	5,34	127,87	0,24
p6r-v9	19.432,80	113,10	18.653,41	36,01	4,01	18.373,40	33,45	18.545,54	35,05	4,57	97,01	0,76
p7r-v9	18.814,00	120,20	18.127,02	34,26	3,65	17.798,62	32,87	17.910,67	33,46	4,80	87,67	0,46
p8r-v9	17.881,20	80,50	17.409,62	37,76	2,64	16.825,01	35,08	17.158,70	36,73	4,04	190,01	0,85
p9r-v9	15.061,40	66,27	14.687,82	39,16	2,48	14.357,61	38,16	14.559,08	38,73	3,34	80,21	0,35
p10r-v9	18.094,60	86,85	17.592,23	26,58	2,78	17.220,03	25,50	17.436,85	25,98	3,64	126,48	0,33
p11r-v9	16.258,60	106,16	15.586,62	25,65	4,13	15.454,02	24,68	15.508,71	25,07	4,61	46,22	0,30
p12r-v9	21.678,40	106,85	20.895,00	38,03	3,61	20.566,61	35,13	20.727,14	36,58	4,39	116,06	0,87
p13r-v9	19.256,20	176,95	18.429,21	31,67	4,29	17.958,41	30,35	18.224,10	30,98	5,36	147,68	0,47
p14r-v9	19.488,00	94,91	18.660,81	37,30	4,24	18.128,41	35,48	18.396,56	36,44	5,60	188,22	0,61
p15r-v9	20.238,40	116,83	19.569,02	36,02	3,31	19.204,82	34,13	19.407,84	34,71	4,10	102,95	0,53
p16r-v9	17.344,00	140,45	16.674,81	33,35	3,86	16.104,59	32,12	16.450,77	32,75	5,15	164,14	0,42
p17r-v9	16.748,20	117,36	15.809,82	26,19	5,60	15.283,02	25,51	15.552,07	25,86	7,14	140,21	0,18
p18r-v9	17.380,00	135,72	16.513,40	33,55	4,99	15.607,59	32,35	16.084,78	33,17	7,45	240,62	0,34
p19r-v9	17.537,00	91,74	17.196,81	22,01	1,94	16.861,21	21,55	16.990,60	21,83	3,12	107,19	0,14
p20r-v9	19.807,60	114,72	19.200,61	32,08	3,06	18.593,80	30,81	18.901,92	31,44	4,57	215,76	0,42
p21r-v9	16.796,80	140,67	16.063,01	35,58	4,37	15.464,41	33,55	15.709,25	34,69	6,47	189,11	0,69
p22r-v9	18.561,80	110,39	18.064,39	36,43	2,68	17.281,61	34,01	17.619,75	35,31	5,08	240,65	0,74
p23r-v9	20.841,40	117,70	19.967,61	37,47	4,19	19.370,81	36,63	19.590,58	37,01	6,00	203,80	0,26
p24r-v9	17.186,80	148,58	16.552,01	24,36	3,69	15.714,61	23,35	16.270,21	23,95	5,33	287,31	0,29
p25r-v9	16.535,40	110,89	15.799,19	34,15	4,45	15.181,79	32,53	15.548,83	33,20	5,97	175,96	0,53
p26r-v9	19.688,60	133,35	18.810,22	27,91	4,46	18.370,81	26,56	18.556,78	27,24	5,75	147,59	0,34
p27r-v9	18.886,60	116,83	18.336,41	34,91	2,91	17.897,20	32,40	18.090,41	33,62	4,22	129,93	0,85
p28r-v9	17.470,20	107,06	17.093,20	33,51	2,16	16.757,40	32,73	16.946,22	33,06	3,00	92,02	0,27
p29r-v9	18.202,20	126,70	17.289,62	28,46	5,01	16.850,21	27,24	17.131,09	27,84	5,88	140,97	0,42
p30r-v9	16.052,20	131,07	15.556,42	27,71	3,09	14.789,22	26,53	15.200,46	27,11	5,31	251,68	0,34
Média		121,05	Média	32,37	3,84	Média	30,90	Média	31,65	5,26	160,48	0,46

Tabela E.28: Resultados obtidos com as metaheurística GRASP para  $|E| = 10$

Problema	CPLEX				GRASP				Média					
	Sol. Ótima		GPUt. (s)		Melhor caso		Pior caso		FO		Gap (%)		$\sigma_{fo}$	
	Sol.	Ótima	GPUt. (s)		FO	GPUt. (s)	FO	GPUt. (s)	FO	GPUt. (s)	Gap (%)	Gap (%)	$\sigma_{fo}$	$\sigma_t$
p1r-v10	16.891,40	16.891,40	219,95	15.789,20	32,76	6,53	15.180,60	29,95	10,13	15.454,40	31,16	8,51	212,06	0,92
p2r-v10	18.797,20	18.797,20	113,97	17.859,40	35,25	4,99	17.343,00	34,19	7,74	17.651,73	34,80	6,09	169,57	0,36
p3r-v10	16.288,00	16.288,00	177,95	15.648,41	26,29	3,93	15.129,41	25,00	7,11	15.380,97	25,60	5,57	149,54	0,37
p4r-v10	19.389,60	19.389,60	158,11	18.577,42	39,03	4,19	17.924,01	37,79	7,56	18.297,93	38,53	5,63	197,78	0,41
p5r-v10	18.055,20	18.055,20	153,07	17.558,20	26,03	2,75	17.205,01	25,11	4,71	17.433,83	25,67	3,44	102,85	0,23
p6r-v10	19.189,40	19.189,40	160,31	18.504,01	35,82	3,57	18.012,01	33,55	6,14	18.354,23	34,41	4,35	136,07	0,57
p7r-v10	18.297,60	18.297,60	112,49	17.605,40	34,60	3,78	17.303,62	33,15	5,43	17.449,40	33,79	4,64	120,11	0,45
p8r-v10	17.908,20	17.908,20	113,97	17.328,00	37,45	3,24	16.852,80	35,92	5,89	17.056,19	36,38	4,76	163,21	0,47
p9r-v10	15.122,00	15.122,00	78,78	14.800,21	40,17	2,13	14.652,21	39,32	3,11	14.736,36	39,67	2,55	41,11	0,31
p10r-v10	18.381,00	18.381,00	124,54	17.840,62	26,42	2,94	17.556,23	25,48	4,49	17.750,73	25,86	3,43	78,72	0,29
p11r-v10	16.223,80	16.223,80	124,82	15.584,02	24,79	3,94	15.147,62	24,28	6,63	15.370,00	24,55	5,26	130,54	0,16
p12r-v10	21.688,60	21.688,60	131,66	21.108,79	37,92	2,67	20.260,79	35,40	6,58	20.707,04	36,64	4,53	213,41	0,80
p13r-v10	19.365,20	19.365,20	200,12	18.572,81	31,82	4,09	18.063,21	30,74	6,72	18.393,30	31,22	5,02	150,69	0,30
p14r-v10	19.217,40	19.217,40	112,40	18.646,21	36,90	2,97	18.093,61	35,45	5,85	18.413,70	35,95	4,18	203,60	0,40
p15r-v10	19.674,00	19.674,00	127,75	19.070,02	35,60	3,07	18.847,03	34,22	4,20	18.901,08	34,71	3,93	72,44	0,38
p16r-v10	17.258,20	17.258,20	167,95	16.653,01	33,28	3,51	16.231,20	31,71	5,95	16.395,98	32,42	5,00	116,45	0,49
p17r-v10	16.684,80	16.684,80	139,82	15.815,62	26,77	5,21	15.168,02	25,56	9,09	15.594,62	26,03	6,53	195,91	0,47
p18r-v10	17.325,00	17.325,00	185,77	16.697,20	34,48	3,62	15.891,60	33,21	8,27	16.285,53	33,62	6,00	263,52	0,40
p19r-v10	17.566,80	17.566,80	119,29	17.263,81	23,02	1,72	17.040,40	22,15	3,00	17.132,28	22,50	2,47	77,40	0,23
p20r-v10	19.942,60	19.942,60	168,39	18.973,41	32,73	4,86	18.535,01	31,64	7,06	18.772,86	32,30	5,87	166,30	0,37
p21r-v10	16.634,40	16.634,40	157,34	15.904,61	33,91	4,39	15.227,61	32,80	8,46	15.576,03	33,35	6,36	187,00	0,37
p22r-v10	18.466,20	18.466,20	138,48	17.968,39	36,97	2,70	17.461,20	34,95	5,44	17.737,71	36,30	3,95	167,45	0,63
p23r-v10	21.104,00	21.104,00	143,26	20.524,61	37,82	2,75	19.161,02	35,26	9,21	19.892,15	36,81	5,74	376,40	0,89
p24r-v10	17.354,40	17.354,40	119,89	16.956,80	23,94	2,29	16.514,81	22,72	4,84	16.796,78	23,29	3,21	129,56	0,42
p25r-v10	16.594,20	16.594,20	116,55	16.086,60	34,12	3,06	15.390,80	31,78	7,25	15.730,94	32,81	5,20	208,75	0,76
p26r-v10	19.719,80	19.719,80	164,60	18.784,82	27,87	4,74	18.368,42	25,87	6,85	18.588,18	26,51	5,74	151,66	0,56
p27r-v10	19.473,20	19.473,20	138,14	18.990,02	33,33	2,48	18.527,42	32,02	4,86	18.833,34	32,78	3,29	144,24	0,40
p28r-v10	17.647,80	17.647,80	124,63	17.377,20	33,71	1,53	17.073,00	32,47	3,26	17.215,62	32,85	2,45	95,49	0,31
p29r-v10	18.607,60	18.607,60	178,11	17.892,81	28,08	3,84	17.696,42	26,98	4,90	17.785,19	27,43	4,42	73,21	0,32
p30r-v10	15.858,20	15.858,20	138,17	15.139,42	27,91	4,53	14.377,22	26,43	9,34	14.883,44	26,95	6,15	217,21	0,40
Média			143,68	Média	32,29	3,53	Média	30,84	6,34	Média	31,50	4,81	157,07	0,45

Tabela E.29: Resultados obtidos com as metaheurística GRASP para  $|E| = 11$

Problema	CPLEX				GRASP				$\sigma_{fo}$	$\sigma_t$			
	Sol. Ótima		Melhor caso		Pior caso		Média						
	Sol.	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)					
p1r-v11	17.030,60	281,66	16.147,80	31,76	5,18	15.807,60	30,82	7,18	15.902,65	31,12	6,62	98,34	0,27
p2r-v11	18.873,40	123,72	18.471,40	36,31	2,13	18.024,60	35,64	4,50	18.193,87	35,95	3,60	133,15	0,23
p3r-v11	16.360,60	222,46	15.689,21	27,16	4,10	15.150,21	25,73	7,40	15.340,64	26,37	6,23	157,47	0,45
p4r-v11	18.979,00	141,84	18.158,01	41,52	4,33	17.715,02	39,41	6,66	17.952,58	40,36	5,41	147,08	0,54
p5r-v11	17.920,60	158,72	17.261,62	26,14	3,68	17.026,62	24,68	4,99	17.129,50	25,55	4,41	74,40	0,41
p6r-v11	19.494,20	156,72	18.910,41	35,12	2,99	18.366,01	32,93	5,79	18.558,52	34,32	4,80	178,98	0,65
p7r-v11	18.948,80	181,85	18.242,02	34,07	3,73	17.536,82	32,90	7,45	17.889,38	33,40	5,59	219,40	0,45
p8r-v11	17.948,00	111,81	17.334,41	37,36	3,42	16.849,42	35,51	6,12	17.115,52	36,35	4,64	174,88	0,60
p9r-v11	14.837,60	91,53	14.375,41	39,47	3,11	14.204,21	37,95	4,27	14.273,90	38,75	3,80	43,29	0,40
p10r-v11	18.391,40	129,89	17.902,63	26,37	2,66	17.606,24	25,35	4,27	17.736,25	25,92	3,56	83,40	0,32
p11r-v11	16.483,40	140,12	15.736,62	24,70	4,53	15.374,02	23,18	6,73	15.514,19	23,97	5,88	105,66	0,44
p12r-v11	21.659,60	192,04	20.812,40	38,62	3,91	20.191,60	35,01	6,78	20.522,78	36,85	5,25	208,20	1,19
p13r-v11	19.485,20	241,74	18.714,22	32,29	3,96	18.143,80	30,36	6,88	18.414,70	31,36	5,49	167,93	0,55
p14r-v11	19.223,40	124,19	18.477,62	37,49	3,88	17.815,60	36,17	7,32	18.049,88	36,80	6,10	216,73	0,37
p15r-v11	19.956,00	164,96	19.160,82	34,49	3,98	18.666,62	33,54	6,46	18.979,67	33,96	4,89	162,28	0,31
p16r-v11	17.435,20	168,22	16.755,81	33,41	3,90	16.089,80	32,09	7,72	16.452,15	32,82	5,64	222,89	0,38
p17r-v11	16.928,20	167,89	16.166,22	26,22	4,50	15.724,82	25,66	7,11	15.934,57	25,90	5,87	115,37	0,19
p18r-v11	17.112,00	239,15	16.435,80	33,71	3,95	15.782,80	32,90	7,77	16.083,36	33,28	6,01	224,84	0,28
p19r-v11	17.853,80	116,64	17.111,80	22,53	4,16	16.953,80	21,68	5,04	17.026,28	22,04	4,64	47,65	0,25
p20r-v11	20.008,40	175,83	19.325,40	33,06	3,41	18.982,00	31,41	5,13	19.159,15	32,28	4,24	114,09	0,45
p21r-v11	16.598,60	203,27	15.666,21	34,99	5,62	15.094,01	33,27	9,06	15.400,94	34,47	7,22	179,83	0,48
p22r-v11	18.490,40	181,38	17.659,40	37,09	4,49	16.760,79	33,44	9,35	17.201,00	35,54	6,97	284,10	1,16
p23r-v11	21.147,80	169,87	20.442,40	38,40	3,34	19.488,80	35,93	7,84	20.073,87	37,20	5,08	283,05	0,69
p24r-v11	17.450,80	125,22	16.961,40	24,60	2,80	16.382,60	23,91	6,12	16.633,30	24,27	4,68	159,57	0,21
p25r-v11	16.820,60	143,36	16.064,79	33,37	4,49	15.686,99	32,27	6,74	15.911,08	32,92	5,41	118,82	0,36
p26r-v11	19.769,00	156,91	19.120,60	27,42	3,28	18.353,22	26,05	7,16	18.837,03	26,62	4,71	221,85	0,48
p27r-v11	19.150,40	186,31	18.500,22	33,68	3,40	17.747,81	31,34	7,32	18.270,27	32,72	4,60	215,77	0,62
p28r-v11	17.708,20	167,73	17.293,20	33,85	2,34	17.096,60	32,75	3,45	17.224,03	33,31	2,73	69,23	0,30
p29r-v11	18.788,20	157,92	18.216,61	28,02	3,04	17.609,81	27,27	6,27	17.973,16	27,71	4,34	185,67	0,26
p30r-v11	16.313,60	155,50	15.664,62	27,88	3,98	15.244,02	27,08	6,56	15.441,44	27,33	5,35	124,32	0,22
Média		165,95	Média	32,37	3,74	Média	30,87	6,52	Média	31,65	5,13	157,94	0,45

Tabela E.30: Resultados obtidos com as metaheurística GRASP para  $|E| = 12$

Problema	CPLEX				GRASP				$\sigma_{fo}$	$\sigma_t$			
	Sol. Ótima		Mélhor caso		Pior caso		Média						
	Sol.	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)					
p1r-v12	16.605,40	259,52	15.097,20	32,12	9,08	14.764,40	30,40	11,09	14.915,78	31,29	10,18	101,92	0,52
p2r-v12	19.038,40	185,41	18.489,60	36,20	2,88	18.006,40	34,58	5,42	18.310,22	35,50	3,82	137,86	0,51
p3r-v12	16.484,40	298,37	15.596,41	27,17	5,39	15.035,01	26,03	8,79	15.253,83	26,58	7,47	163,88	0,37
p4r-v12	18.974,80	165,30	17.908,61	40,47	5,30	17.712,62	38,62	6,65	17.847,11	39,35	5,94	89,22	0,54
p5r-v12	17.802,20	183,55	17.188,61	25,78	3,45	16.807,21	24,88	5,59	17.009,63	25,41	4,45	104,74	0,30
p6r-v12	19.603,00	157,62	19.134,61	35,71	2,39	18.691,21	34,42	4,65	18.869,68	34,92	3,74	156,05	0,42
p7r-v12	18.715,60	154,39	18.124,03	34,01	3,16	17.934,82	33,11	4,17	18.024,21	33,68	3,69	54,41	0,30
p8r-v12	17.753,40	155,35	17.094,00	38,79	3,71	16.825,21	36,49	5,23	16.945,24	37,49	4,55	82,56	0,59
p9r-v12	14.996,40	99,01	14.709,41	39,73	1,91	14.498,20	38,67	3,32	14.572,46	39,07	2,83	76,05	0,33
p10r-v12	17.931,60	155,19	17.314,83	26,46	3,44	17.108,44	25,10	4,59	17.209,83	25,79	4,03	66,12	0,38
p11r-v12	16.197,40	149,81	15.721,42	25,28	2,94	15.399,62	24,29	4,93	15.496,69	24,73	4,33	94,77	0,28
p12r-v12	21.762,00	245,47	21.163,80	38,98	2,75	20.519,99	35,56	5,71	20.827,73	37,22	4,29	217,17	1,09
p13r-v12	19.356,60	238,43	18.603,61	32,38	3,89	17.635,01	30,61	8,89	18.216,46	31,39	5,89	309,72	0,57
p14r-v12	19.311,20	157,64	18.724,41	36,84	3,04	18.157,61	36,16	5,97	18.390,81	36,61	4,77	195,58	0,20
p15r-v12	19.999,60	165,27	19.489,61	35,69	2,55	19.139,21	33,93	4,30	19.317,05	34,71	3,41	125,50	0,56
p16r-v12	17.247,00	192,68	16.572,60	33,59	3,91	16.113,40	32,52	6,57	16.293,78	33,10	5,53	144,07	0,31
p17r-v12	16.621,00	158,34	15.725,62	26,51	5,39	15.471,02	25,84	6,92	15.556,82	26,16	6,40	93,57	0,24
p18r-v12	17.350,00	222,66	16.445,61	34,50	5,21	16.023,01	32,86	7,65	16.246,77	33,74	6,36	123,40	0,48
p19r-v12	17.976,60	126,72	17.432,40	22,37	3,03	17.327,00	21,30	3,61	17.385,38	21,98	3,29	30,50	0,29
p20r-v12	19.834,80	179,92	19.045,80	33,39	3,98	18.495,80	31,39	6,75	18.764,28	31,92	5,40	186,85	0,60
p21r-v12	16.637,00	218,23	15.837,81	34,99	4,80	15.497,01	33,43	6,85	15.689,23	34,38	5,70	113,88	0,49
p22r-v12	18.481,80	232,38	17.983,21	37,30	2,70	17.336,41	34,85	6,20	17.672,90	36,09	4,38	216,17	0,85
p23r-v12	20.938,20	206,20	19.969,40	37,94	4,63	19.003,21	36,64	9,24	19.571,27	37,35	6,53	247,89	0,37
p24r-v12	17.662,20	143,18	17.070,20	24,44	3,35	16.767,01	23,39	5,07	16.907,37	23,94	4,27	105,90	0,32
p25r-v12	16.764,20	159,76	16.327,39	34,39	2,61	15.700,79	32,08	6,34	15.973,41	33,35	4,72	184,35	0,66
p26r-v12	19.294,00	182,80	18.727,22	27,51	2,94	18.073,62	26,33	6,33	18.294,86	26,79	5,18	191,46	0,37
p27r-v12	19.680,80	178,81	19.094,81	33,40	2,98	18.939,02	32,11	3,77	19.019,84	32,83	3,36	51,36	0,41
p28r-v12	17.837,00	163,97	17.353,60	34,50	2,71	16.900,60	32,92	5,25	17.115,00	33,61	4,05	170,36	0,45
p29r-v12	18.576,80	226,45	17.553,41	28,50	5,51	16.986,42	27,44	8,56	17.367,83	27,96	6,51	218,18	0,42
p30r-v12	16.344,60	182,19	15.984,62	27,25	2,20	15.087,42	25,84	7,69	15.469,51	26,85	5,35	237,53	0,42
	Média	184,82	Média	32,54	3,73	Média	31,06	6,20	Média	31,79	5,01	143,04	0,45

Tabela E.31: Resultados obtidos com as metaheurística GRASP para  $|E| = 13$

Problema	CPLEX				GRASP				$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$		
	Melhor caso		Pior caso		Média		Gap (%)	Gap (%)				
	Sol.	Obj.	Obj.	Gap (%)	Obj.	Gap (%)						
p1r-v13	17.084,40	328,27	16.065,80	31,81	15.560,20	30,53	8,92	15.879,56	31,25	7,05	137,56	0,40
p2r-v13	18.881,60	185,67	18.445,79	36,16	18.120,39	34,12	4,03	18.253,72	34,88	3,33	119,06	0,58
p3r-v13	16.175,40	353,81	15.244,41	27,09	14.934,21	25,61	7,67	15.057,10	26,57	6,91	91,96	0,48
p4r-v13	19.266,40	200,45	18.666,21	41,46	18.069,81	37,04	6,21	18.412,82	40,23	4,43	189,35	1,31
p5r-v13	17.824,80	193,99	17.019,40	26,02	16.843,40	24,98	5,51	16.906,22	25,66	5,15	61,94	0,31
p6r-v13	18.960,80	175,50	18.380,61	35,19	17.953,40	33,87	5,31	18.210,79	34,36	3,96	129,84	0,39
p7r-v13	19.037,20	192,24	18.381,82	34,74	17.913,63	32,32	5,90	18.096,66	33,42	4,94	185,26	0,70
p8r-v13	18.039,80	146,86	17.541,01	37,30	17.138,80	35,95	4,99	17.316,85	36,56	4,01	148,02	0,44
p9r-v13	14.840,80	130,56	14.539,41	39,61	14.429,01	37,86	2,77	14.483,08	38,40	2,41	40,90	0,56
p10r-v13	18.188,40	160,32	17.901,83	26,67	17.559,03	25,21	3,46	17.697,23	26,01	2,70	91,18	0,46
p11r-v13	16.262,40	169,67	15.806,82	24,96	15.458,82	24,07	4,94	15.688,04	24,50	3,53	104,27	0,29
p12r-v13	21.590,00	184,72	21.102,01	39,61	20.450,80	37,71	5,28	20.824,62	38,67	3,55	207,33	0,66
p13r-v13	19.212,00	261,02	18.615,62	32,10	17.770,21	29,73	7,50	18.188,30	31,01	5,33	259,95	0,66
p14r-v13	19.131,60	149,98	18.379,21	37,89	17.915,41	36,15	6,36	18.124,79	36,75	5,26	154,79	0,54
p15r-v13	19.631,00	276,73	19.107,23	35,80	18.681,23	34,47	4,84	18.795,21	35,27	4,26	118,78	0,39
p16r-v13	17.577,80	225,72	16.909,01	34,34	16.546,80	31,97	5,87	16.694,55	33,03	5,02	121,20	0,65
p17r-v13	16.835,60	185,78	15.842,02	26,76	15.586,42	25,76	7,42	15.721,42	26,36	6,62	95,43	0,26
p18r-v13	17.186,20	335,34	16.235,20	34,67	15.592,00	33,35	9,28	15.989,71	33,87	6,96	201,13	0,38
p19r-v13	17.554,80	167,01	17.066,00	22,41	16.490,99	21,67	6,06	16.737,49	22,00	4,66	192,78	0,27
p20r-v13	20.213,80	206,64	19.382,41	32,53	19.127,01	31,59	5,38	19.261,88	32,02	4,71	72,57	0,27
p21r-v13	16.666,80	271,60	15.906,42	35,92	15.182,61	33,97	8,91	15.584,90	34,66	6,49	218,18	0,67
p22r-v13	18.502,20	187,61	17.988,40	36,35	17.312,99	34,75	6,43	17.721,12	35,48	4,22	223,94	0,58
p23r-v13	21.122,40	203,63	20.059,80	38,06	19.488,80	36,40	7,73	19.730,31	37,30	6,59	175,00	0,46
p24r-v13	17.185,00	167,59	16.486,01	23,55	16.001,61	22,16	6,89	16.277,64	22,70	5,28	146,95	0,49
p25r-v13	16.717,80	185,49	15.938,60	34,30	15.426,80	32,77	7,72	15.749,84	33,60	5,79	148,15	0,51
p26r-v13	19.868,00	186,25	19.368,82	27,02	18.616,61	25,62	6,30	18.810,20	26,30	5,32	238,11	0,34
p27r-v13	19.679,80	214,63	19.241,01	33,21	18.964,02	31,70	3,64	19.143,45	32,53	2,73	86,50	0,45
p28r-v13	17.322,40	187,17	16.962,20	34,54	16.556,80	32,92	4,42	16.756,69	33,56	3,27	139,95	0,53
p29r-v13	19.002,80	232,27	18.559,62	28,43	17.941,61	27,07	5,58	18.228,89	27,81	4,07	164,10	0,38
p30r-v13	15.943,00	199,92	15.288,62	27,28	14.798,82	26,00	7,18	14.985,44	26,59	6,01	170,02	0,37
	Média	208,88	Média	32,53	Média	30,91	6,08	Média	31,71	4,82	147,81	0,49

Tabela E.32: Resultados obtidos com as metaheurística GRASP para  $|E| = 14$

Problema	CPLEX				GRASP				$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$			
	Sol. Ótima		Mélhor caso		Pior caso		Média						
	Sol.	Ótima	GPUt (s)	FO	GPUt (s)	Gap (%)	FO	GPUt (s)			Gap (%)		
p1r-v14	16.966,40	333,87	16.191,40	22,57	4,57	15.636,00	21,72	7,84	15.883,16	22,10	6,38	171,79	0,25
p2r-v14	18.537,60	165,61	18.180,00	25,72	1,93	17.527,60	24,57	5,45	17.857,57	25,07	3,67	201,26	0,33
p3r-v14	16.407,00	393,23	15.712,61	19,06	4,23	15.181,40	17,94	7,47	15.455,95	18,37	5,80	187,39	0,31
p4r-v14	18.950,60	226,72	18.301,41	27,87	3,43	18.054,81	26,80	4,73	18.166,67	27,49	4,14	82,10	0,34
p5r-v14	17.766,00	222,82	17.369,00	18,03	2,23	16.969,61	17,29	4,48	17.218,99	17,58	3,08	112,46	0,25
p6r-v14	19.219,40	220,23	18.799,21	24,53	2,19	18.124,61	23,63	5,70	18.434,03	24,19	4,09	221,67	0,29
p7r-v14	18.697,20	225,61	18.054,42	23,93	3,44	17.578,22	22,74	5,98	17.790,80	23,51	4,85	136,47	0,35
p8r-v14	18.235,20	145,61	17.796,61	27,03	2,41	17.332,00	25,41	4,95	17.514,55	25,96	3,95	153,90	0,48
p9r-v14	15.274,40	112,84	14.978,01	26,56	1,94	14.681,21	25,58	3,88	14.807,15	26,07	3,06	99,84	0,32
p10r-v14	18.078,40	158,59	17.447,83	18,49	3,49	17.168,23	17,88	5,03	17.287,59	18,15	4,37	88,31	0,19
p11r-v14	16.540,40	188,61	16.098,42	18,20	2,67	15.529,22	17,03	6,11	15.916,44	17,67	3,77	189,26	0,34
p12r-v14	21.658,40	238,17	21.017,41	27,16	2,96	20.380,41	25,23	5,90	20.802,88	26,52	3,95	168,27	0,57
p13r-v14	19.043,00	297,68	18.212,41	22,33	4,36	17.575,01	21,21	7,71	17.899,41	21,89	6,01	188,96	0,33
p14r-v14	19.527,60	176,78	18.774,62	26,99	3,86	18.399,21	25,48	5,78	18.640,93	26,11	4,54	115,80	0,43
p15r-v14	20.238,80	197,20	19.811,22	25,08	2,11	19.372,80	23,85	4,28	19.604,71	24,47	3,13	125,22	0,33
p16r-v14	17.280,20	251,22	16.518,40	22,78	4,41	16.059,79	22,38	7,06	16.282,36	22,60	5,77	167,67	0,11
p17r-v14	16.905,40	263,00	15.956,02	18,52	5,62	15.789,01	18,09	6,60	15.836,89	18,37	6,32	51,90	0,13
p18r-v14	17.370,80	275,87	16.621,60	24,13	4,31	16.098,01	23,09	7,33	16.334,64	23,68	5,96	163,19	0,37
p19r-v14	17.780,40	171,04	17.120,41	15,43	3,71	16.812,41	15,01	5,44	16.992,24	15,21	4,43	107,81	0,14
p20r-v14	19.651,60	276,78	19.021,21	23,11	3,21	18.736,62	22,55	4,66	18.880,21	22,92	3,93	99,92	0,17
p21r-v14	16.532,00	254,20	15.670,62	24,83	5,21	14.816,21	23,86	10,38	15.111,01	24,23	8,60	271,70	0,28
p22r-v14	18.501,60	278,54	17.879,18	25,45	3,36	17.339,61	23,76	6,28	17.629,31	24,67	4,71	169,01	0,61
p23r-v14	21.017,60	243,56	19.981,01	26,85	4,93	19.385,40	25,98	7,77	19.673,33	26,39	6,40	199,05	0,30
p24r-v14	17.424,40	222,33	16.773,41	16,45	3,74	16.315,41	15,86	6,36	16.591,33	16,20	4,78	133,88	0,18
p25r-v14	16.733,80	192,83	16.035,80	23,38	4,17	15.592,59	21,94	6,82	15.793,60	22,80	5,62	145,72	0,40
p26r-v14	19.843,60	243,35	19.347,21	19,08	2,50	18.641,02	17,89	6,06	18.973,40	18,56	4,39	220,66	0,34
p27r-v14	19.342,20	302,38	18.655,81	23,39	3,55	18.149,41	22,05	6,17	18.389,01	22,78	4,93	181,56	0,45
p28r-v14	17.992,20	194,69	17.604,20	23,79	2,16	17.360,99	22,35	3,51	17.466,16	23,14	2,92	78,70	0,41
p29r-v14	18.408,40	284,45	17.849,01	20,08	3,04	17.487,39	19,63	5,00	17.599,53	19,91	4,39	106,47	0,16
p30r-v14	16.017,40	229,68	15.597,41	19,16	2,62	15.026,21	18,17	6,19	15.153,12	18,70	5,40	164,53	0,25
	Média	232,92	Média	22,67	3,41	Média	21,63	6,03	Média	22,18	4,78	150,15	0,31

Tabela E.33: Resultados obtidos com as metaheurística GRASP para  $|E| = 15$

Problema	CPLEX				GRASP									
	Sol. Ótima		GPUt (s)		Melhor caso				Pior caso				Média	
	Sol.	Ótima	GPUt (s)	Gap (%)	FO	GPUt (s)	Gap (%)	FO	GPUt (s)	Gap (%)	FO	GPUt (s)	Gap (%)	$\sigma_{fo}$
p1r-v15	16.619,00	328,35	15.627,00	22,26	5,97	15.135,80	21,52	8,92	15.339,85	21,92	7,70	152,85	0,26	
p2r-v15	18.544,80	179,17	17.870,00	25,35	3,64	17.676,20	24,02	4,68	17.785,46	24,79	4,09	70,48	0,39	
p3r-v15	16.251,00	428,88	15.756,21	19,35	3,04	15.141,01	18,44	6,83	15.338,77	18,92	5,61	205,96	0,28	
p4r-v15	19.325,20	244,09	18.672,62	28,72	3,38	17.859,61	26,42	7,58	18.319,31	27,73	5,21	257,26	0,82	
p5r-v15	17.818,60	263,02	17.054,81	18,11	4,29	16.831,20	17,58	5,54	16.918,62	17,82	5,05	57,38	0,20	
p6r-v15	18.940,40	297,87	18.401,21	24,54	2,85	18.062,61	23,64	4,63	18.223,88	24,12	3,78	115,98	0,34	
p7r-v15	18.835,00	255,90	18.101,62	24,59	3,89	17.947,03	23,69	4,71	18.011,71	24,08	4,37	52,59	0,29	
p8r-v15	18.072,40	324,83	17.493,02	26,31	3,21	16.866,61	24,52	6,67	17.307,56	25,85	4,23	196,75	0,58	
p9r-v15	14.906,20	122,38	14.691,01	27,99	1,44	14.579,41	26,33	2,19	14.648,05	27,43	1,73	30,16	0,54	
p10r-v15	18.213,60	186,02	17.481,04	17,92	4,02	17.298,83	17,10	5,02	17.387,49	17,53	4,54	58,36	0,27	
p11r-v15	16.415,00	192,24	15.782,02	17,31	3,86	15.642,22	16,58	4,71	15.729,18	17,06	4,18	39,57	0,24	
p12r-v15	21.609,20	276,23	21.069,01	27,15	2,50	20.614,82	25,70	4,60	20.894,74	26,42	3,31	174,06	0,52	
p13r-v15	19.318,00	372,41	18.579,02	22,31	3,83	17.901,01	21,12	7,34	18.146,34	21,73	6,07	213,98	0,39	
p14r-v15	19.229,20	190,52	18.517,62	26,73	3,70	17.960,21	25,65	6,60	18.358,92	26,16	4,53	151,05	0,33	
p15r-v15	19.911,20	230,77	19.401,21	24,46	2,56	19.058,42	23,22	4,28	19.266,05	23,86	3,24	106,07	0,42	
p16r-v15	17.338,20	325,89	16.729,00	23,34	3,51	16.353,19	22,28	5,68	16.551,47	22,90	4,54	107,15	0,30	
p17r-v15	16.949,00	208,70	16.173,42	18,28	4,58	15.665,02	17,50	7,58	16.024,76	17,83	5,45	134,79	0,22	
p18r-v15	16.874,60	262,52	15.906,60	23,61	5,74	15.592,20	23,09	7,60	15.821,09	23,41	6,24	89,27	0,15	
p19r-v15	17.585,80	173,47	17.282,41	15,88	1,73	16.850,21	15,31	4,18	17.131,68	15,62	2,58	130,14	0,16	
p20r-v15	19.639,00	293,31	18.796,81	23,02	4,29	18.467,81	22,17	5,96	18.605,43	22,52	5,26	97,89	0,24	
p21r-v15	16.548,00	361,47	15.685,81	25,23	5,21	15.378,61	23,89	7,07	15.547,46	24,73	6,05	99,54	0,35	
p22r-v15	18.239,20	244,28	17.650,22	25,57	3,23	17.014,60	24,21	6,71	17.389,00	24,74	4,66	188,23	0,46	
p23r-v15	20.943,60	244,63	20.139,79	26,83	3,84	19.548,00	25,48	6,66	19.834,69	26,17	5,29	183,95	0,43	
p24r-v15	17.542,80	278,62	17.214,01	16,68	1,87	16.985,61	16,05	3,18	17.125,86	16,34	2,38	68,62	0,21	
p25r-v15	16.886,20	228,15	16.242,00	24,09	3,81	15.475,20	22,85	8,36	15.835,14	23,46	6,22	214,99	0,40	
p26r-v15	20.242,00	248,49	19.385,42	18,12	4,23	18.928,02	17,59	6,49	19.143,18	17,85	5,43	132,56	0,18	
p27r-v15	19.149,60	339,16	18.626,42	23,36	2,73	18.368,42	22,04	4,08	18.482,09	22,59	3,49	80,44	0,37	
p28r-v15	17.668,80	237,17	17.275,60	23,43	2,23	17.048,60	22,32	3,51	17.166,66	22,84	2,84	81,98	0,39	
p29r-v15	18.771,40	425,09	18.260,62	20,01	2,72	17.888,41	19,18	4,70	18.097,03	19,73	3,59	117,65	0,22	
p30r-v15	16.209,60	290,88	15.413,42	19,12	4,91	15.013,02	18,26	7,38	15.245,80	18,72	5,95	123,39	0,27	
Média	Média	268,48	Média	22,66	3,56	Média	21,59	5,78	Média	22,16	4,59	124,44	0,34	

Tabela E.34: Resultados obtidos com as metaheurística GRASP para  $|E| = 16$

Problema	CPLEX				GRASP				$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$			
	Sol. Ótima		Mélhor caso		Pior caso		Média						
	Sol.	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)					
p1r-v16	16.874,80	391,06	16.103,20	22,75	4,57	15.622,80	21,81	7,42	15.913,20	22,26	5,70	147,71	0,28
p2r-v16	18.911,20	224,47	18.318,21	25,39	3,14	17.555,00	24,23	7,17	17.927,69	24,80	5,20	300,75	0,42
p3r-v16	16.300,80	346,68	15.423,61	19,03	5,38	15.002,41	18,49	7,97	15.213,97	18,76	6,67	136,45	0,19
p4r-v16	19.098,00	279,59	18.448,82	28,15	3,40	17.649,81	26,73	7,58	18.090,54	27,51	5,28	240,65	0,45
p5r-v16	17.769,60	304,89	17.280,21	17,87	2,75	17.110,01	17,46	3,71	17.190,88	17,66	3,26	52,56	0,15
p6r-v16	19.135,20	274,45	18.770,79	25,12	1,90	18.257,21	23,77	4,59	18.424,19	24,54	3,72	144,28	0,41
p7r-v16	18.890,20	260,07	18.325,62	24,25	2,99	17.956,23	23,07	4,94	18.113,52	23,69	4,11	119,74	0,39
p8r-v16	17.958,80	251,97	17.250,61	26,95	3,94	17.077,41	25,24	4,91	17.165,68	25,99	4,42	56,46	0,41
p9r-v16	15.105,40	147,23	14.792,81	27,44	2,07	14.622,21	26,49	3,20	14.719,76	26,98	2,55	51,41	0,35
p10r-v16	18.008,00	218,84	17.361,43	18,45	3,59	17.208,44	17,44	4,44	17.269,21	17,95	4,10	51,83	0,31
p11r-v16	16.538,80	199,68	15.954,22	17,10	3,53	15.641,02	16,49	5,43	15.806,05	16,83	4,43	113,91	0,19
p12r-v16	21.847,00	314,45	21.182,60	26,90	3,04	20.412,61	24,58	6,57	20.763,48	26,00	4,96	253,46	0,88
p13r-v16	18.810,80	360,83	17.970,81	22,94	4,47	17.693,01	21,75	5,94	17.870,63	22,03	5,00	86,36	0,34
p14r-v16	19.257,60	187,83	18.680,21	26,05	3,00	18.310,01	25,20	4,92	18.510,30	25,66	3,88	105,09	0,25
p15r-v16	19.927,60	229,51	19.192,03	23,90	3,69	18.847,61	23,21	5,42	19.016,42	23,64	4,57	105,45	0,21
p16r-v16	17.379,40	305,86	16.808,59	23,30	2,94	16.558,60	22,40	4,72	16.724,71	22,84	3,77	99,66	0,29
p17r-v16	17.011,00	261,38	16.084,22	18,74	5,45	15.834,62	17,84	6,92	15.943,15	18,16	6,28	92,95	0,30
p18r-v16	17.169,00	310,64	16.206,20	24,03	5,61	15.594,61	22,96	9,17	15.886,75	23,37	7,47	191,53	0,36
p19r-v16	17.835,20	198,29	17.376,01	15,84	2,57	16.911,00	15,42	5,18	17.163,35	15,61	3,77	168,05	0,12
p20r-v16	19.706,00	260,58	18.783,61	23,05	4,68	18.447,40	22,13	6,39	18.595,31	22,59	5,64	97,08	0,27
p21r-v16	16.805,00	325,84	16.153,41	24,77	3,88	15.456,81	23,91	8,02	15.940,03	24,41	5,15	234,34	0,32
p22r-v16	18.476,00	286,84	18.102,59	25,24	2,02	17.163,80	23,39	7,10	17.554,58	24,54	4,99	381,29	0,69
p23r-v16	21.070,40	331,89	19.984,80	26,46	5,15	19.174,41	25,94	9,00	19.601,90	26,17	6,97	317,55	0,16
p24r-v16	17.351,20	222,74	17.039,61	17,31	1,80	16.747,40	16,59	3,48	16.879,55	16,85	2,72	112,86	0,21
p25r-v16	16.764,00	188,40	15.991,19	24,13	4,61	15.536,99	22,78	7,32	15.712,16	23,53	6,27	151,00	0,45
p26r-v16	19.945,00	275,39	19.523,81	19,15	2,11	18.950,00	17,88	4,99	19.218,41	18,40	3,64	202,84	0,32
p27r-v16	19.686,40	349,55	18.891,42	24,13	4,04	18.639,41	22,61	5,32	18.730,22	23,32	4,86	94,03	0,47
p28r-v16	17.794,00	257,11	17.583,20	23,60	1,18	17.355,40	22,70	2,46	17.446,18	23,20	1,95	84,29	0,23
p29r-v16	18.527,40	291,71	17.951,40	20,01	3,11	17.364,80	18,86	6,28	17.473,01	19,64	5,69	164,81	0,39
p30r-v16	16.302,60	270,97	15.662,22	19,22	3,93	15.143,02	18,12	7,11	15.433,36	18,81	5,33	161,82	0,37
	Média	318,95	Média	22,78	3,57	Média	21,70	6,16	Média	22,24	4,77	145,76	0,32

Tabela E.35: Resultados obtidos com as metaheurística GRASP para  $|E| = 17$ 

Problema	CPLEX				GRASP				$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$			
	Melhor caso		Pior caso		Média		Gap (%)	Gap (%)					
	Sol.	Obj.	FO	GPUt (s)	FO	GPUt (s)					FO	GPUt (s)	
p1r-v17	17.079,40	417,43	15.944,40	22,25	6,65	15.691,20	21,23	8,13	15.812,38	21,64	7,42	81,54	0,31
p2r-v17	18.906,80	239,68	18.181,41	25,75	3,84	17.663,80	24,75	6,57	17.934,58	25,28	5,14	188,48	0,32
p3r-v17	15.789,00	433,53	14.914,60	19,11	5,54	14.378,61	18,28	8,93	14.656,48	18,71	7,17	171,80	0,21
p4r-v17	19.352,00	283,05	18.862,43	28,90	2,53	18.033,61	27,30	6,81	18.383,74	27,98	5,00	248,44	0,43
p5r-v17	17.567,20	274,45	16.990,61	18,14	3,28	16.389,00	17,22	6,71	16.775,04	17,72	4,51	175,43	0,30
p6r-v17	19.298,00	325,37	18.734,01	25,39	2,92	18.342,01	24,14	4,95	18.533,52	24,66	3,96	139,89	0,31
p7r-v17	18.878,20	262,55	18.224,81	23,79	3,46	17.880,00	22,87	5,29	17.994,56	23,38	4,68	95,25	0,31
p8r-v17	17.609,20	246,76	16.969,01	26,72	3,64	16.478,81	25,58	6,42	16.722,45	26,36	5,04	181,56	0,36
p9r-v17	15.015,00	214,61	14.700,81	27,47	2,09	14.596,01	26,50	2,79	14.652,50	27,00	2,41	41,29	0,36
p10r-v17	18.093,80	244,48	17.658,03	18,56	2,41	17.078,43	17,78	5,61	17.475,01	18,22	3,42	176,74	0,26
p11r-v17	16.387,00	192,65	15.563,01	18,22	5,03	15.171,62	16,27	7,42	15.408,42	17,09	5,97	116,19	0,51
p12r-v17	21.729,80	342,13	21.073,21	26,93	3,02	20.510,21	24,79	5,61	20.818,70	26,30	4,19	170,52	0,58
p13r-v17	18.939,20	387,85	18.252,82	23,01	3,62	17.506,21	21,48	7,57	17.967,99	22,15	5,13	208,52	0,45
p14r-v17	19.241,80	278,88	18.897,00	25,88	1,79	18.109,81	25,20	5,88	18.443,73	25,52	4,15	251,03	0,18
p15r-v17	19.796,20	298,37	19.220,62	24,99	2,91	18.870,61	23,81	4,68	19.078,03	24,39	3,63	101,29	0,30
p16r-v17	17.294,60	275,78	16.606,60	23,39	3,98	16.165,00	22,75	6,53	16.408,18	23,06	5,13	139,32	0,23
p17r-v17	16.719,80	323,83	16.087,02	18,63	3,78	15.586,62	17,50	6,78	15.849,16	17,97	5,21	188,33	0,32
p18r-v17	17.435,40	359,55	16.662,80	24,07	4,43	16.357,00	23,15	6,19	16.560,35	23,68	5,02	80,30	0,27
p19r-v17	17.777,80	222,18	17.269,61	15,39	2,86	16.931,60	14,76	4,76	17.122,62	15,04	3,69	111,55	0,18
p20r-v17	19.878,60	357,98	19.247,20	23,00	3,18	18.923,01	22,32	4,81	19.084,69	22,66	3,99	99,86	0,25
p21r-v17	16.694,80	403,03	15.908,01	24,82	4,71	15.460,21	24,13	7,40	15.750,37	24,43	5,66	149,60	0,20
p22r-v17	18.541,60	547,59	17.896,79	26,47	3,48	17.517,01	24,64	5,53	17.738,41	25,48	4,33	102,29	0,48
p23r-v17	21.119,20	353,53	20.407,00	26,50	3,37	19.617,22	25,17	7,11	20.034,29	25,98	5,14	211,97	0,39
p24r-v17	17.489,40	236,83	16.657,81	17,02	4,75	16.259,61	16,02	7,03	16.483,14	16,37	5,75	119,86	0,32
p25r-v17	16.819,40	268,81	15.835,79	24,46	5,85	15.517,20	23,59	7,74	15.672,20	24,08	6,82	93,73	0,27
p26r-v17	19.995,40	293,20	19.527,62	18,74	2,34	18.915,23	17,65	5,40	19.167,54	18,26	4,14	180,37	0,33
p27r-v17	19.557,60	387,43	19.154,82	23,50	2,06	18.807,01	22,28	3,84	18.956,60	22,93	3,07	91,93	0,34
p28r-v17	17.807,60	324,72	17.393,19	23,69	2,33	16.891,60	22,21	5,14	17.247,49	22,87	2,87	138,72	0,49
p29r-v17	18.473,60	495,97	17.708,00	19,65	4,14	17.199,61	19,04	6,90	17.433,28	19,25	5,63	145,91	0,17
p30r-v17	16.288,60	276,32	15.763,62	19,07	3,22	15.257,42	18,47	6,33	15.530,86	18,78	4,65	171,00	0,18
	Média	318,95	Média	22,78	3,57	Média	21,70	6,16	Média	22,24	4,77	145,76	0,32

Tabela E.36: Resultados obtidos com a metaheurística GRASP para  $|E| = 130$

Problema	GRASP													
	Melhor Solução				Melhor caso				Pior caso				Média	
	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	$\sigma_{fo}$	$\sigma_t$
p1r-v130	17.483,99	184,77	3,24	16.918,21	31,19	1,48	16.663,40	29,17	4,69	16.778,04	30,22	4,04	94,84	0,51
p2r-v130	18.859,01	212,46	1,48	18.580,60	36,49	3,65	18.114,00	33,96	3,95	18.351,27	35,12	2,69	150,29	0,76
p3r-v130	16.677,21	252,10	3,65	16.068,41	25,88	1,71	15.783,81	25,11	5,36	15.918,85	25,50	4,55	92,80	0,27
p4r-v130	19.356,62	251,13	1,71	19.024,81	39,31	1,29	18.604,40	37,20	3,89	18.765,12	38,25	3,06	152,25	0,77
p5r-v130	18.291,61	159,13	1,14	18.055,42	25,68	1,14	17.479,02	24,39	4,44	17.807,60	25,21	2,65	195,30	0,35
p6r-v130	19.690,81	164,86	2,98	19.466,62	35,41	2,01	19.022,80	33,22	3,39	19.270,70	34,43	2,13	143,18	0,77
p7r-v130	19.132,43	160,50	2,01	18.562,62	34,36	1,45	18.398,02	32,50	3,84	18.466,04	33,32	3,48	53,01	0,58
p8r-v130	18.156,21	135,70	1,45	17.791,41	37,36	2,32	17.299,81	35,46	4,72	17.507,81	36,43	3,57	147,40	0,70
p9r-v130	15.121,82	115,60	1,09	14.902,61	37,85	1,20	14.720,21	36,56	2,66	14.812,28	37,23	2,05	62,48	0,41
p10r-v130	18.321,02	149,61	1,09	17.896,83	25,52	1,51	17.485,83	24,97	4,56	17.654,78	25,33	3,64	122,69	0,16
p11r-v130	16.578,22	145,89	0,77	16.396,82	24,27	0,74	15.928,21	23,16	3,92	16.136,09	23,65	2,67	170,72	0,33
p12r-v130	21.617,22	230,84	0,85	21.406,81	38,47	0,85	20.687,41	35,78	4,30	21.119,58	37,03	2,30	203,31	0,91
p13r-v130	19.265,62	137,83	1,20	19.102,81	30,97	1,20	18.644,00	29,54	3,23	18.781,26	30,07	2,51	119,88	0,45
p14r-v130	19.258,01	170,79	5,90	19.026,41	36,44	1,51	18.301,02	35,15	4,97	18.640,92	35,83	3,20	202,21	0,53
p15r-v130	21.421,23	216,57	1,51	20.156,81	33,65	1,51	19.672,82	32,81	8,16	19.854,20	33,27	7,32	138,27	0,22
p16r-v130	17.072,01	178,40	0,77	16.813,40	32,82	0,77	16.366,59	30,93	4,13	16.617,64	32,19	2,66	143,52	0,59
p17r-v130	16.888,81	147,48	1,07	16.758,62	25,90	1,07	15.991,22	24,48	5,31	16.432,27	25,06	2,70	195,73	0,38
p18r-v130	17.597,41	208,81	0,74	17.408,62	33,07	0,74	16.668,01	31,85	5,28	17.073,10	32,36	2,98	190,47	0,37
p19r-v130	17.967,60	193,85	2,52	17.835,21	21,77	2,52	17.580,01	20,97	2,16	17.732,17	21,40	1,31	81,17	0,26
p20r-v130	19.689,61	145,04	1,64	19.193,81	31,87	1,64	18.621,40	30,79	5,43	18.968,63	31,33	3,66	181,85	0,40
p21r-v130	16.696,01	272,04	1,45	16.423,01	34,36	1,45	15.821,01	32,10	5,24	16.107,10	33,24	3,53	184,66	0,68
p22r-v130	18.527,39	190,04	1,77	18.257,99	35,78	1,77	17.635,40	33,28	4,81	17.910,67	34,74	3,33	215,49	0,80
p23r-v130	20.842,21	173,60	5,94	20.473,79	37,63	5,94	19.977,00	35,70	4,15	20.274,88	36,45	2,72	159,99	0,50
p24r-v130	18.652,43	214,61	2,33	17.545,01	23,93	2,33	17.128,81	23,03	8,17	17.389,83	23,38	6,77	133,43	0,28
p25r-v130	16.822,40	161,22	1,49	16.436,00	33,01	1,49	15.929,60	30,74	5,31	16.222,04	32,18	3,57	155,53	0,59
p26r-v130	20.046,02	177,04	1,09	19.579,02	26,47	1,09	19.246,22	24,67	3,99	19.428,33	25,59	3,08	131,01	0,53
p27r-v130	19.295,42	117,62	0,30	19.007,82	32,64	0,30	18.466,41	30,45	4,30	18.813,03	31,76	2,50	145,62	0,59
p28r-v130	17.951,61	161,39	1,09	17.897,61	33,38	1,09	17.668,20	32,36	1,58	17.776,02	32,77	0,98	74,22	0,30
p29r-v130	18.818,41	159,37	0,28	18.613,41	27,74	0,28	17.895,81	26,41	4,90	18.230,34	27,09	3,12	214,85	0,48
p30r-v130	16.208,22	167,31	1,88	16.162,42	26,58	1,88	15.550,82	25,75	4,06	15.897,49	26,19	1,92	159,23	0,23
Média	17.852	178,52	1,88	Média	31,66	1,88	Média	30,08	4,50	Média	30,89	3,16	147,18	0,49

Tabela E.37: Resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* para  $|E| = 1$

Problema	CPLEX				Melhor caso				Pior caso				Média					
	Sol.	Otima	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	$\sigma_{fo}$	$\sigma_t$
					Simulated Annealing													
p1r-v1	14.558,40	2,42	14.263,60	55,01	2,02	14.198,60	56,30	2,47	14.256,45	55,55	2,07	19,38	0,34					
p2r-v1	16.994,40	2,54	16.870,61	56,89	0,73	16.841,81	56,28	0,90	16.867,99	56,88	0,74	8,68	0,27					
p3r-v1	11.675,80	2,11	11.580,02	54,98	0,82	11.513,21	54,57	1,39	11.569,10	55,02	0,91	21,11	0,25					
p4r-v1	14.012,80	2,20	13.685,21	59,82	2,34	13.646,81	57,48	2,61	13.671,87	59,01	2,43	12,14	0,82					
p5r-v1	16.548,00	2,45	16.455,80	51,88	0,56	16.455,80	51,88	0,56	16.455,80	51,82	0,56	0,00	0,22					
p6r-v1	18.842,00	2,45	18.757,81	55,14	0,45	18.739,81	56,15	0,54	18.754,71	55,30	0,46	6,15	0,36					
p7r-v1	12.766,60	1,84	12.708,00	56,45	0,46	12.704,60	55,31	0,49	12.706,37	55,87	0,47	0,97	0,37					
p8r-v1	12.675,20	2,20	12.648,20	52,94	0,21	12.648,20	52,94	0,21	12.648,20	53,11	0,21	0,00	0,32					
p9r-v1	12.964,00	2,15	12.908,41	52,35	0,43	12.871,60	52,30	0,71	12.888,92	52,13	0,58	10,04	0,11					
p10r-v1	14.177,20	2,28	13.988,81	52,94	1,33	13.962,01	53,11	1,52	13.983,11	53,02	1,37	7,50	0,21					
p11r-v1	13.721,60	2,17	13.587,61	51,78	0,98	13.555,62	50,92	1,21	13.566,71	51,14	1,13	11,90	0,30					
p12r-v1	16.866,40	2,12	16.777,61	60,20	0,53	16.776,41	60,17	0,53	16.776,74	59,95	0,53	0,46	0,20					
p13r-v1	13.421,80	2,50	13.254,22	56,96	1,25	13.197,82	56,66	1,67	13.227,33	56,68	1,45	20,01	0,19					
p14r-v1	16.327,60	2,03	16.186,01	50,11	0,87	16.181,01	50,17	0,90	16.183,28	50,21	0,88	2,61	0,30					
p15r-v1	14.431,60	2,04	14.161,61	57,51	1,87	14.161,61	57,51	1,87	14.161,61	57,25	1,87	0,00	0,26					
p16r-v1	15.097,20	2,36	15.019,61	54,74	0,51	14.973,61	55,48	0,82	15.010,16	54,99	0,58	14,56	0,34					
p17r-v1	13.126,60	2,34	12.805,42	50,47	2,45	12.764,01	51,28	2,76	12.792,00	50,65	2,55	10,99	0,37					
p18r-v1	13.957,20	2,25	13.854,41	54,10	0,74	13.844,40	54,97	0,81	13.853,49	53,77	0,74	3,02	0,43					
p19r-v1	14.088,60	2,09	13.696,60	49,91	2,78	13.633,60	49,39	3,23	13.688,69	49,69	2,84	18,61	0,23					
p20r-v1	17.898,40	2,42	17.790,21	51,96	0,60	17.774,80	51,60	0,69	17.785,28	51,79	0,63	5,96	0,28					
p21r-v1	11.287,80	2,07	11.107,21	58,28	1,60	11.097,21	58,41	1,69	11.102,12	58,28	1,64	4,04	0,16					
p22r-v1	12.848,60	1,86	12.778,21	58,11	0,55	12.764,40	57,99	0,66	12.772,63	57,93	0,59	4,09	0,36					
p23r-v1	14.503,40	1,93	14.399,21	55,48	0,72	14.399,01	55,59	0,72	14.399,19	55,56	0,72	0,06	0,19					
p24r-v1	16.031,80	2,62	15.947,81	51,92	0,52	15.895,01	51,97	0,85	15.925,34	52,07	0,66	19,50	0,48					
p25r-v1	12.462,20	2,29	12.182,41	50,64	2,25	12.157,01	51,04	2,45	12.172,43	50,87	2,33	8,18	0,24					
p26r-v1	14.928,60	2,29	14.798,21	52,17	0,87	14.785,01	52,28	0,96	14.791,12	52,27	0,92	4,85	0,15					
p27r-v1	13.930,20	2,14	13.813,61	49,71	0,84	13.813,61	49,71	0,84	13.813,61	49,72	0,84	0,00	0,12					
p28r-v1	11.527,80	1,92	11.447,61	51,15	0,70	11.432,21	50,58	0,83	11.436,77	50,70	0,79	6,59	0,25					
p29r-v1	14.161,40	2,29	13.982,81	49,25	1,26	13.959,80	48,84	1,42	13.966,17	49,10	1,38	8,50	0,37					
p30r-v1	14.005,60	2,64	13.820,82	53,12	1,32	13.726,01	52,58	2,00	13.775,16	53,04	1,65	26,22	0,61					
Média		2,23	Média	53,87	1,08	Média	53,78	1,28	Média	53,78	1,15	8,54	0,30					

Tabela E.38: Resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* para  $|E| = 2$

Problema	CPLEX				Melhor caso				Pior caso				Média				
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	$\sigma_{fo}$	$\sigma_t$
p1r-v2	16.784,60	11,09	16.376,80	2,43	16.152,41	59,12	2,43	16.152,41	59,54	16.292,04	3,77	16.292,04	60,00	2,93	59,90	0,77	
p2r-v2	17.179,40	7,11	16.935,21	1,42	16.738,41	58,82	1,42	16.738,41	58,03	16.873,54	2,57	16.873,54	58,55	1,78	58,14	0,71	
p3r-v2	15.383,00	8,89	15.008,01	2,44	14.907,21	60,84	2,44	14.907,21	60,81	14.973,28	3,09	14.973,28	60,87	2,66	31,53	0,40	
p4r-v2	15.579,20	8,27	15.102,21	3,06	14.928,21	61,60	3,06	14.928,21	62,21	15.039,23	4,18	15.039,23	61,86	3,47	53,66	0,91	
p5r-v2	17.161,00	7,96	16.908,40	1,47	16.882,40	53,66	1,47	16.882,40	53,68	16.895,93	1,62	16.895,93	53,79	1,54	9,33	0,15	
p6r-v2	18.176,60	7,89	18.100,61	0,42	18.039,61	58,95	0,42	18.039,61	58,62	18.085,57	0,75	18.085,57	58,98	0,50	16,30	0,26	
p7r-v2	18.094,60	7,86	18.028,82	0,36	17.998,42	59,11	0,36	17.998,42	59,15	18.017,09	0,53	18.017,09	59,20	0,43	12,20	0,18	
p8r-v2	16.486,60	5,77	16.369,41	0,71	16.251,62	54,32	0,71	16.251,62	53,85	16.317,67	1,43	16.317,67	54,09	1,02	46,43	0,49	
p9r-v2	11.652,20	5,24	11.563,62	0,76	11.544,62	53,21	0,76	11.544,62	53,79	11.561,71	0,92	11.561,71	53,36	0,78	5,70	0,29	
p10r-v2	16.580,00	6,19	16.202,22	2,28	16.129,22	56,18	2,28	16.129,22	55,31	16.180,57	2,72	16.180,57	55,89	2,41	23,99	0,34	
p11r-v2	15.650,20	6,30	15.354,01	1,89	15.260,22	55,69	1,89	15.260,22	56,10	15.312,03	2,49	15.312,03	55,62	2,16	26,69	0,28	
p12r-v2	17.610,40	7,36	17.419,62	1,08	17.317,82	67,13	1,08	17.317,82	67,40	17.374,24	1,66	17.374,24	67,29	1,34	34,22	0,35	
p13r-v2	17.614,00	8,72	17.350,02	1,50	17.271,22	59,77	1,50	17.271,22	59,44	17.297,31	1,95	17.297,31	59,73	1,80	25,52	0,41	
p14r-v2	19.224,80	8,13	18.951,42	1,42	18.786,61	54,92	1,42	18.786,61	54,21	18.913,53	2,28	18.913,53	54,28	1,62	52,78	0,64	
p15r-v2	20.322,00	7,41	19.993,43	1,62	19.827,63	70,73	1,62	19.827,63	70,46	19.910,42	2,43	19.910,42	70,74	2,03	54,94	0,67	
p16r-v2	15.629,20	8,70	15.394,80	1,50	15.307,60	56,89	1,50	15.307,60	57,61	15.372,73	2,06	15.372,73	57,79	1,64	27,34	0,72	
p17r-v2	16.599,60	9,73	15.947,82	3,93	15.814,22	53,98	3,93	15.814,22	53,41	15.904,69	4,73	15.904,69	53,50	4,19	38,27	0,52	
p18r-v2	15.785,80	8,38	15.456,80	2,08	15.329,20	58,47	2,08	15.329,20	59,32	15.421,71	2,89	15.421,71	59,07	2,31	40,51	0,66	
p19r-v2	15.884,60	5,73	15.799,20	0,54	15.716,00	51,61	0,54	15.716,00	51,52	15.791,64	1,06	15.791,64	51,62	0,59	25,09	0,13	
p20r-v2	18.166,40	8,10	17.903,81	1,45	17.878,01	56,31	1,45	17.878,01	55,76	17.893,10	1,59	17.893,10	56,48	1,50	8,08	0,59	
p21r-v2	14.553,80	7,71	14.239,01	2,16	14.111,40	66,05	2,16	14.111,40	68,10	14.182,99	3,04	14.182,99	67,31	2,55	50,55	0,97	
p22r-v2	17.623,20	10,86	17.448,21	0,99	17.431,01	64,71	0,99	17.431,01	64,24	17.442,26	1,09	17.442,26	64,18	1,03	6,92	0,41	
p23r-v2	19.222,40	7,41	18.966,01	1,33	18.858,62	57,46	1,33	18.858,62	57,28	18.912,89	1,89	18.912,89	57,50	1,61	39,93	0,22	
p24r-v2	15.134,80	7,22	14.979,80	1,02	14.896,61	60,31	1,02	14.896,61	58,90	14.937,95	1,57	14.937,95	59,87	1,30	25,86	0,89	
p25r-v2	15.304,80	5,79	14.914,80	2,55	14.809,20	55,40	2,55	14.809,20	55,21	14.869,11	3,24	14.869,11	55,41	2,85	31,34	0,30	
p26r-v2	19.042,00	8,61	18.674,22	1,93	18.621,63	56,61	1,93	18.621,63	57,24	18.653,95	2,21	18.653,95	57,06	2,04	20,47	0,31	
p27r-v2	16.504,00	6,86	16.256,01	1,50	16.206,21	50,80	1,50	16.206,21	50,53	16.228,81	1,80	16.228,81	50,81	1,67	13,65	0,36	
p28r-v2	17.249,20	7,64	17.149,21	0,58	17.145,21	54,01	0,58	17.145,21	54,07	17.148,85	0,60	17.148,85	53,91	0,58	1,21	0,14	
p29r-v2	17.381,60	8,25	17.142,41	1,38	16.968,01	56,67	1,38	16.968,01	54,46	17.093,74	2,38	17.093,74	55,94	1,66	50,34	0,65	
p30r-v2	15.325,00	8,72	15.076,01	1,62	14.958,82	60,03	1,62	14.958,82	58,61	15.034,85	2,39	15.034,85	60,04	1,89	34,18	0,99	
Média		7,80	Média	1,58	Média	58,11	1,58	Média	57,96	Média	2,16	Média	58,14	1,80	30,84	0,49	

Tabela E.39: Resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* para  $|E| = 3$

Problema	CPLEX				Simulated Annealing								$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$		
	Sol. Ótima		GPUt. (s)		Melhor caso				Pior caso						Média	
	Sol.	Ótima	GPUt. (s)	Gap (%)	FO	GPUt. (s)	Gap (%)	FO	GPUt. (s)	Gap (%)	FO	GPUt. (s)			Gap (%)	FO
p1r-v3	16.333,60	18.240,40	28,94	3,05	15.835,60	66,70	3,05	15.619,41	69,84	4,37	15.718,89	67,80	3,76	15.718,89	74,33	
p2r-v3	18.240,40	16.333,60	16,36	2,28	17.824,20	61,42	2,28	17.692,01	60,41	3,01	17.742,17	60,58	2,73	17.742,17	37,22	
p3r-v3	16.281,60	17.046,40	24,71	2,91	15.807,81	67,96	2,91	15.528,40	66,18	4,63	15.690,05	67,82	3,63	15.690,05	77,57	
p4r-v3	17.046,40	16.333,60	16,40	1,85	16.731,41	65,22	1,85	16.514,61	64,40	3,12	16.672,63	65,38	2,19	16.672,63	63,66	
p5r-v3	17.643,80	18.134,80	26,75	1,48	17.382,61	55,38	1,48	17.265,21	55,69	2,15	17.353,05	55,42	1,65	17.353,05	44,79	
p6r-v3	18.134,80	16.333,60	16,11	1,46	17.869,81	59,83	1,46	17.721,81	59,47	2,28	17.823,34	59,83	1,72	17.823,34	52,25	
p7r-v3	18.630,00	17.283,60	14,74	0,87	18.467,02	61,22	0,87	18.351,42	60,45	1,50	18.408,06	60,65	1,19	18.408,06	38,49	
p8r-v3	17.283,60	14.316,80	16,24	0,92	17.124,41	56,26	0,92	17.009,41	56,54	1,59	17.064,37	56,40	1,27	17.064,37	45,43	
p9r-v3	14.316,80	17.760,20	9,30	0,97	14.177,42	56,33	0,97	14.127,02	56,29	1,33	14.143,62	56,09	1,21	14.143,62	13,73	
p10r-v3	17.760,20	15.964,40	12,99	1,33	17.523,63	56,81	1,33	17.263,83	55,55	2,79	17.438,01	56,19	1,81	17.438,01	90,04	
p11r-v3	15.964,40	16.129,20	14,20	1,97	15.649,42	54,95	1,97	15.491,62	55,79	2,96	15.598,78	55,05	2,29	15.598,78	47,44	
p12r-v3	20.755,40	18.435,40	16,80	1,24	20.497,82	68,46	1,24	20.450,62	67,92	1,47	20.479,25	67,99	1,33	20.479,25	13,29	
p13r-v3	19.133,00	16.129,20	26,54	2,03	18.744,22	63,38	2,03	18.594,22	63,00	2,82	18.686,19	63,00	2,34	18.686,19	54,11	
p14r-v3	18.435,40	17.129,20	15,63	1,44	18.169,61	55,96	1,44	18.118,41	55,58	1,72	18.144,61	55,85	1,58	18.144,61	18,12	
p15r-v3	19.724,40	16.129,20	16,69	1,68	19.392,61	67,63	1,68	19.211,62	66,09	2,60	19.316,35	68,26	2,07	19.316,35	53,95	
p16r-v3	16.129,20	15.857,60	15,23	1,96	15.813,80	61,50	1,96	15.734,40	60,17	2,45	15.779,31	59,91	2,17	15.779,31	30,32	
p17r-v3	15.857,60	17.129,20	19,98	4,78	15.100,22	54,29	4,78	14.962,62	54,33	5,64	15.043,38	54,42	5,13	15.043,38	45,98	
p18r-v3	17.193,00	16.129,20	32,50	1,66	16.907,61	65,37	1,66	16.518,00	63,22	3,93	16.702,77	64,33	2,85	16.702,77	102,13	
p19r-v3	17.354,20	18.134,80	14,55	0,93	17.193,21	52,91	0,93	16.998,21	52,39	2,05	17.037,65	52,67	1,82	17.037,65	61,68	
p20r-v3	19.978,40	17.046,40	20,08	2,37	19.504,42	59,04	2,37	19.241,02	58,94	3,69	19.455,55	59,31	2,62	19.455,55	79,89	
p21r-v3	15.725,60	18.338,60	17,89	3,29	15.208,22	72,40	3,29	15.012,81	68,18	4,53	15.132,23	69,74	3,77	15.132,23	67,16	
p22r-v3	18.338,60	16.129,20	30,75	1,36	18.089,80	65,89	1,36	17.977,41	66,04	1,97	18.055,11	65,93	1,55	18.055,11	34,85	
p23r-v3	19.077,20	17.046,40	16,55	0,68	18.947,21	60,45	0,68	18.918,00	59,38	0,83	18.930,62	59,62	0,77	18.930,62	7,87	
p24r-v3	17.084,80	16.129,20	16,10	2,08	16.730,21	63,91	2,08	16.550,21	62,62	3,13	16.654,01	64,72	2,52	16.654,01	54,52	
p25r-v3	16.691,20	18.134,80	15,82	2,17	16.329,79	60,04	2,17	16.198,80	58,58	2,95	16.284,36	59,15	2,44	16.284,36	47,75	
p26r-v3	19.502,40	17.046,40	17,97	1,23	19.262,42	56,43	1,23	19.119,02	56,06	1,97	19.190,24	57,09	1,60	19.190,24	42,15	
p27r-v3	18.978,40	16.129,20	16,52	0,93	18.801,02	52,51	0,93	18.643,62	52,68	1,76	18.749,16	52,67	1,21	18.749,16	50,26	
p28r-v3	17.280,60	18.134,80	17,97	1,08	17.094,60	54,67	1,08	17.045,00	55,15	1,36	17.066,45	55,01	1,24	17.066,45	21,01	
p29r-v3	17.334,20	15.168,20	18,72	1,95	16.996,21	54,16	1,95	16.843,41	54,85	2,83	16.949,48	54,74	2,22	16.949,48	44,90	
p30r-v3	15.168,20	18.134,80	20,72	2,08	14.852,42	58,04	2,08	14.560,82	58,44	4,00	14.736,36	58,78	2,85	14.736,36	86,57	
	Média	Média	18,79	1,80	Média	60,30	1,80	Média	59,81	2,71	Média	60,15	2,18	Média	50,05	

Tabela E.40: Resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* para  $|E| = 4$

Problema	CPLEX				Simulated Annealing								$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$		
	Sol. Ótima		GPUt (s)		Melhor caso				Pior caso						Média	
	Sol.	Ótima	GPUt (s)	Gap (%)	FO	GPUt (s)	Gap (%)	FO	GPUt (s)	Gap (%)	FO	GPUt (s)			Gap (%)	FO
p1r-v4	16.298,80	53,12	15.778,00	65,96	3,20	15.555,40	63,83	4,56	15.654,96	64,54	3,95	63,82	1,01			
p2r-v4	18.373,80	29,31	18.197,80	62,53	0,96	18.003,40	61,60	2,02	18.093,42	61,74	1,53	64,49	0,45			
p3r-v4	15.834,40	43,66	15.313,41	67,38	3,29	15.028,61	65,69	5,09	15.159,74	66,73	4,26	72,76	1,01			
p4r-v4	18.535,80	27,10	18.225,21	67,70	1,68	18.055,02	66,26	2,59	18.143,11	66,67	2,12	64,20	0,56			
p5r-v4	17.832,40	34,69	17.570,61	57,41	1,47	17.478,81	56,30	1,98	17.522,68	56,52	1,74	30,67	0,62			
p6r-v4	18.808,80	26,60	18.441,21	60,60	1,95	18.295,02	61,01	2,73	18.383,33	60,50	2,26	48,68	0,66			
p7r-v4	18.315,00	37,91	18.108,62	62,03	1,13	18.026,62	61,81	1,57	18.074,10	62,28	1,32	27,10	0,45			
p8r-v4	16.764,00	19,13	16.545,22	54,85	1,31	16.443,82	54,73	1,91	16.509,51	54,79	1,52	31,45	0,19			
p9r-v4	14.953,00	24,63	14.723,41	55,71	1,54	14.682,42	55,93	1,81	14.690,76	55,85	1,75	12,01	0,17			
p10r-v4	18.448,00	24,99	18.165,84	57,99	1,53	18.027,23	56,73	2,28	18.129,25	57,38	1,73	40,71	0,37			
p11r-v4	16.588,00	23,81	16.323,23	57,39	1,60	16.144,63	58,06	2,67	16.237,28	57,28	2,11	63,39	0,66			
p12r-v4	21.674,20	83,01	21.388,02	73,20	1,32	21.269,82	73,13	1,87	21.337,27	73,73	1,55	43,64	0,68			
p13r-v4	19.184,80	40,64	18.904,02	60,40	1,46	18.757,62	63,46	2,23	18.866,84	60,82	1,66	40,90	0,91			
p14r-v4	18.641,20	27,05	18.390,22	56,87	1,35	18.223,41	57,17	2,24	18.322,36	57,01	1,71	63,25	0,57			
p15r-v4	20.000,00	29,70	19.562,61	70,74	2,19	19.278,42	71,07	3,61	19.448,02	71,07	2,76	105,66	0,76			
p16r-v4	16.547,20	26,49	16.271,00	60,31	1,67	16.156,20	60,57	2,36	16.238,46	60,58	1,87	38,42	0,79			
p17r-v4	16.090,80	29,47	15.556,22	54,17	3,32	15.475,22	55,57	3,83	15.534,53	54,76	3,46	22,14	0,50			
p18r-v4	16.774,80	32,76	16.536,40	61,12	1,42	16.297,20	62,37	2,85	16.442,03	61,17	1,98	64,61	0,78			
p19r-v4	17.457,60	25,10	17.246,61	53,75	1,21	17.013,01	53,69	2,55	17.137,26	54,44	1,83	84,64	0,72			
p20r-v4	19.331,80	31,15	18.679,81	56,90	3,37	18.556,41	56,49	4,01	18.615,25	56,74	3,71	52,09	0,49			
p21r-v4	16.564,40	41,01	16.136,61	73,84	2,58	15.763,41	70,80	4,84	15.996,79	72,87	3,43	101,02	1,00			
p22r-v4	17.525,20	58,94	17.234,41	74,20	1,66	17.136,61	72,71	2,22	17.191,43	72,47	1,90	29,58	1,10			
p23r-v4	20.463,20	35,77	20.205,01	62,73	1,26	20.121,61	60,87	1,67	20.161,39	61,86	1,47	29,72	1,33			
p24r-v4	17.627,00	27,14	17.427,21	65,91	1,13	17.224,21	61,95	2,29	17.345,10	62,97	1,60	64,14	1,10			
p25r-v4	16.943,80	29,06	16.526,00	59,29	2,47	16.418,40	57,99	3,10	16.469,42	58,85	2,80	34,86	0,42			
p26r-v4	19.383,00	33,21	19.144,22	60,18	1,23	19.027,82	60,55	1,83	19.091,62	59,82	1,50	43,88	0,72			
p27r-v4	19.496,80	31,03	19.243,03	52,67	1,30	19.120,82	52,46	1,93	19.181,09	52,37	1,62	38,42	0,30			
p28r-v4	17.419,00	28,13	17.239,61	56,29	1,03	17.067,01	55,79	2,02	17.197,94	56,40	1,27	47,36	0,61			
p29r-v4	17.895,20	39,78	17.486,01	54,93	2,29	17.399,81	55,31	2,77	17.435,21	55,20	2,57	30,48	0,24			
p30r-v4	15.743,20	30,86	15.392,02	65,08	2,23	15.184,62	62,49	3,55	15.310,77	62,89	2,75	73,95	1,09			
	Média	34,18	Média	61,40	1,80	Média	60,88	2,70	Média	61,01	2,19	50,93	0,68			

Tabela E.41: Resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* para  $|E| = 5$

Problema	CPLEX			Simulated Annealing						Média				
	Sol.	Obj.	CPUt. (s)	Melhor caso			Pior caso			FO	CPUt. (s)	Gap (%)	$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$
				FO	CPUt. (s)	Gap (%)	FO	CPUt. (s)	Gap (%)					
p1r-v5	16.530,60	62,49	15.944,40	66,18	3,55	15.511,80	63,88	6,16	15.843,56	65,63	4,16	125,13	0,79	
p2r-v5	18.248,80	44,44	17.940,60	62,08	1,69	17.791,40	59,86	2,51	17.862,80	61,02	2,12	53,28	0,88	
p3r-v5	16.194,40	71,40	15.649,01	70,32	3,37	15.388,21	68,68	4,98	15.566,32	69,71	3,88	79,30	1,30	
p4r-v5	19.082,00	39,22	18.721,22	65,16	1,89	18.456,82	64,25	3,28	18.601,85	65,40	2,52	83,08	0,98	
p5r-v5	17.608,00	51,87	17.267,41	56,10	1,93	17.267,41	56,10	1,93	17.267,41	55,94	1,93	0,00	0,10	
p6r-v5	19.514,00	44,60	19.305,00	59,53	1,07	19.233,40	60,09	1,44	19.278,75	59,56	1,21	21,40	0,37	
p7r-v5	18.573,20	54,79	18.462,82	62,57	0,59	18.304,82	62,84	1,44	18.412,37	62,85	0,87	47,87	0,25	
p8r-v5	17.793,00	37,63	17.606,61	57,75	1,05	17.552,81	57,28	1,35	17.579,99	56,99	1,20	16,74	0,89	
p9r-v5	14.941,20	29,47	14.795,01	59,07	0,98	14.662,61	57,65	1,86	14.714,10	57,85	1,52	42,60	0,48	
p10r-v5	18.312,00	54,85	17.876,43	57,56	2,38	17.554,03	58,15	4,14	17.737,59	56,55	3,14	101,66	0,84	
p11r-v5	15.807,00	34,04	15.548,42	57,77	1,64	15.386,41	55,76	2,66	15.502,44	55,91	1,93	48,10	0,64	
p12r-v5	21.666,20	48,30	21.336,79	67,28	1,52	21.202,80	69,52	2,14	21.286,68	68,50	1,75	35,27	0,93	
p13r-v5	19.397,60	52,68	19.164,61	61,67	1,20	18.990,22	62,39	2,10	19.085,02	62,23	1,61	61,58	1,21	
p14r-v5	18.842,00	39,05	18.698,82	56,63	0,76	18.668,82	56,75	0,92	18.684,42	56,36	0,84	11,05	0,37	
p15r-v5	20.398,60	41,39	20.291,42	67,28	0,53	20.168,82	64,66	1,13	20.260,63	66,65	0,68	36,50	1,02	
p16r-v5	17.208,80	44,79	16.933,81	61,53	1,60	16.713,60	62,77	2,88	16.859,10	62,02	2,03	78,51	0,63	
p17r-v5	16.391,20	69,42	15.883,42	54,33	3,10	15.661,22	54,09	4,45	15.764,84	54,09	3,82	58,73	0,27	
p18r-v5	17.461,00	52,99	17.144,21	66,27	1,81	16.956,01	63,17	2,89	17.082,77	65,56	2,17	61,50	1,08	
p19r-v5	17.706,00	33,01	17.502,41	53,85	1,15	17.312,61	52,69	2,22	17.398,66	52,95	1,74	62,98	0,38	
p20r-v5	19.982,00	60,33	19.400,02	58,03	2,91	19.245,21	57,83	3,69	19.337,94	58,10	3,22	57,27	0,73	
p21r-v5	16.578,20	60,39	16.177,01	72,78	2,42	15.921,21	74,14	3,96	16.040,45	73,24	3,24	84,85	0,72	
p22r-v5	18.240,40	82,56	18.013,62	68,84	1,24	17.799,39	69,24	2,42	17.911,52	68,98	1,80	71,33	1,44	
p23r-v5	20.363,80	59,22	19.936,62	62,11	2,10	19.854,21	62,01	2,50	19.898,21	62,34	2,29	30,49	0,54	
p24r-v5	17.359,60	40,45	17.176,41	65,55	1,06	16.772,81	61,31	3,38	17.010,03	63,70	2,01	111,36	1,84	
p25r-v5	16.493,60	45,61	16.154,19	59,40	2,06	16.003,40	59,23	2,97	16.089,09	59,48	2,45	53,61	0,39	
p26r-v5	18.742,80	44,37	18.508,03	58,33	1,25	18.361,42	58,25	2,03	18.436,66	58,28	1,63	63,90	0,39	
p27r-v5	19.351,80	49,12	19.199,62	52,43	0,79	18.972,42	53,30	1,96	19.158,86	52,43	1,00	66,45	0,32	
p28r-v5	17.656,60	42,68	17.520,21	56,01	0,77	17.366,40	55,60	1,64	17.451,33	55,90	1,16	39,53	0,41	
p29r-v5	18.087,40	48,28	17.751,22	55,55	1,86	17.643,01	55,16	2,46	17.714,76	55,89	2,06	33,75	0,53	
p30r-v5	15.899,80	48,50	15.637,22	56,97	1,65	15.498,82	58,00	2,52	15.570,47	57,39	2,07	46,42	0,59	
Média		49,60	Média	60,96	1,66	Média	60,49	2,67	Média	60,72	2,07	56,14	0,71	

Tabela E.42: Resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* para  $|E| = 6$

Problema	CPLEX				Melhor caso				Pior caso				Média					
	Sol.	Otíma	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	$\sigma_{f_0}$	$\sigma_t$
p1r-v6	17.112,00	87,33	16.566,80	3,19	16.363,00	68,07	4,38	16.482,42	67,53	3,68	16.482,42	67,53	3,68	16.482,42	67,53	3,68	61,20	1,03
p2r-v6	18.734,20	56,19	18.387,41	1,85	18.286,00	61,98	2,39	18.345,33	62,15	2,08	18.345,33	62,15	2,08	18.345,33	62,15	2,08	30,53	0,42
p3r-v6	15.805,40	87,16	15.187,21	3,91	14.930,21	64,47	5,54	15.107,21	64,45	4,42	15.107,21	64,45	4,42	15.107,21	64,45	4,42	68,23	0,83
p4r-v6	18.970,00	72,37	18.683,82	1,51	18.442,81	71,97	2,78	18.493,54	69,77	2,51	18.493,54	69,77	2,51	18.493,54	69,77	2,51	65,29	1,34
p5r-v6	18.103,80	68,62	17.790,61	1,73	17.764,21	57,27	1,88	17.777,79	57,90	1,80	17.777,79	57,90	1,80	17.777,79	57,90	1,80	6,20	0,34
p6r-v6	18.771,40	81,17	18.453,82	1,69	18.355,22	61,98	2,22	18.419,14	62,44	1,88	18.419,14	62,44	1,88	18.419,14	62,44	1,88	33,25	0,72
p7r-v6	18.963,60	45,02	18.684,83	1,47	18.561,62	63,11	2,12	18.650,08	64,23	1,65	18.650,08	64,23	1,65	18.650,08	64,23	1,65	37,13	1,19
p8r-v6	17.474,20	46,93	17.241,61	1,33	17.168,81	57,23	1,75	17.200,71	57,59	1,57	17.200,71	57,59	1,57	17.200,71	57,59	1,57	23,93	0,35
p9r-v6	14.492,20	37,81	14.157,41	2,31	14.084,22	56,20	2,82	14.128,43	55,94	2,51	14.128,43	55,94	2,51	14.128,43	55,94	2,51	22,11	0,26
p10r-v6	17.963,60	68,30	17.466,24	2,77	17.312,42	57,23	3,62	17.411,72	57,69	3,07	17.411,72	57,69	3,07	17.411,72	57,69	3,07	54,48	0,76
p11r-v6	16.566,60	53,71	16.293,63	1,65	16.135,03	60,05	2,61	16.225,22	60,52	2,06	16.225,22	60,52	2,06	16.225,22	60,52	2,06	46,48	0,73
p12r-v6	21.572,60	91,01	21.247,62	1,51	21.149,41	73,17	1,96	21.202,18	73,47	1,72	21.202,18	73,47	1,72	21.202,18	73,47	1,72	33,52	1,01
p13r-v6	18.940,20	70,22	18.665,83	1,45	18.521,82	61,82	2,21	18.622,02	61,99	1,68	18.622,02	61,99	1,68	18.622,02	61,99	1,68	44,72	0,23
p14r-v6	18.951,80	48,55	18.632,82	1,68	18.522,62	57,72	2,26	18.576,26	57,02	1,98	18.576,26	57,02	1,98	18.576,26	57,02	1,98	38,10	0,78
p15r-v6	20.126,40	85,04	19.734,62	1,95	19.530,61	74,04	2,96	19.642,95	75,05	2,40	19.642,95	75,05	2,40	19.642,95	75,05	2,40	69,97	1,36
p16r-v6	17.147,00	86,86	16.911,21	1,38	16.797,40	64,44	2,04	16.856,90	62,76	1,69	16.856,90	62,76	1,69	16.856,90	62,76	1,69	36,19	0,74
p17r-v6	16.173,80	72,06	15.524,62	4,01	15.287,42	54,91	5,48	15.406,58	55,67	4,74	15.406,58	55,67	4,74	15.406,58	55,67	4,74	65,54	0,99
p18r-v6	17.375,20	88,72	16.972,01	2,32	16.681,40	65,04	3,99	16.774,73	65,43	3,46	16.774,73	65,43	3,46	16.774,73	65,43	3,46	84,44	1,42
p19r-v6	17.771,40	49,47	17.535,01	1,33	17.372,81	55,72	2,24	17.472,48	55,65	1,68	17.472,48	55,65	1,68	17.472,48	55,65	1,68	55,79	0,61
p20r-v6	19.878,00	61,46	19.508,21	1,86	19.234,62	57,49	3,24	19.428,54	57,60	2,26	19.428,54	57,60	2,26	19.428,54	57,60	2,26	90,55	0,59
p21r-v6	15.979,20	74,08	15.568,61	2,57	15.408,61	76,78	3,57	15.480,68	76,38	3,12	15.480,68	76,38	3,12	15.480,68	76,38	3,12	47,40	1,06
p22r-v6	18.603,00	52,26	18.406,20	1,06	18.306,19	68,35	1,60	18.381,11	68,73	1,19	18.381,11	68,73	1,19	18.381,11	68,73	1,19	35,14	1,09
p23r-v6	21.005,80	63,43	20.705,20	1,43	20.566,41	60,44	2,09	20.638,45	61,38	1,75	20.638,45	61,38	1,75	20.638,45	61,38	1,75	49,40	0,84
p24r-v6	17.436,40	64,69	17.117,01	1,83	16.960,41	61,80	2,73	17.051,23	62,07	2,21	17.051,23	62,07	2,21	17.051,23	62,07	2,21	57,87	0,70
p25r-v6	16.966,60	57,22	16.464,40	2,96	16.364,80	59,78	3,55	16.419,69	60,51	3,22	16.419,69	60,51	3,22	16.419,69	60,51	3,22	30,92	0,60
p26r-v6	19.733,80	70,12	19.480,02	1,29	19.257,03	59,37	2,42	19.406,47	59,14	1,66	19.406,47	59,14	1,66	19.406,47	59,14	1,66	64,69	0,38
p27r-v6	19.231,60	61,09	18.969,22	1,31	18.893,02	54,13	1,71	18.947,13	53,34	1,43	18.947,13	53,34	1,43	18.947,13	53,34	1,43	23,38	0,78
p28r-v6	17.712,60	63,60	17.459,81	1,43	17.386,61	55,96	1,84	17.423,12	55,84	1,63	17.423,12	55,84	1,63	17.423,12	55,84	1,63	21,01	0,29
p29r-v6	18.358,20	62,73	18.059,41	1,63	17.960,62	54,37	2,17	18.026,27	55,49	1,81	18.026,27	55,49	1,81	18.026,27	55,49	1,81	28,07	0,71
p30r-v6	15.891,20	66,47	15.554,82	2,12	15.259,22	58,83	3,98	15.410,87	58,21	3,02	15.410,87	58,21	3,02	15.410,87	58,21	3,02	89,08	0,96
Média		66,46	Média	1,95	Média	61,79	2,80	Média	61,86	2,33	Média	61,86	2,33	Média	61,86	2,33	47,15	0,77

Tabela E.43: Resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* para  $|E| = 7$

Problema	CPLEX			Simulated Annealing						Média				
	Sol.	Obj.	CPUt. (s)	Melhor caso			Pior caso			FO	CPUt. (s)	Gap (%)	$\sigma_{fo}$	$\sigma_t$
				FO	CPUt. (s)	Gap (%)	FO	CPUt. (s)	Gap (%)					
p1r-v7	16.792,40		107,69	16.542,40	66,78	1,49	16.235,60	66,01	3,32	16.375,67	67,06	2,48	94,92	0,70
p2r-v7	18.666,20		68,09	18.297,41	61,29	1,98	18.136,61	60,42	2,84	18.265,06	61,20	2,15	46,34	0,39
p3r-v7	15.939,80		127,16	15.340,81	67,43	3,76	15.144,41	65,80	4,99	15.242,34	66,62	4,38	51,45	1,05
p4r-v7	19.262,60		67,38	18.958,62	70,35	1,58	18.752,62	69,69	2,65	18.871,69	69,68	2,03	66,27	1,01
p5r-v7	18.254,00		74,97	17.853,42	57,68	2,19	17.773,02	57,03	2,63	17.807,98	57,68	2,44	26,89	0,29
p6r-v7	19.218,20		97,91	19.075,19	62,86	0,74	18.860,41	64,09	1,86	18.964,62	63,85	1,32	70,74	0,81
p7r-v7	18.953,60		54,41	18.747,43	61,77	1,09	18.653,22	62,28	1,58	18.711,84	62,18	1,28	26,55	0,26
p8r-v7	17.940,20		73,23	17.690,01	58,31	1,39	17.607,62	57,66	1,85	17.649,81	57,48	1,62	32,83	0,60
p9r-v7	15.228,40		51,96	15.023,42	56,48	1,35	14.982,22	57,39	1,62	14.999,29	56,76	1,50	12,61	0,42
p10r-v7	17.864,20		69,72	17.536,63	57,54	1,83	17.400,24	57,03	2,60	17.477,98	57,49	2,16	54,21	0,45
p11r-v7	16.390,80		64,21	16.082,42	56,85	1,88	15.999,82	57,48	2,39	16.053,82	57,44	2,06	30,08	0,75
p12r-v7	21.407,40		118,50	21.123,21	71,27	1,33	20.940,81	69,52	2,18	21.047,03	70,92	1,68	51,96	0,70
p13r-v7	19.217,00		103,30	18.871,82	66,04	1,80	18.608,21	63,74	3,17	18.775,98	64,67	2,29	71,85	1,14
p14r-v7	19.091,00		85,55	18.809,62	57,38	1,47	18.381,21	55,17	3,72	18.591,80	56,67	2,61	129,61	0,73
p15r-v7	19.673,20		78,91	19.386,03	72,70	1,46	19.088,22	70,57	2,97	19.261,79	72,85	2,09	95,46	1,09
p16r-v7	17.728,40		91,35	17.466,62	62,17	1,48	17.277,42	63,12	2,54	17.389,36	62,34	1,91	63,10	0,34
p17r-v7	16.782,80		86,08	16.388,82	56,88	2,35	16.189,42	54,81	3,54	16.289,02	55,04	2,94	64,87	1,40
p18r-v7	17.403,40		107,11	17.075,61	63,64	1,88	16.784,40	64,56	3,56	16.954,29	64,22	2,58	95,58	0,55
p19r-v7	17.377,60		51,76	17.034,81	56,85	1,97	16.699,81	54,85	3,90	16.949,34	56,60	2,46	101,21	0,80
p20r-v7	19.235,20		99,76	18.924,61	56,58	1,61	18.792,22	57,13	2,30	18.854,32	56,60	1,98	39,88	0,34
p21r-v7	16.766,60		88,80	16.443,01	84,40	1,93	16.235,41	82,02	3,17	16.339,43	79,91	2,55	63,11	2,39
p22r-v7	18.405,20		106,07	18.255,01	62,47	0,82	18.174,39	68,20	1,25	18.224,08	67,86	0,98	23,45	0,28
p23r-v7	21.313,60		84,54	20.968,40	62,47	1,62	20.692,20	64,44	2,92	20.875,51	62,51	2,06	79,53	0,81
p24r-v7	17.633,80		82,26	17.374,01	66,46	1,47	17.175,42	64,85	2,60	17.310,65	65,99	1,83	70,56	0,76
p25r-v7	16.400,00		98,86	15.890,59	61,10	3,11	15.775,00	60,07	3,81	15.819,40	62,14	3,54	35,86	1,10
p26r-v7	19.645,40		102,38	19.244,82	59,97	2,04	19.040,02	57,37	3,08	19.144,22	58,14	2,55	67,23	0,69
p27r-v7	19.412,60		83,38	19.166,21	52,49	1,27	19.083,81	52,53	1,69	19.132,83	52,37	1,44	23,49	0,27
p28r-v7	17.938,60		76,75	17.729,21	56,21	1,17	17.613,81	55,65	1,81	17.690,84	55,66	1,38	45,17	0,31
p29r-v7	18.695,00		143,26	18.359,21	55,83	1,80	18.226,21	55,18	2,51	18.299,89	56,26	2,11	51,76	0,73
p30r-v7	16.204,60		69,98	15.859,02	60,17	2,13	15.757,02	58,95	2,76	15.810,38	59,38	2,43	32,54	0,53
	Média		87,18	Média	62,25	1,73	Média	61,59	2,73	Média	61,92	2,16	57,30	0,72

Tabela E.44: Resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* para  $|E| = 8$

Problema	CPLEX			Simulated Annealing						Média				
	Sol.	Obj.	CPUt. (s)	Melhor caso			Pior caso			FO	CPUt. (s)	Gap (%)	$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$
				FO	CPUt. (s)	Gap (%)	FO	CPUt. (s)	Gap (%)					
p1r-v8	16.602,80	144,50	16.108,40	62,40	2,98	15.818,00	63,93	4,73	15.948,04	63,40	3,94	89,57	0,78	
p2r-v8	18.630,80	114,91	18.415,01	60,58	1,16	18.182,61	60,73	2,41	18.295,02	60,84	1,80	60,43	0,56	
p3r-v8	16.145,40	170,96	15.605,41	70,24	3,34	15.359,00	66,53	4,87	15.481,25	69,19	4,11	90,20	1,67	
p4r-v8	19.158,80	89,00	18.855,01	72,21	1,59	18.680,22	71,75	2,50	18.758,11	71,25	2,09	55,70	1,31	
p5r-v8	17.211,40	98,55	16.789,41	57,09	2,45	16.728,01	56,75	2,81	16.763,02	57,12	2,61	19,21	0,25	
p6r-v8	19.316,80	102,41	19.100,61	61,68	1,12	18.849,43	61,72	2,42	19.010,61	61,65	1,59	74,23	0,59	
p7r-v8	18.657,40	71,20	18.278,22	62,65	2,03	18.136,02	62,30	2,79	18.225,01	62,20	2,32	50,49	0,30	
p8r-v8	17.930,20	75,10	17.709,62	58,95	1,23	17.538,22	58,50	2,19	17.651,40	58,55	1,55	57,42	0,53	
p9r-v8	15.005,80	46,11	14.866,61	55,99	0,93	14.837,02	56,07	1,12	14.860,16	56,05	0,97	8,94	0,16	
p10r-v8	18.381,00	71,50	17.908,42	57,89	2,57	17.742,44	56,65	3,47	17.828,94	57,22	3,00	53,55	0,54	
p11r-v8	16.733,40	80,57	16.482,62	59,48	1,50	16.428,03	60,08	1,82	16.465,20	59,60	1,60	17,68	0,52	
p12r-v8	21.913,20	98,02	21.604,81	72,46	1,41	21.453,20	70,24	2,10	21.532,75	71,13	1,74	47,49	0,92	
p13r-v8	19.007,00	110,14	18.642,82	62,96	1,92	18.436,22	62,60	3,00	18.556,49	62,45	2,37	66,27	0,59	
p14r-v8	18.985,20	80,32	18.713,22	57,50	1,43	18.499,42	57,24	2,56	18.652,25	57,55	1,75	72,92	0,57	
p15r-v8	20.439,00	98,11	20.044,42	69,12	1,93	19.607,22	67,70	4,07	19.930,57	69,07	2,49	121,94	0,74	
p16r-v8	17.393,20	106,33	17.210,01	63,45	1,05	17.111,81	63,03	1,62	17.166,16	62,83	1,31	33,09	0,46	
p17r-v8	16.825,00	114,43	16.256,22	55,15	3,38	16.007,02	54,51	4,86	16.170,11	55,57	3,89	110,23	0,89	
p18r-v8	17.012,40	97,56	16.702,00	63,59	1,82	16.485,00	62,35	3,10	16.617,11	63,64	2,32	65,11	0,68	
p19r-v8	17.706,80	98,94	17.399,21	57,16	1,74	17.274,21	56,86	2,44	17.344,21	56,71	2,05	38,27	0,62	
p20r-v8	19.159,40	112,01	18.834,02	57,81	1,70	18.757,02	58,26	2,10	18.797,58	57,16	1,89	30,03	0,63	
p21r-v8	16.748,80	113,83	16.293,21	76,14	2,72	16.094,81	75,89	3,90	16.227,88	75,85	3,11	54,18	1,40	
p22r-v8	18.311,20	135,17	18.007,20	66,47	1,66	17.847,00	65,35	2,54	17.949,36	66,76	1,98	42,26	0,90	
p23r-v8	20.995,40	110,45	20.721,01	63,39	1,31	20.576,00	63,19	2,00	20.672,39	63,41	1,54	39,16	0,81	
p24r-v8	17.657,80	102,54	17.455,42	65,50	1,15	17.321,81	64,89	1,90	17.397,94	64,87	1,47	50,98	1,12	
p25r-v8	16.967,00	85,04	16.591,60	59,22	2,21	16.361,19	58,57	3,57	16.490,47	58,91	2,81	81,49	0,23	
p26r-v8	20.079,80	104,26	19.631,82	58,00	2,23	19.515,22	57,73	2,81	19.588,28	57,74	2,45	41,79	0,43	
p27r-v8	19.443,60	117,58	19.259,41	52,87	0,95	19.104,02	52,97	1,75	19.214,43	53,17	1,18	43,76	0,30	
p28r-v8	17.760,00	77,17	17.615,41	56,67	0,81	17.528,61	56,32	1,30	17.587,57	56,53	0,97	28,57	0,27	
p29r-v8	18.402,00	96,74	18.028,82	58,54	2,03	17.881,62	57,60	2,83	17.965,31	58,45	2,37	44,28	0,47	
p30r-v8	15.949,00	90,25	15.678,22	58,97	1,70	15.488,62	58,54	2,89	15.573,13	58,85	2,36	50,98	0,26	
Média		100,46	Média	61,80	1,80	Média	61,30	2,75	Média	61,59	2,19	54,67	0,65	

Tabela E.45: Resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* para  $|E| = 9$

Problema	CPLEX				Simulated Annealing								$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$		
	Sol. Ótima		GPUt (s)		Melhor caso				Pior caso						Média	
	Sol.	Ótima	GPUt (s)	Gap (%)	FO	GPUt (s)	Gap (%)	FO	GPUt (s)	Gap (%)	FO	GPUt (s)			Gap (%)	FO
p1r-v9	16.825,00	173,43	16.382,40	2,63	15.881,80	67,98	5,61	16.221,89	67,43	3,58	159,85	0,81				
p2r-v9	18.686,20	93,46	18.350,01	1,80	18.239,01	61,89	2,39	18.298,64	60,51	2,07	30,49	0,81				
p3r-v9	16.510,80	208,60	16.016,81	2,99	15.652,21	74,00	5,20	15.867,85	75,41	3,89	108,45	1,74				
p4r-v9	19.045,60	117,84	18.561,42	2,54	18.245,42	75,52	4,20	18.449,62	73,42	3,13	90,84	1,76				
p5r-v9	18.087,20	126,24	17.598,01	2,57	17.520,00	57,68	3,14	17.563,08	57,64	2,90	26,13	0,33				
p6r-v9	19.432,80	113,10	19.247,21	0,96	19.183,01	61,25	1,29	19.224,68	61,92	1,07	16,96	0,38				
p7r-v9	18.814,00	120,20	18.611,62	1,08	18.480,43	63,62	1,77	18.550,31	63,56	1,40	48,24	0,41				
p8r-v9	17.881,20	80,50	17.636,01	1,37	17.576,42	57,92	1,70	17.608,94	57,87	1,52	17,70	0,42				
p9r-v9	15.061,40	66,27	14.865,01	1,30	14.782,21	57,21	1,85	14.838,36	57,15	1,48	32,51	0,33				
p10r-v9	18.094,60	86,85	17.801,23	1,62	17.564,03	57,31	2,93	17.668,40	57,39	2,36	74,72	0,40				
p11r-v9	16.258,60	106,16	15.864,62	2,42	15.669,62	59,38	3,62	15.756,55	58,14	3,09	58,42	0,99				
p12r-v9	21.678,40	106,85	21.417,62	1,20	21.308,21	72,28	1,71	21.371,16	71,28	1,42	31,13	1,33				
p13r-v9	19.256,20	176,95	18.859,82	2,06	18.605,83	63,54	3,38	18.759,22	63,07	2,58	86,47	1,06				
p14r-v9	19.488,00	94,91	18.995,22	2,53	18.744,41	59,70	3,82	18.853,76	58,72	3,25	75,38	1,05				
p15r-v9	20.238,40	116,83	19.814,42	2,09	19.699,63	69,24	2,66	19.766,97	71,06	2,33	35,09	1,11				
p16r-v9	17.344,00	140,45	17.084,01	1,50	16.848,21	61,18	2,86	16.998,05	62,28	1,99	79,23	0,48				
p17r-v9	16.748,20	117,36	15.999,81	4,47	15.848,81	56,25	5,37	15.913,89	55,06	4,98	44,40	0,70				
p18r-v9	17.380,00	135,72	16.983,20	2,28	16.739,60	64,48	3,68	16.866,80	65,72	2,95	86,16	1,03				
p19r-v9	17.537,00	91,74	17.238,21	1,70	17.059,81	55,51	2,72	17.169,83	55,79	2,09	51,57	0,51				
p20r-v9	19.807,60	114,72	19.418,61	1,96	19.245,01	61,21	2,84	19.359,66	60,03	2,26	53,23	0,61				
p21r-v9	16.796,80	140,67	16.429,61	2,19	16.281,21	77,57	3,07	16.357,25	75,10	2,62	43,91	2,21				
p22r-v9	18.561,80	110,39	18.349,39	1,14	18.253,01	71,10	1,66	18.308,22	69,02	1,37	30,19	1,27				
p23r-v9	20.841,40	117,70	20.532,20	1,48	20.326,43	62,73	2,47	20.457,21	62,81	1,84	62,07	0,64				
p24r-v9	17.186,80	148,58	16.854,00	1,94	16.672,61	60,59	2,99	16.767,14	62,58	2,44	63,37	1,45				
p25r-v9	16.535,40	110,89	16.092,60	2,68	15.986,79	60,45	3,32	16.043,93	60,39	2,97	40,47	0,52				
p26r-v9	19.688,60	133,35	19.204,62	2,46	18.957,62	59,76	3,71	19.090,04	59,22	3,04	75,65	0,56				
p27r-v9	18.886,60	116,83	18.623,82	1,39	18.421,81	52,11	2,46	18.522,20	52,35	1,93	62,97	0,29				
p28r-v9	17.470,20	107,06	17.231,20	1,37	17.153,79	56,95	1,81	17.213,44	56,71	1,47	23,11	0,22				
p29r-v9	18.202,20	126,70	17.684,02	2,85	17.579,21	56,69	3,42	17.637,62	55,80	3,10	31,10	0,47				
p30r-v9	16.052,20	131,07	15.670,02	2,38	15.456,02	58,63	3,71	15.556,49	58,42	3,09	62,20	0,73				
Média		121,05	Média	2,04	Média	62,46	3,05	Média	62,19	2,47	56,73	0,82				

Tabela E.46: Resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* para  $|E| = 10$

Problema	CPLEX			Simulated Annealing						Média				
	Sol.	Obj.	CPUt. (s)	Melhor caso			Pior caso			FO	CPUt. (s)	Gap (%)	$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$
				FO	CPUt. (s)	Gap (%)	FO	CPUt. (s)	Gap (%)					
p1r-v10	16.891,40	16.344,00	219,95	16.344,00	68,98	3,24	16.151,80	68,46	4,38	16.275,27	67,91	3,65	64,90	0,97
p2r-v10	18.797,20	18.279,00	113,97	18.279,00	60,16	2,76	18.051,41	61,36	3,97	18.172,11	61,69	3,33	60,66	0,86
p3r-v10	16.288,00	15.948,41	177,95	15.948,41	70,80	2,08	15.613,61	67,70	4,14	15.827,21	69,08	2,83	99,63	1,46
p4r-v10	19.389,60	19.008,82	158,11	19.008,82	71,26	1,96	18.883,42	73,32	2,61	18.939,37	70,98	2,32	40,86	1,13
p5r-v10	18.055,20	17.850,01	153,07	17.850,01	56,54	1,14	17.770,82	56,20	1,58	17.812,98	56,52	1,34	23,67	0,20
p6r-v10	19.189,40	18.915,61	160,31	18.915,61	62,29	1,43	18.779,61	62,42	2,14	18.872,06	62,56	1,65	45,75	0,34
p7r-v10	18.297,60	17.941,02	112,49	17.941,02	63,70	1,95	17.796,42	64,18	2,74	17.881,65	64,27	2,27	49,68	0,61
p8r-v10	17.908,20	17.697,02	113,97	17.697,02	58,40	1,18	17.640,01	57,61	1,50	17.672,67	58,19	1,32	22,06	0,58
p9r-v10	15.122,00	15.018,02	78,78	15.018,02	57,77	0,69	14.987,21	58,12	0,89	15.000,61	58,01	0,80	12,92	0,14
p10r-v10	18.381,00	17.952,83	124,54	17.952,83	56,77	2,33	17.724,41	57,99	3,57	17.811,79	56,83	3,10	66,69	0,70
p11r-v10	16.223,80	15.852,42	124,82	15.852,42	58,89	2,29	15.741,42	57,55	2,97	15.818,37	58,23	2,50	34,21	0,50
p12r-v10	21.688,60	21.285,80	131,66	21.285,80	73,55	1,86	21.146,41	71,88	2,50	21.238,11	73,42	2,08	45,77	0,67
p13r-v10	19.365,20	19.050,82	200,12	19.050,82	64,95	1,62	18.887,01	65,11	2,47	18.977,76	63,87	2,00	50,91	0,89
p14r-v10	19.217,40	18.882,21	112,40	18.882,21	56,31	1,74	18.682,42	56,22	2,78	18.793,90	56,41	2,20	68,21	0,75
p15r-v10	19.674,00	19.355,21	127,75	19.355,21	71,12	1,62	19.247,01	71,09	2,17	19.318,16	70,70	1,81	30,43	0,57
p16r-v10	17.258,20	16.981,01	167,95	16.981,01	64,60	1,61	16.698,61	63,28	3,24	16.835,46	63,36	2,45	104,31	0,97
p17r-v10	16.684,80	16.057,22	139,82	16.057,22	54,72	3,76	15.901,82	54,22	4,69	15.993,87	54,73	4,14	54,00	0,36
p18r-v10	17.325,00	16.999,61	185,77	16.999,61	66,96	1,88	16.738,80	68,55	3,38	16.867,59	66,55	2,64	82,61	1,12
p19r-v10	17.566,80	17.324,61	119,29	17.324,61	56,76	1,38	17.200,01	56,34	2,09	17.278,79	56,64	1,64	44,92	0,36
p20r-v10	19.942,60	19.616,82	168,39	19.616,82	60,69	1,63	19.339,43	59,72	3,02	19.513,28	60,24	2,15	109,03	0,75
p21r-v10	16.634,40	16.178,61	157,34	16.178,61	77,02	2,74	15.992,02	77,50	3,86	16.087,74	76,79	3,29	51,56	1,84
p22r-v10	18.466,20	18.243,40	138,48	18.243,40	69,41	1,21	18.165,41	69,86	1,63	18.208,14	69,47	1,40	25,95	0,42
p23r-v10	21.104,00	20.763,20	143,26	20.763,20	62,40	1,61	20.552,61	61,50	2,61	20.656,68	62,36	2,12	69,68	0,77
p24r-v10	17.354,40	17.173,40	119,89	17.173,40	63,43	1,04	17.010,61	62,55	1,98	17.066,90	63,22	1,66	51,06	0,78
p25r-v10	16.594,20	16.243,80	116,55	16.243,80	58,17	2,11	16.099,40	57,47	2,98	16.170,25	58,55	2,55	56,12	0,65
p26r-v10	19.719,80	19.270,62	164,60	19.270,62	60,39	2,28	18.983,02	58,56	3,74	19.136,24	59,46	2,96	95,92	0,65
p27r-v10	19.473,20	19.207,42	138,14	19.207,42	51,71	1,36	19.087,81	51,78	1,98	19.162,76	52,14	1,59	32,01	0,26
p28r-v10	17.647,80	17.513,61	124,63	17.513,61	56,91	0,76	17.426,21	56,71	1,26	17.480,65	56,86	0,95	26,35	0,27
p29r-v10	18.607,60	18.162,82	178,11	18.162,82	58,18	2,39	18.112,62	58,46	2,66	18.139,71	58,29	2,51	13,73	0,58
p30r-v10	15.858,20	15.374,82	138,17	15.374,82	59,59	3,05	15.078,82	58,43	4,91	15.265,98	59,37	3,73	88,90	0,48
Média		Média	143,68	Média	62,41	1,89	Média	62,14	2,81	Média	62,22	2,30	54,08	0,69

Tabela E.47: Resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* para  $|E| = 11$

Problema	CPLEX			Simulated Annealing						Média				
	Sol.	Obj.	CPUt. (s)	Melhor caso			Pior caso			FO	CPUt. (s)	Gap (%)	$\sigma_{fo}$	$\sigma_t$
				FO	CPUt. (s)	Gap (%)	FO	CPUt. (s)	Gap (%)					
p1r-v11	17.030,60	281,66	16.595,60	68,13	2,55	16.476,40	66,50	3,25	16.526,78	66,12	2,96	34,28	0,86	
p2r-v11	18.873,40	123,72	18.682,60	62,63	1,01	18.550,21	61,52	1,71	18.628,19	62,16	1,30	34,92	0,87	
p3r-v11	16.360,60	222,46	15.922,81	71,66	2,68	15.577,81	69,96	4,78	15.799,39	72,61	3,43	102,63	1,51	
p4r-v11	18.979,00	141,84	18.547,02	72,86	2,28	18.274,81	73,76	3,71	18.404,20	71,98	3,03	77,43	1,41	
p5r-v11	17.920,60	158,72	17.596,21	56,69	1,81	17.515,02	56,88	2,26	17.565,29	56,76	1,98	23,71	0,48	
p6r-v11	19.494,20	156,72	19.191,40	61,64	1,55	19.095,80	61,19	2,04	19.153,15	61,43	1,75	26,81	0,41	
p7r-v11	18.948,80	181,85	18.683,42	63,82	1,40	18.276,22	65,36	3,55	18.560,00	64,49	2,05	115,96	0,79	
p8r-v11	17.948,00	111,81	17.782,01	58,17	0,92	17.629,21	57,05	1,78	17.714,52	57,57	1,30	45,98	0,53	
p9r-v11	14.837,60	91,53	14.688,01	56,72	1,01	14.635,81	57,32	1,36	14.655,71	57,04	1,23	18,19	0,53	
p10r-v11	18.391,40	129,89	17.983,23	57,50	2,22	17.854,84	56,81	2,92	17.920,71	56,99	2,56	38,64	0,51	
p11r-v11	16.483,40	140,12	16.245,22	62,26	1,44	15.983,22	60,51	3,03	16.182,35	61,12	1,83	83,31	0,77	
p12r-v11	21.659,60	192,04	21.409,81	74,06	1,15	21.260,82	71,23	1,84	21.331,23	71,60	1,52	46,98	1,32	
p13r-v11	19.485,20	241,74	19.285,03	63,71	1,03	19.093,23	62,77	2,01	19.225,68	63,91	1,33	56,47	0,63	
p14r-v11	19.223,40	124,19	18.761,62	58,49	2,40	18.561,62	57,37	3,44	18.668,76	57,61	2,89	75,50	0,67	
p15r-v11	19.956,00	164,96	19.548,23	70,32	2,04	19.155,04	71,20	4,01	19.406,47	69,81	2,75	120,12	1,12	
p16r-v11	17.435,20	168,22	17.060,21	63,80	2,15	16.829,21	62,51	3,48	16.993,37	63,21	2,53	66,21	0,56	
p17r-v11	16.928,20	167,89	16.484,82	55,47	2,62	16.266,01	55,11	3,91	16.418,24	55,25	3,01	73,27	0,68	
p18r-v11	17.112,00	239,15	16.802,60	65,80	1,81	16.507,20	67,49	3,53	16.676,40	65,23	2,55	95,17	1,18	
p19r-v11	17.853,80	116,64	17.468,41	57,04	2,16	17.257,21	56,67	3,34	17.358,52	57,16	2,77	62,46	0,55	
p20r-v11	20.008,40	175,83	19.580,22	57,23	2,14	19.481,42	57,70	2,63	19.541,75	57,84	2,33	30,12	0,89	
p21r-v11	16.598,60	203,27	16.091,81	75,88	3,05	15.931,21	75,03	4,02	16.014,56	76,60	3,52	47,62	1,99	
p22r-v11	18.490,40	181,38	18.075,40	69,17	2,24	17.827,40	70,72	3,59	17.987,28	70,54	2,72	73,40	1,18	
p23r-v11	21.147,80	169,87	20.863,81	62,27	1,34	20.640,60	62,44	2,40	20.802,51	62,84	1,63	78,31	0,70	
p24r-v11	17.450,80	125,22	17.223,21	67,21	1,30	16.934,21	64,67	2,96	17.112,10	65,96	1,94	101,68	1,14	
p25r-v11	16.820,60	143,36	16.522,20	61,86	1,77	16.390,20	60,83	2,56	16.449,92	60,99	2,20	36,62	0,79	
p26r-v11	19.769,00	156,91	19.382,62	60,31	1,95	19.129,02	59,77	3,24	19.260,78	59,90	2,57	70,64	0,83	
p27r-v11	19.150,40	186,31	18.973,21	54,25	0,93	18.827,02	53,55	1,69	18.910,71	53,67	1,25	46,83	0,76	
p28r-v11	17.708,20	167,73	17.537,21	57,47	0,97	17.459,21	57,69	1,41	17.480,22	57,29	1,29	23,29	0,41	
p29r-v11	18.788,20	157,92	18.486,40	56,49	1,61	18.305,82	58,65	2,57	18.439,68	57,07	1,85	53,22	0,72	
p30r-v11	16.313,60	155,50	15.835,22	61,57	2,93	15.600,62	59,42	4,37	15.698,57	61,05	3,77	78,02	0,98	
	Média	165,95	Média	62,82	1,82	Média	62,39	2,91	Média	62,53	2,26	61,26	0,86	

Tabela E.48: Resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* para  $|E| = 12$

Problema	CPLEX			Simulated Annealing						Média				
	Sol.	Obj.	CPUt. (s)	Melhor caso			Pior caso			FO	CPUt. (s)	Gap (%)	$\sigma_{fo}$	$\sigma_t$
				FO	CPUt. (s)	Gap (%)	FO	CPUt. (s)	Gap (%)					
p1r-v12	16.605,40	259,52	16.130,40	64,75	2,86	15.836,80	65,24	4,63	15.994,91	64,99	3,68	91,21	0,96	
p2r-v12	19.038,40	185,41	18.796,21	62,00	1,27	18.620,00	61,81	2,20	18.699,42	62,47	1,78	58,80	0,63	
p3r-v12	16.484,40	298,37	15.831,61	69,99	3,96	15.632,01	67,62	5,17	15.753,32	68,81	4,43	66,38	1,42	
p4r-v12	18.974,80	165,30	18.561,62	71,41	2,18	18.310,63	67,14	3,50	18.452,27	69,49	2,75	81,93	1,90	
p5r-v12	17.802,20	183,55	17.385,22	57,88	2,34	17.237,22	58,22	3,17	17.319,58	58,28	2,71	46,23	0,40	
p6r-v12	19.603,00	157,62	19.401,20	62,31	1,03	19.327,41	61,87	1,41	19.370,93	62,56	1,18	26,78	0,44	
p7r-v12	18.715,60	154,39	18.457,62	63,29	1,38	18.296,23	63,87	2,24	18.387,15	63,55	1,75	58,19	0,36	
p8r-v12	17.753,40	155,35	17.410,22	58,18	1,93	17.196,82	58,76	3,14	17.325,34	58,33	2,41	70,61	0,57	
p9r-v12	14.996,40	99,01	14.821,41	57,15	1,17	14.696,61	57,99	2,00	14.767,01	57,17	1,53	36,37	0,34	
p10r-v12	17.931,60	155,19	17.474,44	56,13	2,55	17.398,43	55,97	2,97	17.440,94	56,14	2,74	22,94	0,25	
p11r-v12	16.197,40	149,81	15.805,22	60,41	2,42	15.687,42	60,05	3,15	15.762,40	59,91	2,69	41,87	0,24	
p12r-v12	21.762,00	245,47	21.507,20	74,81	1,17	21.416,22	75,49	1,59	21.472,00	74,92	1,33	25,18	0,84	
p13r-v12	19.356,60	238,43	18.960,62	64,48	2,05	18.756,62	62,67	3,10	18.870,78	63,91	2,51	65,53	0,94	
p14r-v12	19.311,20	157,64	19.089,42	58,55	1,15	18.759,41	56,21	2,86	18.945,90	58,14	1,89	111,61	0,86	
p15r-v12	19.999,60	165,27	19.742,22	69,17	1,29	19.562,83	67,26	2,18	19.637,15	69,00	1,81	52,59	1,10	
p16r-v12	17.247,00	192,68	16.928,00	63,88	1,85	16.641,60	62,79	3,51	16.818,55	63,10	2,48	106,72	0,49	
p17r-v12	16.621,00	158,34	16.117,02	54,43	3,03	15.885,02	54,87	4,43	16.022,67	54,39	3,60	66,53	0,25	
p18r-v12	17.350,00	222,66	17.084,20	68,22	1,53	16.768,80	68,60	3,35	16.933,11	66,89	2,40	91,45	1,74	
p19r-v12	17.976,60	126,72	17.721,21	56,33	1,42	17.599,21	54,92	2,10	17.701,59	55,95	1,53	35,20	0,59	
p20r-v12	19.834,80	179,92	19.474,62	57,63	1,82	19.277,01	57,78	2,81	19.382,80	57,83	2,28	68,75	0,41	
p21r-v12	16.637,00	218,23	16.257,21	74,54	2,28	16.050,21	77,06	3,53	16.174,28	75,82	2,78	55,27	1,14	
p22r-v12	18.481,80	232,38	18.199,59	71,84	1,53	18.075,81	69,65	2,20	18.152,58	70,57	1,78	40,47	1,19	
p23r-v12	20.938,20	206,20	20.394,21	62,64	2,60	20.155,21	61,40	3,74	20.291,14	62,18	3,09	83,46	0,78	
p24r-v12	17.662,20	143,18	17.331,21	63,03	1,87	17.185,41	64,18	2,70	17.269,43	63,22	2,22	50,06	1,15	
p25r-v12	16.764,20	159,76	16.534,80	61,11	1,37	16.302,00	60,60	2,76	16.428,63	60,94	2,00	70,97	0,43	
p26r-v12	19.294,00	182,80	18.862,42	60,33	2,24	18.679,22	59,92	3,19	18.757,97	59,67	2,78	66,29	0,45	
p27r-v12	19.680,80	178,81	19.525,22	53,17	0,79	19.421,22	52,87	1,32	19.484,89	52,99	1,00	34,04	0,41	
p28r-v12	17.837,00	163,97	17.654,41	56,49	1,92	17.560,60	56,88	1,55	17.604,08	57,09	1,31	30,60	0,71	
p29r-v12	18.576,80	226,45	18.223,02	60,80	1,90	18.009,21	59,91	3,06	18.096,42	59,75	2,59	61,67	0,54	
p30r-v12	16.344,60	182,19	16.078,01	62,84	1,63	15.942,02	60,56	2,46	16.019,85	61,29	1,99	50,95	0,64	
Média		184,82	Média	62,59	1,85	Média	62,07	2,87	Média	62,31	2,30	58,95	0,74	

Tabela E.49: Resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* para  $|E| = 13$

Problema	CPLEX				Simulated Annealing								$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$				
	Sol. Ótima		GPUt. (s)		Melhor caso				Pior caso						Média			
	Sol.	Ótima	GPUt. (s)	Gap (%)	FO	GPUt. (s)	Gap (%)	FO	GPUt. (s)	Gap (%)	FO	GPUt. (s)			Gap (%)	FO	GPUt. (s)	Gap (%)
p1r-v13	17.084,40	17.084,40	328,27	3,71	16.450,80	66,10	3,71	16.250,20	65,46	4,88	16.364,98	66,61	4,21	16.364,98	66,61	4,21	65,04	0,82
p2r-v13	18.881,60	18.881,60	185,67	0,67	18.754,61	61,81	0,67	18.529,60	61,23	1,86	18.661,06	61,37	1,17	18.661,06	61,37	1,17	70,08	0,35
p3r-v13	16.175,40	16.175,40	353,81	2,89	15.707,21	74,29	2,89	15.357,01	68,67	5,06	15.577,05	71,88	3,70	15.577,05	71,88	3,70	118,40	1,80
p4r-v13	19.266,40	19.266,40	200,45	1,33	19.010,62	73,78	1,33	18.865,02	68,93	2,08	18.946,91	70,19	1,66	18.946,91	70,19	1,66	35,93	1,45
p5r-v13	17.824,80	17.824,80	193,99	1,74	17.515,01	57,74	1,74	17.207,61	56,97	3,46	17.426,54	57,55	2,23	17.426,54	57,55	2,23	85,51	0,52
p6r-v13	18.960,80	18.960,80	175,50	0,91	18.789,19	61,81	0,91	18.594,81	61,39	1,93	18.700,16	61,84	1,37	18.700,16	61,84	1,37	56,03	0,38
p7r-v13	19.037,20	19.037,20	192,24	1,66	18.720,82	64,66	1,66	18.652,81	63,95	2,02	18.687,96	64,04	1,83	18.687,96	64,04	1,83	23,63	0,56
p8r-v13	18.039,80	18.039,80	146,86	1,05	17.851,01	59,68	1,05	17.645,01	57,87	2,19	17.787,63	58,36	1,40	17.787,63	58,36	1,40	57,28	0,75
p9r-v13	14.840,80	14.840,80	130,56	1,17	14.666,81	57,72	1,17	14.518,01	57,81	2,18	14.622,83	57,86	1,47	14.622,83	57,86	1,47	48,23	0,20
p10r-v13	18.188,40	18.188,40	160,32	1,69	17.881,23	58,65	1,69	17.701,63	57,27	2,68	17.791,99	57,86	2,18	17.791,99	57,86	2,18	66,51	0,45
p11r-v13	16.262,40	16.262,40	169,67	1,55	16.010,23	59,69	1,55	15.877,22	59,26	2,37	15.960,20	59,51	1,86	15.960,20	59,51	1,86	37,63	0,79
p12r-v13	21.590,00	21.590,00	184,72	0,97	21.381,02	74,31	0,97	21.169,42	71,50	1,95	21.292,00	72,34	1,38	21.292,00	72,34	1,38	71,19	1,64
p13r-v13	19.212,00	19.212,00	261,02	2,04	18.820,62	62,82	2,04	18.610,22	62,73	3,13	18.726,95	63,39	2,52	18.726,95	63,39	2,52	64,78	1,03
p14r-v13	19.131,60	19.131,60	149,98	1,98	18.752,81	57,09	1,98	18.643,21	56,95	2,55	18.717,52	56,95	2,16	18.717,52	56,95	2,16	29,87	0,41
p15r-v13	19.631,00	19.631,00	276,73	1,48	19.340,43	71,48	1,48	19.169,82	70,72	2,35	19.263,90	72,08	1,87	19.263,90	72,08	1,87	56,70	0,74
p16r-v13	17.577,80	17.577,80	225,72	1,97	17.231,21	63,33	1,97	16.920,21	65,52	3,74	17.139,74	63,07	2,49	17.139,74	63,07	2,49	88,07	1,15
p17r-v13	16.835,60	16.835,60	185,78	3,80	16.196,22	57,71	3,80	15.970,22	56,20	5,14	16.064,97	56,53	4,58	16.064,97	56,53	4,58	61,72	0,77
p18r-v13	17.186,20	17.186,20	335,34	2,45	16.764,80	65,00	2,45	16.500,20	65,46	3,99	16.688,76	64,50	2,89	16.688,76	64,50	2,89	71,79	0,57
p19r-v13	17.554,80	17.554,80	167,01	2,02	17.199,61	56,54	2,02	17.035,21	55,95	2,96	17.132,17	56,23	2,41	17.132,17	56,23	2,41	57,96	0,82
p20r-v13	20.213,80	20.213,80	206,64	1,93	19.823,01	60,68	1,93	19.649,01	59,53	2,79	19.741,78	60,11	2,34	19.741,78	60,11	2,34	62,47	0,69
p21r-v13	16.666,80	16.666,80	271,60	2,34	16.277,61	77,78	2,34	16.028,81	77,63	3,83	16.171,81	77,14	2,97	16.171,81	77,14	2,97	65,06	0,61
p22r-v13	18.502,20	18.502,20	187,61	1,32	18.257,60	69,80	1,32	18.199,62	70,60	1,64	18.232,30	69,90	1,46	18.232,30	69,90	1,46	16,87	0,46
p23r-v13	21.122,40	21.122,40	203,63	1,72	20.758,20	64,25	1,72	20.304,41	64,11	3,87	20.681,71	64,37	2,09	20.681,71	64,37	2,09	137,38	0,66
p24r-v13	17.185,00	17.185,00	167,59	2,04	16.835,21	63,49	2,04	16.640,61	61,82	3,17	16.737,63	61,79	2,60	16.737,63	61,79	2,60	63,37	1,29
p25r-v13	16.717,80	16.717,80	185,49	2,07	16.372,20	61,79	2,07	16.127,60	60,38	3,53	16.302,87	61,22	2,48	16.302,87	61,22	2,48	69,73	0,51
p26r-v13	19.868,00	19.868,00	186,25	1,19	19.631,02	57,76	1,19	19.166,03	58,49	3,53	19.456,19	57,68	2,07	19.456,19	57,68	2,07	145,16	0,45
p27r-v13	19.679,80	19.679,80	214,63	0,59	19.564,62	53,83	0,59	19.523,02	53,53	0,80	19.535,78	53,62	0,73	19.535,78	53,62	0,73	13,15	0,30
p28r-v13	17.322,40	17.322,40	187,17	0,75	17.191,80	56,92	0,75	17.048,80	57,24	1,58	17.139,48	56,97	1,06	17.139,48	56,97	1,06	43,56	0,28
p29r-v13	19.002,80	19.002,80	232,27	1,22	18.771,03	56,39	1,22	18.700,82	57,39	1,59	18.742,65	56,54	1,37	18.742,65	56,54	1,37	21,88	0,52
p30r-v13	15.943,00	15.943,00	199,92	2,16	15.598,21	60,77	2,16	15.505,41	60,28	2,74	15.552,33	59,57	2,45	15.552,33	59,57	2,45	33,71	0,73
Média			208,88	1,75	Média	62,92	1,75	Média	62,16	2,85	Média	62,37	2,17	Média	62,37	2,17	61,29	0,72

Tabela E.50: Resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* para  $|E| = 14$

Problema	CPLEX		Simulated Annealing						Média		$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$	
	Sol.	Obj.	Melhor caso			Pior caso			CPUt (s)	Gap (%)			
			FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)					
p1r-v14	16.966,40	333,87	16.343,60	66,78	3,67	16.091,60	65,01	5,16	16.212,18	65,36	4,45	80,82	1,15
p2r-v14	18.537,60	165,61	18.273,01	59,85	1,43	18.186,81	60,12	1,89	18.233,63	60,22	1,64	30,11	0,56
p3r-v14	16.407,00	393,23	15.898,01	72,81	3,10	15.605,81	71,12	4,88	15.743,57	71,85	4,04	83,56	1,16
p4r-v14	18.950,60	226,72	18.596,02	70,41	1,87	18.428,02	70,42	2,76	18.529,80	70,86	2,22	47,04	0,98
p5r-v14	17.766,00	222,82	17.592,41	58,66	0,98	17.350,81	58,10	2,34	17.531,45	58,32	1,32	75,32	0,31
p6r-v14	19.219,40	220,23	19.058,61	62,55	0,84	18.895,01	62,33	1,69	18.977,86	62,50	1,26	63,53	0,38
p7r-v14	18.697,20	225,61	18.417,62	63,83	1,50	18.279,43	62,70	2,23	18.364,33	63,57	1,78	40,85	0,63
p8r-v14	18.235,20	145,61	18.056,61	57,26	0,98	18.012,81	58,00	1,22	18.035,57	57,52	1,09	12,52	0,46
p9r-v14	15.274,40	112,84	15.140,42	58,00	0,88	15.030,42	57,15	1,60	15.107,91	57,70	1,09	43,58	0,58
p10r-v14	18.078,40	158,59	17.640,83	58,29	2,42	17.428,43	58,85	3,60	17.559,50	58,11	2,87	69,65	0,61
p11r-v14	16.540,40	188,61	16.284,63	60,44	1,55	16.149,02	60,61	2,37	16.221,46	59,97	1,93	40,59	0,79
p12r-v14	21.658,40	238,17	21.386,02	70,68	1,26	21.225,22	71,22	2,00	21.305,81	70,63	1,63	42,30	1,31
p13r-v14	19.043,00	297,68	18.774,81	64,97	1,41	18.677,82	65,56	1,92	18.750,47	64,67	1,54	32,01	0,50
p14r-v14	19.527,60	176,78	19.156,42	59,21	1,90	18.947,82	58,85	2,97	19.057,00	58,80	2,41	65,15	0,64
p15r-v14	20.238,80	197,20	19.911,83	71,56	1,62	19.660,81	70,04	2,86	19.807,31	72,51	2,13	87,95	1,22
p16r-v14	17.280,20	251,22	16.953,20	63,96	1,89	16.764,81	63,12	2,98	16.863,24	62,76	2,41	68,42	0,91
p17r-v14	16.905,40	263,00	16.345,42	55,30	3,31	15.933,82	55,59	5,75	16.186,64	55,65	4,25	146,85	0,52
p18r-v14	17.370,80	275,87	16.950,40	65,00	2,42	16.632,60	66,72	4,25	16.846,40	65,24	3,02	88,90	1,08
p19r-v14	17.780,40	171,04	17.369,01	56,03	2,31	17.204,40	56,89	3,24	17.259,39	56,54	2,93	45,58	0,39
p20r-v14	19.651,60	276,78	19.298,62	60,49	1,80	18.922,82	61,71	3,71	19.134,15	60,94	2,63	112,67	1,07
p21r-v14	16.532,00	254,20	16.129,81	76,04	2,43	15.938,01	74,40	3,59	16.034,81	74,42	3,01	67,61	0,76
p22r-v14	18.501,60	278,54	18.350,60	69,61	0,82	18.169,39	70,07	1,80	18.237,89	69,73	1,43	53,21	0,43
p23r-v14	21.017,60	243,56	20.577,00	63,66	2,10	20.317,01	63,16	3,33	20.469,51	64,78	2,61	72,42	1,50
p24r-v14	17.424,40	222,33	17.102,42	62,43	1,85	16.928,01	61,86	2,85	17.000,28	62,20	2,43	47,72	0,46
p25r-v14	16.733,80	192,83	16.260,40	60,24	2,83	16.080,80	60,36	3,90	16.194,75	59,90	3,22	51,07	0,44
p26r-v14	19.843,60	243,35	19.517,62	59,43	1,64	19.322,22	60,08	2,63	19.426,46	59,54	2,10	69,63	0,32
p27r-v14	19.342,20	302,38	19.111,42	53,08	1,19	18.801,82	53,15	2,79	19.026,79	53,78	1,63	82,40	0,54
p28r-v14	17.992,20	194,69	17.826,01	55,96	0,92	17.695,61	57,66	1,65	17.785,22	56,71	1,15	39,62	0,55
p29r-v14	18.408,40	284,45	18.083,82	58,72	1,76	17.926,41	57,50	2,62	18.013,55	58,09	2,14	47,72	0,57
p30r-v14	16.017,40	229,68	15.700,62	59,43	1,98	15.489,42	59,40	3,30	15.600,46	59,67	2,60	63,94	0,51
Média		232,92	Média	62,49	1,82	Média	62,39	2,93	Média	62,42	2,30	62,43	0,71

Tabela E.51: Resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* para  $|E| = 15$

Problema	CPLEX			Simulated Annealing						Média				
	Sol.	Obj.	CPUt. (s)	Melhor caso			Pior caso			FO	CPUt. (s)	Gap (%)	$\sigma_{fo}$	$\sigma_t$
				FO	CPUt. (s)	Gap (%)	FO	CPUt. (s)	Gap (%)					
p1r-v15	16.619,00	328,35	16.221,00	69,20	2,39	16.048,40	65,66	3,43	16.125,25	67,90	2,97	57,54	1,37	
p2r-v15	18.544,80	179,17	18.252,40	62,76	1,58	18.050,21	62,44	2,67	18.161,10	62,66	2,07	51,70	0,90	
p3r-v15	16.251,00	428,88	15.924,41	72,65	2,01	15.685,01	70,28	3,48	15.756,77	71,28	3,04	65,27	1,63	
p4r-v15	19.325,20	244,09	18.919,42	71,27	2,10	18.712,02	66,25	3,17	18.830,04	70,20	2,56	72,37	2,41	
p5r-v15	17.818,60	263,02	17.425,21	58,29	2,21	17.331,02	57,42	2,74	17.397,79	58,09	2,36	29,20	0,33	
p6r-v15	18.940,40	297,87	18.700,41	62,40	1,27	18.526,00	62,42	2,19	18.621,08	62,74	1,69	49,76	0,35	
p7r-v15	18.835,00	255,90	18.524,82	64,80	1,65	18.334,63	64,89	2,66	18.428,46	64,50	2,16	53,05	0,61	
p8r-v15	18.072,40	324,83	17.811,81	58,03	1,44	17.691,41	57,94	2,11	17.755,88	57,96	1,75	37,30	0,57	
p9r-v15	14.906,20	122,38	14.823,41	58,32	0,56	14.729,61	57,75	1,18	14.797,28	57,93	0,73	25,70	0,24	
p10r-v15	18.213,60	186,02	17.811,83	58,54	2,21	17.633,43	58,94	3,19	17.726,16	58,18	2,68	64,29	0,88	
p11r-v15	16.415,00	192,24	16.142,02	59,32	1,66	16.006,62	59,98	2,49	16.087,60	60,26	1,99	44,66	0,71	
p12r-v15	21.609,20	276,23	21.402,42	74,38	0,96	21.271,22	72,33	1,56	21.329,04	72,90	1,30	44,61	1,14	
p13r-v15	19.318,00	372,41	18.925,22	64,00	2,03	18.692,42	62,91	3,24	18.829,38	63,71	2,53	70,54	0,53	
p14r-v15	19.229,20	190,52	18.860,41	60,14	1,92	18.597,41	57,15	3,29	18.744,14	58,01	2,52	73,71	0,92	
p15r-v15	19.911,20	230,77	19.714,81	72,51	0,99	19.579,42	72,31	1,67	19.656,82	72,77	1,28	53,25	0,59	
p16r-v15	17.338,20	325,89	17.017,41	62,36	1,85	16.761,21	62,29	3,33	16.872,43	62,62	2,69	68,89	0,65	
p17r-v15	16.949,00	208,70	16.329,82	54,66	3,65	16.205,01	57,27	4,39	16.275,33	54,77	3,97	45,41	1,05	
p18r-v15	16.874,60	262,52	16.371,40	66,43	2,98	16.079,80	61,39	4,71	16.248,87	64,26	3,71	80,11	1,71	
p19r-v15	17.585,80	173,47	17.314,62	55,97	1,54	17.281,21	55,81	1,73	17.294,10	55,99	1,66	14,79	0,16	
p20r-v15	19.639,00	293,31	19.187,41	60,08	2,30	18.755,80	60,22	4,50	19.076,10	60,85	2,87	121,81	0,65	
p21r-v15	16.548,00	361,47	16.139,81	76,74	2,47	15.933,01	76,57	3,72	16.044,96	76,51	3,04	71,26	0,84	
p22r-v15	18.239,20	244,28	18.030,20	69,12	1,15	17.789,60	69,53	2,47	17.896,04	69,53	1,88	75,90	1,02	
p23r-v15	20.943,60	244,63	20.672,21	63,13	1,30	20.380,81	64,32	2,69	20.543,65	62,85	1,91	98,59	0,75	
p24r-v15	17.542,80	278,62	17.418,21	67,06	0,71	17.213,01	66,89	1,88	17.345,99	67,48	1,12	56,09	0,94	
p25r-v15	16.886,20	228,15	16.524,00	60,28	2,14	16.401,80	60,96	2,87	16.449,51	60,72	2,59	49,67	0,36	
p26r-v15	20.242,00	248,49	19.972,63	59,86	1,33	19.823,43	59,15	2,07	19.923,08	59,44	1,58	44,68	0,57	
p27r-v15	19.149,60	339,16	18.883,02	53,31	1,39	18.790,81	53,64	1,87	18.836,20	53,26	1,64	29,55	0,21	
p28r-v15	17.668,80	237,17	17.544,41	57,62	0,70	17.478,21	57,76	1,08	17.531,05	57,41	0,78	19,34	0,28	
p29r-v15	18.771,40	425,09	18.578,02	56,95	1,03	18.400,42	57,65	1,98	18.488,34	57,97	1,51	50,44	0,62	
p30r-v15	16.209,60	290,88	15.853,42	60,45	2,20	15.688,02	62,36	3,22	15.765,38	61,78	2,74	56,78	1,54	
	Média	268,48	Média	63,02	1,72	Média	62,48	2,72	Média	62,82	2,18	55,87	0,82	

Tabela E.52: Resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* para  $|E| = 16$

Problema	CPLEX			Simulated Annealing						Média				
	Sol.	Obj.	GPUt (s)	Melhor caso			Pior caso			FO	GPUt (s)	Gap (%)	$\sigma_{fo}$	$\sigma_t$
				FO	GPUt (s)	Gap (%)	FO	GPUt (s)	Gap (%)					
p1r-v16	16.874,80		391,06	16.442,80	67,69	2,56	16.180,40	66,05	4,12	16.313,42	66,34	3,33	95,23	0,97
p2r-v16	18.911,20		224,47	18.553,21	63,15	1,89	18.285,00	64,40	3,31	18.464,55	64,00	2,36	82,89	0,79
p3r-v16	16.300,80		346,68	15.710,21	68,68	3,62	15.570,41	69,86	4,48	15.636,70	69,59	4,07	45,36	0,69
p4r-v16	19.098,00		279,59	18.775,62	69,30	1,69	18.568,82	68,83	2,77	18.639,75	69,61	2,40	60,81	1,27
p5r-v16	17.769,60		304,89	17.469,21	57,19	1,69	17.350,81	56,85	2,36	17.404,32	56,99	2,06	35,60	0,45
p6r-v16	19.135,20		274,45	18.905,60	64,38	1,20	18.797,62	63,71	1,76	18.845,48	63,65	1,51	34,81	0,47
p7r-v16	18.890,20		260,07	18.574,62	63,80	1,67	18.371,42	62,52	2,75	18.485,37	63,18	2,14	72,07	0,52
p8r-v16	17.958,80		251,97	17.781,61	57,73	0,99	17.706,01	57,45	1,41	17.737,08	57,48	1,23	22,69	0,17
p9r-v16	15.105,40		147,23	14.976,22	58,97	0,86	14.883,42	59,06	1,47	14.943,24	58,72	1,07	30,13	0,39
p10r-v16	18.008,00		218,84	17.639,83	58,12	2,04	17.448,03	56,20	3,11	17.539,32	57,34	2,60	60,24	0,81
p11r-v16	16.538,80		199,68	16.268,02	59,70	1,64	15.973,62	60,87	3,42	16.118,00	60,31	2,54	83,74	0,98
p12r-v16	21.847,00		314,45	21.533,81	74,10	1,43	21.469,82	71,92	1,73	21.496,65	73,33	1,60	21,84	1,68
p13r-v16	18.810,80		360,83	18.411,61	63,69	2,12	18.297,22	62,67	2,73	18.354,94	64,04	2,42	33,98	0,65
p14r-v16	19.257,60		187,83	18.937,42	57,88	1,66	18.844,60	58,53	2,14	18.910,92	58,33	1,80	35,25	0,35
p15r-v16	19.927,60		229,51	19.616,02	71,41	1,56	19.244,02	70,94	3,43	19.493,73	70,42	2,18	104,14	0,76
p16r-v16	17.379,40		305,86	17.198,41	64,31	1,04	17.058,61	63,54	1,85	17.106,41	63,64	1,57	41,86	0,45
p17r-v16	17.011,00		261,38	16.409,21	55,64	3,54	16.196,22	55,76	4,79	16.290,40	56,00	4,24	58,22	0,61
p18r-v16	17.169,00		310,64	16.699,00	65,85	2,74	16.198,80	65,92	5,65	16.486,58	65,24	3,97	149,11	1,26
p19r-v16	17.835,20		198,29	17.555,21	58,54	1,57	17.377,61	57,57	2,57	17.473,94	58,18	2,03	61,06	0,59
p20r-v16	19.706,00		260,58	19.335,22	58,43	1,88	19.047,22	59,71	3,34	19.218,60	59,40	2,47	80,85	0,81
p21r-v16	16.805,00		325,84	16.403,42	78,00	2,39	16.198,21	75,43	3,61	16.330,10	77,70	2,83	67,43	1,43
p22r-v16	18.476,00		286,84	18.305,81	69,88	0,92	18.200,80	69,94	1,49	18.254,66	69,35	1,20	33,84	0,64
p23r-v16	21.070,40		331,89	20.600,00	65,66	2,23	20.458,41	63,81	2,90	20.542,17	65,00	2,51	45,31	1,03
p24r-v16	17.351,20		222,74	17.155,62	64,71	1,13	16.910,81	60,89	2,54	17.068,85	63,73	1,63	80,45	1,38
p25r-v16	16.764,00		188,40	16.333,80	59,93	2,57	16.107,20	61,93	3,92	16.220,87	60,08	3,24	78,46	0,85
p26r-v16	19.945,00		275,39	19.616,22	59,21	1,65	19.495,62	59,35	2,25	19.538,58	59,35	2,04	34,27	0,31
p27r-v16	19.686,40		349,55	19.447,62	54,15	1,21	19.374,22	53,85	1,59	19.408,80	53,97	1,41	26,63	0,16
p28r-v16	17.794,00		257,11	17.641,80	57,82	0,86	17.549,80	56,92	1,37	17.596,42	57,30	1,11	37,14	0,29
p29r-v16	18.527,40		291,71	18.280,22	57,66	1,33	18.159,83	58,30	1,98	18.246,48	57,75	1,52	37,06	0,56
p30r-v16	16.302,60		270,97	16.037,42	60,51	1,63	15.768,82	59,09	3,27	15.917,33	60,70	2,36	90,09	0,79
	Média		270,96	Média	62,87	1,78	Média	62,40	2,80	Média	62,69	2,25	58,02	0,74

Tabela E.53: Resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* para  $|E| = 17$

Problema	CPLEX			Simulated Annealing						$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$		
	Sol.	Obj.	CPUt. (s)	Melhor caso			Pior caso					Média	
				FO	CPUt. (s)	Gap (%)	FO	CPUt. (s)	Gap (%)			FO	CPUt. (s)
p1r-v17	17.079,40	417,43	16.499,00	67,72	3,40	16.226,40	65,70	4,99	16.377,00	66,86	4,11	80,22	0,82
p2r-v17	18.906,80	239,68	18.614,41	62,89	1,55	18.497,01	61,73	2,17	18.559,03	61,98	1,84	37,55	0,55
p3r-v17	15.789,00	433,53	15.284,61	66,19	3,19	15.042,61	65,98	4,73	15.149,79	68,04	4,05	88,74	1,84
p4r-v17	19.352,00	283,05	19.087,22	73,63	1,37	18.861,22	72,88	2,54	18.978,78	72,49	1,93	63,33	1,00
p5r-v17	17.567,20	274,45	17.256,61	58,25	1,77	16.948,80	57,22	3,52	17.168,94	57,49	2,27	101,63	0,36
p6r-v17	19.298,00	325,37	19.118,61	63,41	0,93	18.899,40	63,90	2,07	19.030,41	63,54	1,39	66,77	0,36
p7r-v17	18.878,20	262,55	18.640,03	66,84	1,26	18.487,02	66,91	2,07	18.591,59	66,48	1,52	49,88	0,34
p8r-v17	17.609,20	246,76	17.412,21	59,77	1,12	17.199,41	60,05	2,33	17.334,08	59,92	1,56	58,02	0,51
p9r-v17	15.015,00	214,61	14.806,22	58,07	1,39	14.763,01	57,75	1,68	14.784,80	57,69	1,53	11,96	0,24
p10r-v17	18.093,80	244,48	17.709,24	58,51	2,13	17.355,43	57,41	4,08	17.616,67	58,05	2,64	97,61	0,53
p11r-v17	16.387,00	192,65	15.944,42	59,34	2,70	15.792,01	59,60	3,63	15.898,36	59,47	2,98	53,35	0,29
p12r-v17	21.729,80	342,13	21.516,40	72,42	0,98	21.416,80	74,55	1,44	21.474,04	73,32	1,18	25,88	1,45
p13r-v17	18.939,20	387,85	18.553,22	63,33	2,04	18.336,62	63,16	3,18	18.468,76	63,21	2,48	69,52	0,95
p14r-v17	19.241,80	278,88	19.034,21	59,42	1,08	18.590,21	59,06	3,39	18.939,19	58,98	1,57	123,77	0,58
p15r-v17	19.796,20	298,37	19.517,21	70,92	1,41	19.340,83	71,40	2,30	19.447,66	72,52	1,76	52,87	1,19
p16r-v17	17.294,60	275,78	17.029,20	66,35	1,53	16.870,01	65,62	2,46	16.964,53	65,35	1,91	54,13	0,59
p17r-v17	16.719,80	323,83	16.318,02	56,52	2,40	16.096,22	55,71	3,73	16.244,47	55,54	2,84	72,32	0,53
p18r-v17	17.435,40	359,55	17.076,41	73,46	2,06	16.913,01	67,72	3,00	17.012,37	69,38	2,43	49,17	2,16
p19r-v17	17.777,80	222,18	17.383,41	55,56	2,22	17.109,41	56,19	3,76	17.236,48	55,79	3,04	104,77	0,55
p20r-v17	19.878,60	357,98	19.495,22	59,65	1,93	19.400,62	59,21	2,40	19.466,04	59,29	2,08	37,14	0,63
p21r-v17	16.694,80	403,03	16.265,81	77,55	2,57	16.150,21	75,07	3,26	16.216,88	77,43	2,86	34,05	2,03
p22r-v17	18.541,60	547,59	18.322,19	68,81	1,18	18.108,99	69,12	2,33	18.234,32	68,96	1,66	69,08	0,48
p23r-v17	21.119,20	353,53	20.872,01	66,64	1,17	20.741,60	66,46	1,79	20.818,17	66,04	1,43	35,40	1,25
p24r-v17	17.489,40	236,83	17.165,21	65,05	1,85	16.879,21	63,64	3,49	17.059,52	64,59	2,46	104,20	1,03
p25r-v17	16.819,40	268,81	16.194,79	62,13	3,71	15.937,40	60,53	5,24	16.085,27	61,45	4,36	78,26	0,67
p26r-v17	19.995,40	293,20	19.711,41	59,88	1,42	19.477,42	59,55	2,59	19.595,22	59,85	2,00	91,62	0,23
p27r-v17	19.557,60	387,43	19.398,22	53,41	0,81	19.269,82	53,05	1,47	19.332,29	53,37	1,15	39,17	0,28
p28r-v17	17.807,60	324,72	17.611,81	57,83	1,10	17.494,41	56,55	1,76	17.578,64	57,38	1,29	38,05	0,48
p29r-v17	18.473,60	495,97	18.051,61	58,42	2,28	17.917,81	58,88	3,01	17.998,76	58,12	2,57	41,82	0,39
p30r-v17	16.288,60	276,32	15.949,82	59,76	2,08	15.841,02	59,76	2,75	15.897,75	59,59	2,40	34,02	0,83
Média		318,95	Média	63,39	1,82	Média	62,81	2,90	Média	63,07	2,24	62,14	0,77

Tabela E.54: Resultados obtidos com a metaheurística *Simulated Annealing* para  $|E| = 130$

Problema	Simulated Annealing											
	Melhor Solução			Melhor caso			Pior caso			Média		
	FO	GPUt (s)	Gap (%)	FO	GPUt (s)	Gap (%)	FO	GPUt (s)	Gap (%)	FO	GPUt (s)	Gap (%)
p1r-v130	17,483,99	184,77	0,00	17,202,60	194,82	1,61	17,356,21	194,80	0,73	18,242	12,35	
p2r-v130	18,859,01	212,46	0,00	18,723,61	199,24	0,72	18,795,68	204,83	0,34	45,41	6,65	
p3r-v130	16,677,21	252,10	0,00	16,338,41	213,28	2,03	16,512,05	235,60	0,99	98,23	45,96	
p4r-v130	19,356,62	251,13	0,00	19,179,41	228,00	0,92	19,273,53	234,79	0,43	49,92	11,84	
p5r-v130	18,291,61	159,13	0,00	18,124,81	166,96	0,91	18,243,34	162,08	0,26	59,94	7,95	
p6r-v130	19,690,81	164,86	0,00	19,624,21	168,09	0,34	19,652,30	162,47	0,20	19,74	4,02	
p7r-v130	19,132,43	160,50	0,00	18,975,43	167,72	0,82	19,078,64	157,15	0,28	42,41	5,12	
p8r-v130	18,156,21	135,70	0,00	18,000,62	135,19	0,86	18,098,74	130,72	0,32	46,66	3,69	
p9r-v130	15,121,82	115,60	0,00	15,079,82	115,85	0,28	15,102,53	112,79	0,13	11,89	2,59	
p10r-v130	18,321,02	149,61	0,00	18,153,82	153,08	0,91	18,250,97	150,34	0,38	69,65	5,63	
p11r-v130	16,578,22	145,89	0,00	16,356,22	168,90	1,34	16,511,44	165,32	0,40	57,39	9,85	
p12r-v130	21,617,22	230,84	0,00	21,525,01	210,17	0,43	21,572,62	204,15	0,21	29,32	11,96	
p13r-v130	19,265,62	137,83	0,00	19,167,02	152,16	0,51	19,227,51	148,25	0,20	31,86	6,65	
p14r-v130	19,258,01	170,79	0,34	19,062,40	122,86	1,02	19,142,27	131,80	0,60	36,96	6,86	
p15r-v130	21,421,23	216,57	0,00	21,162,61	223,91	1,21	21,306,13	218,65	0,54	67,55	7,66	
p16r-v130	17,072,01	178,40	0,00	16,874,81	189,06	1,16	16,986,68	167,88	0,50	78,54	15,58	
p17r-v130	16,888,81	147,48	0,00	16,698,03	176,46	1,13	16,786,76	152,68	0,60	56,78	19,16	
p18r-v130	17,597,41	208,81	0,00	17,413,61	195,33	1,04	17,529,03	209,96	0,39	57,56	11,82	
p19r-v130	17,967,60	193,85	0,00	17,709,62	188,72	1,44	17,861,48	187,96	0,59	79,59	10,75	
p20r-v130	19,689,61	145,04	0,00	19,049,02	129,20	3,25	19,478,90	146,99	1,07	170,86	6,76	
p21r-v130	16,696,01	272,04	0,00	16,499,61	248,45	1,18	16,622,45	269,11	0,44	54,26	16,02	
p22r-v130	18,527,39	190,04	0,00	18,386,80	195,69	0,76	18,443,76	187,74	0,45	50,05	13,25	
p23r-v130	20,842,21	173,60	0,00	20,632,41	164,33	1,01	20,751,99	175,30	0,43	66,46	9,59	
p24r-v130	18,652,43	214,61	0,00	18,230,22	166,27	2,26	18,480,79	186,50	0,92	139,73	14,61	
p25r-v130	16,822,40	161,22	0,00	16,724,00	167,42	0,58	16,778,51	159,20	0,26	28,99	6,39	
p26r-v130	20,046,02	177,04	0,00	19,884,03	172,50	0,81	20,010,21	178,41	0,18	45,21	4,29	
p27r-v130	19,295,42	117,62	0,00	19,084,02	117,50	1,10	19,188,75	117,55	0,55	69,10	2,04	
p28r-v130	17,951,61	161,39	0,00	17,897,41	154,30	0,30	17,916,70	160,11	0,19	20,30	3,30	
p29r-v130	18,818,41	159,37	0,00	18,738,42	168,78	0,43	18,788,48	157,52	0,16	25,14	6,12	
p30r-v130	16,208,22	167,31	0,00	16,092,82	180,25	0,71	16,165,57	170,30	0,26	38,14	9,31	
Média	Média	Média	0,01	Média	Média	1,03	Média	Média	0,43	Média	Média	

Tabela E.55: Resultados obtidos com a metaheurística colônia de formigas para  $|E| = 1$

Problema	CPLEX				Colônia de Formigas				$\sigma_{fo}$	$\sigma_t$		
	Melhor caso		Pior caso		Média		Gap (%)	Gap (%)				
	FO	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	FO	CPUt (s)						
p1r-v1	14.558,40	2,42	14.263,60	82,12	14.245,80	81,98	2,15	14.257,00	81,97	2,07	5,28	0,11
p2r-v1	16.994,40	2,54	16.870,61	81,13	16.870,60	81,01	0,73	16.870,61	81,22	0,73	0,00	0,13
p3r-v1	11.675,80	2,11	11.580,01	83,89	11.564,41	83,88	0,82	11.575,90	83,78	0,86	6,03	0,13
p4r-v1	14.012,80	2,20	13.651,21	81,40	13.650,81	81,36	2,58	13.650,88	81,39	2,58	0,16	0,15
p5r-v1	16.548,00	2,45	16.455,80	82,14	16.455,80	82,14	0,56	16.455,80	82,19	0,56	0,00	0,08
p6r-v1	18.842,00	2,45	18.757,80	80,98	18.751,79	80,86	0,48	18.756,34	80,91	0,45	2,07	0,10
p7r-v1	12.766,60	1,84	12.708,00	80,47	12.703,60	84,21	0,49	12.706,27	82,46	0,47	1,17	1,98
p8r-v1	12.675,20	2,20	12.592,61	82,70	12.590,61	82,73	0,67	12.592,26	82,67	0,65	0,55	0,07
p9r-v1	12.904,00	2,15	12.908,41	80,44	12.890,81	80,30	0,43	12.897,15	80,44	0,52	8,06	0,08
p10r-v1	14.177,20	2,28	13.965,42	83,81	13.965,41	83,75	1,49	13.965,42	83,17	1,49	0,00	1,40
p11r-v1	13.721,60	2,17	13.587,61	83,77	13.582,61	83,74	0,98	13.587,16	83,66	0,98	1,51	0,12
p12r-v1	16.866,40	2,12	16.777,21	83,35	16.776,41	83,38	0,53	16.776,92	83,34	0,53	0,40	0,07
p13r-v1	13.421,80	2,50	13.254,22	83,84	13.222,01	83,76	1,25	13.239,71	83,85	1,36	12,06	0,08
p14r-v1	16.327,60	2,03	16.186,01	81,44	16.178,41	81,47	0,87	16.181,95	81,47	0,89	2,72	0,08
p15r-v1	14.431,60	2,04	14.214,01	81,78	14.214,01	81,78	1,51	14.214,01	81,99	1,51	0,00	0,12
p16r-v1	15.097,20	2,36	15.019,61	81,95	15.008,61	81,93	0,51	15.016,25	81,93	0,54	5,05	0,10
p17r-v1	13.126,60	2,34	12.805,41	81,65	12.790,21	81,82	2,45	12.798,37	81,66	2,50	6,23	0,11
p18r-v1	13.957,20	2,25	13.854,40	83,10	13.854,40	83,10	0,74	13.854,40	83,27	0,74	0,00	0,11
p19r-v1	14.088,60	2,09	13.696,60	82,63	13.685,40	82,61	2,78	13.694,56	82,73	2,80	3,13	0,13
p20r-v1	17.898,40	2,42	17.790,21	80,52	17.786,20	80,53	0,60	17.789,11	80,57	0,61	1,38	0,12
p21r-v1	11.287,80	2,07	11.107,21	82,52	11.099,20	82,78	1,60	11.104,47	82,63	1,62	3,07	0,11
p22r-v1	12.848,60	1,86	12.780,80	81,98	12.769,80	82,16	0,53	12.772,25	82,06	0,59	4,37	0,09
p23r-v1	14.503,40	1,93	14.399,21	82,04	14.399,01	81,98	0,72	14.399,17	82,11	0,72	0,08	0,33
p24r-v1	16.031,80	2,62	15.947,81	81,81	15.906,81	81,80	0,52	15.923,23	81,74	0,68	10,91	0,13
p25r-v1	12.462,20	2,29	12.182,40	80,33	12.159,00	80,48	2,25	12.171,18	81,64	2,34	6,91	1,76
p26r-v1	14.928,60	2,29	14.798,21	80,77	14.783,01	80,88	0,87	14.792,34	80,74	0,91	4,47	0,15
p27r-v1	13.930,20	2,14	13.813,61	83,40	13.813,60	81,06	0,84	13.813,61	83,15	0,84	0,01	0,70
p28r-v1	11.527,80	1,92	11.434,21	83,83	11.432,21	80,30	0,81	11.433,03	81,94	0,82	0,98	1,85
p29r-v1	14.161,40	2,29	13.987,60	82,56	13.982,80	82,17	1,23	13.985,42	82,56	1,24	2,09	0,18
p30r-v1	14.005,60	2,64	13.820,82	82,82	13.769,01	82,14	1,32	13.786,76	82,25	1,56	19,42	0,22
Média	Média	2,23	Média	82,17	Média	82,07	1,10	Média	82,18	1,14	3,60	0,36

Tabela E.56: Resultados obtidos com a metaheurística colônia de formigas para  $|E| = 2$

Problema	CPLEX				Colônia de Formigas				$\sigma_{f_0}$	$\sigma_t$		
	Melhor caso		Pior caso		Média		Gap (%)	CPUt (s)				
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	FO	CPUt (s)						
p1r-v2	16.784,60	11,09	16.349,20	80,85	16.234,79	80,78	3,28	16.293,40	80,87	2,93	32,91	0,29
p2r-v2	17.179,40	7,11	16.925,81	80,34	16.831,00	82,77	2,03	16.867,64	82,67	1,81	33,62	0,78
p3r-v2	15.383,00	8,89	14.987,61	81,21	14.942,21	81,15	2,87	14.966,37	81,12	2,71	16,85	0,14
p4r-v2	15.579,20	8,27	15.094,61	84,21	15.038,01	84,11	3,47	15.065,56	82,82	3,30	18,87	1,82
p5r-v2	17.161,00	7,96	16.908,40	81,07	16.888,40	81,48	1,59	16.900,09	81,36	1,52	8,82	0,20
p6r-v2	18.176,60	7,89	18.088,81	80,45	18.040,59	84,06	0,75	18.060,07	81,46	0,64	13,70	1,68
p7r-v2	18.094,60	7,86	18.023,82	80,63	17.996,41	81,08	0,54	18.007,07	80,73	0,48	7,48	0,28
p8r-v2	16.486,60	5,77	16.358,01	83,16	16.303,21	83,25	1,11	16.334,43	83,15	0,92	14,07	0,10
p9r-v2	11.652,20	5,24	11.563,62	80,49	11.562,62	80,43	0,77	11.563,53	80,81	0,76	0,30	0,38
p10r-v2	16.580,00	6,19	16.179,02	83,11	16.100,02	83,31	2,89	16.136,56	83,31	2,67	22,52	0,23
p11r-v2	15.650,20	6,30	15.318,41	80,61	15.247,21	80,43	2,57	15.287,10	80,62	2,32	23,42	0,15
p12r-v2	17.610,40	7,36	17.394,21	82,09	17.335,80	81,63	1,56	17.366,19	81,71	1,39	16,73	0,20
p13r-v2	17.614,00	8,72	17.335,02	81,81	17.262,02	81,81	2,00	17.293,96	81,81	1,82	21,46	0,10
p14r-v2	19.224,80	8,13	18.948,21	81,16	18.879,00	81,34	1,80	18.903,48	81,41	1,67	18,27	0,14
p15r-v2	20.322,00	7,41	19.905,02	82,08	19.758,20	81,89	2,77	19.816,85	82,15	2,49	46,03	0,27
p16r-v2	15.629,20	8,70	15.389,40	83,27	15.310,59	83,35	2,04	15.361,65	83,17	1,71	24,73	0,10
p17r-v2	16.599,60	9,73	15.908,42	81,87	15.821,41	81,99	4,69	15.881,00	82,05	4,33	28,40	0,18
p18r-v2	15.785,80	8,38	15.448,00	82,00	15.305,99	82,33	3,04	15.371,80	82,22	2,62	52,78	0,15
p19r-v2	15.884,60	5,73	15.800,20	81,81	15.792,20	81,82	0,58	15.798,29	81,89	0,54	2,55	0,11
p20r-v2	18.166,40	8,10	17.890,81	80,59	17.857,41	80,58	1,70	17.875,23	80,68	1,60	9,72	0,20
p21r-v2	14.553,80	7,71	14.243,40	81,58	14.113,40	81,69	3,03	14.164,53	81,63	2,67	37,63	0,26
p22r-v2	17.623,20	10,86	17.425,60	81,52	17.361,00	81,60	1,49	17.406,04	81,57	1,23	18,66	0,12
p23r-v2	19.222,40	7,41	18.916,01	83,79	18.840,59	80,36	1,99	18.880,46	83,31	1,78	23,97	1,01
p24r-v2	15.134,80	7,22	14.868,80	82,94	14.825,00	83,20	2,05	14.846,04	83,05	1,91	13,83	0,13
p25r-v2	15.304,80	5,79	14.892,80	80,60	14.845,79	80,74	3,00	14.870,89	80,76	2,84	15,96	0,15
p26r-v2	19.042,00	8,61	18.674,21	83,71	18.636,61	83,48	2,13	18.659,17	83,29	2,01	14,50	0,99
p27r-v2	16.504,00	6,86	16.256,00	83,28	16.222,00	83,25	1,71	16.239,00	83,08	1,61	11,62	0,94
p28r-v2	17.249,20	7,64	17.149,21	82,18	17.140,21	81,76	0,63	17.145,24	81,96	0,60	3,13	0,28
p29r-v2	17.381,60	8,25	17.134,40	81,04	17.048,01	81,14	1,92	17.087,30	81,12	1,69	22,56	0,12
p30r-v2	15.325,00	8,72	15.074,21	81,33	14.987,22	81,30	2,20	15.026,69	81,37	1,95	30,14	0,14
Média			Média		Média			Média				
				81,83		81,94	2,07		81,91	1,88	20,17	0,39

Tabela E.57: Resultados obtidos com a metaheurística colônia de formigas para  $|E| = 3$

Problema	CPLEX				Melhor caso				Pior caso				Colônia de Formigas					
	Sol. Ótima		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		Média	
	Sol.	Ótima	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$
p1r-v3	16.333,60	16.333,60	28,94	3,44	15.771,20	82,27	3,44	15.538,80	83,05	4,87	15.662,73	82,59	4,11	17.111,89	83,04	2,90	71,21	0,28
p2r-v3	18.240,40	18.240,40	16,36	2,77	17.735,80	83,11	2,77	17.688,40	83,43	3,03	17.711,89	83,04	2,90	17.711,89	83,04	2,90	15,64	0,24
p3r-v3	16.281,60	16.281,60	24,71	3,81	15.662,01	81,45	3,81	15.537,21	81,70	4,57	15.618,34	81,54	4,07	15.618,34	81,54	4,07	40,43	0,15
p4r-v3	17.046,40	17.046,40	16,40	1,95	16.713,41	82,02	1,95	16.570,81	82,19	2,79	16.570,81	82,31	2,28	16.570,81	82,31	2,28	53,15	0,49
p5r-v3	17.643,80	17.643,80	26,75	1,48	17.382,61	81,91	1,48	17.309,80	81,90	1,89	17.366,61	81,98	1,57	17.366,61	81,98	1,57	21,20	0,36
p6r-v3	18.134,80	18.134,80	16,11	1,64	17.836,60	83,64	1,64	17.739,41	83,82	2,18	17.788,73	83,08	1,91	17.788,73	83,08	1,91	30,95	1,33
p7r-v3	18.630,00	18.630,00	14,74	1,15	18.415,01	82,60	1,15	18.288,61	83,05	1,83	18.381,92	82,69	1,33	18.381,92	82,69	1,33	34,91	0,22
p8r-v3	17.283,60	17.283,60	16,24	1,07	17.099,41	80,90	1,07	17.017,01	80,85	1,54	17.078,06	81,06	1,19	17.078,06	81,06	1,19	27,91	0,32
p9r-v3	14.316,80	14.316,80	9,30	0,96	14.179,21	83,83	0,96	14.121,60	83,86	1,36	14.147,53	83,62	1,18	14.147,53	83,62	1,18	17,65	0,98
p10r-v3	17.760,20	17.760,20	12,99	2,23	17.364,84	80,70	2,23	17.301,43	80,60	2,58	17.334,81	80,67	2,40	17.334,81	80,67	2,40	20,70	0,14
p11r-v3	15.964,40	15.964,40	14,20	2,08	15.631,81	80,84	2,08	15.546,62	80,83	2,62	15.591,72	80,88	2,33	15.591,72	80,88	2,33	27,76	0,15
p12r-v3	20.755,40	20.755,40	16,80	1,30	20.485,81	83,69	1,30	20.427,00	84,18	1,58	20.449,83	83,51	1,47	20.449,83	83,51	1,47	15,42	1,09
p13r-v3	19.133,00	19.133,00	26,54	2,14	18.723,41	82,41	2,14	18.631,00	81,99	2,62	18.661,41	82,15	2,46	18.661,41	82,15	2,46	25,81	0,25
p14r-v3	18.435,40	18.435,40	15,63	1,47	18.164,60	83,11	1,47	18.113,01	83,13	1,75	18.139,76	82,95	1,60	18.139,76	82,95	1,60	18,02	0,86
p15r-v3	19.724,40	19.724,40	16,69	2,35	19.261,42	83,16	2,35	19.138,80	82,64	2,97	19.211,41	82,90	2,60	19.211,41	82,90	2,60	41,36	0,32
p16r-v3	16.129,20	16.129,20	15,23	2,26	15.764,20	80,73	2,26	15.677,40	80,34	2,80	15.735,00	80,89	2,44	15.735,00	80,89	2,44	23,72	1,06
p17r-v3	15.857,60	15.857,60	19,98	4,98	15.068,01	80,30	4,98	14.954,62	83,71	5,69	15.021,07	82,70	5,28	15.021,07	82,70	5,28	31,72	1,53
p18r-v3	17.193,00	17.193,00	32,50	2,40	16.780,80	81,81	2,40	16.600,20	81,98	3,45	16.672,11	82,00	3,03	16.672,11	82,00	3,03	51,51	0,27
p19r-v3	17.354,20	17.354,20	14,55	1,32	17.125,21	80,65	1,32	16.939,40	80,54	2,39	17.043,93	80,60	1,79	17.043,93	80,60	1,79	51,06	0,10
p20r-v3	19.978,40	19.978,40	20,08	2,42	19.494,61	80,50	2,42	19.406,20	80,45	2,86	19.445,69	80,60	2,67	19.445,69	80,60	2,67	28,28	0,21
p21r-v3	15.725,60	15.725,60	17,89	3,64	15.153,01	82,19	3,64	15.073,21	82,48	4,15	15.104,53	82,49	3,95	15.104,53	82,49	3,95	27,76	0,25
p22r-v3	18.338,60	18.338,60	30,75	1,50	18.063,38	80,71	1,50	17.985,19	80,49	1,93	18.026,66	80,69	1,70	18.026,66	80,69	1,70	26,09	0,27
p23r-v3	19.077,20	19.077,20	16,55	0,72	18.939,20	82,10	0,72	18.927,42	82,03	0,79	18.931,66	81,67	0,76	18.931,66	81,67	0,76	3,24	0,30
p24r-v3	17.084,80	17.084,80	16,10	2,63	16.635,20	82,58	2,63	16.538,61	82,72	3,20	16.585,79	82,75	2,92	16.585,79	82,75	2,92	29,50	0,10
p25r-v3	16.691,20	16.691,20	15,82	2,40	16.289,79	81,02	2,40	16.205,20	81,19	2,91	16.253,87	81,28	2,62	16.253,87	81,28	2,62	29,90	0,25
p26r-v3	19.502,40	19.502,40	17,97	1,55	19.200,61	81,42	1,55	19.083,80	81,60	2,15	19.136,07	81,56	1,88	19.136,07	81,56	1,88	42,52	0,17
p27r-v3	18.978,40	18.978,40	16,52	1,27	18.738,21	82,65	1,27	18.651,41	82,43	1,72	18.696,26	82,49	1,49	18.696,26	82,49	1,49	27,59	0,18
p28r-v3	17.280,60	17.280,60	17,97	1,05	17.098,60	82,34	1,05	17.039,00	82,01	1,40	17.063,60	82,17	1,26	17.063,60	82,17	1,26	16,85	0,23
p29r-v3	17.334,20	17.334,20	18,72	2,01	16.985,80	80,63	2,01	16.924,80	81,40	2,36	16.964,13	80,86	2,13	16.964,13	80,86	2,13	16,99	0,21
p30r-v3	15.168,20	15.168,20	20,72	2,77	14.748,21	82,90	2,77	14.652,82	82,36	3,40	14.703,27	82,37	3,07	14.703,27	82,37	3,07	27,02	0,21
Média			18,79	2,09	Média	81,94	2,09	Média	82,10	2,65	Média	82,00	2,35	Média	82,00	2,35	29,86	0,42

Tabela E.58: Resultados obtidos com a metaheurística colônia de formigas para  $|E| = 4$

Problema	CPLEX				Melhor caso				Pior caso				Colônia de Formigas					
	Sol. Ótima		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		Média	
	Sol.	Ótima	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$
p1r-v4	16.298,80	53,12	15.699,40	3,68	15.539,60	82,42	4,66	15.616,45	82,29	4,19	50,45	0,22						
p2r-v4	18.373,80	29,31	18.158,00	1,17	17.983,80	82,76	2,12	18.073,33	82,84	1,64	49,84	0,09						
p3r-v4	15.834,40	43,66	15.213,21	3,92	14.977,60	82,33	5,41	15.116,28	82,20	4,54	63,17	0,17						
p4r-v4	18.535,80	27,10	18.137,60	2,15	17.997,62	81,39	2,90	18.067,19	81,73	2,53	46,15	0,28						
p5r-v4	17.832,40	34,69	17.570,61	1,47	17.517,20	82,50	1,77	17.544,80	82,61	1,61	17,11	0,16						
p6r-v4	18.808,80	26,60	18.486,20	1,72	18.354,41	82,94	2,42	18.403,49	82,87	2,15	36,11	0,18						
p7r-v4	18.315,00	37,91	18.089,61	1,23	17.995,81	81,88	1,74	18.043,34	81,90	1,48	31,41	0,17						
p8r-v4	16.764,00	19,13	16.510,41	1,51	16.457,61	80,49	1,83	16.483,76	80,63	1,67	15,59	0,14						
p9r-v4	14.953,00	24,63	14.705,41	1,66	14.674,61	80,90	1,86	14.686,74	81,07	1,78	11,00	0,18						
p10r-v4	18.448,40	24,99	18.085,03	1,97	17.982,63	80,42	2,52	18.038,15	80,50	2,22	33,38	0,10						
p11r-v4	16.588,00	23,81	16.258,81	1,98	16.095,22	83,66	2,97	16.195,53	83,09	2,37	50,76	1,29						
p12r-v4	21.674,20	83,01	21.356,81	1,46	21.203,62	83,62	2,17	21.288,67	83,93	1,78	46,46	0,18						
p13r-v4	19.184,80	40,64	18.873,81	1,62	18.823,41	81,82	1,88	18.848,56	82,12	1,75	15,64	0,20						
p14r-v4	18.641,20	27,05	18.350,41	1,56	18.245,21	81,67	2,12	18.299,30	81,48	1,83	34,54	0,20						
p15r-v4	20.000,00	29,70	19.438,41	2,81	19.313,40	83,97	3,43	19.388,63	83,11	3,06	43,86	1,35						
p16r-v4	16.547,20	26,49	16.204,40	2,07	16.126,60	82,19	2,54	16.173,71	82,44	2,26	26,53	0,15						
p17r-v4	16.090,80	29,47	15.556,42	3,32	15.510,22	81,51	3,61	15.529,51	81,67	3,49	14,12	0,10						
p18r-v4	16.774,80	32,76	16.473,20	1,80	16.288,20	80,60	2,90	16.360,31	80,86	2,47	59,98	0,35						
p19r-v4	17.457,60	25,10	17.198,41	1,48	17.059,60	81,33	2,28	17.105,90	81,37	2,01	41,65	0,18						
p20r-v4	19.331,80	31,15	18.628,01	3,64	18.545,81	80,52	4,07	18.582,35	80,75	3,88	28,48	0,15						
p21r-v4	16.564,40	41,01	16.023,61	3,26	15.948,60	82,73	3,72	15.981,28	82,88	3,52	23,54	0,20						
p22r-v4	17.525,20	58,94	17.224,19	1,72	17.134,61	81,12	2,23	17.170,93	80,94	2,02	28,02	0,16						
p23r-v4	20.463,20	35,77	20.139,20	1,58	20.005,60	82,48	2,24	20.093,19	82,44	1,81	36,74	0,26						
p24r-v4	17.627,00	27,14	17.282,80	1,95	17.187,21	81,00	2,49	17.243,19	80,86	2,18	30,04	0,17						
p25r-v4	16.943,80	29,06	16.485,20	2,71	16.368,99	81,45	3,39	16.420,92	81,47	3,09	39,03	0,12						
p26r-v4	19.383,00	33,21	19.129,42	1,31	19.005,42	81,51	1,95	19.070,82	81,55	1,61	39,56	0,14						
p27r-v4	19.496,80	31,03	19.226,00	1,39	19.164,02	81,52	1,71	19.197,25	81,39	1,54	19,51	0,19						
p28r-v4	17.419,00	28,13	17.219,20	1,15	17.160,80	83,30	1,48	17.196,98	83,18	1,27	15,84	0,13						
p29r-v4	17.895,20	39,78	17.455,20	2,46	17.345,61	83,29	3,07	17.413,39	83,37	2,69	28,64	0,13						
p30r-v4	15.743,20	30,86	15.410,61	2,11	15.227,81	80,86	3,27	15.303,31	80,81	2,79	49,55	0,15						
Média		34,18	Média	2,06	Média	81,94	2,69	Média	81,95	2,37	34,22	0,25						

Tabela E.59: Resultados obtidos com a metaheurística colônia de formigas para  $|E| = 5$

Problema	CPLEX				Melhor caso				Pior caso				Colônia de Formigas					
	Sol. Ótima		CPUt. (s)		FO		CPUt. (s)		Gap (%)		FO		CPUt. (s)		Gap (%)		Média	
	Sol. Ótima	CPUt. (s)	FO	CPUt. (s)	Gap (%)	FO	CPUt. (s)	Gap (%)	FO	CPUt. (s)	Gap (%)	FO	CPUt. (s)	Gap (%)	FO	CPUt. (s)	Gap (%)	$\sigma_{f_0}$
p1r-v5	16.530,60	62,49	15.877,00	80,65	3,95	15.712,00	80,71	4,95	15.804,76	81,05	4,39	15.804,76	81,05	4,39	15.804,76	81,05	52,68	1,01
p2r-v5	18.248,80	44,44	17.889,80	83,65	1,97	17.773,60	80,54	2,60	17.825,93	82,29	2,32	17.825,93	82,29	2,32	17.825,93	82,29	37,70	1,70
p3r-v5	16.194,40	71,40	15.537,61	81,55	4,06	15.409,61	81,34	4,85	15.484,72	81,52	4,38	15.484,72	81,52	4,38	15.484,72	81,52	41,84	0,15
p4r-v5	19.082,00	39,22	18.640,61	81,21	2,31	18.501,21	81,78	3,04	18.556,19	81,49	2,76	18.556,19	81,49	2,76	18.556,19	81,49	45,23	0,26
p5r-v5	17.608,00	51,87	17.258,80	83,67	1,98	17.177,80	80,45	2,44	17.217,44	82,76	2,22	17.217,44	82,76	2,22	17.217,44	82,76	23,57	1,52
p6r-v5	19.514,00	44,60	19.291,19	83,95	1,14	19.257,00	83,67	1,32	19.270,07	83,58	1,25	19.270,07	83,58	1,25	19.270,07	83,58	9,95	1,09
p7r-v5	18.573,20	54,79	18.442,62	81,75	0,70	18.323,01	81,84	1,35	18.375,87	81,80	1,06	18.375,87	81,80	1,06	18.375,87	81,80	46,24	0,10
p8r-v5	17.793,00	37,63	17.597,41	80,58	1,10	17.538,01	81,11	1,43	17.566,66	80,94	1,27	17.566,66	80,94	1,27	17.566,66	80,94	16,46	0,34
p9r-v5	14.941,20	29,47	14.722,81	82,74	1,46	14.660,41	82,80	1,88	14.692,21	82,87	1,67	14.692,21	82,87	1,67	14.692,21	82,87	18,93	0,26
p10r-v5	18.312,00	54,85	17.815,83	80,84	2,71	17.632,02	80,92	3,71	17.685,83	80,81	3,42	17.685,83	80,81	3,42	17.685,83	80,81	46,87	0,12
p11r-v5	15.807,00	34,04	15.497,02	81,80	1,96	15.393,02	81,62	2,62	15.462,60	81,81	2,18	15.462,60	81,81	2,18	15.462,60	81,81	34,36	0,21
p12r-v5	21.666,20	48,30	21.292,20	84,45	1,73	21.251,01	83,97	1,92	21.270,79	83,93	1,83	21.270,79	83,93	1,83	21.270,79	83,93	12,49	1,13
p13r-v5	19.397,60	52,68	19.092,61	81,92	1,57	19.034,61	82,04	1,87	19.059,68	81,94	1,74	19.059,68	81,94	1,74	19.059,68	81,94	19,58	0,16
p14r-v5	18.842,00	39,05	18.678,19	81,63	0,87	18.615,00	81,53	1,20	18.654,60	81,66	0,99	18.654,60	81,66	0,99	18.654,60	81,66	18,28	0,25
p15r-v5	20.398,60	41,39	20.158,80	82,71	1,18	20.041,41	82,75	1,75	20.099,94	82,76	1,46	20.099,94	82,76	1,46	20.099,94	82,76	41,34	0,13
p16r-v5	17.208,80	44,79	16.887,20	80,35	1,87	16.704,20	83,90	2,93	16.788,75	82,29	2,44	16.788,75	82,29	2,44	16.788,75	82,29	54,15	1,80
p17r-v5	16.391,20	69,42	15.848,22	81,58	3,31	15.642,42	81,47	4,57	15.731,09	81,56	4,03	15.731,09	81,56	4,03	15.731,09	81,56	54,97	0,22
p18r-v5	17.461,00	52,99	17.103,80	81,17	2,05	16.966,60	81,26	2,83	17.043,06	81,25	2,39	17.043,06	81,25	2,39	17.043,06	81,25	49,65	0,26
p19r-v5	17.706,00	33,01	17.494,21	82,01	1,20	17.384,21	81,94	1,82	17.438,77	82,00	1,51	17.438,77	82,00	1,51	17.438,77	82,00	30,82	0,09
p20r-v5	19.982,00	60,33	19.364,61	81,33	3,09	19.285,21	81,23	3,49	19.312,32	81,53	3,35	19.312,32	81,53	3,35	19.312,32	81,53	24,80	0,25
p21r-v5	16.578,20	60,39	16.118,81	84,15	2,77	15.896,81	80,29	4,11	15.986,50	82,73	3,57	15.986,50	82,73	3,57	15.986,50	82,73	60,66	1,87
p22r-v5	18.240,40	82,56	17.960,22	80,49	1,54	17.866,79	84,24	2,05	17.904,40	81,51	1,84	17.904,40	81,51	1,84	17.904,40	81,51	27,16	1,72
p23r-v5	20.363,80	59,22	19.891,60	83,67	2,32	19.761,40	83,37	2,96	19.831,10	83,43	2,62	19.831,10	83,43	2,62	19.831,10	83,43	38,73	0,20
p24r-v5	17.359,60	40,45	17.018,80	82,06	1,96	16.861,01	81,91	2,87	16.971,46	81,89	2,24	16.971,46	81,89	2,24	16.971,46	81,89	47,05	0,16
p25r-v5	16.493,60	45,61	16.070,19	81,27	2,57	15.990,79	81,29	3,05	16.039,32	81,26	2,75	16.039,32	81,26	2,75	16.039,32	81,26	25,03	0,12
p26r-v5	18.742,80	44,37	18.479,81	83,72	1,40	18.384,42	83,59	1,91	18.445,71	83,35	1,59	18.445,71	83,35	1,59	18.445,71	83,35	30,73	1,02
p27r-v5	19.351,80	49,12	19.147,42	81,80	1,06	19.095,41	81,62	1,32	19.124,43	81,60	1,17	19.124,43	81,60	1,17	19.124,43	81,60	17,41	0,18
p28r-v5	17.656,60	42,68	17.481,80	83,12	0,99	17.413,59	82,99	1,38	17.446,71	83,08	1,19	17.446,71	83,08	1,19	17.446,71	83,08	21,49	0,12
p29r-v5	18.087,40	48,28	17.736,21	80,41	1,94	17.655,41	83,41	2,39	17.701,69	82,71	2,13	17.701,69	82,71	2,13	17.701,69	82,71	27,74	1,48
p30r-v5	15.899,80	48,50	15.610,62	82,54	1,82	15.507,22	82,52	2,47	15.552,58	82,59	2,18	15.552,58	82,59	2,18	15.552,58	82,59	35,47	0,16
Média		49,60	Média	82,09	1,95	Média	82,07	2,57	Média	82,13	2,26	Média	82,13	2,26	Média	82,13	33,71	0,60

Tabela E.60: Resultados obtidos com a metaheurística colônia de formigas para  $|E| = 6$

Problema	CPLEX				Melhor caso				Pior caso				Colônia de Formigas					
	Sol. Ótima		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		Média	
	Sol.	Ótima	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$
p1r-v6	17.112,00	87,33	16.427,40	82,74	4,00	16.276,00	82,70	4,89	16.365,96	82,77	4,36	40,58	0,28					
p2r-v6	18.734,20	56,19	18.285,61	81,97	2,39	18.148,00	82,26	3,13	18.241,60	82,03	2,63	40,71	0,19					
p3r-v6	15.805,40	87,16	15.111,01	81,47	4,39	15.035,21	81,87	4,87	15.069,94	81,72	4,65	28,45	0,19					
p4r-v6	18.970,00	72,37	18.467,81	82,99	2,65	18.353,60	82,74	3,25	18.406,92	82,55	2,97	32,42	0,26					
p5r-v6	18.103,80	68,62	17.779,01	80,56	1,79	17.740,41	80,48	2,01	17.766,90	80,61	1,86	12,67	0,16					
p6r-v6	18.771,40	81,17	18.441,79	81,38	1,76	18.318,60	81,01	2,41	18.378,71	80,79	2,09	44,51	0,29					
p7r-v6	18.963,60	45,02	18.700,41	82,09	1,39	18.633,00	82,16	1,74	18.665,50	82,14	1,57	20,36	0,16					
p8r-v6	17.474,20	46,93	17.224,01	83,27	1,43	17.120,21	82,76	2,03	17.180,50	83,09	1,68	28,54	0,22					
p9r-v6	14.492,20	37,81	14.150,21	82,26	2,36	14.081,01	82,12	2,84	14.118,05	82,23	2,58	22,08	0,23					
p10r-v6	17.963,60	68,30	17.380,84	81,66	3,24	17.295,43	81,21	3,72	17.341,92	81,50	3,46	32,17	0,14					
p11r-v6	16.566,60	53,71	16.218,21	81,66	2,10	16.085,02	81,73	2,91	16.159,02	81,62	2,46	41,31	0,19					
p12r-v6	21.572,60	91,01	21.225,41	80,44	1,61	21.149,01	84,36	1,96	21.187,68	81,74	1,78	25,90	1,75					
p13r-v6	18.940,20	70,22	18.636,81	83,43	1,60	18.577,21	83,63	1,92	18.601,70	83,62	1,79	18,45	0,14					
p14r-v6	18.951,80	48,55	18.593,80	83,90	1,89	18.451,61	80,47	2,64	18.507,06	82,07	2,35	43,24	1,73					
p15r-v6	20.126,40	85,04	19.713,61	83,58	2,05	19.512,22	83,61	3,05	19.579,56	82,48	2,72	57,75	1,66					
p16r-v6	17.147,00	86,86	16.842,20	83,95	1,78	16.753,00	83,89	2,30	16.796,11	83,62	2,05	30,33	0,28					
p17r-v6	16.173,80	72,06	15.414,01	82,15	4,70	15.362,22	81,42	5,02	15.387,71	81,71	4,86	15,33	0,23					
p18r-v6	17.375,20	88,72	16.794,40	80,86	3,34	16.559,40	80,70	4,70	16.732,09	80,90	3,70	69,24	0,23					
p19r-v6	17.771,40	49,47	17.486,01	81,54	1,61	17.435,40	81,60	1,89	17.463,68	81,59	1,73	16,85	0,11					
p20r-v6	19.878,00	61,46	19.454,21	81,49	2,13	19.331,81	81,21	2,75	19.409,72	81,27	2,36	31,51	0,24					
p21r-v6	15.979,20	74,08	15.511,21	84,19	2,93	15.406,41	80,64	3,58	15.448,28	80,95	3,32	33,99	1,09					
p22r-v6	18.603,00	52,26	18.376,38	81,51	1,22	18.285,98	81,93	1,70	18.339,46	81,65	1,42	28,22	0,39					
p23r-v6	21.005,80	63,43	20.674,60	82,65	1,58	20.521,40	82,95	2,31	20.585,93	82,90	2,00	47,46	0,21					
p24r-v6	17.436,40	64,69	16.968,81	81,67	2,68	16.873,01	81,22	3,23	16.910,95	81,24	3,01	27,05	0,28					
p25r-v6	16.966,60	57,22	16.428,79	81,43	3,17	16.333,00	80,83	3,73	16.387,47	80,96	3,41	30,60	0,27					
p26r-v6	19.733,80	70,12	19.425,01	81,54	1,56	19.312,02	81,50	2,14	19.371,59	81,92	1,84	34,00	0,41					
p27r-v6	19.221,60	61,09	18.954,20	82,11	1,39	18.884,22	82,29	1,76	18.920,66	82,38	1,57	21,68	0,30					
p28r-v6	17.712,60	63,60	17.464,40	82,39	1,40	17.408,01	82,55	1,72	17.436,51	82,67	1,56	19,25	0,34					
p29r-v6	18.358,20	62,73	18.040,40	80,85	1,73	17.992,61	80,99	1,99	18.020,53	80,92	1,84	15,04	0,17					
p30r-v6	15.891,20	66,47	15.452,61	83,77	2,76	15.322,01	83,92	3,58	15.382,09	83,42	3,20	44,67	0,97					
Média		66,46	Média	82,18	2,29	Média	82,03	2,86	Média	81,97	2,56	31,81	0,44					

Tabela E.61: Resultados obtidos com a metaheurística colônia de formigas para  $|E| = 7$

Problema	CPLEX						Colônia de Formigas						
	Sol. Ótima		Melhor caso		Pior caso		Média		Média		$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$	
	Sol.	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)			Gap (%)
p1r-v7	16.792,40	107,69	16.463,40	83,73	1,96	16.148,00	83,68	3,84	16.269,02	83,69	3,12	102,92	0,06
p2r-v7	18.666,20	68,09	18.285,41	81,46	2,04	18.242,61	80,76	2,27	18.268,58	81,03	2,13	14,77	0,24
p3r-v7	15.939,80	127,16	15.275,01	81,34	4,17	15.118,61	81,13	5,15	15.183,45	81,13	4,75	45,20	0,20
p4r-v7	19.262,60	67,38	18.878,01	82,99	2,00	18.731,61	82,28	2,76	18.812,03	82,50	2,34	43,30	0,24
p5r-v7	18.254,00	74,97	17.837,21	80,30	2,28	17.752,61	83,90	2,75	17.785,57	81,05	2,57	25,73	1,39
p6r-v7	19.218,20	97,91	18.992,00	80,67	1,18	18.786,58	80,93	2,25	18.876,46	80,86	1,78	59,77	0,13
p7r-v7	18.953,60	54,41	18.736,41	82,36	1,15	18.666,81	82,37	1,51	18.696,18	82,51	1,36	22,61	0,11
p8r-v7	17.940,20	73,23	17.704,20	80,89	1,32	17.622,81	81,31	1,77	17.649,74	81,14	1,62	26,94	0,27
p9r-v7	15.228,40	51,96	14.999,61	82,20	1,50	14.934,01	81,88	1,93	14.976,74	82,01	1,65	18,70	0,22
p10r-v7	17.864,20	69,72	17.473,42	81,41	2,19	17.367,83	81,54	2,78	17.435,72	81,53	2,40	31,58	0,21
p11r-v7	16.390,80	64,21	16.073,02	82,00	1,94	15.981,62	82,01	2,50	16.024,93	81,88	2,23	26,56	0,18
p12r-v7	21.407,40	118,50	21.022,79	84,03	1,80	20.959,40	84,18	2,09	20.995,51	83,85	1,92	20,77	1,17
p13r-v7	19.217,00	103,30	18.794,82	83,28	2,20	18.655,80	83,19	2,92	18.737,59	83,12	2,49	48,12	0,12
p14r-v7	19.091,00	85,55	18.685,60	80,81	2,12	18.549,01	80,76	2,84	18.607,44	80,76	2,53	45,92	0,12
p15r-v7	19.673,20	78,91	19.224,61	80,34	2,28	19.118,03	83,98	2,82	19.173,56	81,84	2,54	38,18	1,78
p16r-v7	17.728,40	91,35	17.379,41	83,50	1,97	17.290,40	83,57	2,47	17.336,22	83,50	2,21	27,91	0,20
p17r-v7	16.782,80	86,08	16.328,42	83,70	2,71	16.200,22	81,29	3,47	16.268,58	81,36	3,06	35,09	1,20
p18r-v7	17.403,40	107,11	17.078,00	83,53	1,87	16.881,79	80,40	3,00	16.956,05	82,72	2,57	51,61	1,49
p19r-v7	17.377,60	51,76	16.998,80	82,57	2,18	16.864,00	82,60	2,96	16.946,51	82,71	2,48	38,76	0,13
p20r-v7	19.235,20	99,76	18.824,21	82,18	2,14	18.735,41	82,52	2,60	18.785,06	82,19	2,34	28,95	0,28
p21r-v7	16.766,60	88,80	16.315,81	80,80	2,69	16.196,01	81,05	3,40	16.253,85	81,05	3,06	41,60	0,19
p22r-v7	18.405,20	106,07	18.215,99	80,45	1,03	18.092,00	84,04	1,70	18.166,22	83,09	1,30	32,96	1,54
p23r-v7	21.313,60	84,54	20.885,60	82,79	2,01	20.789,80	82,83	2,46	20.853,46	83,03	2,16	35,95	0,28
p24r-v7	17.633,80	82,26	17.202,41	80,76	2,45	17.067,81	81,12	3,21	17.154,08	80,97	2,72	43,58	0,11
p25r-v7	16.400,00	98,86	15.803,60	82,11	3,64	15.638,59	82,77	4,64	15.728,11	82,49	4,10	50,30	0,30
p26r-v7	19.645,40	102,38	19.176,81	82,29	2,39	19.070,02	82,72	2,93	19.120,53	82,58	2,67	33,96	0,21
p27r-v7	19.412,60	83,38	19.160,80	82,17	1,30	19.115,80	82,36	1,53	19.139,62	82,46	1,41	16,64	0,27
p28r-v7	17.938,60	76,75	17.725,80	82,58	1,19	17.646,81	82,73	1,63	17.687,22	82,85	1,40	25,15	0,32
p29r-v7	18.695,00	143,26	18.311,20	80,82	2,05	18.240,41	81,33	2,43	18.276,79	81,08	2,24	23,83	0,17
p30r-v7	16.204,60	69,98	15.799,62	83,28	2,50	15.721,42	83,12	2,98	15.766,35	82,94	2,70	28,15	0,17
	Média	87,18	Média	82,04	2,07	Média	82,28	2,72	Média	82,13	2,39	36,18	0,44

Tabela E.62: Resultados obtidos com a metaheurística colônia de formigas para  $|E| = 8$

Problema	CPLEX				Colônia de Formigas				$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$		
	Melhor caso		Pior caso		Média		Gap (%)	Gap (%)				
	FO	CPUt (s)	FO	CPUt (s)	FO	CPUt (s)						
p1r-v8	16.602,80	144,50	16.021,20	83,19	15.776,59	82,86	4,98	15.903,96	83,07	4,21	65,14	0,16
p2r-v8	18.630,80	114,91	18.374,00	82,99	18.287,20	83,21	1,84	18.340,00	83,15	1,56	28,86	0,20
p3r-v8	16.145,40	170,96	15.515,01	81,80	15.386,21	81,74	4,70	15.439,41	81,73	4,37	35,03	0,18
p4r-v8	19.158,80	89,00	18.789,81	83,38	18.689,62	83,23	2,45	18.728,56	83,38	2,25	28,02	0,28
p5r-v8	17.211,40	98,55	16.772,40	83,03	16.689,60	82,81	3,03	16.742,31	82,87	2,73	23,97	0,21
p6r-v8	19.316,80	102,41	19.073,01	81,43	18.934,00	80,89	1,98	19.012,18	81,26	1,58	48,51	0,18
p7r-v8	18.657,40	71,20	18.242,42	82,08	18.146,62	82,45	2,74	18.197,03	82,26	2,47	28,05	0,22
p8r-v8	17.930,20	75,10	17.695,40	80,71	17.620,41	80,50	1,73	17.648,30	82,53	1,57	22,10	1,63
p9r-v8	15.005,80	46,11	14.860,41	82,60	14.834,61	82,50	1,14	14.846,77	82,68	1,06	7,56	0,24
p10r-v8	18.381,00	71,50	17.876,82	81,25	17.791,22	81,18	3,21	17.833,62	81,30	2,98	26,09	0,15
p11r-v8	16.733,40	80,57	16.477,62	82,36	16.401,42	82,14	1,98	16.438,67	82,15	1,76	22,24	0,14
p12r-v8	21.913,20	98,02	21.541,60	81,48	21.458,78	80,84	2,07	21.500,40	81,18	1,88	26,75	0,20
p13r-v8	19.007,00	110,14	18.573,21	83,56	18.426,21	83,61	3,06	18.515,27	83,51	2,59	52,37	0,19
p14r-v8	18.985,20	80,32	18.671,60	80,66	18.577,01	81,59	2,15	18.630,17	81,03	1,87	29,22	0,39
p15r-v8	20.439,00	98,11	19.966,60	80,32	19.775,02	80,52	3,25	19.870,10	81,40	2,78	22,24	0,14
p16r-v8	17.393,20	106,33	17.183,81	80,58	17.043,39	80,43	2,01	17.087,51	80,89	1,76	37,50	1,05
p17r-v8	16.825,00	114,43	16.191,82	81,47	16.023,41	81,56	4,76	16.096,94	81,66	4,33	47,15	0,13
p18r-v8	17.012,40	97,56	16.631,39	80,41	16.389,00	80,80	3,66	16.568,30	80,63	2,61	70,10	0,16
p19r-v8	17.706,80	98,94	17.351,20	82,66	17.223,00	82,34	2,73	17.283,06	82,47	2,39	30,96	0,21
p20r-v8	19.159,40	112,01	18.815,40	81,53	18.694,61	82,33	2,43	18.776,55	81,76	2,00	30,66	0,33
p21r-v8	16.748,80	113,83	16.263,21	80,68	16.151,41	80,50	3,57	16.200,57	81,57	3,27	38,15	1,64
p22r-v8	18.311,20	135,17	17.956,18	81,00	17.877,58	80,80	2,37	17.908,33	80,99	2,20	22,21	0,15
p23r-v8	20.995,40	110,45	20.679,61	83,71	20.599,21	83,72	1,89	20.635,08	83,33	1,72	24,28	1,01
p24r-v8	17.657,80	102,54	17.312,61	80,84	17.165,60	80,94	2,79	17.228,10	80,89	2,43	42,90	0,15
p25r-v8	16.967,00	85,04	16.497,79	82,10	16.354,80	82,28	3,61	16.435,29	82,15	3,13	37,63	0,23
p26r-v8	20.079,80	104,26	19.632,81	81,33	19.455,02	81,46	3,11	19.566,07	81,29	2,56	48,44	0,18
p27r-v8	19.443,60	117,58	19.226,21	81,88	19.161,61	81,99	1,45	19.196,94	82,03	1,27	16,46	0,13
p28r-v8	17.600,00	77,17	17.607,20	80,47	17.548,01	83,83	1,19	17.582,42	82,61	1,00	18,93	1,67
p29r-v8	18.402,00	96,74	18.034,61	81,73	17.903,21	82,22	2,71	17.951,01	81,80	2,45	46,48	0,18
p30r-v8	15.949,00	90,25	15.511,62	83,70	15.411,82	80,39	3,37	15.475,82	82,80	2,97	27,96	1,55
Média	100,46	Média	Média	81,83	Média	81,86	2,73	Média	82,01	2,39	34,58	0,49

Tabela E.63: Resultados obtidos com a metaheurística colônia de formigas para  $|E| = 9$

Problema	CPLEX				Melhor caso				Pior caso				Colônia de Formigas					
	Sol. Ótima		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		Média	
	Sol.	Ótima	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	$\sigma_{fo}$	$\sigma_t$
p1r-v9	16.825,00	173,43	16.276,60	3,26	82,91	83,20	4,17	16.124,00	83,20	4,17	16.183,98	83,02	3,81	43,88	0,15			
p2r-v9	18.686,20	93,46	18.317,80	1,97	81,30	80,96	2,32	18.253,01	80,96	2,32	18.279,47	81,05	2,18	20,16	0,18			
p3r-v9	16.510,80	208,60	15.891,81	3,75	81,63	81,73	4,67	15.739,21	81,73	4,67	15.824,86	81,77	4,15	48,14	0,14			
p4r-v9	19.045,60	117,84	18.429,01	3,24	80,54	84,01	4,03	18.277,61	84,01	4,03	18.355,59	83,14	3,62	46,20	1,69			
p5r-v9	18.087,20	126,24	17.572,21	2,85	83,83	80,67	3,03	17.539,59	80,67	3,03	17.556,61	81,07	2,93	10,83	1,36			
p6r-v9	19.432,80	113,10	19.217,59	1,11	81,36	81,45	1,55	19.131,20	81,45	1,55	19.185,94	81,43	1,27	29,13	0,21			
p7r-v9	18.814,00	120,20	18.567,61	1,31	82,74	82,92	1,67	18.500,01	82,92	1,67	18.526,54	82,94	1,53	19,75	0,15			
p8r-v9	17.881,20	80,50	17.621,40	1,45	81,68	81,64	1,84	17.552,41	81,64	1,84	17.578,48	81,65	1,69	21,42	0,23			
p9r-v9	15.061,40	66,27	14.885,41	1,17	83,02	83,53	1,93	14.770,21	83,53	1,93	14.812,36	83,16	1,65	37,07	0,21			
p10r-v9	18.094,60	86,85	17.666,22	2,37	81,94	81,64	2,89	17.571,23	81,64	2,89	17.613,00	81,87	2,66	31,91	0,21			
p11r-v9	16.258,60	106,16	15.793,41	2,86	82,43	81,91	3,98	15.612,21	81,91	3,98	15.708,82	82,04	3,38	43,55	0,22			
p12r-v9	21.678,40	106,85	21.365,01	1,45	81,65	81,80	1,86	21.274,21	81,80	1,86	21.301,66	81,81	1,74	26,86	0,21			
p13r-v9	19.256,20	176,95	18.767,22	2,54	82,89	83,06	3,27	18.626,01	83,06	3,27	18.702,58	83,10	2,88	50,12	0,35			
p14r-v9	19.488,00	94,91	18.890,80	3,06	81,15	81,25	3,59	18.788,00	81,25	3,59	18.819,95	81,46	3,43	29,03	0,29			
p15r-v9	20.238,40	116,83	19.686,81	2,73	80,88	81,17	3,24	19.583,42	81,17	3,24	19.635,70	81,17	2,98	34,13	0,31			
p16r-v9	17.344,00	140,45	16.995,80	2,01	80,38	80,65	2,71	16.874,01	80,65	2,71	16.940,31	80,61	2,33	32,17	0,13			
p17r-v9	16.748,20	117,36	16.033,61	4,27	80,48	80,42	5,00	15.911,41	80,42	5,00	15.957,52	80,64	4,72	35,38	0,14			
p18r-v9	17.380,00	135,72	16.813,99	3,26	81,08	81,19	3,80	16.719,19	81,19	3,80	16.770,32	81,30	3,51	30,77	0,30			
p19r-v9	17.537,00	91,74	17.187,61	1,99	81,83	81,75	2,60	17.081,01	81,75	2,60	17.143,62	81,77	2,24	35,02	0,17			
p20r-v9	19.807,60	114,72	19.390,01	2,11	80,74	80,96	2,50	19.312,40	80,96	2,50	19.342,13	80,94	2,35	22,23	0,18			
p21r-v9	16.796,80	140,67	16.341,21	2,71	81,79	81,93	3,29	16.243,41	81,93	3,29	16.293,57	81,90	3,00	36,63	0,12			
p22r-v9	18.561,80	110,39	18.352,37	1,13	80,87	80,91	1,63	18.259,58	80,91	1,63	18.298,63	80,86	1,42	27,25	0,12			
p23r-v9	20.841,40	117,70	20.471,00	1,78	83,31	84,02	2,58	20.304,00	84,02	2,58	20.385,47	83,58	2,19	62,48	0,24			
p24r-v9	17.186,80	148,58	16.682,01	2,94	81,65	82,09	3,67	16.555,41	82,09	3,67	16.622,35	81,74	3,28	38,51	0,17			
p25r-v9	16.535,40	110,89	15.993,60	3,28	83,82	84,02	3,63	15.935,80	84,02	3,63	15.971,01	82,94	3,41	20,82	1,62			
p26r-v9	19.688,60	133,35	19.137,62	2,80	82,80	82,85	3,22	19.054,01	82,85	3,22	19.088,14	82,86	3,05	32,17	0,13			
p27r-v9	18.886,60	116,83	18.575,01	1,65	83,51	83,05	2,16	18.479,19	83,05	2,16	18.514,51	83,19	1,97	27,51	0,22			
p28r-v9	17.470,20	107,06	17.230,19	1,37	82,84	82,87	1,65	17.182,39	82,87	1,65	17.209,96	82,98	1,49	14,19	0,19			
p29r-v9	18.202,20	126,70	17.663,60	2,96	81,30	81,51	3,36	17.590,82	81,51	3,36	17.637,17	81,38	3,10	21,48	0,15			
p30r-v9	16.052,20	131,07	15.574,22	2,98	83,55	83,56	3,62	15.471,22	83,56	3,62	15.527,96	83,42	3,27	32,51	0,13			
Média	121,05	Média	Média	2,41	82,00	82,09	2,98	Média	82,09	2,98	Média	82,03	2,71	32,04	0,33			

Tabela E.64: Resultados obtidos com a metaheurística colônia de formigas para  $|E| = 10$

Problema	CPLEX				Melhor caso				Pior caso				Colônia de Formigas							
	Sol. Ótima		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		Gap (%)		$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$
	Sol.	Ótima	CPUt (s)	Gap (%)	FO	Gap (%)	CPUt (s)	Gap (%)	FO	Gap (%)	CPUt (s)	Gap (%)	FO	Gap (%)	CPUt (s)	Gap (%)				
p1r-v10	16.891,40	16.891,40	219,95	3,57	16.288,00	3,57	83,19	16.096,60	83,34	16.206,71	4,71	83,36	16.206,71	4,05	83,36	4,05	59,34	0,10		
p2r-v10	18.797,20	18.797,20	113,97	3,24	18.187,60	3,24	83,83	18.037,20	83,74	18.138,27	4,04	82,56	18.138,27	3,51	82,56	3,51	47,64	1,72		
p3r-v10	16.288,00	16.288,00	177,95	2,55	15.872,00	2,55	82,21	15.724,41	82,44	15.799,37	3,46	82,27	15.799,37	3,00	82,27	3,00	50,57	0,24		
p4r-v10	19.389,60	19.389,60	158,11	2,18	18.967,22	2,18	83,46	18.842,42	82,93	18.882,65	2,82	83,15	18.882,65	2,61	83,15	2,61	35,32	0,37		
p5r-v10	18.055,20	18.055,20	153,07	1,21	17.837,01	1,21	83,75	17.775,41	80,34	17.814,79	1,55	82,52	17.814,79	1,33	82,52	1,33	17,87	1,65		
p6r-v10	19.189,40	19.189,40	160,31	1,61	18.881,41	1,61	81,82	18.834,00	81,91	18.861,11	1,85	81,95	18.861,11	1,71	81,95	1,71	13,65	0,17		
p7r-v10	18.297,60	18.297,60	112,49	1,85	17.958,80	1,85	82,72	17.756,21	82,76	17.847,08	2,96	82,92	17.847,08	2,46	82,92	2,46	54,90	0,26		
p8r-v10	17.908,20	17.908,20	113,97	1,34	17.668,01	1,34	81,02	17.613,21	81,10	17.636,65	1,65	81,07	17.636,65	1,52	81,07	1,52	16,05	0,23		
p9r-v10	15.122,00	15.122,00	78,78	0,74	15.009,41	0,74	83,40	14.980,41	83,57	14.995,18	0,94	83,59	14.995,18	0,84	83,59	0,84	10,50	0,23		
p10r-v10	18.381,00	18.381,00	124,54	2,80	17.865,61	2,80	81,95	17.777,43	82,34	17.823,40	3,28	82,21	17.823,40	3,03	82,21	3,03	29,19	0,17		
p11r-v10	16.223,80	16.223,80	124,82	2,29	15.852,22	2,29	81,84	15.768,21	82,03	15.800,42	2,81	82,08	15.800,42	2,61	82,08	2,61	23,11	0,20		
p12r-v10	21.688,60	21.688,60	131,66	1,94	21.268,40	1,94	81,13	21.120,20	80,71	21.181,48	2,62	80,92	21.181,48	2,34	80,92	2,34	43,94	0,44		
p13r-v10	19.365,20	19.365,20	200,12	1,78	19.020,21	1,78	84,15	18.914,01	84,25	18.977,56	2,33	83,82	18.977,56	2,00	83,82	2,00	31,93	1,15		
p14r-v10	19.217,40	19.217,40	112,40	1,74	18.883,40	1,74	80,87	18.769,41	80,81	18.810,28	2,33	80,84	18.810,28	2,12	80,84	2,12	34,82	0,18		
p15r-v10	19.674,00	19.674,00	127,75	2,37	19.207,60	2,37	81,33	19.165,41	81,35	19.185,13	2,59	81,50	19.185,13	2,48	81,50	2,48	14,43	0,19		
p16r-v10	17.258,20	17.258,20	167,95	1,86	16.937,81	1,86	80,90	16.697,40	80,94	16.796,92	3,25	81,00	16.796,92	2,67	81,00	2,67	60,89	0,14		
p17r-v10	16.684,80	16.684,80	139,82	3,96	16.023,62	3,96	82,11	15.948,62	82,09	15.979,82	4,41	82,19	15.979,82	4,23	82,19	4,23	20,79	0,09		
p18r-v10	17.325,00	17.325,00	185,77	2,45	16.901,00	2,45	81,25	16.747,20	81,23	16.821,51	3,34	81,28	16.821,51	2,91	81,28	2,91	52,07	0,18		
p19r-v10	17.566,80	17.566,80	119,29	1,43	17.316,21	1,43	83,10	17.251,81	83,25	17.279,82	1,79	83,20	17.279,82	1,63	83,20	1,63	21,49	0,13		
p20r-v10	19.942,60	19.942,60	168,39	2,07	19.529,02	2,07	81,75	19.369,41	81,66	19.449,26	2,87	81,78	19.449,26	2,47	81,78	2,47	42,22	0,19		
p21r-v10	16.634,40	16.634,40	157,34	3,09	16.121,01	3,09	83,96	16.007,21	84,16	16.078,63	3,77	83,02	16.078,63	3,34	83,02	3,34	30,62	1,59		
p22r-v10	18.466,20	18.466,20	138,48	1,16	18.251,39	1,16	81,44	18.187,79	80,98	18.209,08	1,51	81,20	18.209,08	1,39	81,20	1,39	22,62	0,21		
p23r-v10	21.104,00	21.104,00	143,26	1,78	20.728,98	1,78	83,85	20.544,20	83,55	20.622,01	2,65	83,60	20.622,01	2,28	83,60	2,28	59,74	0,33		
p24r-v10	17.354,40	17.354,40	119,89	1,77	17.047,80	1,77	81,64	16.878,81	81,93	16.933,99	2,74	81,64	16.933,99	2,42	81,64	2,42	54,71	0,22		
p25r-v10	16.594,20	16.594,20	116,55	2,44	16.188,60	2,44	83,21	16.119,40	82,45	16.156,07	2,86	82,73	16.156,07	2,64	82,73	2,64	21,19	0,38		
p26r-v10	19.719,80	19.719,80	164,60	2,67	19.193,21	2,67	82,12	19.075,02	82,37	19.130,33	3,27	82,21	19.130,33	2,99	82,21	2,99	34,27	0,18		
p27r-v10	19.473,20	19.473,20	138,14	1,40	19.199,82	1,40	81,88	19.101,21	81,69	19.140,66	1,91	81,71	19.140,66	1,71	81,71	1,71	29,73	0,10		
p28r-v10	17.647,80	17.647,80	124,63	0,95	17.480,61	0,95	83,57	17.411,00	83,20	17.440,35	1,34	83,34	17.440,35	1,18	83,34	1,18	20,67	0,18		
p29r-v10	18.607,60	18.607,60	178,11	2,35	18.170,80	2,35	80,84	18.118,02	80,56	18.142,03	2,63	80,71	18.142,03	2,50	80,71	2,50	15,47	0,16		
p30r-v10	15.858,20	15.858,20	138,17	3,48	15.306,02	3,48	83,42	15.167,22	83,19	15.245,33	4,36	83,42	15.245,33	3,86	83,42	3,86	37,91	0,16		
Média	Média	Média	143,68	2,14	Média	2,14	82,39	Média	82,23	Média	2,75	82,26	Média	2,46	82,26	2,46	33,59	0,39		

Tabela E.65: Resultados obtidos com a metaheurística colônia de formigas para  $|E| = 11$

Problema	CPLEX				Melhor caso				Pior caso				Colônia de Formigas					
	Sol. Ótima	CPUt (s)	FO	Gap (%)	CPUt (s)	FO	Gap (%)	CPUt (s)	FO	Gap (%)	CPUt (s)	FO	Gap (%)	CPUt (s)	FO	Gap (%)	$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$
					Média				Média									
p1r-v11	17.030,60	281,66	16.537,00	2,90	83,53	16.425,40	3,55	83,15	16.478,49	3,24	83,42	16.478,49	3,24	83,42	16.478,49	3,24	36,54	0,28
p2r-v11	18.873,40	123,72	18.613,20	1,38	81,54	18.527,80	1,83	81,15	18.570,68	1,60	81,19	18.570,68	1,60	81,19	18.570,68	1,60	28,61	0,23
p3r-v11	16.360,60	222,46	15.874,81	2,97	82,24	15.682,81	4,14	82,30	15.764,26	3,64	82,37	15.764,26	3,64	82,37	15.764,26	3,64	57,04	0,11
p4r-v11	18.979,00	141,84	18.447,62	2,80	81,04	18.313,01	3,51	81,26	18.367,14	3,22	81,21	18.367,14	3,22	81,21	18.367,14	3,22	45,02	0,26
p5r-v11	17.920,60	158,72	17.579,01	1,91	81,52	17.472,00	2,50	81,12	17.546,67	2,09	81,30	17.546,67	2,09	81,30	17.546,67	2,09	28,82	0,16
p6r-v11	19.494,20	156,72	19.179,99	1,61	81,42	19.087,20	2,09	81,59	19.129,20	1,87	81,54	19.129,20	1,87	81,54	19.129,20	1,87	28,87	0,19
p7r-v11	18.948,80	181,85	18.583,61	1,93	82,58	18.476,81	2,49	82,76	18.530,68	2,21	82,56	18.530,68	2,21	82,56	18.530,68	2,21	32,27	0,11
p8r-v11	17.948,00	111,81	17.749,81	1,10	81,52	17.663,81	1,58	80,93	17.696,86	1,40	81,28	17.696,86	1,40	81,28	17.696,86	1,40	27,39	0,28
p9r-v11	14.837,60	91,53	14.653,41	1,24	83,17	14.616,81	1,49	83,39	14.634,74	1,37	83,13	14.634,74	1,37	83,13	14.634,74	1,37	14,21	0,22
p10r-v11	18.391,40	129,89	17.956,03	2,37	81,91	17.820,62	3,10	81,93	17.889,16	2,73	82,21	17.889,16	2,73	82,21	17.889,16	2,73	34,33	0,23
p11r-v11	16.483,40	140,12	16.211,02	1,65	82,05	16.087,42	2,40	82,11	16.149,87	2,02	82,08	16.149,87	2,02	82,08	16.149,87	2,02	35,83	0,12
p12r-v11	21.659,60	192,04	21.302,39	1,65	81,30	21.208,00	2,08	82,52	21.249,93	1,89	81,77	21.249,93	1,89	81,77	21.249,93	1,89	35,86	0,40
p13r-v11	19.485,20	241,74	19.224,41	1,34	81,15	19.072,81	2,12	80,55	19.132,14	1,81	81,61	19.132,14	1,81	81,61	19.132,14	1,81	43,67	1,64
p14r-v11	19.223,40	124,19	18.769,61	2,36	81,46	18.529,61	3,61	81,94	18.639,50	3,04	81,53	18.639,50	3,04	81,53	18.639,50	3,04	61,55	0,27
p15r-v11	19.956,00	164,96	19.439,03	2,59	80,43	19.296,41	3,31	81,01	19.379,56	2,89	80,92	19.379,56	2,89	80,92	19.379,56	2,89	47,99	1,08
p16r-v11	17.435,20	168,22	17.036,40	2,29	80,58	16.904,80	3,04	80,64	16.971,98	2,66	80,71	16.971,98	2,66	80,71	16.971,98	2,66	33,00	0,14
p17r-v11	16.928,20	167,89	16.433,62	2,92	80,90	16.298,22	3,72	80,98	16.365,05	3,33	81,12	16.365,05	3,33	81,12	16.365,05	3,33	53,77	0,16
p18r-v11	17.112,00	239,15	16.640,40	2,76	83,59	16.523,40	3,44	83,64	16.581,54	3,10	82,24	16.581,54	3,10	82,24	16.581,54	3,10	43,06	1,61
p19r-v11	17.853,80	116,64	17.346,60	2,84	83,23	17.266,01	3,29	83,26	17.294,39	3,13	82,75	17.294,39	3,13	82,75	17.294,39	3,13	27,15	0,70
p20r-v11	20.008,40	175,83	19.586,81	2,11	82,23	19.467,00	2,71	82,16	19.526,99	2,41	82,35	19.526,99	2,41	82,35	19.526,99	2,41	33,24	0,29
p21r-v11	16.598,60	203,27	15.962,81	3,83	81,99	15.804,61	4,42	81,63	15.914,94	4,12	81,91	15.914,94	4,12	81,91	15.914,94	4,12	27,33	0,15
p22r-v11	18.490,40	181,38	18.031,20	2,48	81,63	17.923,98	3,06	81,64	17.964,34	2,85	81,65	17.964,34	2,85	81,65	17.964,34	2,85	36,24	0,26
p23r-v11	21.147,80	169,87	20.816,79	1,57	80,65	20.730,99	1,97	80,47	20.772,54	1,77	81,13	20.772,54	1,77	81,13	20.772,54	1,77	28,81	1,41
p24r-v11	17.450,80	125,22	17.031,80	2,40	82,35	16.905,60	3,12	82,30	16.984,89	2,67	82,43	16.984,89	2,67	82,43	16.984,89	2,67	41,46	0,11
p25r-v11	16.820,60	143,36	16.433,79	2,30	83,45	16.263,80	3,31	83,32	16.368,56	2,69	82,95	16.368,56	2,69	82,95	16.368,56	2,69	46,51	0,24
p26r-v11	19.709,00	156,91	19.252,62	2,61	82,80	19.153,42	3,11	82,69	19.189,51	2,93	82,65	19.189,51	2,93	82,65	19.189,51	2,93	29,05	0,15
p27r-v11	19.150,40	186,31	18.947,80	1,06	82,49	18.834,01	1,65	82,58	18.881,35	1,40	82,55	18.881,35	1,40	82,55	18.881,35	1,40	33,59	0,22
p28r-v11	17.708,20	167,73	17.492,20	1,22	83,68	17.442,20	1,50	83,72	17.463,76	1,38	83,65	17.463,76	1,38	83,65	17.463,76	1,38	19,04	0,15
p29r-v11	18.788,20	157,92	18.465,81	1,70	81,00	18.398,39	2,07	80,98	18.432,62	1,89	81,09	18.432,62	1,89	81,09	18.432,62	1,89	22,39	0,12
p30r-v11	16.313,60	155,50	15.795,42	3,18	80,72	15.615,02	4,28	83,69	15.675,11	3,91	82,58	15.675,11	3,91	82,58	15.675,11	3,91	60,66	1,61
Média	Média	165,95	Média	2,17	81,94	Média	2,82	82,05	Média	2,51	82,00	Média	2,51	82,00	Média	2,51	36,44	0,43

Tabela E.66: Resultados obtidos com a metaheurística colônia de formigas para  $|E| = 12$

Problema	CPLEX				Melhor caso				Pior caso				Colônia de Formigas					
	Sol. Ótima		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		Média	
	Sol.	Ótima	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$
p1r-v12	16.605,40	259,52	16.002,80	3,63	83,72	83,70	3,63	15.766,80	83,70	5,05	15.884,65	83,38	4,34	15.884,65	83,38	4,34	78,85	0,98
p2r-v12	19.038,40	185,41	18.768,00	1,42	80,70	80,36	1,42	18.642,60	80,36	2,08	18.680,31	80,86	1,88	18.680,31	80,86	1,88	36,28	1,00
p3r-v12	16.484,40	298,37	15.736,81	4,54	82,07	81,93	4,54	15.607,81	81,93	5,32	15.675,99	82,07	4,90	15.675,99	82,07	4,90	37,53	0,23
p4r-v12	18.974,80	165,30	18.448,42	2,77	80,50	81,11	2,77	18.325,22	81,11	3,42	18.367,32	80,62	3,20	18.367,32	80,62	3,20	37,36	0,21
p5r-v12	17.802,20	183,55	17.370,20	2,43	80,49	80,45	2,43	17.251,41	80,45	3,09	17.307,12	80,62	2,78	17.307,12	80,62	2,78	31,53	0,12
p6r-v12	19.603,00	157,62	19.363,19	1,22	82,23	81,73	1,22	19.294,18	81,73	1,58	19.333,19	81,79	1,38	19.333,19	81,79	1,38	21,37	0,18
p7r-v12	18.715,60	154,39	18.416,21	1,60	83,49	82,99	1,60	18.258,01	82,99	2,44	18.348,56	83,37	1,96	18.348,56	83,37	1,96	47,93	0,24
p8r-v12	17.753,40	155,35	17.350,41	2,27	82,53	81,49	2,27	17.269,21	81,49	2,73	17.313,90	81,84	2,48	17.313,90	81,84	2,48	24,20	0,40
p9r-v12	14.996,40	99,01	14.805,40	1,27	82,64	83,19	1,27	14.746,81	83,19	1,66	14.766,83	82,74	1,53	14.766,83	82,74	1,53	18,46	0,26
p10r-v12	17.931,60	155,19	17.476,83	2,54	81,31	81,22	2,54	17.348,84	81,22	3,25	17.415,74	81,53	2,88	17.415,74	81,53	2,88	34,40	0,27
p11r-v12	16.197,40	149,81	15.774,62	2,61	82,65	83,13	2,61	15.611,62	83,13	3,62	15.701,69	82,88	3,06	15.701,69	82,88	3,06	48,44	0,24
p12r-v12	21.762,00	245,47	21.452,82	1,42	82,32	81,37	1,42	21.408,81	81,37	1,62	21.426,12	81,76	1,54	21.426,12	81,76	1,54	15,17	0,31
p13r-v12	19.356,60	238,43	18.939,01	2,16	80,39	84,21	2,16	18.732,42	84,21	3,22	18.838,11	83,44	2,68	18.838,11	83,44	2,68	64,30	1,46
p14r-v12	19.311,20	157,64	19.028,01	1,47	81,36	82,09	1,47	18.815,81	82,09	2,57	18.889,64	81,73	2,18	18.889,64	81,73	2,18	58,93	0,28
p15r-v12	19.999,60	165,27	19.586,23	2,07	82,08	81,90	2,07	19.434,42	81,90	2,83	19.486,42	81,73	2,57	19.486,42	81,73	2,57	45,34	0,36
p16r-v12	17.247,00	192,68	16.851,61	2,29	81,86	82,24	2,29	16.710,60	82,24	3,11	16.772,69	82,06	2,75	16.772,69	82,06	2,75	53,85	0,18
p17r-v12	16.621,00	158,34	16.056,82	3,39	81,78	82,41	3,39	15.974,42	82,41	3,89	16.016,82	82,06	3,64	16.016,82	82,06	3,64	30,15	0,21
p18r-v12	17.350,00	222,66	17.012,59	1,94	81,62	81,04	1,94	16.888,20	81,04	2,66	16.953,00	81,54	2,29	16.953,00	81,54	2,29	37,99	0,48
p19r-v12	17.976,60	126,72	17.721,21	1,42	81,98	82,03	1,42	17.649,61	82,03	1,82	17.684,46	82,16	1,63	17.684,46	82,16	1,63	29,53	0,16
p20r-v12	19.834,80	179,92	19.421,60	2,08	81,31	81,52	2,08	19.337,60	81,52	2,51	19.380,55	81,39	2,29	19.380,55	81,39	2,29	26,02	0,18
p21r-v12	16.637,00	218,23	16.174,61	2,78	81,43	81,39	2,78	16.060,61	81,39	3,46	16.120,37	81,01	3,11	16.120,37	81,01	3,11	34,53	0,22
p22r-v12	18.481,80	232,38	18.141,61	1,84	81,44	81,71	1,84	18.062,39	81,71	2,27	18.091,27	81,56	2,11	18.091,27	81,56	2,11	23,32	0,19
p23r-v12	20.938,20	206,20	20.402,80	2,56	81,21	81,79	2,56	20.146,20	81,79	3,78	20.306,80	81,36	3,02	20.306,80	81,36	3,02	73,51	0,31
p24r-v12	17.662,20	143,18	17.232,21	2,43	82,15	82,19	2,43	17.079,01	82,19	3,30	17.150,94	81,93	2,89	17.150,94	81,93	2,89	51,36	0,18
p25r-v12	16.764,20	159,76	16.466,40	1,78	82,81	82,78	1,78	16.351,19	82,78	2,46	16.400,21	82,90	2,17	16.400,21	82,90	2,17	29,33	0,17
p26r-v12	19.294,00	182,80	18.738,01	2,88	83,23	82,98	2,88	18.661,21	82,98	3,28	18.704,83	82,94	3,05	18.704,83	82,94	3,05	23,02	0,28
p27r-v12	19.680,80	178,81	19.498,21	0,93	82,92	83,39	0,93	19.433,20	83,39	1,26	19.469,55	83,10	1,07	19.469,55	83,10	1,07	17,77	0,23
p28r-v12	17.837,00	163,97	17.665,20	0,96	80,39	80,35	0,96	17.516,20	80,35	1,80	17.570,51	81,27	1,49	17.570,51	81,27	1,49	42,77	1,32
p29r-v12	18.576,80	226,45	18.187,42	2,10	82,33	82,02	2,10	17.980,21	82,02	3,21	18.068,92	82,04	2,73	18.068,92	82,04	2,73	63,72	0,25
p30r-v12	16.344,60	182,19	16.038,42	1,87	83,43	83,57	1,87	15.877,82	83,57	2,86	15.978,94	83,47	2,24	15.978,94	83,47	2,24	44,04	0,11
Média	Média	184,82	Média	2,16	81,95	82,08	2,16	Média	82,08	2,87	Média	82,04	2,53	Média	82,04	2,53	39,37	0,37

Tabela E.67: Resultados obtidos com a metaheurística colônia de formigas para  $|E| = 13$

Problema	CPLEX				Melhor caso				Pior caso				Colônia de Formigas					
	Sol. Ótima		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		Média	
	Sol.	Gap (%)	FO	Gap (%)	FO	Gap (%)	FO	Gap (%)	FO	Gap (%)	FO	Gap (%)	FO	Gap (%)	FO	Gap (%)	$\sigma_{f_0}$	$\sigma_t$
p1r-v13	17.084,40	328,27	16.438,60	3,78	16.273,60	83,45	4,75	16.362,56	83,28	4,23	16.362,56	83,28	4,23	16.362,56	83,28	4,23	51,10	0,96
p2r-v13	18.881,60	185,67	18.649,80	1,23	18.524,20	80,44	1,89	18.587,27	80,83	1,56	18.587,27	80,83	1,56	18.587,27	80,83	1,56	41,37	0,44
p3r-v13	16.175,40	353,81	15.528,81	4,00	15.449,21	82,38	4,49	15.494,48	82,70	4,21	15.494,48	82,70	4,21	15.494,48	82,70	4,21	25,94	0,37
p4r-v13	19.266,40	200,45	18.944,62	1,67	18.799,80	80,68	2,42	18.862,77	80,87	2,09	18.862,77	80,87	2,09	18.862,77	80,87	2,09	51,97	1,15
p5r-v13	17.824,80	193,99	17.457,80	2,06	17.328,19	80,58	2,79	17.403,40	80,59	2,36	17.403,40	80,59	2,36	17.403,40	80,59	2,36	42,90	0,17
p6r-v13	18.960,80	175,50	18.701,39	1,37	18.588,20	81,43	1,97	18.651,90	81,51	1,63	18.651,90	81,51	1,63	18.651,90	81,51	1,63	33,16	0,28
p7r-v13	19.037,20	192,24	18.668,41	1,94	18.589,80	82,64	2,35	18.643,18	82,70	2,07	18.643,18	82,70	2,07	18.643,18	82,70	2,07	21,21	0,20
p8r-v13	18.039,80	146,86	17.854,80	1,03	17.714,01	81,90	1,81	17.769,62	81,73	1,50	17.769,62	81,73	1,50	17.769,62	81,73	1,50	38,69	0,42
p9r-v13	14.840,80	130,56	14.635,81	1,38	14.582,41	83,33	1,74	14.610,44	83,30	1,55	14.610,44	83,30	1,55	14.610,44	83,30	1,55	17,08	0,21
p10r-v13	18.188,40	160,32	17.833,42	1,95	17.750,23	81,43	2,41	17.790,34	81,36	2,19	17.790,34	81,36	2,19	17.790,34	81,36	2,19	29,70	0,12
p11r-v13	16.262,40	169,67	15.978,22	1,75	15.885,21	82,54	2,32	15.921,75	82,78	2,09	15.921,75	82,78	2,09	15.921,75	82,78	2,09	27,13	0,20
p12r-v13	21.590,00	184,72	21.338,62	1,16	21.215,21	82,16	1,74	21.258,79	82,34	1,53	21.258,79	82,34	1,53	21.258,79	82,34	1,53	35,31	0,26
p13r-v13	19.212,00	261,02	18.748,61	2,41	18.648,20	83,78	2,93	18.689,37	83,80	2,72	18.689,37	83,80	2,72	18.689,37	83,80	2,72	33,54	0,20
p14r-v13	19.131,60	149,98	18.733,41	2,08	18.625,40	82,24	2,65	18.695,28	82,19	2,28	18.695,28	82,19	2,28	18.695,28	82,19	2,28	30,26	0,22
p15r-v13	19.631,00	276,73	19.261,41	1,88	19.095,41	82,67	2,73	19.162,43	82,31	2,39	19.162,43	82,31	2,39	19.162,43	82,31	2,39	46,96	0,26
p16r-v13	17.577,80	225,72	17.208,21	2,10	17.078,61	81,41	2,84	17.130,44	81,52	2,55	17.130,44	81,52	2,55	17.130,44	81,52	2,55	40,11	0,15
p17r-v13	16.835,60	185,78	16.041,42	4,72	15.958,42	82,33	5,21	16.002,11	82,07	4,95	16.002,11	82,07	4,95	16.002,11	82,07	4,95	30,98	0,25
p18r-v13	17.186,20	335,34	16.656,01	3,08	16.509,79	81,43	3,94	16.589,16	81,61	3,47	16.589,16	81,61	3,47	16.589,16	81,61	3,47	46,73	0,13
p19r-v13	17.554,80	167,01	17.182,80	2,12	17.081,61	82,76	2,70	17.128,91	82,70	2,43	17.128,91	82,70	2,43	17.128,91	82,70	2,43	35,03	0,11
p20r-v13	20.213,80	206,64	19.763,21	2,23	19.649,81	82,18	2,79	19.707,41	82,39	2,51	19.707,41	82,39	2,51	19.707,41	82,39	2,51	31,32	0,17
p21r-v13	16.666,80	271,60	16.173,00	2,96	16.040,81	81,58	3,76	16.124,15	81,53	3,26	16.124,15	81,53	3,26	16.124,15	81,53	3,26	39,08	0,18
p22r-v13	18.502,20	187,61	18.237,58	1,43	18.183,99	81,61	1,72	18.206,41	81,66	1,60	18.206,41	81,66	1,60	18.206,41	81,66	1,60	16,00	0,28
p23r-v13	21.122,40	203,63	20.764,00	1,70	20.587,99	80,84	2,53	20.659,80	80,98	2,19	20.659,80	80,98	2,19	20.659,80	80,98	2,19	51,17	0,26
p24r-v13	17.185,00	167,59	16.656,40	3,08	16.552,40	83,47	3,68	16.588,99	81,31	3,47	16.588,99	81,31	3,47	16.588,99	81,31	3,47	36,98	1,41
p25r-v13	16.717,80	185,49	16.299,00	2,51	16.197,00	83,14	3,12	16.247,96	83,19	2,81	16.247,96	83,19	2,81	16.247,96	83,19	2,81	35,22	0,19
p26r-v13	19.808,00	186,25	19.612,81	1,28	19.449,61	82,22	2,11	19.502,92	82,22	1,84	19.502,92	82,22	1,84	19.502,92	82,22	1,84	42,93	0,24
p27r-v13	19.679,80	214,63	19.542,80	0,70	19.485,00	82,62	0,99	19.509,97	82,82	0,86	19.509,97	82,82	0,86	19.509,97	82,82	0,86	22,08	0,27
p28r-v13	17.322,40	187,17	17.178,80	0,83	17.113,40	83,65	1,21	17.145,78	82,84	1,02	17.145,78	82,84	1,02	17.145,78	82,84	1,02	16,31	1,52
p29r-v13	19.002,80	232,27	18.733,41	1,42	18.664,21	81,31	1,78	18.693,34	81,37	1,63	18.693,34	81,37	1,63	18.693,34	81,37	1,63	21,31	0,26
p30r-v13	15.943,00	199,92	15.547,62	2,48	15.412,22	82,95	3,33	15.488,82	83,19	2,85	15.488,82	83,19	2,85	15.488,82	83,19	2,85	40,46	0,22
Média		208,88	Média	2,08	Média	82,17	2,69	Média	82,12	2,39	Média	82,12	2,39	Média	82,12	2,39	34,40	0,37

Tabela E.68: Resultados obtidos com a metaheurística colônia de formigas para  $|E| = 14$

Problema	CPLEX				Melhor caso				Pior caso				Colônia de Formigas					
	Sol. Ótima		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		Média	
	Sol.	Ótima	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	$\sigma_{fo}$	$\sigma_t$
p1r-v14	16.966,40	333,87	16.257,40	83,76	4,18	16.127,60	83,80	4,94	16.198,45	83,50	4,53	16.198,45	83,50	4,53	40,44	1,07		
p2r-v14	18.537,60	165,61	18.252,40	80,91	1,54	18.172,00	81,09	1,97	18.209,31	81,19	1,77	18.209,31	81,19	1,77	26,03	0,30		
p3r-v14	16.407,00	393,23	15.772,21	82,48	3,87	15.649,21	82,47	4,62	15.738,30	82,59	4,08	15.738,30	82,59	4,08	33,40	0,11		
p4r-v14	18.950,60	226,72	18.507,61	82,91	2,34	18.438,21	83,28	2,70	18.472,88	83,04	2,52	18.472,88	83,04	2,52	22,31	0,16		
p5r-v14	17.766,00	222,82	17.588,41	81,10	1,00	17.496,40	81,40	1,52	17.539,08	81,13	1,28	17.539,08	81,13	1,28	32,80	0,19		
p6r-v14	19.219,40	220,23	19.037,40	81,64	0,95	18.889,01	82,08	1,72	18.942,11	81,79	1,44	18.942,11	81,79	1,44	47,08	0,27		
p7r-v14	18.697,20	225,61	18.373,61	83,32	1,73	18.307,81	82,77	2,08	18.338,78	83,00	1,92	18.338,78	83,00	1,92	22,72	0,19		
p8r-v14	18.235,20	145,61	18.081,61	82,97	0,84	17.980,61	82,35	1,40	18.018,68	82,61	1,19	18.018,68	82,61	1,19	30,96	0,27		
p9r-v14	15.274,40	112,84	15.136,62	83,25	0,90	15.103,21	83,31	1,12	15.125,98	83,35	0,97	15.125,98	83,35	0,97	8,75	0,22		
p10r-v14	18.078,40	158,59	17.566,63	82,67	2,83	17.434,03	82,49	3,56	17.480,77	82,60	3,31	17.480,77	82,60	3,31	37,69	0,20		
p11r-v14	16.540,40	188,61	16.213,42	83,18	1,98	16.160,82	82,91	2,29	16.187,80	83,11	2,13	16.187,80	83,11	2,13	16,11	0,19		
p12r-v14	21.658,40	238,17	21.338,21	82,30	1,48	21.237,42	82,64	1,94	21.288,67	82,26	1,71	21.288,67	82,26	1,71	28,62	0,20		
p13r-v14	19.043,00	297,68	18.745,60	83,74	1,56	18.644,62	83,39	2,09	18.697,21	83,57	1,82	18.697,21	83,57	1,82	37,33	0,19		
p14r-v14	19.527,60	176,78	19.044,79	82,61	2,47	18.931,00	82,50	3,06	18.984,20	82,48	2,78	18.984,20	82,48	2,78	41,09	0,25		
p15r-v14	20.238,80	197,20	19.828,61	80,99	2,03	19.648,01	80,97	2,92	19.727,77	81,23	2,52	19.727,77	81,23	2,52	56,92	0,28		
p16r-v14	17.280,20	251,22	16.908,20	81,02	2,15	16.761,00	81,28	3,00	16.816,31	80,90	2,68	16.816,31	80,90	2,68	49,03	0,31		
p17r-v14	16.905,40	263,00	16.315,42	81,50	3,49	16.124,21	81,54	4,62	16.251,40	81,70	3,87	16.251,40	81,70	3,87	50,48	0,24		
p18r-v14	17.370,80	275,87	16.944,80	80,92	2,45	16.791,19	80,95	3,34	16.849,16	81,13	3,00	16.849,16	81,13	3,00	50,91	0,42		
p19r-v14	17.780,40	171,04	17.451,61	81,63	1,85	17.288,41	81,88	2,77	17.356,28	81,93	2,39	17.356,28	81,93	2,39	46,51	0,19		
p20r-v14	19.651,60	276,78	19.215,80	82,98	2,22	19.028,41	82,22	3,17	19.127,63	82,51	2,67	19.127,63	82,51	2,67	52,55	0,28		
p21r-v14	16.532,00	254,20	16.057,81	80,70	2,87	15.944,21	81,01	3,56	15.998,94	81,05	3,22	15.998,94	81,05	3,22	36,03	0,22		
p22r-v14	18.501,60	278,54	18.236,20	81,94	1,43	18.158,40	81,91	1,85	18.196,74	82,05	1,65	18.196,74	82,05	1,65	22,46	0,17		
p23r-v14	21.017,60	243,56	20.449,78	81,05	2,70	20.351,40	80,88	3,17	20.400,19	81,08	2,94	20.400,19	81,08	2,94	38,12	0,18		
p24r-v14	17.424,40	222,33	16.973,01	81,61	2,59	16.841,41	81,35	3,35	16.888,37	81,45	3,08	16.888,37	81,45	3,08	36,78	0,17		
p25r-v14	16.733,80	192,83	16.282,00	83,08	2,70	16.121,59	83,31	3,66	16.175,03	83,01	3,34	16.175,03	83,01	3,34	51,87	0,26		
p26r-v14	19.843,60	243,35	19.401,22	82,21	2,23	19.321,21	82,04	2,63	19.370,72	82,30	2,38	19.370,72	82,30	2,38	28,45	0,16		
p27r-v14	19.342,20	302,38	19.042,61	82,72	1,55	18.975,61	83,45	1,90	19.004,21	82,90	1,75	19.004,21	82,90	1,75	22,00	0,30		
p28r-v14	17.992,20	194,69	17.816,79	83,13	0,97	17.762,60	83,33	1,28	17.791,91	83,19	1,11	17.791,91	83,19	1,11	18,25	0,95		
p29r-v14	18.408,40	284,45	18.071,00	82,40	1,83	17.956,00	81,41	2,46	18.008,22	81,56	2,17	18.008,22	81,56	2,17	34,47	0,30		
p30r-v14	16.017,40	229,68	15.596,22	83,92	2,63	15.433,62	83,73	3,64	15.538,78	83,47	2,99	15.538,78	83,47	2,99	50,37	0,26		
Média		232,92	Média	82,29	2,11	Média	82,26	2,74	Média	82,26	2,44	Média	82,26	2,44	35,69	0,28		

Tabela E.69: Resultados obtidos com a metaheurística colônia de formigas para  $|E| = 15$

Problema	CPLEX				Melhor caso				Pior caso				Colônia de Formigas				
	Sol. Ótima		CPUt (s)		FO		Gap (%)		FO		CPUt (s)		Gap (%)		Média		
	Sol.	Ótima	CPUt (s)		FO	Gap (%)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	$\sigma_{f_0}$
p1r-v15	16.619,00	328,35	16.118,60	80,52	3,01	15.909,20	80,70	4,27	16.022,13	80,50	3,59	65,30	0,10				
p2r-v15	18.544,80	179,17	18.143,60	81,02	2,16	18.050,80	81,21	2,66	18.098,80	80,84	2,40	27,16	0,28				
p3r-v15	16.251,00	428,88	15.784,41	82,64	2,87	15.644,61	82,68	3,73	15.708,34	82,84	3,34	41,88	0,22				
p4r-v15	19.325,20	244,09	18.859,61	80,38	2,41	18.741,41	83,55	3,02	18.803,10	82,54	2,70	39,44	1,59				
p5r-v15	17.818,60	263,02	17.414,40	81,41	2,27	17.348,80	81,39	2,64	17.386,58	81,16	2,42	21,22	0,30				
p6r-v15	18.940,40	297,87	18.631,79	81,58	1,63	18.561,20	81,78	2,00	18.589,22	81,74	1,85	20,24	0,37				
p7r-v15	18.835,00	255,90	18.457,41	83,74	2,00	18.314,01	82,94	2,77	18.387,06	83,21	2,38	45,63	0,24				
p8r-v15	18.072,40	324,83	17.795,40	80,54	1,53	17.681,60	81,28	2,16	17.740,28	80,98	1,84	29,87	0,27				
p9r-v15	14.906,20	122,38	14.800,41	83,82	0,71	14.759,01	83,88	0,99	14.789,27	83,23	0,78	12,24	1,30				
p10r-v15	18.213,60	186,02	17.736,23	81,65	2,62	17.647,63	81,80	3,11	17.682,70	81,83	2,91	25,78	0,15				
p11r-v15	16.415,00	192,24	16.057,42	82,77	2,18	15.975,81	83,16	2,68	16.020,04	83,08	2,41	29,21	0,21				
p12r-v15	21.609,20	276,23	21.361,01	82,14	1,15	21.284,61	82,12	1,50	21.306,98	82,05	1,40	21,32	0,18				
p13r-v15	19.318,00	372,41	18.864,81	80,47	2,35	18.761,82	80,76	2,88	18.796,72	80,96	2,70	35,45	1,13				
p14r-v15	19.229,20	190,52	18.778,00	82,43	2,35	18.676,61	82,71	2,87	18.743,08	82,68	2,53	30,47	0,21				
p15r-v15	19.911,20	230,77	19.613,01	81,24	1,50	19.471,81	81,10	2,21	19.544,34	81,06	1,84	40,87	0,14				
p16r-v15	17.338,20	325,89	16.948,00	81,15	2,25	16.785,00	80,66	3,19	16.842,42	80,61	2,86	45,05	0,21				
p17r-v15	16.949,00	208,70	16.290,22	80,74	3,89	16.227,62	81,22	4,26	16.257,86	80,83	4,08	16,33	0,21				
p18r-v15	16.874,60	262,52	16.289,60	81,61	3,47	16.171,40	81,30	4,17	16.217,11	81,36	3,90	40,02	0,26				
p19r-v15	17.585,80	173,47	17.314,61	82,71	1,54	17.267,21	83,03	1,81	17.294,61	82,98	1,66	15,42	0,24				
p20r-v15	19.639,00	293,31	19.098,20	81,55	2,75	18.915,81	81,73	3,68	19.027,35	81,74	3,11	62,68	0,24				
p21r-v15	16.548,00	361,47	16.075,01	81,12	2,86	15.931,01	81,32	3,73	15.981,59	81,49	3,42	40,66	0,19				
p22r-v15	18.239,20	244,28	17.920,58	81,93	1,75	17.812,20	81,38	2,34	17.864,13	81,75	2,06	36,75	0,23				
p23r-v15	20.943,60	244,63	20.562,40	80,55	1,82	20.440,20	80,68	2,40	20.503,67	80,75	2,10	34,04	0,34				
p24r-v15	17.542,80	278,62	17.333,01	81,80	1,20	17.169,21	82,08	2,13	17.231,65	81,93	1,77	46,02	0,16				
p25r-v15	16.886,20	228,15	16.445,99	83,92	2,61	16.364,00	84,07	3,09	16.418,36	83,57	2,77	23,23	1,08				
p26r-v15	20.242,00	248,49	19.910,62	81,34	1,64	19.802,23	81,73	2,17	19.847,32	81,71	1,95	37,79	0,31				
p27r-v15	19.149,60	339,16	18.825,20	82,86	1,69	18.793,60	82,78	1,86	18.811,26	82,89	1,77	10,31	0,21				
p28r-v15	17.608,80	237,17	17.542,21	81,35	0,72	17.503,40	81,40	0,94	17.523,33	80,93	0,82	11,93	0,22				
p29r-v15	18.771,40	425,09	18.496,21	81,69	1,47	18.417,40	81,31	1,89	18.460,63	81,74	1,66	25,38	0,22				
p30r-v15	16.209,60	290,88	15.753,42	80,61	2,81	15.656,82	80,30	3,41	15.703,95	82,26	3,12	32,42	1,79				
Média		268,48	Média	81,71	2,11	Média	81,87	2,69	Média	81,84	2,40	32,14	0,43				

Tabela E.70: Resultados obtidos com a metaheurística colônia de formigas para  $|E| = 16$

Problema	CPLEX				Melhor caso				Pior caso				Colônia de Formigas					
	Sol. Ótima		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		FO		CPUt (s)		Média	
	Sol.	Ótima	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	$\sigma_{f_o}$	$\sigma_t$
p1r-v16	16.874,80	391,06	16.285,60	3,49	16.166,00	83,68	4,20	16.228,75	83,49	3,83	16.228,75	83,49	3,83	16.228,75	83,49	3,83	35,85	1,04
p2r-v16	18.911,20	224,47	18.494,20	2,21	18.342,00	80,75	3,01	18.433,64	80,95	2,53	18.433,64	80,95	2,53	18.433,64	80,95	2,53	46,34	0,30
p3r-v16	16.300,80	346,68	15.613,81	4,21	15.489,21	82,42	4,98	15.553,63	82,25	4,58	15.553,63	82,25	4,58	15.553,63	82,25	4,58	40,98	0,19
p4r-v16	19.098,00	279,59	18.650,22	2,34	18.461,01	84,12	3,34	18.542,05	83,65	2,91	18.542,05	83,65	2,91	18.542,05	83,65	2,91	52,67	1,03
p5r-v16	17.769,60	304,89	17.444,21	1,83	17.388,81	83,33	2,14	17.411,72	83,25	2,01	17.411,72	83,25	2,01	17.411,72	83,25	2,01	21,32	0,16
p6r-v16	19.135,20	274,45	18.876,41	1,35	18.777,60	81,90	1,87	18.827,94	81,96	1,61	18.827,94	81,96	1,61	18.827,94	81,96	1,61	29,14	0,21
p7r-v16	18.890,20	260,07	18.541,22	1,85	18.421,22	82,84	2,48	18.483,38	82,97	2,15	18.483,38	82,97	2,15	18.483,38	82,97	2,15	39,64	0,13
p8r-v16	17.958,80	251,97	17.726,01	1,30	17.677,40	82,18	1,57	17.703,28	82,12	1,42	17.703,28	82,12	1,42	17.703,28	82,12	1,42	17,08	0,26
p9r-v16	15.105,40	147,23	14.949,81	1,03	14.849,01	82,62	1,70	14.912,01	82,94	1,28	14.912,01	82,94	1,28	14.912,01	82,94	1,28	24,89	0,36
p10r-v16	18.008,00	218,84	17.585,43	2,35	17.450,43	81,92	3,10	17.499,26	82,28	2,83	17.499,26	82,28	2,83	17.499,26	82,28	2,83	41,67	0,19
p11r-v16	16.538,80	199,68	16.143,22	2,39	16.078,41	82,17	2,78	16.106,51	82,43	2,61	16.106,51	82,43	2,61	16.106,51	82,43	2,61	19,46	0,17
p12r-v16	21.847,00	314,45	21.484,81	1,66	21.437,01	82,80	1,88	21.463,35	82,53	1,76	21.463,35	82,53	1,76	21.463,35	82,53	1,76	17,24	0,24
p13r-v16	18.810,80	360,83	18.357,21	2,41	18.260,22	84,00	2,93	18.310,89	83,45	2,66	18.310,89	83,45	2,66	18.310,89	83,45	2,66	28,95	1,48
p14r-v16	19.257,60	187,83	18.922,20	1,74	18.839,60	81,80	2,17	18.875,14	81,96	1,99	18.875,14	81,96	1,99	18.875,14	81,96	1,99	32,73	0,27
p15r-v16	19.927,60	229,51	19.414,22	2,58	19.324,42	81,33	3,03	19.375,34	81,53	2,77	19.375,34	81,53	2,77	19.375,34	81,53	2,77	24,07	0,31
p16r-v16	17.379,40	305,86	17.069,21	1,78	16.976,01	81,90	2,32	17.014,44	81,57	2,10	17.014,44	81,57	2,10	17.014,44	81,57	2,10	33,40	0,23
p17r-v16	17.011,00	261,38	16.340,42	3,94	16.229,22	82,02	4,60	16.273,40	81,88	4,34	16.273,40	81,88	4,34	16.273,40	81,88	4,34	37,26	0,18
p18r-v16	17.169,00	310,64	16.540,40	3,66	16.389,99	81,61	4,54	16.443,39	81,60	4,23	16.443,39	81,60	4,23	16.443,39	81,60	4,23	44,93	0,21
p19r-v16	17.835,20	198,29	17.447,41	2,17	17.364,01	82,12	2,64	17.403,26	82,31	2,42	17.403,26	82,31	2,42	17.403,26	82,31	2,42	25,64	0,17
p20r-v16	19.706,00	260,58	19.296,41	2,08	19.069,01	82,79	3,23	19.189,88	82,82	2,62	19.189,88	82,82	2,62	19.189,88	82,82	2,62	68,34	0,23
p21r-v16	16.805,00	325,84	16.314,01	2,92	16.211,61	81,77	3,53	16.235,81	81,48	3,39	16.235,81	81,48	3,39	16.235,81	81,48	3,39	28,82	0,38
p22r-v16	18.476,00	286,84	18.285,79	1,03	18.183,19	81,02	1,58	18.232,92	81,22	1,32	18.232,92	81,22	1,32	18.232,92	81,22	1,32	32,83	0,23
p23r-v16	21.070,40	331,89	20.579,39	2,33	20.455,39	80,40	2,92	20.520,06	83,15	2,61	20.520,06	83,15	2,61	20.520,06	83,15	2,61	30,95	1,35
p24r-v16	17.351,20	222,74	17.015,21	1,94	16.890,80	82,34	2,65	16.974,14	82,01	2,17	16.974,14	82,01	2,17	16.974,14	82,01	2,17	42,34	0,18
p25r-v16	16.764,00	188,40	16.287,00	2,85	16.124,39	83,40	3,82	16.208,47	83,43	3,31	16.208,47	83,43	3,31	16.208,47	83,43	3,31	49,02	0,16
p26r-v16	19.945,00	275,39	19.597,21	1,74	19.491,01	82,29	2,28	19.539,89	82,39	2,03	19.539,89	82,39	2,03	19.539,89	82,39	2,03	31,91	0,17
p27r-v16	19.686,40	349,55	19.421,41	1,35	19.337,01	82,25	1,77	19.383,15	82,63	1,54	19.383,15	82,63	1,54	19.383,15	82,63	1,54	27,20	0,42
p28r-v16	17.794,00	257,11	17.633,20	0,90	17.547,19	81,44	1,39	17.596,20	81,30	1,11	17.596,20	81,30	1,11	17.596,20	81,30	1,11	26,48	1,33
p29r-v16	18.527,40	291,71	18.269,19	1,39	18.161,21	82,38	1,98	18.196,88	82,51	1,78	18.196,88	82,51	1,78	18.196,88	82,51	1,78	33,83	0,21
p30r-v16	16.302,60	270,97	15.914,02	2,38	15.791,21	83,51	3,14	15.846,65	83,58	2,80	15.846,65	83,58	2,80	15.846,65	83,58	2,80	33,77	0,13
Média	Média	270,96	Média	2,17	Média	82,30	2,78	Média	82,39	2,49	Média	82,39	2,49	Média	82,39	2,49	33,96	0,40

Tabela E.71: Resultados obtidos com a metaheurística colônia de formigas para  $|E| = 17$

Problema	CPLEX			Melhor caso			Pior caso			Colônia de Formigas			Média				
	Sol. Ótima	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	$\sigma_{fo}$	$\sigma_t$
p1r-v17	17.079,40	417,43	3,98	16.399,60	84,08	3,98	16.245,80	83,96	4,88	16.317,29	82,64	4,46	16.317,29	82,64	4,46	43,94	1,77
p2r-v17	18.906,80	239,68	1,72	18.582,20	80,77	1,72	18.516,60	80,82	2,06	18.546,81	80,86	1,90	18.546,81	80,86	1,90	22,83	0,22
p3r-v17	15.789,00	433,53	3,77	15.194,01	82,71	3,77	15.044,21	82,68	4,72	15.117,66	82,59	4,25	15.117,66	82,59	4,25	49,47	0,20
p4r-v17	19.352,00	283,05	1,88	18.987,61	84,00	1,88	18.867,02	80,56	2,51	18.919,23	82,10	2,24	18.919,23	82,10	2,24	35,98	1,85
p5r-v17	17.567,20	274,45	2,01	17.213,80	81,18	2,01	17.114,20	81,13	2,58	17.157,60	81,44	2,33	17.157,60	81,44	2,33	39,19	0,33
p6r-v17	19.298,00	325,37	1,39	19.029,80	81,96	1,39	18.904,20	81,78	2,04	18.962,98	81,53	1,74	18.962,98	81,53	1,74	39,77	0,27
p7r-v17	18.878,20	262,55	1,70	18.557,21	83,53	1,70	18.470,62	83,87	2,16	18.517,89	83,62	1,91	18.517,89	83,62	1,91	29,42	0,19
p8r-v17	17.609,20	246,76	1,50	17.345,60	81,49	1,50	17.279,01	81,60	1,88	17.309,53	81,77	1,70	17.309,53	81,77	1,70	24,22	0,30
p9r-v17	15.015,00	214,61	1,40	14.805,02	83,12	1,40	14.758,81	83,63	1,71	14.789,07	83,33	1,50	14.789,07	83,33	1,50	12,96	0,33
p10r-v17	18.093,80	244,48	2,48	17.644,22	82,33	2,48	17.537,83	82,16	3,07	17.588,18	82,25	2,79	17.588,18	82,25	2,79	31,29	0,17
p11r-v17	16.387,00	192,65	2,70	15.944,41	82,63	2,70	15.810,61	83,01	3,52	15.873,41	82,75	3,13	15.873,41	82,75	3,13	48,97	0,18
p12r-v17	21.729,80	342,13	1,12	21.486,80	82,92	1,12	21.407,22	82,53	1,48	21.445,62	82,74	1,31	21.445,62	82,74	1,31	23,72	0,24
p13r-v17	18.939,20	387,85	2,31	18.502,42	80,40	2,31	18.362,62	80,64	3,04	18.433,34	80,64	2,67	18.433,34	80,64	2,67	45,24	0,33
p14r-v17	19.241,80	278,88	1,20	19.010,20	82,15	1,20	18.861,20	81,63	1,98	18.937,04	81,89	1,58	18.937,04	81,89	1,58	37,74	0,28
p15r-v17	19.796,20	298,37	2,26	19.348,20	81,99	2,26	19.240,81	81,84	2,81	19.296,57	81,50	2,52	19.296,57	81,50	2,52	39,84	0,25
p16r-v17	17.294,60	275,78	1,43	17.047,79	81,63	1,43	16.815,00	81,99	2,77	16.928,00	81,78	2,12	16.928,00	81,78	2,12	71,70	0,15
p17r-v17	16.719,80	323,83	2,67	16.274,02	81,44	2,67	16.178,82	81,23	3,24	16.214,00	81,24	3,03	16.214,00	81,24	3,03	30,64	0,17
p18r-v17	17.435,40	359,55	2,64	16.975,40	81,24	2,64	16.786,00	82,11	3,72	16.890,18	81,47	3,13	16.890,18	81,47	3,13	59,92	0,40
p19r-v17	17.777,80	222,18	2,61	17.313,80	82,34	2,61	17.124,60	82,26	3,67	17.213,49	82,44	3,17	17.213,49	82,44	3,17	51,03	0,18
p20r-v17	19.878,60	357,98	1,98	19.484,61	82,61	1,98	19.396,61	82,39	2,42	19.437,74	82,46	2,22	19.437,74	82,46	2,22	28,49	0,13
p21r-v17	16.694,80	403,03	2,83	16.223,01	82,67	2,83	16.100,41	82,31	3,56	16.174,16	82,47	3,12	16.174,16	82,47	3,12	38,10	0,19
p22r-v17	18.541,60	547,59	1,55	18.254,38	82,21	1,55	18.153,39	82,14	2,09	18.212,44	82,33	1,78	18.212,44	82,33	1,78	34,94	0,18
p23r-v17	21.119,20	353,53	1,64	20.771,99	80,58	1,64	20.624,80	80,64	2,34	20.703,81	80,87	1,97	20.703,81	80,87	1,97	49,78	0,40
p24r-v17	17.489,40	236,83	2,51	17.050,61	81,27	2,51	16.870,20	81,67	3,54	16.953,42	81,54	3,06	16.953,42	81,54	3,06	49,57	0,23
p25r-v17	16.819,40	268,81	4,58	16.048,59	83,80	4,58	15.922,39	83,58	5,33	16.011,61	83,65	4,80	16.011,61	83,65	4,80	43,72	0,16
p26r-v17	19.995,40	293,20	1,79	19.638,21	82,53	1,79	19.441,01	83,14	2,77	19.533,72	82,67	2,31	19.533,72	82,67	2,31	65,87	0,23
p27r-v17	19.557,60	387,43	1,04	19.354,21	82,73	1,04	19.266,22	82,98	1,49	19.305,08	82,82	1,29	19.305,08	82,82	1,29	27,62	0,13
p28r-v17	17.807,60	324,72	1,41	17.557,39	83,88	1,41	17.504,39	83,54	1,70	17.543,51	82,94	1,48	17.543,51	82,94	1,48	15,12	1,17
p29r-v17	18.473,60	495,97	2,49	18.012,80	81,49	2,49	17.944,61	81,30	2,86	17.985,16	81,56	2,64	17.985,16	81,56	2,64	24,58	0,27
p30r-v17	16.288,60	276,32	2,29	15.915,02	83,64	2,29	15.816,22	83,84	2,90	15.874,00	82,96	2,55	15.874,00	82,96	2,55	29,58	1,38
Média		318,95	2,16	Média	82,31	2,16	Média	82,23	2,83	Média	82,16	2,49	Média	82,16	2,49	38,17	0,41

Tabela E.72: Resultados obtidos com a metaheurística colônia de formigas para  $|E| = 130$

Problema	Colônia de Formigas																
	Melhor Solução				Melhor caso				Pior caso				Média				
	FO	GPUt (s)	Gap (%)	GPUt (s)	FO	GPUt (s)	Gap (%)	GPUt (s)	FO	GPUt (s)	Gap (%)	GPUt (s)	FO	GPUt (s)	Gap (%)	$\sigma_{fo}$	$\sigma_t$
p1r-v130	17,483,99	184,77	1,30	172,49	17,256,00	172,49	1,30	170,39	17,093,39	170,45	2,23	171,54	17,179,03	171,54	1,74	54,66	0,75
p2r-v130	18,859,01	212,46	0,03	172,33	18,853,40	172,33	0,03	172,06	18,733,40	172,06	0,67	171,73	18,780,75	171,73	0,41	41,58	0,53
p3r-v130	16,677,21	252,10	2,25	171,23	16,302,41	171,23	2,25	170,17	16,185,61	170,17	2,95	171,39	16,249,88	171,39	2,36	32,98	0,71
p4r-v130	19,356,62	251,13	0,64	171,06	19,231,81	171,06	0,64	172,59	19,116,41	172,59	1,24	171,35	19,168,87	171,35	0,97	40,84	0,72
p5r-v130	18,291,61	159,13	0,35	170,28	18,227,02	170,28	0,35	171,49	18,117,01	171,49	0,95	171,35	18,174,40	171,35	0,64	40,15	0,63
p6r-v130	19,690,81	164,86	0,32	171,48	19,628,60	171,48	0,32	170,46	19,510,99	170,46	0,91	171,42	19,563,80	171,42	0,65	38,30	0,84
p7r-v130	19,132,43	160,50	0,48	172,76	19,041,01	172,76	0,48	170,31	18,961,39	170,31	0,89	171,48	19,003,92	171,48	0,67	23,23	1,12
p8r-v130	18,156,21	135,70	0,35	172,09	18,092,80	172,09	0,35	171,49	18,035,01	171,49	0,67	171,93	18,063,40	171,93	0,51	20,66	0,30
p9r-v130	15,121,82	115,60	0,07	170,30	15,111,81	170,30	0,07	170,63	15,050,81	170,63	0,47	170,90	15,075,74	170,90	0,30	17,02	0,77
p10r-v130	18,321,02	149,61	2,84	170,27	17,801,42	170,27	2,84	171,95	17,724,82	171,95	3,25	171,40	17,760,02	171,40	3,06	22,88	0,58
p11r-v130	16,578,22	145,89	0,36	170,67	16,518,02	170,67	0,36	172,51	16,456,82	172,51	0,73	170,98	16,494,22	170,98	0,51	16,23	0,78
p12r-v130	21,617,22	230,84	0,32	173,76	21,547,39	173,76	0,32	172,58	21,503,00	172,58	0,53	171,95	21,519,95	171,95	0,45	13,69	1,06
p13r-v130	19,265,62	137,83	0,28	172,26	19,211,00	172,26	0,28	171,54	19,133,82	171,54	0,68	171,69	19,173,68	171,69	0,48	20,83	0,65
p14r-v130	19,258,01	170,79	0,00	170,79	19,258,01	170,79	0,00	172,01	19,096,62	172,01	0,84	171,01	19,167,79	171,01	0,47	57,34	0,56
p15r-v130	21,421,23	216,57	5,64	170,42	20,213,01	170,42	5,64	172,14	20,135,80	172,14	6,00	171,73	20,178,10	171,73	5,80	24,63	0,77
p16r-v130	17,072,01	178,40	0,56	171,39	16,975,79	171,39	0,56	171,86	16,874,60	171,86	1,16	171,66	16,917,54	171,66	0,90	38,11	0,71
p17r-v130	16,888,81	147,48	0,52	171,45	16,800,61	171,45	0,52	170,42	16,650,42	170,42	1,41	171,39	16,722,91	171,39	0,98	55,11	0,82
p18r-v130	17,597,41	208,81	0,69	171,57	17,475,81	171,57	0,69	170,32	17,427,80	170,32	0,96	171,59	17,447,75	171,59	0,85	14,75	0,77
p19r-v130	17,967,60	193,85	0,78	172,54	17,827,00	172,54	0,78	170,44	17,713,21	170,44	1,42	171,43	17,776,60	171,43	1,06	31,96	0,96
p20r-v130	19,689,61	145,04	1,19	171,51	19,455,40	171,51	1,19	170,98	19,296,20	170,98	2,00	171,16	19,387,08	171,16	1,54	44,53	0,67
p21r-v130	16,696,01	272,04	1,09	170,67	16,513,82	170,67	1,09	170,52	16,389,61	170,52	1,84	170,99	16,440,20	170,99	1,53	39,15	0,45
p22r-v130	18,527,39	190,04	0,61	171,49	18,414,19	171,49	0,61	171,06	18,368,39	171,06	0,86	171,18	18,387,27	171,18	0,76	13,72	0,99
p23r-v130	20,842,21	173,60	0,46	171,36	20,747,18	171,36	0,46	170,21	20,646,59	170,21	0,94	171,09	20,694,06	171,09	0,71	30,53	0,87
p24r-v130	18,652,43	214,61	5,34	171,62	17,656,41	171,62	5,34	171,98	17,513,40	171,98	6,11	171,74	17,608,25	171,74	5,60	44,89	0,46
p25r-v130	16,822,40	161,22	0,44	171,27	16,748,40	171,27	0,44	171,17	16,634,00	171,17	1,12	171,07	16,698,34	171,07	0,74	37,44	0,31
p26r-v130	20,046,02	177,04	0,07	172,44	20,031,02	172,44	0,07	170,95	19,832,22	170,95	1,07	171,94	19,906,07	171,94	0,70	56,62	0,78
p27r-v130	19,295,42	117,62	0,83	172,31	19,134,81	172,31	0,83	172,41	19,081,61	172,41	1,11	171,60	19,112,75	171,60	0,95	18,21	0,69
p28r-v130	17,951,61	161,39	0,13	172,42	17,928,39	172,42	0,13	171,90	17,887,40	171,90	0,36	171,65	17,904,89	171,65	0,26	12,15	0,69
p29r-v130	18,818,41	159,37	0,27	170,93	18,768,20	170,93	0,27	171,83	18,638,20	171,83	0,96	170,94	18,693,62	170,94	0,66	36,85	0,71
p30r-v130	16,208,22	167,31	0,37	171,41	16,148,81	171,41	0,37	170,79	16,044,42	170,79	1,01	171,14	16,091,96	171,14	0,72	31,51	0,76
Média	Média	Média	0,95	Média	Média	Média	0,95	Média	Média	Média	1,51	Média	Média	Média	1,24	32,35	0,71

Tabela E.73: Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV  $|E| = 1$

Problema	Heurística Gulosa			Busca Local			GRASP			Simulated Annealing			Colônia de Formigas		
	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v1	12.372,80	0,02	15,01	12.928,60	0,05	11,19	14.154,80	30,61	2,77	14.263,60	56,30	2,02	14.263,60	82,12	2,02
p2r-v1	15.149,60	0,02	10,86	16.141,20	0,06	5,02	16.698,81	33,03	1,74	16.870,61	57,23	0,73	16.870,61	81,39	0,73
p3r-v1	11.079,60	0,02	5,11	11.079,60	0,07	5,11	11.486,61	27,24	1,62	11.580,02	55,33	0,82	11.580,01	83,95	0,82
p4r-v1	12.718,40	0,02	9,24	12.718,40	0,05	9,24	13.542,01	37,41	3,36	13.685,21	59,89	2,34	13.651,21	81,81	2,58
p5r-v1	15.112,80	0,02	8,67	15.112,80	0,05	8,67	16.351,01	24,21	1,19	16.455,80	52,17	0,56	16.455,80	82,30	0,56
p6r-v1	17.715,60	0,02	5,98	17.793,00	0,05	5,57	18.680,41	33,31	0,86	18.757,81	56,15	0,45	18.757,80	81,05	0,45
p7r-v1	12.514,80	0,02	1,97	12.514,80	0,05	1,97	12.657,61	32,69	0,85	12.708,00	56,45	0,46	12.708,00	84,25	0,46
p8r-v1	11.328,20	0,02	10,63	11.772,00	0,05	7,13	12.537,01	36,58	1,09	12.648,20	53,69	0,21	12.592,61	82,75	0,65
p9r-v1	11.836,80	0,02	8,69	12.240,00	0,06	5,58	12.751,01	36,11	1,64	12.908,41	52,35	0,43	12.908,41	80,58	0,43
p10r-v1	12.699,40	0,02	10,42	13.505,80	0,06	4,74	13.918,42	26,20	1,83	13.988,81	53,29	1,33	13.965,42	83,93	1,49
p11r-v1	12.882,00	0,02	6,12	12.926,60	0,06	5,79	13.505,61	23,61	1,57	13.587,61	51,78	0,98	13.587,61	83,77	0,98
p12r-v1	16.389,80	0,02	2,83	16.389,80	0,04	2,83	16.712,21	37,56	0,91	16.777,61	60,20	0,53	16.777,21	83,45	0,53
p13r-v1	12.498,80	0,02	6,88	12.528,20	0,07	6,66	13.049,41	30,61	2,77	13.254,22	56,96	1,25	13.254,22	84,00	1,25
p14r-v1	15.349,60	0,02	5,99	15.405,40	0,06	5,65	16.114,41	34,01	1,31	16.186,01	50,81	0,87	16.186,01	81,60	0,87
p15r-v1	13.195,60	0,02	8,56	13.541,20	0,06	6,17	14.082,41	32,92	2,42	14.161,61	57,75	1,87	14.214,01	82,11	1,51
p16r-v1	14.302,60	0,02	5,26	14.302,60	0,04	5,26	14.872,81	30,83	1,49	15.019,61	55,57	0,51	15.019,61	82,09	0,51
p17r-v1	12.215,00	0,02	6,94	12.215,00	0,06	6,94	12.689,22	24,75	3,33	12.805,42	51,46	2,45	12.805,41	81,82	2,45
p18r-v1	13.491,60	0,02	3,34	13.501,60	0,05	3,26	13.799,40	31,24	1,13	13.854,41	54,97	0,74	13.854,40	83,43	0,74
p19r-v1	12.718,40	0,02	9,73	12.994,20	0,06	7,77	13.545,20	22,39	3,86	13.696,60	50,11	2,78	13.696,60	82,92	2,78
p20r-v1	16.052,00	0,02	10,32	16.292,20	0,06	8,97	17.704,00	30,58	1,09	17.790,21	52,28	0,60	17.790,21	80,78	0,60
p21r-v1	10.496,20	0,01	7,01	10.529,00	0,05	6,72	11.068,21	33,95	1,95	11.107,21	58,65	1,60	11.107,21	82,80	1,60
p22r-v1	12.346,60	0,01	3,91	12.474,00	0,05	2,92	12.750,81	33,48	0,76	12.778,21	58,32	0,55	12.780,80	82,16	0,53
p23r-v1	13.759,60	0,02	5,13	13.949,60	0,06	3,82	14.389,00	36,58	0,79	14.399,21	55,99	0,72	14.399,21	83,08	0,72
p24r-v1	14.446,00	0,02	9,89	14.821,40	0,05	7,55	15.834,41	22,59	1,23	15.947,81	53,40	0,52	15.947,81	81,98	0,52
p25r-v1	11.608,00	0,02	6,85	11.622,80	0,05	6,74	12.055,00	30,94	3,27	12.182,41	51,25	2,25	12.182,40	83,93	2,25
p26r-v1	14.086,80	0,02	5,64	14.151,00	0,06	5,21	14.734,41	24,64	1,30	14.798,21	52,62	0,87	14.798,21	81,00	0,87
p27r-v1	13.035,60	0,02	6,42	13.252,80	0,06	4,86	13.618,00	31,60	2,24	13.813,61	49,92	0,84	13.813,61	83,41	0,84
p28r-v1	10.454,60	0,02	9,31	10.826,20	0,06	6,09	11.398,21	32,53	1,12	11.447,61	51,15	0,70	11.434,21	83,94	0,81
p29r-v1	13.241,40	0,02	6,50	13.296,60	0,05	6,50	13.908,80	26,99	1,78	13.982,81	50,06	1,26	13.987,60	82,77	1,23
p30r-v1	12.746,60	0,02	8,99	12.831,40	0,05	8,38	13.664,81	24,70	2,43	13.820,82	54,77	1,32	13.820,82	82,82	1,32
	Média		7,41	Média		6,07	Média	30,46	1,79	Média	54,36	1,08	Média	82,60	1,10

Tabela E.74: Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV  $|E| = 2$

Problema	Heurística Gulosa			Busca Local			GRASP			Simulated Annealing			Colônia de Formigas		
	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v2	14.725,80	12,27	0,01	15.238,20	0,05	9,21	16.090,00	30,84	4,14	16.376,80	61,18	2,43	16.349,20	81,41	2,59
p2r-v2	15.622,20	9,06	0,02	16.271,00	0,06	5,29	16.724,01	33,99	2,65	16.935,21	59,67	1,42	16.925,81	83,11	1,48
p3r-v2	14.219,40	7,56	0,02	14.287,60	0,05	7,12	14.628,41	25,40	4,91	15.008,01	61,53	2,44	14.987,61	81,28	2,57
p4r-v2	13.742,80	11,79	0,01	13.772,40	0,05	11,60	14.925,41	39,88	4,20	15.102,21	63,23	3,06	15.094,61	84,24	3,11
p5r-v2	14.586,40	14,94	0,02	15.369,40	0,04	10,44	16.616,80	24,74	3,17	16.908,40	53,99	1,47	16.908,40	81,64	1,47
p6r-v2	16.698,40	8,13	0,02	16.896,00	0,04	7,05	17.883,01	34,98	1,62	18.100,61	59,57	0,42	18.088,81	84,09	0,48
p7r-v2	16.879,40	6,72	0,01	17.102,80	0,04	5,48	17.970,62	33,18	0,69	18.028,82	59,53	0,36	18.023,82	81,19	0,39
p8r-v2	15.192,80	7,85	0,02	15.308,20	0,04	7,15	16.119,81	36,34	2,22	16.369,41	54,83	0,71	16.358,01	83,30	0,78
p9r-v2	10.759,80	7,66	0,02	10.971,40	0,05	5,84	11.408,41	37,46	2,09	11.563,62	53,79	0,76	11.563,62	81,59	0,76
p10r-v2	13.720,20	17,25	0,02	14.547,00	0,05	12,26	16.017,22	25,86	3,39	16.202,22	56,39	2,28	16.179,02	83,73	2,42
p11r-v2	14.091,00	9,96	0,01	14.269,80	0,04	8,82	15.093,81	24,66	3,56	15.354,01	56,10	1,89	15.316,41	80,87	2,12
p12r-v2	16.438,60	6,65	0,01	16.438,60	0,04	6,65	17.299,62	37,99	1,76	17.419,62	67,90	1,08	17.394,21	82,09	1,23
p13r-v2	16.670,40	5,36	0,02	16.670,40	0,05	5,36	16.837,62	30,23	4,41	17.350,02	60,37	1,50	17.335,02	82,09	1,58
p14r-v2	17.443,20	9,27	0,02	17.470,60	0,05	9,12	18.799,01	35,70	2,21	18.951,42	55,10	1,42	18.948,21	81,64	1,44
p15r-v2	18.324,40	9,83	0,02	19.019,40	0,06	6,41	19.692,42	33,74	3,10	19.993,43	72,07	1,62	19.905,02	82,53	2,05
p16r-v2	13.976,20	10,58	0,02	14.062,00	0,07	10,03	15.315,79	32,35	2,01	15.394,80	59,01	1,50	15.389,40	83,35	1,53
p17r-v2	14.824,00	10,70	0,02	14.886,20	0,06	10,33	15.672,02	25,44	5,59	15.947,82	54,37	3,93	15.908,42	82,49	4,16
p18r-v2	14.447,20	8,48	0,01	14.538,00	0,05	7,90	15.126,01	32,68	4,18	15.456,80	60,48	2,08	15.448,00	82,43	2,14
p19r-v2	14.230,40	10,41	0,02	14.593,40	0,05	8,13	15.774,20	22,42	0,70	15.799,20	51,78	0,54	15.800,20	82,10	0,53
p20r-v2	16.185,60	10,90	0,02	16.392,20	0,06	9,77	17.731,21	32,10	2,40	17.903,81	57,28	1,45	17.890,81	81,15	1,52
p21r-v2	13.374,20	8,11	0,01	13.453,20	0,05	7,56	14.014,01	34,31	3,71	14.239,01	68,93	2,16	14.243,40	82,14	2,13
p22r-v2	16.185,00	8,16	0,01	16.185,00	0,04	8,16	17.410,40	34,90	1,21	17.448,21	64,80	0,99	17.425,60	81,79	1,12
p23r-v2	16.833,60	12,43	0,02	17.282,60	0,06	10,09	18.621,40	35,67	3,13	18.966,01	57,82	1,33	18.916,01	83,98	1,59
p24r-v2	13.486,00	10,89	0,02	14.624,20	0,05	3,37	14.802,21	23,00	2,20	14.979,80	61,30	1,02	14.868,80	83,29	1,76
p25r-v2	14.182,20	7,33	0,02	14.241,80	0,03	6,95	14.668,19	31,58	4,16	14.914,80	55,94	2,55	14.892,80	81,13	2,69
p26r-v2	17.049,40	10,46	0,01	17.287,80	0,04	9,21	18.534,61	26,14	2,66	18.674,22	57,65	1,93	18.674,21	83,78	1,93
p27r-v2	15.295,20	7,32	0,02	15.512,80	0,04	6,01	16.079,40	33,26	2,57	16.256,01	51,57	1,50	16.256,00	83,62	1,50
p28r-v2	15.574,00	9,71	0,02	15.664,40	0,05	9,19	16.950,60	33,45	1,73	17.149,21	54,07	0,58	17.149,21	82,43	0,58
p29r-v2	16.289,80	6,28	0,01	16.311,40	0,06	6,16	16.901,21	28,19	2,76	17.142,41	56,67	1,38	17.134,40	81,36	1,64
p30r-v2	13.957,40	8,92	0,02	14.216,60	0,05	7,23	14.994,01	26,70	2,16	15.076,01	61,38	1,62	15.074,21	81,54	1,62
Media	Media	9,50	0,02	Media	0,05	7,93	Media	31,24	2,84	Media	58,94	1,58	Media	82,38	1,69

Tabela E.75: Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV  $|E| = 3$

Problema	Heurística Gulosa			Busca Local			GRASP			Simulated Annealing			Colônia de Formigas		
	FO	CPUT (s)	Gap (%)	FO	CPUT (s)	Gap (%)	FO	CPUT (s)	Gap (%)	FO	CPUT (s)	Gap (%)	FO	CPUT (s)	Gap (%)
p1r-v3	14.226,00	0,02	12,90	14.417,60	0,06	11,73	15.283,60	31,25	6,43	15.835,60	69,84	3,05	15.771,20	83,10	3,44
p2r-v3	15.746,40	0,02	13,67	16.290,60	0,04	10,69	17.385,81	35,45	4,69	17.824,20	62,27	2,28	17.735,80	83,44	2,77
p3r-v3	14.057,00	0,01	13,66	14.320,60	0,03	12,04	15.323,41	26,59	5,89	15.807,81	69,69	2,91	15.662,01	81,91	3,81
p4r-v3	14.904,20	0,02	12,57	15.283,00	0,05	10,34	16.240,01	39,75	4,73	16.731,41	66,17	1,85	16.713,41	83,51	1,95
p5r-v3	16.039,80	0,02	9,09	16.294,60	0,06	7,65	17.128,61	25,12	2,92	17.382,61	55,76	1,48	17.382,61	83,01	1,48
p6r-v3	15.754,60	0,02	13,13	16.079,20	0,04	11,34	17.491,21	35,01	3,55	17.869,81	60,30	1,46	17.836,60	83,88	1,64
p7r-v3	17.135,40	0,01	8,02	17.135,40	0,05	8,02	17.949,02	32,47	3,66	18.467,02	61,31	0,87	18.415,01	83,08	1,15
p8r-v3	15.810,20	0,01	8,52	15.833,60	0,05	8,39	16.918,21	37,12	2,11	17.124,41	56,69	0,92	17.099,41	81,70	1,07
p9r-v3	12.922,20	0,02	9,74	13.484,20	0,06	5,82	14.058,41	37,51	1,80	14.177,42	56,87	0,97	14.179,21	83,98	0,96
p10r-v3	14.749,60	0,01	16,95	15.261,00	0,06	14,07	17.130,43	25,12	3,55	17.523,63	57,23	1,33	17.364,84	80,94	2,23
p11r-v3	13.870,40	0,02	13,12	14.099,40	0,05	11,68	15.196,81	24,27	4,81	15.649,42	55,79	1,97	15.631,81	81,10	2,08
p12r-v3	18.981,00	0,01	8,55	19.076,40	0,03	8,09	19.983,39	36,71	3,72	20.497,82	69,84	1,24	20.485,81	84,18	1,30
p13r-v3	17.251,40	0,02	9,83	17.303,20	0,04	9,56	18.407,00	31,24	3,79	18.744,22	63,90	2,03	18.723,41	82,51	2,14
p14r-v3	15.914,40	0,02	13,67	16.088,60	0,08	12,73	17.845,81	36,93	3,20	18.169,61	56,29	1,44	18.164,60	83,46	1,47
p15r-v3	17.315,80	0,02	12,21	18.262,40	0,06	7,41	19.113,22	33,73	3,10	19.392,61	70,90	1,68	19.261,42	83,69	2,35
p16r-v3	14.702,40	0,02	8,85	14.737,40	0,04	8,63	15.492,80	32,90	3,95	15.813,80	61,83	1,96	15.764,20	84,04	2,26
p17r-v3	13.603,20	0,02	14,22	13.734,60	0,05	13,39	15.013,42	25,98	5,32	15.100,22	55,40	4,78	15.068,01	83,71	4,98
p18r-v3	15.142,40	0,02	11,93	15.187,40	0,06	11,67	16.452,40	32,65	4,31	16.907,61	66,61	1,66	16.780,80	82,54	2,40
p19r-v3	15.419,00	0,02	11,15	15.518,80	0,06	10,58	16.864,80	21,93	2,82	17.193,21	53,26	0,93	17.125,21	80,78	1,32
p20r-v3	16.710,00	0,02	16,36	16.851,40	0,05	15,65	19.181,62	31,56	3,99	19.504,42	59,96	2,37	19.494,61	80,95	2,42
p21r-v3	14.059,20	0,02	10,60	14.142,00	0,04	10,07	14.954,81	32,95	4,90	15.208,22	72,54	3,29	15.153,01	83,08	3,64
p22r-v3	17.103,00	0,02	6,74	17.146,20	0,04	6,50	17.951,59	36,25	2,11	18.089,80	66,90	1,36	18.063,38	81,24	1,50
p23r-v3	17.305,20	0,01	9,29	17.358,60	0,05	9,01	18.711,40	37,63	1,92	18.947,21	60,68	0,68	18.939,20	82,18	0,72
p24r-v3	14.621,80	0,02	14,42	15.876,00	0,06	7,08	16.563,00	23,54	3,05	16.730,21	67,47	2,08	16.635,20	82,88	2,63
p25r-v3	14.893,80	0,02	10,77	15.121,40	0,04	9,40	16.167,80	33,38	3,14	16.329,79	60,04	2,17	16.289,79	81,71	2,40
p26r-v3	17.906,20	0,02	8,18	18.007,20	0,04	7,67	18.981,81	26,51	2,67	19.262,42	58,11	1,23	19.200,61	81,99	1,55
p27r-v3	16.707,40	0,02	11,97	17.122,60	0,05	9,78	18.504,02	34,13	2,50	18.801,02	53,06	0,93	18.738,21	82,79	1,27
p28r-v3	14.839,00	0,02	14,13	15.034,60	0,05	13,00	16.830,60	32,27	2,60	17.094,60	55,71	1,08	17.098,60	82,48	1,05
p29r-v3	15.690,40	0,02	9,48	15.817,60	0,04	8,75	16.837,01	28,43	2,87	16.996,21	56,42	1,95	16.985,80	81,40	2,01
p30r-v3	13.474,80	0,02	11,16	13.562,60	0,04	10,59	14.394,42	26,29	5,10	14.852,42	59,78	2,08	14.748,21	82,90	2,77
Media	Media	0,02	11,50	Media	0,05	10,04	Media	Media	3,64	Media	Media	1,80	Media	Media	2,09





Tabela E.78: Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV  $|E| = 6$

Problema	Heurística Gulosa			Busca Local			GRASP			Simulated Annealing			Colônia de Formigas		
	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v6	14.899,00	0,02	12,93	15.239,80	0,05	10,94	16.075,41	31,97	6,06	16.566,80	69,57	3,19	16.427,40	83,35	4,00
p2r-v6	16.321,60	0,01	12,88	17.077,60	0,06	8,84	18.003,40	34,50	3,90	18.387,41	34,50	1,85	18.285,61	82,30	2,39
p3r-v6	13.629,60	0,02	13,77	13.924,40	0,04	11,90	14.905,41	26,44	5,69	15.187,21	65,64	3,91	15.111,01	82,03	4,39
p4r-v6	16.718,80	0,02	11,87	16.774,20	0,04	11,58	18.359,42	39,80	3,22	18.683,82	71,97	1,51	18.467,81	83,01	2,65
p5r-v6	16.105,60	0,02	11,04	16.403,60	0,04	9,39	17.536,01	26,38	3,14	17.790,61	58,41	1,73	17.779,01	80,87	1,79
p6r-v6	16.472,20	0,02	12,25	16.533,40	0,05	11,92	17.924,21	34,37	4,51	18.453,82	63,60	1,69	18.441,79	81,38	1,76
p7r-v6	17.544,40	0,02	7,48	17.544,40	0,03	7,48	18.473,62	33,81	2,58	18.684,83	65,74	1,47	18.700,41	82,53	1,39
p8r-v6	15.137,40	0,02	13,37	15.386,40	0,05	11,95	16.655,21	36,53	4,69	17.241,61	58,24	1,33	17.224,01	83,53	1,43
p9r-v6	13.089,80	0,02	9,68	13.253,20	0,05	8,55	14.011,81	39,48	3,31	14.157,41	56,41	2,31	14.150,21	82,81	2,36
p10r-v6	14.727,00	0,02	18,02	15.915,20	0,06	11,40	17.282,63	26,20	3,79	17.466,24	58,75	2,77	17.380,84	81,66	3,24
p11r-v6	14.876,00	0,02	10,20	14.912,20	0,05	9,99	16.161,22	24,71	2,45	16.293,63	62,10	1,65	16.218,21	82,00	2,10
p12r-v6	19.791,60	0,02	8,26	19.869,80	0,03	7,89	20.916,80	38,42	3,04	21.247,62	75,15	1,51	21.225,41	84,47	1,61
p13r-v6	16.953,60	0,02	10,49	16.977,40	0,04	10,36	18.247,42	31,52	3,66	18.665,83	62,45	1,45	18.636,81	83,85	1,60
p14r-v6	16.913,20	0,02	10,76	17.379,20	0,05	8,30	18.409,21	37,20	2,86	18.632,82	58,61	1,68	18.593,80	83,92	1,89
p15r-v6	17.804,40	0,01	11,54	18.633,00	0,07	7,42	19.503,80	34,71	3,09	19.734,62	77,65	1,95	19.713,61	84,01	2,05
p16r-v6	15.425,60	0,02	10,04	15.565,80	0,04	9,22	16.566,80	33,07	3,38	16.911,21	64,44	1,38	16.842,20	84,01	1,78
p17r-v6	13.753,00	0,02	14,97	14.166,00	0,05	12,41	15.176,42	26,59	6,17	15.524,62	57,54	4,01	15.414,01	82,15	4,70
p18r-v6	15.785,60	0,02	9,15	15.785,60	0,06	9,15	16.281,40	33,75	6,30	16.972,01	68,77	2,32	16.794,40	81,33	3,34
p19r-v6	15.963,00	0,02	10,18	16.177,20	0,07	8,97	17.411,80	22,10	2,02	17.535,01	56,75	1,33	17.486,01	81,77	1,61
p20r-v6	16.366,20	0,02	17,67	16.892,00	0,06	15,02	19.101,61	32,34	3,91	19.508,21	58,81	1,86	19.454,21	81,66	2,13
p21r-v6	14.710,80	0,02	7,94	14.791,00	0,03	7,44	15.293,22	34,71	4,29	15.568,61	78,45	2,57	15.511,21	84,19	2,93
p22r-v6	17.117,20	0,02	7,99	17.117,20	0,03	7,99	18.200,19	37,17	2,17	18.406,20	70,55	1,06	18.376,38	82,32	1,22
p23r-v6	18.768,60	0,02	10,65	18.800,60	0,06	10,50	20.185,41	37,76	3,91	20.705,20	62,93	1,43	20.674,60	83,47	1,58
p24r-v6	15.407,20	0,02	11,64	16.453,20	0,07	5,64	16.841,60	24,50	3,41	17.117,01	63,41	1,83	16.968,81	81,67	2,68
p25r-v6	14.740,60	0,02	13,12	14.922,60	0,05	12,05	16.018,60	33,24	5,59	16.464,40	61,60	2,96	16.428,79	81,47	3,17
p26r-v6	17.419,00	0,01	11,73	17.630,40	0,06	10,66	19.213,41	26,53	2,64	19.480,02	60,03	1,29	19.425,01	82,68	1,56
p27r-v6	17.645,20	0,02	8,20	17.686,00	0,06	7,99	18.675,01	33,60	2,84	18.969,22	54,63	1,31	18.954,20	83,16	1,39
p28r-v6	15.603,00	0,02	11,91	15.635,40	0,04	11,73	17.275,79	33,36	2,47	17.459,81	56,37	1,43	17.464,40	83,41	1,40
p29r-v6	17.012,80	0,02	7,33	17.028,20	0,04	7,24	17.799,39	28,00	3,04	18.059,41	56,87	1,63	18.040,40	81,26	1,73
p30r-v6	14.005,60	0,02	11,87	14.184,60	0,05	10,74	15.359,62	27,99	3,35	15.554,82	59,49	2,12	15.452,61	83,92	2,76
Média	Média		11,30	Média		9,82	Média	32,03	3,72	Média	63,27	1,95	Média	82,67	2,29

Tabela E.79: Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV  $|E| = 7$

Problema	Heurística Gulosa			Busca Local			GRASP			Simulated Annealing			Colônia de Formigas		
	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v7	14.265,80	0,02	15,05	14.516,40	0,05	13,55	15.821,00	32,51	5,78	16.542,40	68,16	1,49	16.463,40	83,80	1,96
p2r-v7	16.097,80	0,02	13,76	16.636,20	0,04	10,88	18.023,00	36,84	3,45	18.297,41	61,74	1,98	18.285,41	81,46	2,04
p3r-v7	13.224,80	0,02	17,03	14.298,80	0,04	10,29	14.915,61	25,94	6,43	15.340,81	68,35	3,76	15.275,01	81,54	4,17
p4r-v7	16.821,60	0,02	12,67	17.055,20	0,04	11,46	18.652,82	40,18	3,17	18.652,82	70,76	1,58	18.878,01	82,99	2,00
p5r-v7	16.103,60	0,02	11,78	16.549,60	0,05	9,34	17.438,41	26,04	4,47	17.853,42	58,10	2,19	17.837,21	83,90	2,28
p6r-v7	17.309,80	0,02	9,93	17.354,60	0,06	9,70	18.607,40	35,09	3,18	19.075,19	65,49	0,74	18.992,00	81,09	1,18
p7r-v7	17.926,40	0,02	5,42	17.926,40	0,04	5,42	18.550,01	34,23	2,13	18.747,43	62,53	1,09	18.736,41	82,71	1,15
p8r-v7	15.804,40	0,02	11,91	16.041,60	0,04	10,58	17.472,60	37,58	2,61	17.690,01	58,58	1,39	17.704,20	81,74	1,32
p9r-v7	13.430,40	0,02	11,81	13.430,40	0,07	9,90	14.799,21	39,50	2,82	15.023,42	57,39	1,35	14.999,61	82,33	1,50
p10r-v7	15.199,60	0,02	14,92	16.069,40	0,06	10,05	17.444,03	26,22	2,35	17.536,63	57,97	1,83	17.473,42	81,82	2,19
p11r-v7	14.282,80	0,01	12,86	14.348,80	0,06	12,46	15.826,23	24,72	3,44	16.082,42	58,55	1,88	16.073,02	82,17	1,94
p12r-v7	19.846,00	0,02	7,29	19.846,00	0,03	7,29	20.676,61	38,44	3,41	21.123,21	71,99	1,33	21.022,79	84,42	1,80
p13r-v7	17.612,80	0,02	8,35	17.712,00	0,05	7,83	18.391,61	31,49	4,30	18.871,82	66,08	1,80	18.794,82	83,28	2,20
p14r-v7	16.930,60	0,02	11,32	17.101,40	0,07	10,42	18.524,81	36,77	2,97	19.386,03	74,63	1,46	18.685,60	81,04	2,12
p15r-v7	17.892,80	0,01	9,05	18.660,40	0,08	5,15	19.039,43	34,67	3,22	19.386,03	74,63	1,46	19.224,61	84,14	2,28
p16r-v7	15.726,60	0,02	11,29	15.769,80	0,04	11,05	17.094,61	32,85	3,57	17.466,62	63,12	1,48	17.379,41	83,96	1,97
p17r-v7	14.605,20	0,02	12,98	15.182,80	0,05	9,53	16.038,22	26,30	4,44	16.388,82	57,85	2,35	16.328,42	83,79	2,71
p18r-v7	15.124,40	0,02	13,10	15.288,20	0,06	12,15	16.681,80	33,66	4,15	17.075,61	65,24	1,88	17.078,00	83,73	1,87
p19r-v7	14.831,20	0,02	14,65	15.689,40	0,07	9,71	16.929,20	22,59	2,58	17.034,81	57,50	1,97	16.998,80	83,02	2,18
p20r-v7	16.543,60	0,02	13,99	17.187,20	0,07	10,65	18.767,01	33,16	2,43	18.924,61	57,13	1,61	18.824,21	82,69	2,14
p21r-v7	15.018,20	0,01	10,43	15.126,20	0,03	9,78	16.134,42	34,80	3,77	16.443,01	84,40	1,93	16.315,81	81,38	2,69
p22r-v7	16.799,20	0,01	8,73	16.830,20	0,03	8,56	17.884,60	36,55	2,83	18.255,01	68,28	0,82	18.215,99	84,15	1,03
p23r-v7	19.704,00	0,01	7,55	19.704,00	0,06	7,55	20.503,79	37,67	3,80	20.968,40	64,44	1,62	20.885,60	83,56	2,01
p24r-v7	15.206,60	0,02	13,76	16.671,40	0,06	5,46	17.260,00	23,93	2,12	17.374,01	67,33	1,47	17.202,41	81,14	2,45
p25r-v7	14.179,60	0,02	13,54	14.329,80	0,05	12,62	15.158,00	33,45	7,57	15.890,59	63,89	3,11	15.803,60	82,94	3,64
p26r-v7	17.793,00	0,01	9,43	17.846,00	0,05	9,16	19.118,02	27,12	2,68	19.244,82	59,97	2,04	19.176,81	83,06	2,39
p27r-v7	17.751,20	0,02	8,56	17.757,00	0,04	8,53	18.914,40	33,31	2,57	19.166,21	52,88	1,27	19.160,80	82,89	1,30
p28r-v7	15.929,20	0,02	11,20	16.161,40	0,04	9,91	17.460,79	34,44	2,66	17.729,21	56,21	1,17	17.725,80	83,38	1,19
p29r-v7	17.519,40	0,02	6,29	17.519,40	0,05	6,29	18.021,20	28,45	3,60	18.359,21	57,05	1,80	18.311,20	81,40	2,05
p30r-v7	14.315,20	0,02	11,66	14.517,80	0,05	10,41	15.689,82	27,87	3,18	15.859,02	60,17	1,83	15.799,62	83,28	2,50
Média	Média	0,02	11,34	Média	0,05	9,52	Média	32,21	3,52	Média	63,11	1,73	Média	82,76	2,07







Tabela E.83: Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV  $|E| = 11$

Problema	Heurística Gulosa			Busca Local			GRASP			Simulated Annealing			Colônia de Formigas		
	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v11	14.549,20	0,01	14,57	14.934,80	0,05	12,31	16.147,80	31,76	5,18	16.595,60	68,13	2,55	16.537,00	83,91	2,90
p2r-v11	16.733,80	0,02	11,34	16.997,40	0,06	9,94	18.471,40	36,31	2,13	18.682,60	63,85	1,01	18.613,20	81,62	1,38
p3r-v11	14.705,20	0,02	10,12	15.042,20	0,05	8,06	15.689,21	27,16	4,10	15.922,81	74,50	2,68	15.874,81	82,56	2,97
p4r-v11	16.858,80	0,02	11,17	16.858,80	0,04	11,17	18.158,01	41,52	4,33	18.547,02	73,76	2,28	18.447,62	81,74	2,80
p5r-v11	16.491,00	0,02	7,98	16.556,80	0,05	7,61	17.261,62	26,14	3,68	17.596,21	57,27	1,81	17.579,01	81,57	1,91
p6r-v11	17.599,80	0,02	9,72	17.714,80	0,04	9,13	18.910,41	35,12	2,99	19.191,40	62,13	1,55	19.179,99	82,08	1,61
p7r-v11	17.419,80	0,02	8,07	17.432,20	0,03	8,00	18.242,02	34,07	3,73	18.683,42	66,30	1,40	18.583,61	82,76	1,93
p8r-v11	15.759,40	0,02	12,19	15.946,80	0,05	11,15	17.334,41	37,36	3,42	17.782,01	58,74	0,92	17.749,81	81,66	1,10
p9r-v11	13.408,60	0,02	9,63	13.766,80	0,05	7,22	14.375,41	39,47	3,11	14.688,01	58,17	1,01	14.653,41	83,39	1,24
p10r-v11	15.077,40	0,02	18,02	16.517,40	0,05	10,19	17.902,63	26,37	2,66	17.983,23	57,65	2,22	17.956,03	82,62	2,37
p11r-v11	14.670,00	0,02	11,00	14.773,80	0,06	10,37	15.736,62	24,70	4,53	16.245,22	62,26	1,44	16.211,02	82,24	1,65
p12r-v11	20.030,00	0,02	7,52	20.030,00	0,03	7,52	20.812,40	38,62	3,91	21.409,81	74,06	1,15	21.302,39	82,52	1,65
p13r-v11	18.055,60	0,02	7,34	18.073,00	0,05	7,25	18.714,22	32,29	3,96	19.285,03	64,74	1,03	19.224,41	84,21	1,34
p14r-v11	17.532,80	0,02	8,79	17.532,80	0,06	8,79	18.477,62	37,49	3,88	18.761,62	58,49	2,40	18.769,61	81,96	2,36
p15r-v11	17.748,00	0,02	11,06	18.651,60	0,05	6,54	19.160,82	34,49	3,98	19.548,23	71,46	2,04	19.439,03	84,09	2,59
p16r-v11	15.605,00	0,02	10,50	15.778,60	0,04	9,50	16.755,81	33,41	3,90	17.060,21	63,97	2,15	17.036,40	80,99	2,29
p17r-v11	14.916,80	0,02	11,88	15.310,00	0,04	9,56	16.166,22	26,22	4,50	16.484,82	56,57	2,62	16.433,62	81,46	2,92
p18r-v11	15.101,20	0,02	11,75	15.203,80	0,06	11,15	16.435,80	33,71	3,95	16.802,60	67,49	1,81	16.640,40	83,75	2,76
p19r-v11	15.870,80	0,02	11,11	16.296,60	0,06	8,72	17.111,80	22,53	4,16	17.468,41	58,45	2,16	17.346,60	83,26	2,84
p20r-v11	17.388,00	0,02	13,10	17.694,80	0,05	11,56	19.325,40	33,06	3,41	19.580,22	59,47	2,14	19.586,81	82,83	2,11
p21r-v11	15.063,20	0,01	9,25	15.063,20	0,04	9,25	15.666,21	34,99	5,62	16.091,81	80,86	3,05	15.962,81	82,13	3,83
p22r-v11	16.797,80	0,02	9,15	16.797,80	0,03	9,15	17.659,40	37,09	4,49	18.075,40	72,34	2,24	18.031,20	82,28	2,48
p23r-v11	19.694,80	0,02	6,87	19.788,60	0,05	6,43	20.442,40	38,40	3,34	20.863,81	64,80	1,34	20.816,79	84,03	1,57
p24r-v11	14.982,20	0,01	14,15	16.268,80	0,07	6,77	16.961,40	24,60	2,80	17.223,21	67,21	1,30	17.031,80	82,64	2,40
p25r-v11	15.159,20	0,02	9,88	15.275,20	0,04	9,19	16.064,79	33,37	4,49	16.522,20	62,95	1,77	16.433,79	83,45	2,30
p26r-v11	17.826,60	0,02	9,83	17.969,00	0,04	9,11	19.120,60	27,42	3,28	19.382,62	61,12	1,95	19.252,62	82,85	2,61
p27r-v11	17.668,00	0,02	7,74	17.701,00	0,05	7,57	18.500,22	33,68	3,40	18.973,21	55,15	0,93	18.947,80	83,12	1,06
p28r-v11	15.869,60	0,02	10,38	16.006,20	0,05	9,61	17.293,20	33,85	2,34	17.537,21	57,91	0,97	17.492,20	83,90	1,22
p29r-v11	16.842,00	0,01	10,36	17.075,80	0,06	9,12	18.216,61	28,02	3,04	18.486,40	58,65	1,61	18.465,81	81,27	1,72
p30r-v11	14.768,20	0,02	9,47	14.999,40	0,05	8,06	15.664,62	27,88	3,98	15.835,22	62,62	2,93	15.795,42	83,87	3,18
Media			10,46	Media		9,00	Media	32,37	3,74	Media	64,04	1,82	Media	82,69	2,17



Tabela E.85: Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV  $|E| = 13$

Problema	Heurística Gulosa			Busca Local			GRASP			Simulated Annealing			Colônia de Formigas		
	FO	CpUt (s)	Gap (%)	FO	CpUt (s)	Gap (%)	FO	CpUt (s)	Gap (%)	FO	CpUt (s)	Gap (%)	FO	CpUt (s)	Gap (%)
p1r-v13	14.128,80	0,01	17,30	14.708,80	0,05	13,91	16.065,80	31,81	5,96	16.450,80	68,17	3,71	16.438,60	83,88	3,78
p2r-v13	17.072,00	0,01	9,58	17.266,00	0,05	8,56	18.445,79	36,16	2,31	18.754,61	61,81	0,67	18.649,80	81,78	1,23
p3r-v13	14.403,00	0,01	10,96	14.793,20	0,04	8,55	15.244,41	27,09	5,76	15.707,21	74,29	2,89	15.528,81	83,63	4,00
p4r-v13	17.101,60	0,02	11,24	17.101,60	0,04	11,24	18.666,21	41,46	3,12	19.010,62	73,78	1,33	18.944,62	84,26	1,67
p5r-v13	15.464,60	0,02	13,24	15.989,60	0,04	10,30	17.019,40	26,02	4,52	17.515,01	58,21	1,74	17.457,80	81,04	2,06
p6r-v13	17.149,40	0,02	9,55	17.389,60	0,05	8,29	18.380,61	35,19	3,06	18.789,19	62,35	0,91	18.701,39	82,11	1,37
p7r-v13	17.853,80	0,02	6,22	17.853,80	0,03	6,22	18.381,82	34,74	3,44	18.720,82	64,80	1,66	18.668,41	83,11	1,94
p8r-v13	15.834,40	0,02	12,23	16.236,40	0,04	10,00	17.541,01	37,30	2,76	17.851,01	59,68	1,05	17.854,80	82,26	1,03
p9r-v13	13.116,60	0,02	11,62	13.438,80	0,06	9,45	14.539,41	39,61	2,03	14.666,81	58,29	1,17	14.635,81	83,89	1,38
p10r-v13	14.794,80	0,01	18,66	16.302,00	0,05	10,37	17.901,83	26,67	1,58	17.881,23	58,65	1,69	17.833,42	81,55	1,95
p11r-v13	14.633,20	0,02	10,02	14.662,00	0,05	9,84	15.806,82	24,96	2,80	16.010,23	60,51	1,55	15.978,22	83,04	1,75
p12r-v13	20.274,80	0,01	6,09	20.274,80	0,02	6,09	21.102,01	39,61	2,26	21.381,02	74,87	0,97	21.338,62	82,86	1,16
p13r-v13	17.675,40	0,02	8,00	17.675,40	0,04	8,00	18.615,62	32,10	3,10	18.820,62	64,98	2,04	18.748,61	84,09	2,41
p14r-v13	16.820,20	0,02	12,08	17.097,00	0,05	10,63	18.379,21	37,89	3,93	18.752,81	57,82	1,98	18.733,41	82,63	2,08
p15r-v13	17.679,40	0,02	9,94	18.705,00	0,06	4,72	19.107,23	35,80	2,67	19.340,43	73,08	1,48	19.261,41	82,77	1,88
p16r-v13	15.634,00	0,02	11,06	15.738,80	0,04	10,46	16.909,01	34,34	3,80	17.231,21	65,52	1,97	17.208,21	81,91	2,10
p17r-v13	14.376,00	0,02	14,61	14.882,60	0,05	11,60	15.842,02	26,76	5,90	16.196,22	57,71	3,80	16.041,42	82,93	4,72
p18r-v13	15.127,60	0,02	11,98	15.185,00	0,07	11,64	16.235,20	34,67	5,53	16.764,80	65,46	2,45	16.656,01	81,85	3,08
p19r-v13	15.679,00	0,02	10,69	15.698,80	0,05	10,57	17.066,00	22,41	2,78	17.199,61	57,83	2,02	17.182,80	82,97	2,12
p20r-v13	16.894,60	0,01	16,42	17.408,40	0,05	13,88	19.382,41	32,53	4,11	19.823,01	61,45	1,93	19.763,21	82,81	2,23
p21r-v13	15.285,40	0,02	8,29	15.413,60	0,03	7,52	15.906,42	35,92	4,56	16.277,61	78,14	2,34	16.173,00	81,87	2,96
p22r-v13	17.077,80	0,02	7,70	17.077,80	0,03	7,70	17.988,40	36,35	2,78	18.257,60	70,60	1,32	18.237,58	82,08	1,43
p23r-v13	19.243,60	0,02	8,89	19.412,00	0,05	8,10	20.059,80	38,06	5,03	20.758,20	65,65	1,72	20.764,00	81,51	1,70
p24r-v13	14.551,60	0,02	15,32	15.729,40	0,07	8,47	16.486,01	23,55	4,07	16.835,21	64,28	2,04	16.656,40	83,58	3,08
p25r-v13	14.814,00	0,02	11,39	14.925,40	0,03	10,72	15.938,60	34,30	4,66	16.372,20	61,79	2,07	16.299,00	83,59	2,51
p26r-v13	18.140,40	0,02	8,70	18.403,20	0,05	7,37	19.368,82	27,02	2,51	19.631,02	58,49	1,19	19.612,81	82,71	1,28
p27r-v13	18.034,80	0,02	8,36	18.202,40	0,04	7,51	19.241,01	33,21	2,23	19.564,62	54,35	0,59	19.542,80	83,32	0,70
p28r-v13	14.815,60	0,02	14,47	15.016,20	0,05	13,31	16.962,20	34,54	2,08	17.191,80	57,33	0,75	17.178,80	83,88	0,83
p29r-v13	17.819,20	0,02	6,23	17.836,00	0,05	6,14	18.559,62	28,43	2,33	18.771,03	57,39	1,22	18.733,41	81,93	1,42
p30r-v13	14.381,80	0,02	9,79	14.384,40	0,04	9,78	15.288,62	27,28	4,10	15.598,21	60,77	2,16	15.547,62	83,67	2,48
Media	Media	Media	11,02	Media	Media	9,36	Media	Media	3,53	Media	Media	1,75	Media	Media	2,08



Tabela E.87: Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV  $|E| = 15$

Problema	Heurística Gulosa			Busca Local			GRASP			Simulated Annealing			Colônia de Formigas		
	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v15	14.486,00	0,02	12,83	14.889,60	0,06	10,41	15.627,00	22,26	5,97	16.221,00	69,28	2,39	16.118,60	80,770	3,01
p2r-v15	16.446,00	0,02	11,32	16.870,00	0,05	9,03	17.870,00	25,35	3,64	18.252,40	64,08	1,58	18.143,60	81,31	2,16
p3r-v15	14.181,20	0,02	12,74	14.378,20	0,04	11,52	15.756,21	19,35	3,04	15.924,41	73,33	2,01	15.784,41	83,32	2,87
p4r-v15	17.216,80	0,02	10,91	17.216,80	0,04	10,91	18.672,62	28,72	3,38	18.919,42	74,24	2,10	18.859,61	83,91	2,41
p5r-v15	15.976,20	0,02	10,34	16.143,00	0,05	9,40	17.054,81	18,11	4,29	17.425,21	58,50	2,21	17.414,40	81,53	2,27
p6r-v15	17.488,40	0,02	7,67	17.545,60	0,04	7,36	18.401,21	24,54	2,85	18.700,41	63,23	1,27	18.631,79	82,71	1,63
p7r-v15	17.453,60	0,02	7,33	17.514,80	0,03	7,01	18.101,62	24,59	3,89	18.524,82	65,44	1,65	18.457,41	83,74	2,00
p8r-v15	15.760,40	0,02	12,79	16.182,00	0,04	10,46	17.493,02	26,31	3,21	17.811,81	59,15	1,44	17.795,40	81,35	1,53
p9r-v15	13.461,20	0,02	9,69	13.726,40	0,05	7,91	14.691,01	27,99	1,44	14.823,41	58,32	0,56	14.800,41	83,90	0,71
p10r-v15	15.514,40	0,02	14,82	16.349,60	0,05	10,23	17.481,04	17,92	4,02	17.811,83	59,53	2,21	17.736,23	82,06	2,62
p11r-v15	14.913,40	0,02	9,15	14.927,60	0,04	9,06	15.782,02	17,31	3,86	16.142,02	61,42	1,66	16.057,42	83,37	2,18
p12r-v15	20.233,40	0,01	6,37	20.233,40	0,03	6,37	21.069,01	27,15	2,50	21.402,42	75,20	0,96	21.361,01	82,41	1,15
p13r-v15	17.595,80	0,02	8,92	17.595,80	0,04	8,92	18.579,02	22,31	3,83	18.925,22	64,32	2,03	18.864,81	84,27	2,35
p14r-v15	17.684,40	0,02	8,03	17.684,40	0,05	8,03	18.517,62	26,73	3,70	18.860,41	60,14	1,92	18.778,00	83,02	2,35
p15r-v15	17.186,40	0,01	13,68	18.082,20	0,05	9,19	19.401,21	24,46	2,56	19.714,81	73,70	0,99	19.613,01	81,24	1,50
p16r-v15	15.551,80	0,01	10,30	15.777,20	0,04	9,00	16.729,00	23,34	3,51	17.017,41	63,63	1,85	16.948,00	81,15	2,25
p17r-v15	14.869,80	0,02	12,27	14.916,60	0,05	11,99	16.173,42	18,28	4,58	16.329,82	57,27	3,65	16.290,22	81,22	3,89
p18r-v15	15.307,60	0,02	9,29	15.347,60	0,05	9,05	15.906,60	23,61	5,74	16.371,40	67,10	2,98	16.289,60	81,86	3,47
p19r-v15	15.713,60	0,02	10,65	15.870,40	0,05	9,75	17.282,41	15,88	1,73	17.314,62	56,30	1,54	17.314,61	83,33	1,54
p20r-v15	16.987,60	0,01	13,50	17.203,80	0,05	12,40	18.796,81	23,02	4,29	19.187,41	61,86	2,30	19.098,20	82,32	2,75
p21r-v15	15.012,60	0,01	9,28	15.039,60	0,03	9,12	15.685,81	25,23	5,21	16.139,81	77,92	2,47	16.075,01	81,78	2,86
p22r-v15	16.616,40	0,02	8,90	16.724,40	0,03	8,31	17.650,22	25,57	3,23	18.030,20	71,24	1,15	17.920,58	82,10	1,75
p23r-v15	19.291,40	0,02	7,89	19.291,40	0,05	7,89	20.139,79	26,83	3,84	20.672,21	64,32	1,30	20.562,40	81,61	1,82
p24r-v15	14.964,80	0,02	14,70	16.454,80	0,06	6,20	17.214,01	16,68	1,87	17.418,21	69,51	0,71	17.333,01	82,20	1,20
p25r-v15	14.825,00	0,02	12,21	15.039,40	0,04	10,94	16.242,00	24,09	3,81	16.524,00	61,22	2,14	16.445,99	84,07	2,61
p26r-v15	17.992,00	0,01	11,12	18.421,20	0,06	9,00	19.385,42	18,12	4,23	19.972,63	60,11	1,33	19.910,62	82,52	1,64
p27r-v15	17.406,20	0,02	9,10	17.443,60	0,05	8,91	18.626,42	23,36	2,73	18.883,02	53,64	1,39	18.825,20	83,30	1,69
p28r-v15	15.875,60	0,02	10,15	15.983,00	0,05	9,54	17.275,60	23,43	2,23	17.544,41	57,81	0,70	17.542,21	81,85	0,72
p29r-v15	17.419,40	0,02	7,20	17.512,20	0,05	6,71	18.260,62	20,01	2,72	18.578,02	59,07	1,03	18.496,21	82,03	1,47
p30r-v15	14.616,40	0,02	9,83	14.620,60	0,05	9,80	15.413,42	19,12	4,91	15.853,42	65,30	2,20	15.753,42	83,90	2,81
	Média		10,43	Média		9,15	Média	22,66	3,56	Média	64,21	1,72	Média	82,47	2,11



Tabela E.89: Tabela comparativa entre as heurísticas para o PADV  $|E| = 17$

Problema	Heurística Gulosa			Busca Local			GRASP			Simulated Annealing			Colônia de Formigas		
	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)	FO	CPUt (s)	Gap (%)
p1r-v17	14.220,80	0,02	16,74	14.653,80	0,04	14,20	15.944,40	22,25	6,65	16.499,00	68,38	3,40	16.399,60	84,08	3,98
p2r-v17	16.768,40	0,02	11,31	16.914,40	0,05	10,54	18.181,41	25,75	3,84	18.614,41	62,89	1,55	18.582,20	81,34	1,72
p3r-v17	13.708,40	0,02	13,18	14.342,80	0,04	9,16	14.914,60	19,11	5,54	15.284,61	71,43	3,19	15.194,01	82,95	3,77
p4r-v17	17.674,00	0,02	8,67	17.674,00	0,04	8,67	18.862,43	28,90	2,53	19.087,22	74,26	1,37	18.987,61	84,15	1,88
p5r-v17	15.329,80	0,02	12,74	15.522,40	0,04	11,64	16.990,61	18,14	3,28	17.256,61	58,25	1,77	17.213,80	81,82	2,01
p6r-v17	17.540,20	0,02	9,11	17.667,80	0,04	8,45	18.734,01	25,39	2,92	19.118,61	64,14	0,93	19.029,80	81,96	1,39
p7r-v17	17.620,60	0,02	6,66	17.620,60	0,03	6,66	18.224,81	23,79	3,46	18.640,03	66,91	1,26	18.557,21	83,96	1,70
p8r-v17	15.516,00	0,02	11,89	15.825,40	0,04	10,13	16.969,01	26,72	3,64	17.412,21	61,33	1,12	17.345,60	82,37	1,50
p9r-v17	13.391,60	0,02	10,81	13.672,20	0,05	8,94	14.700,81	27,47	2,09	14.806,22	58,07	1,39	14.805,02	83,92	1,40
p10r-v17	15.406,00	0,02	14,85	16.377,80	0,05	9,48	17.658,03	18,56	2,41	17.709,24	58,70	2,13	17.644,22	82,62	2,48
p11r-v17	14.093,60	0,02	14,00	14.432,40	0,06	11,93	15.563,01	18,22	5,03	15.944,42	59,99	2,70	15.944,41	83,01	2,70
p12r-v17	20.542,60	0,01	5,46	20.566,40	0,03	5,35	21.073,21	26,93	3,02	21.516,40	75,00	0,98	21.486,80	83,23	1,12
p13r-v17	17.366,80	0,02	8,30	17.366,80	0,04	8,30	18.252,82	23,01	3,62	18.553,22	65,02	2,04	18.502,42	81,58	2,31
p14r-v17	17.833,00	0,02	7,32	17.872,20	0,05	7,12	18.897,00	25,88	1,79	19.034,21	59,55	1,08	19.010,20	82,30	1,20
p15r-v17	17.825,20	0,01	9,96	18.588,40	0,07	6,10	19.220,62	24,99	2,91	19.517,21	74,72	1,41	19.348,20	81,99	2,26
p16r-v17	15.338,20	0,02	11,31	15.476,40	0,04	10,51	16.606,60	23,39	3,98	17.029,20	66,35	1,53	17.047,79	82,05	1,43
p17r-v17	14.681,00	0,02	12,19	15.166,00	0,05	9,29	16.087,02	18,63	3,78	16.318,02	56,52	2,40	16.274,02	81,56	2,67
p18r-v17	16.145,80	0,02	7,40	16.208,20	0,05	7,04	16.662,80	24,07	4,43	17.076,41	73,46	2,06	16.975,40	82,11	2,64
p19r-v17	15.267,20	0,02	14,12	15.453,00	0,06	13,08	17.269,61	15,39	2,86	17.383,41	56,97	2,22	17.313,80	82,85	2,61
p20r-v17	16.868,40	0,02	15,14	17.108,80	0,05	13,93	19.247,20	23,00	3,18	19.495,22	60,65	1,93	19.484,61	82,61	1,98
p21r-v17	15.290,20	0,02	8,41	15.290,20	0,03	8,41	15.908,01	24,82	4,71	16.265,81	80,35	2,57	16.223,01	82,78	2,83
p22r-v17	17.397,20	0,02	6,17	17.397,20	0,03	6,17	17.896,79	26,47	3,48	18.322,19	70,16	1,18	18.254,38	82,64	1,55
p23r-v17	19.345,60	0,02	8,40	19.469,40	0,05	7,81	20.407,00	26,50	3,37	20.872,01	67,86	1,17	20.771,99	81,32	1,64
p24r-v17	15.487,20	0,02	11,45	16.533,20	0,06	5,47	16.657,81	17,02	4,75	17.165,21	66,60	1,85	17.050,61	81,95	2,51
p25r-v17	14.757,60	0,02	12,26	14.795,80	0,04	12,03	15.835,79	24,46	5,85	16.194,79	62,52	3,71	16.048,59	83,88	4,58
p26r-v17	17.934,20	0,02	10,31	18.106,80	0,06	9,45	19.527,62	18,74	2,34	19.711,41	60,36	1,42	19.638,21	83,14	1,79
p27r-v17	17.765,00	0,02	9,17	17.789,20	0,05	9,04	19.154,82	23,50	2,06	19.398,22	53,99	0,81	19.354,21	83,05	1,04
p28r-v17	15.324,80	0,02	13,94	15.799,00	0,05	11,28	17.393,19	23,69	2,33	17.611,81	58,35	1,10	17.557,39	83,88	1,41
p29r-v17	16.923,80	0,02	8,39	16.992,20	0,05	8,72	17.708,00	19,65	4,14	18.051,61	58,88	2,28	18.012,80	82,03	2,49
p30r-v17	14.867,80	0,02	8,72	14.972,00	0,05	8,08	15.763,62	19,07	3,22	15.949,82	61,10	2,08	15.915,02	83,84	2,29
Media	Media	Media	10,61	Media	Media	9,21	Media	Media	3,57	Media	Media	1,82	Media	Media	2,16



*ANEXO F – Problema exemplo proposto para  
validação*

## **Cenário:**

Temos uma empresa de transporte rodoviário e as cargas sempre são completas. Trabalha somente com um tipo de veículo (exemplo: conjunto fixo cavalo&carreta) e não realizam conjugações. As cargas vão sempre do terminal de origem da carga diretamente para o terminal de destino da carga. Os veículos não param em terminais intermediários.

Vamos supor que temos uma programação confirmada de necessidades de veículos ( demanda de cargas) entre os terminais em tempos específicos ( ver dados, Tabela 1).

Vamos supor que temos uma frota dedicada a realizar estes transportes de transferências e que estão em alguns terminais (ver dados, Tabela 3).

Os veículos podem: ser mantidos nos terminais por períodos (em estoque), podem ser movimentados vazios para atender a uma carga em outro terminal, e podem ser movimentados cheios (levando as cargas programadas). São 3 tipos de movimento no tempo.

Falando em tempo..., os tais terminais possuem (obviamente) distâncias entre eles e iremos transformar estas distâncias em tempos/períodos para facilitar a análise.

Estamos interessados em programar a frota disponível para atender (ou não) as cargas programadas. Sim! Pode ser que algumas cargas sejam rejeitadas, não consigam ser atendidas....nestes casos esqueça o problema com o prazo de entrega, ônus, perda do cliente....depois cuidaremos deste tema.

### **O Problema:**

Temos uma semana de planejamento de tráfego. Vamos considerar 6 dias corridos, divididos em períodos de 6 horas ( vai nos ajudar com o tempo de viagem entre os terminais – ver Tabela 3). Precisamos programar quais movimentos os veículos disponíveis irão realizar (Tabela 2 mostra onde estão os veículos). O objetivo é atender o máximo das cargas programadas (Tabela 1 mostra onde e quando estão as cargas).

Então temos 24 horas/6 horas, ou seja, 4 períodos por dia, sendo 6 dias (de 2af à sábado) teremos um total 24 períodos para toda a semana de planejamento.

A cada movimento cheio de um veículo, tenho uma receita da carga atendida menos o custo para movimentar esse veículo por período, ou seja, temos os custos operacionais do veículo por período e temos uma receita. No final teremos um saldo de receita menos o custo.

Os movimentos de estoque dos veículos nos períodos, ou seja, o veículo permanece parado em um terminal em determinado(s) período(s), vamos considerar (simplificar) como custo zero.

Os movimentos vazios dos veículos geram custo por período. Estes custos de rodar vazio devem ser somados aos custos operacionais, também por período, do movimento da carga que ele foi atender. Exemplo, saiu vazio de Contagem para CPQ ( custo do vazio) + de CPQ para o RIO (custo operacional cheio). Receita de CPQ para o RIO menos a soma dos custos ( vazio e cheio ) para atender esta demanda (carga de CPQ x RIO).

No final da resolução do problema teremos que verificar o nosso saldo!! Positivo, negativo, quanto??

Bom, vamos aos dados!

### **Dados:**

Quantidade de terminais em estudo: 8.

Locais : SÃO, CPQ, RAO, CONT, JDF, VIX, RIO e SSA.

Planejamento para: 6 dias, que corresponde a 24 períodos ( 24h/6h = 4 períodos por dia).

Das 00h01 às 6h00, das 06h01 às 12h00, das 12h01 às 18h00, das 18h01 às 24h00.

Iremos ajustar os tempos de viagem em períodos....fique tranquilo ( ver dados, Tabela 3). Facilitaremos para não perdermos o foco: **atender a maior quantidade de cargas possível, ao máximo de saldo positivo.**

Imagine que você tem que realizar a previsão da operação no domingo e que irá programar de 2ªf à sábado de uma vez só. Como se fosse um plano único, que exceto em caso de quebra do veículo, ou acidentes, etc...nada irá alterar o seu plano. Imagine que você está no final do domingo (...assistindo o Fantástico...que tédio), você resolve então fazer o plano de tráfego da semana toda, com a programação das cargas (... um sonho!) enviada pelos gerentes, na 6af anterior, (Tabela 1).

Bom, vamos conhecer as informações das cargas e dos veículos. Sobre os veículos, para facilitar, se desejar poderá usar a identificação por número ( de 1 até 30 ) como se fosse a placa. Apesar deles serem idênticos, aqui no cenário imaginário, a numeração poderá facilitar a rastreabilidade, qual veículo está onde?

A tabela abaixo, (**Tabela 1**), pode ser útil para fornecer os dados das cargas.

Período	Origem da Carga	Destino da Carga	Quantidade de Veículo (carga)	Receitas: cargas (unidades monetárias)
<b>1º Período</b> 2af das 00h01 às 6h00	SÃO	CONT	2	20 u.m.
	SÃO	RIO	1	20
	SAO	SSA	1	20
<b>2º Período</b> 2af das 06h01 às 12h00				
<b>3º Período</b> 2af das 12h01 às 18h00				
<b>4º Período</b> 2af das 18h01 às 24h00	CPQ	CONT	1	20
	CPQ	VIX	1	20
	VIX	SSA	1	20
	VIX	CONT	1	20
	SÃO	SSA	1	20
	CONT	VIX	1	20
	CONT	RIO	1	20
	RIO	CONT	1	20
<b>5º Período</b> 3af das 00h01 às 6h00				
<b>6º Período</b> 3af das 06h01 às 12h00				
<b>7º Período</b> 3af das 12h01 às 18h00				
<b>8º Período</b> 3af das 18h01 às 24h00	SÃO	CONT	2	20 u.m cada
	SÃO	RIO	1	20
	CONT	CPQ	1	20
	CONT	JDF	1	20
	RIO	SSA	1	20
	CPQ	RIO	1	20
	CPQ	CONT	1	20
	CPQ	RAO	1	20
<b>9º Período</b> 4af das 00h01 às 6h00				
<b>10º Período</b> 4af das 06h01 às 12h00				
<b>11º Período</b> 4af das 12h01 às 18h00				
<b>12º Período</b> 4af das 18h01 às 24h00	SÃO	CONT	1	20
	SÃO	VIX	1	20
	SÃO	RAO	1	20
	SÃO	SSA	1	20
	RAO	SSA	1	20
	JDF	VIX	1	20
	RIO	VIX	1	20
	VIX	CONT	1	20
CONT	RIO	1	20	
<b>13º Período</b> 5af das 00h01 às 6h00				

<b>14º Período</b> 5af das 06h01 às 12h00				
<b>15º Período</b> 5af das 12h01 às 18h00				
<b>16º Período</b> 5af das 18h01 às 24h00	SÃO	CONT	2	20 u.m. cada
	SÃO	RIO	1	20
	SÃO	JDF	1	20
	CPQ	CONT	1	20
	CPQ	VIX	2	20 u.m. cada
	RIO	CONT	1	20
	RIO	VIX	1	20
	VIX	SSA	1	20
	SSA	CONT	1	20
	JDF	CONT	1	20
<b>17º Período</b> 6af das 00h01 às 6h00				
<b>18º Período</b> 6af das 06h01 às 12h00				
<b>19º Período</b> 6af das 12h01 às 18h00				
<b>20º Período</b> 6af das 18h01 às 24h00	SÃO	CONT	1	20
	SÃO	RIO	1	20
	SÃO	RAO	1	20
	RIO	SSA	1	20
	VIX	CPQ	1	20
	CONT	JDF	1	20
	RAO	CONT	1	20
	JDF	CONT	1	20
<b>21º Período</b> sab das 00h01 às 6h00				
<b>22º Período</b> sab das 06h01 às 12h00				
<b>23º Período</b> sab das 12h01 às 18h00	SAO	CONT	1	20
	CPQ	RIO	1	20
	RIO	VIX	1	20
<b>24º Período</b> sab das 18h01 às 24h00				

Lembre-se também de que o tempo não retorna, ele segue durante a semana, e uma carga que ficou sem ser atendida não passa para outro período, ela é perdida no tempo/espaço. Deixamos de faturar somente!

A tabela a seguir, **(Tabela 2)**, fornece os dados de localização de veículos no tempo. Você irá movimentar estes veículos para atender as cargas já programadas. Vamos considerar 30 veículos. Toda vez que movimentamos um veículo cheio ou vazio ele custa (operacionalmente) **3 unidades monetárias por período**. Sempre! Lembre-se que em estoque nos períodos não tem custo.

Período	Terminal Em que o veículo entra	Quantidade De Veículo	Numeração Como se fosse a placa do veículo
<b>1º Período</b> 2af das 00h01 às 6h00	SAO	2	1 e 2
<b>2º Período</b> 2af das 06h01 às 12h00	CONT	2	3 e 4
<b>3º Período</b> 2af das 12h01 às 18h00	SÃO CPQ CONT RIO VIX	3 2 4 2 2	5, 6 e 7 8 e 9 10, 11, 12 e 13 14 e 15 16 e 17
<b>4º Período</b> 2af das 18h01 às 24h00			
<b>5º Período</b> 3af das 00h01 às 6h00			
<b>6º Período</b> 3af das 06h01 às 12h00	JDF RAO	1 1	18 19
<b>7º Período</b> 3af das 12h01 às 18h00	SÃO CPQ CONT RIO SSA VIX	2 2 1 1 1 3	20 e 21 23 e 24 25 26 27 28, 29 e 30
<b>8º Período</b> 3af das 18h01 às 24h00			
<b>9º Período</b> 4af das 00h01 às 6h00			
<b>10º Período</b> 4af das 06h01 às 12h00			
<b>11º Período</b> 4af das 12h01 às 18h00			
<b>12º Período</b> 4af das 18h01 às 24h00			
<b>13º Período</b> 5af das 00h01 às 6h00			
<b>14º Período</b> 5af das 06h01 às 12h00			
<b>15º Período</b> 5af das 12h01 às 18h00			
<b>16º Período</b> 5af das 18h01 às 24h00			
<b>17º Período</b> 6af das 00h01 às 6h00			
<b>18º Período</b> 6af das 06h01 às 12h00			
<b>19º Período</b> 6af das 12h01 às 18h00			
<b>20º Período</b> 6af das 18h01 às 24h00			
<b>21º Período</b> sab das 00h01 às 6h00			
<b>22º Período</b> sab das 06h01 às 12h00			
<b>23º Período</b> sab das 12h01 às 18h00			
<b>24º Período</b> sab das 18h01 às 24h00			

Os 30 veículos aparecem nos terminais nos períodos indicados. A partir daí, você ira movimentá-los para tentar atender as cargas nos períodos em que elas aparecem nos terminais (**Tabela 1**).

A tabela (**Tabela 3**) abaixo, fornece os tempos de viagem entre os 8 terminais.

Vamos considerar o tempo de viagem como períodos. Vejamos:

	SAO	RIO	CONT	CPQ	VIX	RAO	JDF	SSA
SÃO	0	1	2	1	3	1	1	4
RIO	1	0	1	1	2	3	1	3
CONT	2	1	0	2	2	2	1	3
CPQ	1	1	2	0	3	1	1	4
VIX	3	2	2	3	0	3	3	2
RAO	1	3	2	1	3	0	2	4
JDF	1	1	1	1	3	2	0	4
SSA	4	3	3	4	2	4	4	0

Agora, é só começar a planejar a semana de 6 dias, (24 períodos de 6 horas), conhecendo o custo operacional por veículo/período ( 3u.m/período), tendo a informação da receita de cada carga (origem x destino- todas 20 u.m). Sabemos em qual período, cargas precisam ser transportadas da sua origem para seus destinos. Temos 30 veículos disponíveis a partir de um certo local e período.

Fique à vontade, você poderá fazer planilha, mapa, diagrama, gráfico, etc..., o que melhor representar a solução dos movimentos dos veículos, e também o resultado financeiro no final do planejamento. Fique à vontade para criar.

Obrigada, Rejane.

## F.1 Modelo matemático utilizado para solução

```

/* Vehicle Assignment Problem (VAP) */
/* Rejane Arinos Vasco */
param T, integer, > 0; /* tamanho do horizonte de planejamento
set N;
/* num. de cargas disponiveis no periodo t de i -> j */
param d {i in N, j in N, t in 1..T} >= 0;
/* tempo de viagem de i -> j */
param Travel {i in N, j in N} >= 0;
/* quantidade de veiculos do tipo v que entram no sistema no ponto i no periodo t */
param m {i in N, t in 1..T}, >= 0;
/* receita */
param p{i in N, j in N}, >= 0;
/* custo */
param c{i in N, j in N}, >= 0;
var X {i in N, j in N, t in 1..T}, integer, >= 0;
var Y {i in N, j in N, t in 1..T}, integer, >= 0;

maximize z : sum{t in 1..T, i in N, j in N: j<>i}
            ( p[i,j]*X[i,j,t] - c[i,j]*(Y[i,j,t] + X[i,j,t]) );

s.t. r1 {i in N, t in 1..T} :
    sum{j in N} (X[i,j,t] + Y[i,j,t])
    - sum{k in N: k<>i and t>Travel[k,i]} (X[k,i,t-Travel[k,i]] +
    Y[k,i,t-Travel[k,i]]) = (if t>1 then (m[i,t] + Y[i,i,t-1])
    else m[i,t]);

s.t. r2 {i in N, j in N, t in 1..T} : X[i,j,t] <= d[i,j,t];
solve;
printf: "Demanda Total: %d\n", sum{i in N, j in N, t in 1..T} d[i,j,t];
printf: "Demanda Atendida: %d\n", sum{i in N, j in N, t in 1..T} X[i,j,t];
printf: "Movimentos Vazios: %d\n", sum{i in N, j in N, t in 1..T : i != j} Y[i,j,t];
printf: "Movimentos de estoque: %d\n", sum{i in N, j in N, t in 1..T : i == j} Y[i,j,t];
printf: "Movimentos de vazios + estoque: %d\n", sum{i in N, j in N, t in 1..T} Y[i,j,t];
printf: "%d\n", T > "relatorio.csv";
printf: "SAO RIO CON CPQ VIX RAO JDF SSA\n" >> "relatorio.csv";
printf{i in N, j in N, t in 1..T: X[i,j,t] != 0}:
    "x;%s;%s;%s;%s;%s\n",i,j,t,(t + Travel[i,j]), X[i,j,t] >> "relatorio.csv";
printf{i in N, j in N, t in 1..T: Y[i,j,t] != 0 && i != j}:
    "y;%s;%s;%s;%s;%s\n",i,j,t,(t + Travel[i,j]), Y[i,j,t] >> "relatorio.csv";
printf{i in N, j in N, t in 1..T: Y[i,j,t] != 0 && i == j}:
    "y;%s;%s;%s;%s;%s\n",i,j,t,(t + 1), Y[i,j,t] >> "relatorio.csv";

```

end;

---



---

# Problema p1

data;

param T := 24;

set N := SAO CPQ RAO CON JDF VIX RIO SSA;

param p **default** 20;

param Travel : SAO RIO CON CPQ VIX RAO JDF SSA :=

SAO	0	1	2	1	3	1	1	4
RIO	1	0	1	1	2	3	1	3
CON	2	1	0	2	2	2	1	3
CPQ	1	1	2	0	3	1	1	4
VIX	3	2	2	3	0	3	3	2
RAO	1	3	2	1	3	0	2	4
JDF	1	1	1	1	3	2	0	4
SSA	4	3	3	4	2	4	4	0

10

;

param c : SAO RIO CON CPQ VIX RAO JDF SSA :=

SAO	0	3	6	3	9	3	3	12
RIO	3	0	3	3	6	9	3	9
CON	6	3	0	6	6	6	3	9
CPQ	3	3	6	0	9	3	3	12
VIX	9	6	6	9	0	9	9	6
RAO	3	9	6	3	9	0	6	12
JDF	3	3	3	3	9	6	0	12
SSA	12	9	9	12	6	12	12	0

20

;

param d **default** 0 :=

[SAO, CON, 1] 2

[SAO, RIO, 1] 1

[SAO, SSA, 1] 1

[CPQ, CON, 4] 1

[CPQ, VIX, 4] 1

[VIX, SSA, 4] 1

[VIX, CON, 4] 1

[SAO, SSA, 4] 1

[CON, VIX, 4] 1

30

---

[CON, RIO, 4] 1	40
[RIO, CON, 4] 1	
[SAO, CON, 8] 2	
[SAO, RIO, 8] 1	
[CON, CPQ, 8] 1	
[CON, JDF, 8] 1	
[RIO, SSA, 8] 1	
[CPQ, RIO, 8] 1	
[CPQ, CON, 8] 1	
[CPQ, RAO, 8] 1	
[SAO, CON, 12] 1	50
[SAO, VIX, 12] 1	
[SAO, RAO, 12] 1	
[SAO, SSA, 12] 1	
[RAO, SSA, 12] 1	
[JDF, VIX, 12] 1	
[RIO, VIX, 12] 1	
[VIX, CON, 12] 1	
[CON, RIO, 12] 1	
[SAO, CON, 16] 2	
[SAO, RIO, 16] 1	60
[SAO, JDF, 16] 1	
[CPQ, CON, 16] 1	
[CPQ, VIX, 16] 2	
[RIO, CON, 16] 1	
[RIO, VIX, 16] 1	
[VIX, SSA, 16] 1	
[SSA, CON, 16] 1	
[JDF, CON, 16] 1	
[SAO, CON, 20] 1	
[SAO, RIO, 20] 1	70
[SAO, RAO, 20] 1	
[RIO, SSA, 20] 1	
[VIX, CPQ, 20] 1	
[CON, JDF, 20] 1	
[RAO, CON, 20] 1	
[JDF, CON, 20] 1	
[SAO, CON, 23] 1	
[CPQ, RIO, 23] 1	
[RIO, VIX, 23] 1;	
	80
param m default 0 :=	
[SAO, 1] 2	

[CON, 2] 2  
 [SAO, 3] 3  
 [CPQ, 3] 2  
 [CON, 3] 4  
 [RIO, 3] 2  
 [VIX, 3] 2  
 [JDF, 6] 1  
 [RAO, 6] 1  
 [SAO, 7] 2  
 [CPQ, 7] 2  
 [CON, 7] 1  
 [RIO, 7] 1  
 [SSA, 7] 1  
 [VIX, 7] 3;  
 end;

90

---

## F.2 Solução ótima do problema exemplo utilizado para validação

---

Valor final Liquido = R\$ 654,00 (receita – custos)

Demanda Total = 53 cargas

Demanda Atendida = 51 cargas

Movimentos vazios = 21

Movimentos de estoque = 476

=====  
 Detalhe dos movimentos realizados por cada veiculo:

10

Movimentos realizados pelo veiculo 1:

Movimento carregado de SAO para RIO no periodo 1 chegando no periodo 2

Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do periodo 2 ate o periodo 3

Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do periodo 3 ate o periodo 4

Movimento carregado de RIO para CON no periodo 4 chegando no periodo 5

Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 5 ate o periodo 6

Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 6 ate o periodo 7

Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 7 ate o periodo 8

Movimento carregado de CON para CPQ no periodo 8 chegando no periodo 10

20

Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do periodo 10 ate o periodo 11

Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do período 11 até o período 12  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do período 12 até o período 13  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do período 13 até o período 14  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do período 14 até o período 15  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do período 15 até o período 16  
Movimento carregado de CPQ para VIX no período 16 chegando no período 19  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 19 até o período 20  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 20 até o período 21  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 21 até o período 22  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 22 até o período 23  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 23 até o período 24  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 24 até o período 25

30

Movimentos realizados pelo veículo 2:

Movimento carregado de SAO para CON no período 1 chegando no período 3  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 3 até o período 4  
Movimento carregado de CON para RIO no período 4 chegando no período 5  
Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 5 até o período 6  
Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 6 até o período 7  
Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 7 até o período 8  
Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 8 até o período 9  
Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 9 até o período 10  
Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 10 até o período 11  
Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 11 até o período 12  
Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 12 até o período 13  
Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 13 até o período 14  
Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 14 até o período 15  
Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 15 até o período 16  
Movimento carregado de RIO para VIX no período 16 chegando no período 18  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 18 até o período 19  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 19 até o período 20  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 20 até o período 21  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 21 até o período 22  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 22 até o período 23  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 23 até o período 24  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 24 até o período 25

40

50

Movimentos realizados pelo veículo 3:

Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 2 até o período 3  
Deslocamento vazio de CON para JDF no período 3 chegando no período 4  
Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do período 4 até o período 5  
Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do período 5 até o período 6  
Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do período 6 até o período 7

60

Deslocamento vazio de JDF para SAO no periodo 7 chegando no periodo 8  
 Movimento carregado de SAO para RIO no periodo 8 chegando no periodo 9  
 Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do periodo 9 ate o periodo 10  
 Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do periodo 10 ate o periodo 11  
 Deslocamento vazio de RIO para SAO no periodo 11 chegando no periodo 12  
 Movimento carregado de SAO para SSA no periodo 12 chegando no periodo 16  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do periodo 16 ate o periodo 17  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do periodo 17 ate o periodo 18  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do periodo 18 ate o periodo 19  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do periodo 19 ate o periodo 20  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do periodo 20 ate o periodo 21  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do periodo 21 ate o periodo 22  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do periodo 22 ate o periodo 23  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do periodo 23 ate o periodo 24  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do periodo 24 ate o periodo 25

70

80

Movimentos realizados pelo veiculo 4:

Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 2 ate o periodo 3  
 Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 3 ate o periodo 4  
 Movimento carregado de CON para VIX no periodo 4 chegando no periodo 6  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 6 ate o periodo 7  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 7 ate o periodo 8  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 8 ate o periodo 9  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 9 ate o periodo 10  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 10 ate o periodo 11  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 11 ate o periodo 12  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 12 ate o periodo 13  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 13 ate o periodo 14  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 14 ate o periodo 15  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 15 ate o periodo 16  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 16 ate o periodo 17  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 17 ate o periodo 18  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 18 ate o periodo 19  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 19 ate o periodo 20  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 20 ate o periodo 21  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 21 ate o periodo 22  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 22 ate o periodo 23  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 23 ate o periodo 24  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 24 ate o periodo 25

90

100

Movimentos realizados pelo veiculo 5:

Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 3 ate o periodo 4  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 4 ate o periodo 5

Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 5 ate o periodo 6	
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 6 ate o periodo 7	
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 7 ate o periodo 8	110
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 8 ate o periodo 9	
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 9 ate o periodo 10	
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 10 ate o periodo 11	
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 11 ate o periodo 12	
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 12 ate o periodo 13	
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 13 ate o periodo 14	
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 14 ate o periodo 15	
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 15 ate o periodo 16	
Movimento carregado de SAO para JDF no periodo 16 chegando no periodo 17	
Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do periodo 17 ate o periodo 18	120
Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do periodo 18 ate o periodo 19	
Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do periodo 19 ate o periodo 20	
Movimento carregado de JDF para CON no periodo 20 chegando no periodo 21	
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 21 ate o periodo 22	
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 22 ate o periodo 23	
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 23 ate o periodo 24	
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 24 ate o periodo 25	
Movimentos realizados pelo veiculo 6:	
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 3 ate o periodo 4	130
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 4 ate o periodo 5	
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 5 ate o periodo 6	
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 6 ate o periodo 7	
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 7 ate o periodo 8	
Movimento carregado de SAO para CON no periodo 8 chegando no periodo 10	
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 10 ate o periodo 11	
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 11 ate o periodo 12	
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 12 ate o periodo 13	
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 13 ate o periodo 14	
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 14 ate o periodo 15	140
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 15 ate o periodo 16	
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 16 ate o periodo 17	
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 17 ate o periodo 18	
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 18 ate o periodo 19	
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 19 ate o periodo 20	
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 20 ate o periodo 21	
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 21 ate o periodo 22	
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 22 ate o periodo 23	
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 23 ate o periodo 24	
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 24 ate o periodo 25	150

Movimentos realizados pelo veiculo 7:

Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 3 ate o periodo 4  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 4 ate o periodo 5  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 5 ate o periodo 6  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 6 ate o periodo 7  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 7 ate o periodo 8  
 Movimento carregado de SAO para CON no periodo 8 chegando no periodo 10  
 Deslocamento vazio de CON para RIO no periodo 10 chegando no periodo 11  
 Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do periodo 11 ate o periodo 12 160  
 Movimento carregado de RIO para VIX no periodo 12 chegando no periodo 14  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 14 ate o periodo 15  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 15 ate o periodo 16  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 16 ate o periodo 17  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 17 ate o periodo 18  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 18 ate o periodo 19  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 19 ate o periodo 20  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 20 ate o periodo 21  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 21 ate o periodo 22  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 22 ate o periodo 23 170  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 23 ate o periodo 24  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 24 ate o periodo 25

Movimentos realizados pelo veiculo 8:

Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do periodo 3 ate o periodo 4  
 Movimento carregado de CPQ para CON no periodo 4 chegando no periodo 6  
 Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 6 ate o periodo 7  
 Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 7 ate o periodo 8  
 Deslocamento vazio de CON para SAO no periodo 8 chegando no periodo 10  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 10 ate o periodo 11 180  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 11 ate o periodo 12  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 12 ate o periodo 13  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 13 ate o periodo 14  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 14 ate o periodo 15  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 15 ate o periodo 16  
 Movimento carregado de SAO para CON no periodo 16 chegando no periodo 18  
 Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 18 ate o periodo 19  
 Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 19 ate o periodo 20  
 Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 20 ate o periodo 21  
 Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 21 ate o periodo 22 190  
 Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 22 ate o periodo 23  
 Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 23 ate o periodo 24  
 Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 24 ate o periodo 25

Movimentos realizados pelo veiculo 9:

Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do periodo 3 ate o periodo 4  
 Movimento carregado de CPQ para VIX no periodo 4 chegando no periodo 7  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 7 ate o periodo 8  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 8 ate o periodo 9  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 9 ate o periodo 10 200  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 10 ate o periodo 11  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 11 ate o periodo 12  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 12 ate o periodo 13  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 13 ate o periodo 14  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 14 ate o periodo 15  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 15 ate o periodo 16  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 16 ate o periodo 17  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 17 ate o periodo 18  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 18 ate o periodo 19  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 19 ate o periodo 20 210  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 20 ate o periodo 21  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 21 ate o periodo 22  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 22 ate o periodo 23  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 23 ate o periodo 24  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do periodo 24 ate o periodo 25

Movimentos realizados pelo veiculo 10:

Deslocamento vazio de CON para JDF no periodo 3 chegando no periodo 4  
 Deslocamento vazio de JDF para SAO no periodo 4 chegando no periodo 5  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 5 ate o periodo 6 220  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 6 ate o periodo 7  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 7 ate o periodo 8  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 8 ate o periodo 9  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 9 ate o periodo 10  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 10 ate o periodo 11  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 11 ate o periodo 12  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 12 ate o periodo 13  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 13 ate o periodo 14  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 14 ate o periodo 15  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 15 ate o periodo 16 230  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 16 ate o periodo 17  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 17 ate o periodo 18  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 18 ate o periodo 19  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 19 ate o periodo 20  
 Movimento carregado de SAO para RIO no periodo 20 chegando no periodo 21  
 Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do periodo 21 ate o periodo 22

Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 22 até o período 23  
Movimento carregado de RIO para VIX no período 23 chegando no período 25

Movimentos realizados pelo veículo 11:

240

Deslocamento vazio de CON para RIO no período 3 chegando no período 4

Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 4 até o período 5

Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 5 até o período 6

Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 6 até o período 7

Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 7 até o período 8

Movimento carregado de RIO para SSA no período 8 chegando no período 11

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 11 até o período 12

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 12 até o período 13

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 13 até o período 14

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 14 até o período 15

250

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 15 até o período 16

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 16 até o período 17

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 17 até o período 18

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 18 até o período 19

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 19 até o período 20

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 20 até o período 21

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 21 até o período 22

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 22 até o período 23

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 23 até o período 24

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 24 até o período 25

260

Movimentos realizados pelo veículo 12:

Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 3 até o período 4

Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 4 até o período 5

Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 5 até o período 6

Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 6 até o período 7

Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 7 até o período 8

Movimento carregado de CON para JDF no período 8 chegando no período 9

Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do período 9 até o período 10

Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do período 10 até o período 11

270

Deslocamento vazio de JDF para SAO no período 11 chegando no período 12

Movimento carregado de SAO para RAO no período 12 chegando no período 13

Movimento de "estoque" permanecendo em RAO do período 13 até o período 14

Movimento de "estoque" permanecendo em RAO do período 14 até o período 15

Movimento de "estoque" permanecendo em RAO do período 15 até o período 16

Movimento de "estoque" permanecendo em RAO do período 16 até o período 17

Movimento de "estoque" permanecendo em RAO do período 17 até o período 18

Movimento de "estoque" permanecendo em RAO do período 18 até o período 19

Movimento de "estoque" permanecendo em RAO do período 19 até o período 20

Movimento carregado de RAO para CON no periodo 20 chegando no periodo 22 280  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 22 ate o periodo 23  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 23 ate o periodo 24  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 24 ate o periodo 25

Movimentos realizados pelo veiculo 13:

Deslocamento vazio de CON para JDF no periodo 3 chegando no periodo 4  
Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do periodo 4 ate o periodo 5  
Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do periodo 5 ate o periodo 6  
Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do periodo 6 ate o periodo 7  
Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do periodo 7 ate o periodo 8 290  
Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do periodo 8 ate o periodo 9  
Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do periodo 9 ate o periodo 10  
Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do periodo 10 ate o periodo 11  
Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do periodo 11 ate o periodo 12  
Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do periodo 12 ate o periodo 13  
Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do periodo 13 ate o periodo 14  
Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do periodo 14 ate o periodo 15  
Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do periodo 15 ate o periodo 16  
Movimento carregado de JDF para CON no periodo 16 chegando no periodo 17  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 17 ate o periodo 18 300  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 18 ate o periodo 19  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 19 ate o periodo 20  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 20 ate o periodo 21  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 21 ate o periodo 22  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 22 ate o periodo 23  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 23 ate o periodo 24  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 24 ate o periodo 25

Movimentos realizados pelo veiculo 14:

Deslocamento vazio de RIO para SAO no periodo 3 chegando no periodo 4 310  
Movimento carregado de SAO para SSA no periodo 4 chegando no periodo 8  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do periodo 8 ate o periodo 9  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do periodo 9 ate o periodo 10  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do periodo 10 ate o periodo 11  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do periodo 11 ate o periodo 12  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do periodo 12 ate o periodo 13  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do periodo 13 ate o periodo 14  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do periodo 14 ate o periodo 15  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do periodo 15 ate o periodo 16  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do periodo 16 ate o periodo 17 320  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do periodo 17 ate o periodo 18  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do periodo 18 ate o periodo 19

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 19 até o período 20  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 20 até o período 21  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 21 até o período 22  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 22 até o período 23  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 23 até o período 24  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 24 até o período 25

Movimentos realizados pelo veículo 15:

330

Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 3 até o período 4  
Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 4 até o período 5  
Deslocamento vazio de RIO para CPQ no período 5 chegando no período 6  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do período 6 até o período 7  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do período 7 até o período 8  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do período 8 até o período 9  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do período 9 até o período 10  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do período 10 até o período 11  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do período 11 até o período 12  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do período 12 até o período 13  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do período 13 até o período 14  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do período 14 até o período 15  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do período 15 até o período 16  
Movimento carregado de CPQ para VIX no período 16 chegando no período 19  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 19 até o período 20  
Movimento carregado de VIX para CPQ no período 20 chegando no período 23  
Movimento carregado de CPQ para RIO no período 23 chegando no período 24  
Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 24 até o período 25

340

Movimentos realizados pelo veículo 16:

350

Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 3 até o período 4  
Movimento carregado de VIX para SSA no período 4 chegando no período 6  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 6 até o período 7  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 7 até o período 8  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 8 até o período 9  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 9 até o período 10  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 10 até o período 11  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 11 até o período 12  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 12 até o período 13  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 13 até o período 14  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 14 até o período 15  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 15 até o período 16  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 16 até o período 17  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 17 até o período 18  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 18 até o período 19

360

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 19 até o período 20  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 20 até o período 21  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 21 até o período 22  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 22 até o período 23  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 23 até o período 24  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 24 até o período 25

370

Movimentos realizados pelo veículo 17:

Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 3 até o período 4  
Movimento carregado de VIX para CON no período 4 chegando no período 6  
Deslocamento vazio de CON para CPQ no período 6 chegando no período 8  
Movimento carregado de CPQ para RIO no período 8 chegando no período 9  
Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 9 até o período 10  
Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 10 até o período 11  
Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 11 até o período 12  
Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 12 até o período 13  
Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 13 até o período 14  
Deslocamento vazio de RIO para SAO no período 14 chegando no período 15  
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do período 15 até o período 16  
Movimento carregado de SAO para CON no período 16 chegando no período 18  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 18 até o período 19  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 19 até o período 20  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 20 até o período 21  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 21 até o período 22  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 22 até o período 23  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 23 até o período 24  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 24 até o período 25

380

390

Movimentos realizados pelo veículo 18:

Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do período 6 até o período 7  
Deslocamento vazio de JDF para SAO no período 7 chegando no período 8  
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do período 8 até o período 9  
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do período 9 até o período 10  
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do período 10 até o período 11  
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do período 11 até o período 12  
Movimento carregado de SAO para VIX no período 12 chegando no período 15  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 15 até o período 16  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 16 até o período 17  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 17 até o período 18  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 18 até o período 19  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 19 até o período 20  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 20 até o período 21  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 21 até o período 22

400

Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 22 até o período 23  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 23 até o período 24  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 24 até o período 25

410

Movimentos realizados pelo veículo 19:

Movimento de "estoque" permanecendo em RAO do período 6 até o período 7  
Movimento de "estoque" permanecendo em RAO do período 7 até o período 8  
Movimento de "estoque" permanecendo em RAO do período 8 até o período 9  
Movimento de "estoque" permanecendo em RAO do período 9 até o período 10  
Movimento de "estoque" permanecendo em RAO do período 10 até o período 11  
Movimento de "estoque" permanecendo em RAO do período 11 até o período 12  
Movimento carregado de RAO para SSA no período 12 chegando no período 16  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 16 até o período 17  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 17 até o período 18  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 18 até o período 19  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 19 até o período 20  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 20 até o período 21  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 21 até o período 22  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 22 até o período 23  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 23 até o período 24  
Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 24 até o período 25

420

430

Movimentos realizados pelo veículo 20:

Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do período 7 até o período 8  
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do período 8 até o período 9  
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do período 9 até o período 10  
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do período 10 até o período 11  
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do período 11 até o período 12  
Movimento carregado de SAO para CON no período 12 chegando no período 14  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 14 até o período 15  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 15 até o período 16  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 16 até o período 17  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 17 até o período 18  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 18 até o período 19  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 19 até o período 20  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 20 até o período 21  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 21 até o período 22  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 22 até o período 23  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 23 até o período 24  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 24 até o período 25

440

Movimentos realizados pelo veículo 21:

Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do período 7 até o período 8

450

Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 8 ate o periodo 9  
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 9 ate o periodo 10  
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 10 ate o periodo 11  
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 11 ate o periodo 12  
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 12 ate o periodo 13  
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 13 ate o periodo 14  
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 14 ate o periodo 15  
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 15 ate o periodo 16  
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 16 ate o periodo 17  
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 17 ate o periodo 18  
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 18 ate o periodo 19  
Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do periodo 19 ate o periodo 20  
Movimento carregado de SAO para CON no periodo 20 chegando no periodo 22  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 22 ate o periodo 23  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 23 ate o periodo 24  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 24 ate o periodo 25

460

Movimentos realizados pelo veiculo 22:

Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do periodo 7 ate o periodo 8  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do periodo 8 ate o periodo 9  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do periodo 9 ate o periodo 10  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do periodo 10 ate o periodo 11  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do periodo 11 ate o periodo 12  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do periodo 12 ate o periodo 13  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do periodo 13 ate o periodo 14  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do periodo 14 ate o periodo 15  
Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do periodo 15 ate o periodo 16  
Movimento carregado de CPQ para CON no periodo 16 chegando no periodo 18  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 18 ate o periodo 19  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 19 ate o periodo 20  
Movimento carregado de CON para JDF no periodo 20 chegando no periodo 21  
Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do periodo 21 ate o periodo 22  
Deslocamento vazio de JDF para SAO no periodo 22 chegando no periodo 23  
Movimento carregado de SAO para CON no periodo 23 chegando no periodo 25

470

480

Movimentos realizados pelo veiculo 23:

Movimento de "estoque" permanecendo em CPQ do periodo 7 ate o periodo 8  
Movimento carregado de CPQ para CON no periodo 8 chegando no periodo 10  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 10 ate o periodo 11  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do periodo 11 ate o periodo 12  
Movimento carregado de CON para RIO no periodo 12 chegando no periodo 13  
Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do periodo 13 ate o periodo 14  
Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do periodo 14 ate o periodo 15

490

Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 15 até o período 16  
 Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 16 até o período 17  
 Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 17 até o período 18  
 Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 18 até o período 19  
 Movimento de "estoque" permanecendo em RIO do período 19 até o período 20  
 Movimento carregado de RIO para SSA no período 20 chegando no período 23 500  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 23 até o período 24  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 24 até o período 25

Movimentos realizados pelo veículo 24:

Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 7 até o período 8  
 Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 8 até o período 9  
 Deslocamento vazio de CON para JDF no período 9 chegando no período 10  
 Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do período 10 até o período 11  
 Movimento de "estoque" permanecendo em JDF do período 11 até o período 12  
 Movimento carregado de JDF para VIX no período 12 chegando no período 15 510  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 15 até o período 16  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 16 até o período 17  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 17 até o período 18  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 18 até o período 19  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 19 até o período 20  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 20 até o período 21  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 21 até o período 22  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 22 até o período 23  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 23 até o período 24  
 Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 24 até o período 25 520

Movimentos realizados pelo veículo 25:

Deslocamento vazio de RIO para CPQ no período 7 chegando no período 8  
 Movimento carregado de CPQ para RAO no período 8 chegando no período 9  
 Movimento de "estoque" permanecendo em RAO do período 9 até o período 10  
 Deslocamento vazio de RAO para SAO no período 10 chegando no período 11  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do período 11 até o período 12  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do período 12 até o período 13  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do período 13 até o período 14  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do período 14 até o período 15 530  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do período 15 até o período 16  
 Movimento carregado de SAO para RIO no período 16 chegando no período 17  
 Deslocamento vazio de RIO para SAO no período 17 chegando no período 18  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do período 18 até o período 19  
 Movimento de "estoque" permanecendo em SAO do período 19 até o período 20  
 Movimento carregado de SAO para RAO no período 20 chegando no período 21  
 Movimento de "estoque" permanecendo em RAO do período 21 até o período 22

Movimento de "estoque" permanecendo em RAO do período 22 até o período 23

Movimento de "estoque" permanecendo em RAO do período 23 até o período 24

Movimento de "estoque" permanecendo em RAO do período 24 até o período 25

540

Movimentos realizados pelo veículo 26:

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 7 até o período 8

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 8 até o período 9

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 9 até o período 10

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 10 até o período 11

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 11 até o período 12

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 12 até o período 13

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 13 até o período 14

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 14 até o período 15

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 15 até o período 16

Movimento carregado de SSA para CON no período 16 chegando no período 19

Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 19 até o período 20

Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 20 até o período 21

Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 21 até o período 22

Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 22 até o período 23

Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 23 até o período 24

Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 24 até o período 25

550

Movimentos realizados pelo veículo 27:

560

Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 7 até o período 8

Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 8 até o período 9

Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 9 até o período 10

Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 10 até o período 11

Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 11 até o período 12

Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 12 até o período 13

Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 13 até o período 14

Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 14 até o período 15

Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 15 até o período 16

Movimento carregado de VIX para SSA no período 16 chegando no período 18

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 18 até o período 19

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 19 até o período 20

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 20 até o período 21

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 21 até o período 22

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 22 até o período 23

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 23 até o período 24

Movimento de "estoque" permanecendo em SSA do período 24 até o período 25

570

Movimentos realizados pelo veículo 28:

Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 7 até o período 8

580

Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 8 até o período 9  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 9 até o período 10  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 10 até o período 11  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 11 até o período 12  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 12 até o período 13  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 13 até o período 14  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 14 até o período 15  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 15 até o período 16  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 16 até o período 17  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 17 até o período 18  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 18 até o período 19  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 19 até o período 20  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 20 até o período 21  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 21 até o período 22  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 22 até o período 23  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 23 até o período 24  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 24 até o período 25

590

Movimentos realizados pelo veículo 29:

Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 7 até o período 8  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 8 até o período 9  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 9 até o período 10  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 10 até o período 11  
Movimento de "estoque" permanecendo em VIX do período 11 até o período 12  
Movimento carregado de VIX para CON no período 12 chegando no período 14  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 14 até o período 15  
Deslocamento vazio de CON para RIO no período 15 chegando no período 16  
Movimento carregado de RIO para CON no período 16 chegando no período 17  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 17 até o período 18  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 18 até o período 19  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 19 até o período 20  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 20 até o período 21  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 21 até o período 22  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 22 até o período 23  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 23 até o período 24  
Movimento de "estoque" permanecendo em CON do período 24 até o período 25

600

610

Tabela F.1: Questionário respondido pelo tomador de decisão 1

Questionário para validação – PADV (Tomadores de Decisão)	
Nome completo:	Carlos Renato Moreira
Escolaridade:	Pós-Graduado em Gestão de Projetos
Cargo Atual:	Gerente de Frota
Há quanto tempo trabalha no transporte de cargas:	17 anos
Concordo em divulgar meu nome na Tese:	Sim ( <b>X</b> ) Não ( )
<p>Caro <b>Gerente</b>, gentileza responder as questões abaixo através da atribuição do grau de concordância e justificativas, o quanto possível. <b>Escala</b> de 1 (baixo / pouco / não concordo) até 5 (alto / muito / concordo plenamente).</p> <p><b>Assinale</b> sua opção e busque em seguida <b>justificar</b> a sua opinião</p> <p><b>Obrigada!</b></p>	
<p><b>1</b> - O problema de alocação de veículos vazios nas transferências entre terminais é relevante para o negócio da empresa?</p>	
Escala	
	1   2   3   4   5
Justifique	“A alocação de veículos vazios é um dos maiores custos do nosso negócio, totalmente relevante a discussão em busca de um modelo que nos ajude a reduzir custos.”
<p><b>2</b> - Na empresa o problema é tratado de forma empírica?</p>	
Escala	
	1   2   3   4   5
Justifique	“A forma empírica de tratar o problema tem mudado mas ainda está longe de uma solução técnica e científica, o que justifica a aproximação acadêmica.”
<p><b>3</b> - Na empresa há como resolver o problema com algumas ações específicas?</p>	
Escala	
	1   2   3   4   5
Justifique	“Este é um problema que está sustentado em várias raízes (origens). Temos que atacar várias frentes, como comercial, estrutural e operacional. O modelo apresentado vai diretamente de encontro à gestão operacional, que com certeza é uma dessas raízes.”
<p><b>4</b> - Você acredita que o conceito técnico apresentado pode representar corretamente o problema?</p>	
Escala	
	1   2   3   4   5
Justifique	“O conceito técnico sobre o problema apresentado é perfeito, ele tira a decisão da mão do Analista de Tráfego e traz ela para uma decisão lógica e técnica, com menor distância, menor custo e total transparência.”

<b>5</b> - A modelagem apresentada, na sua opinião, representa a realidade com relação ao problema em questão? (alocação de veículos vazios) ?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“Sim. A modelagem trata com perfeição a alocação de veículos, ela consegue utilizar a matriz de distâncias entre as unidades da empresa e indicar a decisão que traz o menor custo para a empresa.”				
<b>6</b> - Para a empresa, no seu entendimento, seria interessante desenvolver um <i>software</i> utilizando a ferramenta apresentada?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“Sim. Com toda a certeza é justificável o desenvolvimento de um <i>software</i> com a ferramenta apresentada, pois ela agrega muito valor ao negócio.”				
<b>7</b> - Você acredita ser viável de fato a empresa investir no desenvolvimento da ferramenta, para apoio nas decisões de frota?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“Sim. Esta ferramenta pode ser agregada a outras ferramentas de gestão para tornar o processo de decisão de deslocamento de veículos vazios uma tarefa transparente e com aporte técnico, e não mais empírico.”				
<b>8</b> - Qual sua atribuição de utilidade para a modelagem apresentada?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“As decisões de movimentações de veículos já possuem uma avaliação lógica antes de sua execução, mas ela ainda é feita de forma manual, por pessoas. A utilização do modelo apresentado vem para trazer maior segurança as decisões e também permitir uma forma de auditar as decisões tomadas pelos Analistas de Tráfego.”				
<b>9</b> - Sobre a apresentação das soluções da modelagem, você acredita ser satisfatória? Ou seja, tem relação direta com o problema?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“A apresentação é totalmente satisfatória e possui relação direta com o problema enfrentado por esta e por outras tantas empresas que necessitam realizar deslocamento de veículos vazios entre as suas unidades.”				
<b>10</b> - Do ponto de vista de dados de entrada para o modelo, na sua opinião, são viáveis, estão adequados para os resultados esperados para solução?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“Em todo projeto é necessário adequações para a prática, e aqui no modelo apresentado não seria diferente. A empresa necessita rever alguns processos para que possa permitir a geração de demanda e a posição atual dos veículos. Desta forma o modelo apresentado pode fazer o processamento e sugerir as melhores opções em distância e custo para a empresa.”				

Tabela F.2: Questionário respondido pelo tomador de decisão 2

<b>Questionário para validação – PADV (Tomadores de Decisão)</b>	
Nome completo:	Jorge Roberto Santos Gerres
Escolaridade:	Superior Incompleto (cursando)
Cargo Atual:	Gerente de Operações
Há quanto tempo trabalha no transporte de cargas:	10 anos
Concordo em divulgar meu nome na Tese:	Sim ( <b>X</b> ) Não ( )
<p>Caro <b>Gerente</b>, gentileza responder as questões abaixo através da atribuição do grau de concordância e justificativas, o quanto possível. <b>Escala</b> de 1 (baixo / pouco / não concordo) até 5 (alto / muito / concordo plenamente).</p> <p><b>Assinale</b> sua opção e busque em seguida <b>justificar</b> a sua opinião</p> <p><b>Obrigada!</b></p>	
<p><b>1 - O problema de alocação de veículos vazios nas transferências entre terminais é relevante para o negócio da empresa?</b></p>	
Escala	
	1   2   3   4   5
Justifique	“Sim, devido à crescente busca por ter uma melhor rentabilidade, rodar entre terminais com veículos vazios termina sendo um desperdício, impactando diretamente no resultado da empresa.”
<p><b>2 - Na empresa o problema é tratado de forma empírica?</b></p>	
Escala	
	1   2   3   4   5
Justifique	“Positivo. Entendo que devido à enorme quantidade de variáveis que existe, termina a ficar quase impossível fazer as alocações de veículos em tempo e com uma melhor ocupação em todos os casos. Assim terminamos a atender de forma pontual a real necessidade de melhor aproveitamento de cada veículo em cada local desejado.”
<p><b>3 - Na empresa há como resolver o problema com algumas ações específicas?</b></p>	
Escala	
	1   2   3   4   5
Justifique	“Parcialmente sim, mas não totalmente. Devido à alta complexidade de todo o processo e suas variáveis e à necessidade de tempo de resposta, com certeza não teríamos como atender todas as demandas e situações impostas pela legislação de cada local.”
<p><b>4 - Você acredita que o conceito técnico apresentado pode representar corretamente o problema?</b></p>	
Escala	
	1   2   3   4   5
Justifique	“Ótimo. Quando tratamos de maneira sistêmica o problema, conseguimos alcançar melhores formas de atender a demanda, sem prejudicar a rentabilidade e atingindo, assim, mais rápido todos os objetivos propostos.”

<b>5</b> - A modelagem apresentada, na sua opinião, representa a realidade com relação ao problema em questão? (alocação de veículos vazios) ?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“Positivo. Mostra que é muito difícil fazermos cálculos infundáveis e manualmente, para achar uma melhor situação de alocação veicular. Assim a ferramenta poderá ajudar em tempo real uma melhor tomada de decisão, além de ser mais ágil e confiável.”				
<b>6</b> - Para a empresa, no seu entendimento, seria interessante desenvolver um <i>software</i> utilizando a ferramenta apresentada?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“Sim, devido a melhorarmos a visualização de situações e entender a demanda mais rápido e com menor custo.”				
<b>7</b> - Você acredita ser viável de fato a empresa investir no desenvolvimento da ferramenta, para apoio nas decisões de frota?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“Positivo. Pois este investimento terá retorno em muito pouco tempo, já que o desperdício é muito alto.”				
<b>8</b> - Qual sua atribuição de utilidade para a modelagem apresentada?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“Entendo que poderia facilitar nossa área de tráfego, onde é composto a alocação e atendimento às filiais de toda nossa frota de veículos.”				
<b>9</b> - Sobre a apresentação das soluções da modelagem, você acredita ser satisfatória? Ou seja, tem relação direta com o problema?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“Sim. Mas lembrando que o usuário tem que ser uma pessoa com bom conhecimento para poder estar atento a todas variáveis que poderão aparecer no transcorrer da utilização da ferramenta. Lembrando que a ferramenta não trabalha sozinha, precisando assim ser sempre alimentada com as mais ricas informações possíveis.”				
<b>10</b> - Do ponto de vista de dados de entrada para o modelo, na sua opinião, são viáveis, estão adequados para os resultados esperados para solução?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“Sim. A partir do momento que for feita a inclusão pelo usuário de maneira correta, a ferramenta poderá nos auxiliar, de maneira rápida e eficaz, com o melhor aproveitamento de todos os veículos com custo satisfatório.”				

Tabela F.3: Questionário respondido pelo tomador de decisão 3

Questionário para validação – PADV (Tomadores de Decisão)	
Nome completo:	Maurício Carlos Tassitano Tomani
Escolaridade:	Superior – Administração de Empresas
Cargo Atual:	Gerente Geral de Operações
Há quanto tempo trabalha no transporte de cargas:	30 anos
Concordo em divulgar meu nome na Tese:	Sim ( <b>X</b> ) Não ( )
<p>Caro <b>Gerente</b>, gentileza responder as questões abaixo através da atribuição do grau de concordância e justificativas, o quanto possível. <b>Escala</b> de 1 (baixo / pouco / não concordo) até 5 (alto / muito / concordo plenamente).</p> <p><b>Assinale</b> sua opção e busque em seguida <b>justificar</b> a sua opinião</p> <p><b>Obrigada!</b></p>	
<p><b>1 - O problema de alocação de veículos vazios nas transferências entre terminais é relevante para o negócio da empresa?</b></p>	
Escala	
	1   2   3   4   <b>5</b>
Justifique	“Com certeza, pois além de representatividade eminente do prejuízo em transitar com o veículo vazio, podemos agravar a situação operacional em decorrência de não conseguirmos atender uma solicitação do cliente ou de uma determinada unidade. Outro ponto importante para afirmação da relevância do problema é o constante crescimento da frota própria que aumenta a possibilidade da tomada errônea de decisão.”
<p><b>2 - Na empresa o problema é tratado de forma empírica?</b></p>	
Escala	
	1   2   3   <b>4</b>   5
Justifique	“Sim, em minha opinião o problema é tratamento mais no campo da observação do que a utilização de uma teoria ou método que pudesse resolver de modo mais racional e científico a questão da alocação de veículos vazios.”
<p><b>3 - Na empresa há como resolver o problema com algumas ações específicas?</b></p>	
Escala	
	1   2   3   <b>4</b>   5
Justifique	“Sim. Para podermos resolver a questão sem correr o risco do “erro humano” nossa empresa necessitará investir num <i>software</i> que estivesse integrado a toda frota de transferência e o setor de tráfego central tomasse as decisões baseadas nas conclusões apresentadas pelo sistema.”
<p><b>4 - Você acredita que o conceito técnico apresentado pode representar corretamente o problema?</b></p>	
Escala	
	1   2   3   <b>4</b>   5
Justifique	“Em meu entendimento o conceito consegue após receber todas as informações necessárias para análise, otimizar, analisar e reduzir consideravelmente os prejuízos eminentes às transferências com veículos vazios.”

<b>5</b> - A modelagem apresentada, na sua opinião, representa a realidade com relação ao problema em questão? (alocação de veículos vazios) ?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“Chega a ser surpreendente quando analisamos as simulações apresentadas com a realidade de nossos dias de trabalhos na empresa. A modelagem apresentada consegue além de determinar a melhor solução, auxiliar na tomada de decisão.”				
<b>6</b> - Para a empresa, no seu entendimento, seria interessante desenvolver um <i>software</i> utilizando a ferramenta apresentada?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“Como atendemos uma região considerável do território brasileiro e nem sempre temos condições de efetuar uma logística de retorno favorável as nossas necessidades, o que nos obriga a rodar com veículos vazios, deveríamos iniciar o mais urgente possível o desenvolvimento do sistema.”				
<b>7</b> - Você acredita ser viável de fato a empresa investir no desenvolvimento da ferramenta, para apoio nas decisões de frota?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“Sim, pois com o constante crescimento de mais de 20% ao ano e como consequência aquisição de mais veículos de transferências, a possibilidade de rodarmos com veículos vazios é elevada, então precisamos ter auxílio de sistemas inteligentes de TI para a tomada de decisão correta.”				
<b>8</b> - Qual sua atribuição de utilidade para a modelagem apresentada?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“A maior possível, pois como a empresa tem metas audaciosas de redução de custos e comercialmente de termos o melhor atendimento operacional do mercado no ramo que atuamos, a modelagem apresentada seria de muita valia e propriedade para alcançarmos os objetivos.”				
<b>9</b> - Sobre a apresentação das soluções da modelagem, você acredita ser satisfatória? Ou seja, tem relação direta com o problema?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“100%, pois apresentou cientificamente as melhores soluções para otimização dos recursos e atendimento as demandas.”				
<b>10</b> - Do ponto de vista de dados de entrada para o modelo, na sua opinião, são viáveis, estão adequados para os resultados esperados para solução?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	“Para o melhor aproveitamento do sistema e aplicação da modelagem, necessitamos melhorar nosso sistema de informações e banco de dados para que o sistema tenha todas as informações em tempo real da situação da frota e suas disponibilidades.”				

Tabela F.4: Questionário respondido pelo tomador de decisão 4

<b>Questionário para validação – PADV (Tomadores de Decisão)</b>	
Nome completo:	Manuel Marcelino da Costa Landeiro
Escolaridade:	Superior completo
Cargo Atual:	Gerente de TI, Telecom. e CEDOC
Há quanto tempo trabalha no transporte de cargas:	04 anos
Concordo em divulgar meu nome na Tese:	Sim ( <b>X</b> ) Não ( )
<p>Caro <b>Gerente</b>, gentileza responder as questões abaixo através da atribuição do grau de concordância e justificativas, o quanto possível. <b>Escala</b> de 1 (baixo / pouco / não concordo) até 5 (alto / muito / concordo plenamente).</p> <p><b>Assinale</b> sua opção e busque em seguida <b>justificar</b> a sua opinião</p> <p><b>Obrigada!</b></p>	
<p><b>1</b> - O problema de alocação de veículos vazios nas transferências entre terminais é relevante para o negócio da empresa?</p>	
Escala	
	1   2   3   4   5
Justifique	“Sim, pois os veículos são o maior componente de custo do nosso negócio e minimizar o desperdício com o deslocamento de veículos vazios terá impacto direto, positivo, no nosso resultado.”
<p><b>2</b> - Na empresa o problema é tratado de forma empírica?</p>	
Escala	
	1   2   3   4   5
Justifique	“Temos algumas iniciativas através de planilhas e relatórios para evitar desperdícios, mas sempre atuamos de forma corretiva.”
<p><b>3</b> - Na empresa há como resolver o problema com algumas ações específicas?</p>	
Escala	
	1   2   3   4   5
Justifique	“Quando os relatórios e planilhas apontam um aumento nas despesas com viagens vazias atuamos corretivamente. Porém, não temos como garantir que a ação causa o efeito desejado, pois os embarques são dinâmicos e o cenário passado nem sempre reflete a realidade atual e das próximas semanas.”
<p><b>4</b> - Você acredita que o conceito técnico apresentado pode representar corretamente o problema?</p>	
Escala	
	1   2   3   4   5
Justifique	“Entendo o modelo utilizado e percebo o alinhamento com o nosso problema real. Todos os dados são factíveis e já existentes no nosso banco de dados.”

<b>5</b> - A modelagem apresentada, na sua opinião, representa a realidade com relação ao problema em questão? (alocação de veículos vazios) ?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	"Sim, plenamente."				
<b>6</b> - Para a empresa, no seu entendimento, seria interessante desenvolver um <i>software</i> utilizando a ferramenta apresentada?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	"Sim, pois já temos os dados, mas nos falta o modelo de como utilizar as informações para minimizar as viagens vazias."				
<b>7</b> - Você acredita ser viável de fato a empresa investir no desenvolvimento da ferramenta, para apoio nas decisões de frota?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	"Sim, pois temos uma equipe de TI interna que pode executar a tarefa com baixo investimento, ampliando ainda mais o retorno financeiro."				
<b>8</b> - Qual sua atribuição de utilidade para a modelagem apresentada?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	"Extremamente útil, com relação direta e positiva no resultado da empresa."				
<b>9</b> - Sobre a apresentação das soluções da modelagem, você acredita ser satisfatória? Ou seja, tem relação direta com o problema?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	"Sim, atua exatamente no problema que enfrentamos."				
<b>10</b> - Do ponto de vista de dados de entrada para o modelo, na sua opinião, são viáveis, estão adequados para os resultados esperados para solução?					
Escala	1	2	3	4	5
Justifique	"Sim, pois o modelo utiliza dados que já possuímos no nosso sistema e são relevantes para o resultado final."				

Tabela F.5: Questionário respondido pelo tomador de decisão 5

<b>Questionário para validação – PADV (Tomadores de Decisão)</b>	
Nome completo:	Marcos Roberto Silva
Escolaridade:	Doutor em Eng. de Transportes
Cargo Atual:	Engenheiro de Transportes
Há quanto tempo trabalha no transporte de cargas:	15 anos
Concordo em divulgar meu nome na Tese:	Sim ( <b>X</b> ) Não ( )
<p>Caro <b>Gerente</b>, gentileza responder as questões abaixo através da atribuição do grau de concordância e justificativas, o quanto possível. <b>Escala</b> de 1 (baixo / pouco / não concordo) até 5 (alto / muito / concordo plenamente).</p> <p><b>Assinale</b> sua opção e busque em seguida <b>justificar</b> a sua opinião</p> <p><b>Obrigada!</b></p>	
<p><b>1</b> - O problema de alocação de veículos vazios nas transferências entre terminais é relevante para o nosso negócio?</p>	
Escala   1   2   3   4   5	
Justifique	“Sim, pois trata de um custo significativo para a operação, e ainda imprescindível por conta do desbalanceamento do fluxo de carga nas diferentes regiões do Brasil.”
<p><b>2</b> - Na empresa o problema é tratado de forma empírica?</p>	
Escala   1   2   3   4   5	
Justifique	“Não há ferramenta para apoio a decisão e, por conta do tamanho da rede, as decisões de reposicionamento são tomadas analisando-se localmente, caso a caso, não sendo possível uma visão mas abrangente do sistema, possibilitando a visão somente de curto prazo.”
<p><b>3</b> - O modelo formal apresenta relação com o modelo conceitual?</p>	
Escala   1   2   3   4   5   Atributo: Lógica	
Justifique	“Como ferramenta de planejamento acredito que seja perfeitamente adequada, principalmente pela possibilidade de se tratar veículo a veículo, placa a placa, pois na operação do dia a dia os veículos são tratados dessa forma, não em grandes grupos.”
<p><b>4</b> - O modelo formal, descreve corretamente o problema?</p>	
Escala   1   2   3   4   5   Atributo: Formulação	
Justifique	“Várias restrições práticas para planejamento foram incorporadas no modelo formal. Do meu ponto de vista talvez a função objetivo do modelo 1 deva ser melhor detalhada / refinada. E ainda, o modelo $M_1$ permite que cargas sejam rejeitadas, não correspondendo com a realidade atual da empresa.”

<b>5 - Sobre a qualidade da solução? Natureza técnica da solução?</b>						
Escala	1	2	3	4	5	Atributo: Experimental
Justifique	“A solução obtida se mostrou adequada à realidade do problema tratado, sendo coerente e aplicável na prática. Os movimentos da frota sugeridos são coerentes e bastante interessantes.”					
<b>6 - Sobre a eficiência do método de solução?</b>						
Escala	1	2	3	4	5	Atributo: Experimental
Justifique	“O método se mostrou eficiente, obtendo soluções ótimas ou aproximadas em questão de segundos.”					
<b>7 - Sobre utilidade, oportunidade do uso, benefícios?</b>						
Escala	1	2	3	4	5	Atributo: Operacional
Justifique	“Dado que atualmente não existe nenhuma ferramenta para planejamento da frota de transferência e redução de movimentos vazios, entendo que seria útil, possibilitando grandes oportunidades de ganhos no que diz respeito à redução de custos e produtividade da frota.”					
<b>8 - Validação conceitual, justificativa da teoria?</b>						
Escala	1	2	3	4	5	Atributo: Verificação
Justifique	“A abordagem se mostrou adequada, contribuindo para o correto entendimento de questões do dia a dia do Departamento de Tráfego, e sua interação com outros “atores” do processo.”					
<b>9 - Sobre dados: viabilidade, exatidão, manutenção e custo?</b>						
Escala	1	2	3	4	5	Atributo: Dados
Justifique	“Acredito que seja viável o desenvolvimento da ferramenta de planejamento, os dados de entrada não são complicados de serem obtidos e, dado o benefício esperado, o custo para desenvolvimento, implementação e manutenção não seria problema.”					